ISSN 2635-7216
www.ksoe.or.kr

# 2020년도 한국해양공학회
# 추계학술대회
# 논 문 집

**2020. 12. 2. (WED.) ~ 12. 4. (FRI.)**
**온라인 비대면 진행 (zoom 미팅)**



**주요프로그램**

개회식, 기조연설, 학술발표, 기획세션,
정기총회, 시상식







주 최 사단법인 한국해양공학회 KSOE The Korean Society of Ocean Engineers

후 원 KOFST 한국과학기술단체총연합회

posco 포스코인터내셔널

ISSN 2635-7216
www.ksoe.or.kr

# 2020년도 한국해양공학회
# 추계학술대회
# 논 문 집

**2020. 12. 2. (WED.) ~ 12. 4. (FRI.)**
**온라인 비대면 진행 (zoom 미팅)**

**주요프로그램**

개회식, 기조연설, 학술발표, 기획세션,
정기총회, 시상식

주 최 사단법인 한국해양공학회 KSOE The Korean Society of Ocean Engineers

후 원 KOFST 한국과학기술단체총연합회
posco 포스코인터내셔널

# 추계학술대회 및 정기총회 일정표

## 12월 2일(수)

| 시간 \ 장소 | 미팅룸D |
|---|---|
| 15:30-17:00 | 편집위원회의 |
| 17:00-18:00 | 환영 세션 |

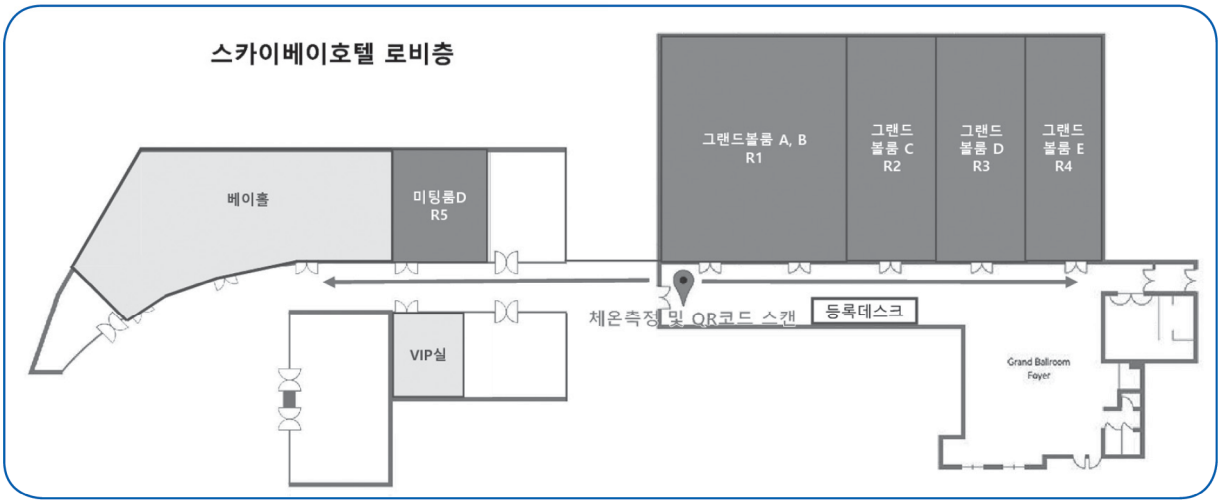
## 12월 3일(목)

| 시간 \ 장소 | R1 (볼룸AB) | R2 (볼룸 C) | R3 (볼룸 D) | R4 (볼룸 E) | R5 (미팅룸D) |
|---|---|---|---|---|---|
| 09:00-10:00 | | | | 이사회 / 평의원회 | |
| 09:00-(17:00) | 등 록 | | | | |
| 10:30-11:30 | 정기총회 및 시상식 | | | | |
| 11:30-12:30 | 개회식,<br>기조연설: 이정렬(성균관대학교) -<br>"강원도권 해안침식 대응의 경성화 분석 및 연성화 전략" | | | | |
| 12:30-13:30 | 오찬회 (베이홀) / 볼룸 분리 및 리셋 작업 | | | | |
| 13:30-15:10 | R11:<br>선박/해양플랫폼-유체1<br>해양 신재생 에너지-기타 신재생에너지<br>정세민 | R21:<br>선박/해양플랫폼-구조&재료<br>안석환 | R31:<br>해양 토목-유체, 수리 & 환경<br>강태순 | R41:<br>설계 & 기계학습<br>박선호 | |
| 15:10-15:20 | 휴식 | | | | |
| 15:20-17:00 | R12:<br>선박/해양플랫폼-유체2<br>박종천 | R22:<br>선박/해양플랫폼-구조1<br>송창용 | R32:<br>해양 토목-연안방재<br>(15:20-17:20)<br>도기덕 | R42:<br>신재생에너지<br>구원철 | 기획세션: 접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발<br>(15:20-17:20)<br>좌장: 황선규 |

## 12월 4일(금)

| 시간 \ 장소 | R1 (볼룸AB) | R2 (볼룸 C) | R3 (볼룸 D) | 온라인 Zoom미팅 |
|---|---|---|---|---|
| 08:30-(12:00) | 등 록 | | | |
| 09:00-10:40 | R13:<br>선박/해양플랫폼-유체3<br>백광준 | R23:<br>선박/해양플랫폼-유체5<br>서민국 | R33:<br>선박/해양플랫폼-빙해공학&구조<br>이탁기 | Online 1:<br>유체<br>김국현 |
| 10:40-10:50 | 휴식 | | | |
| 10:50-12:30 | R14:<br>선박/해양플랫폼-유체4<br>정재환 | R24:<br>선박/해양플랫폼-공정/안전<br>임영섭 | R34:<br>선박/해양플랫폼-구조2<br>정준모 | Online 2:<br>해양로봇장비<br>우주현 |
| 12:30-13:30 | 점 심 | | | |

# 행사장 및 등록안내




- **등록데스크 : 로비층 그랜드볼룸 C 앞 로비**
- **학술발표장 : 로비층 그랜드볼룸 A, B, C, D, E, 미팅룸 D**
- **정기총회, 시상식, 개회식, 기조연설 : 그랜드볼룸 A, B, C**
- **오찬회 : 베이홀**
- **점심장소 : 베이홀**

## ■ 등록안내

| 구분 | | 온라인 참가자 사전등록 (온라인발표자 제외) | 오프라인 발표자/참가자 사전등록 (온라인 발표자 해당) | 현장등록 |
|---|---|---|---|---|
| 기간 | | 10월 1일(목)~11월 13일(금) | | 12월 3일(목)~4일(금) |
| 등록비 | 일반회원(정 · 종신회원) | 40,000원 | 140,000원 | 170,000원 |
| | 학생회원 | 20,000원 | 70,000원 | 100,000원 |
| | 비회원 | 50,000원 | 170,000원 | 200,000원 |
| 신청 | | 홈페이지에서 사전등록 : 신청서 제출, 참가비 납부 | | 로비층 등록데스크 : 신청서 제출, 참가비 납부 |

※ '온라인 참가자 사전등록'은 온라인으로 참가하실 분만 해당됩니다. 온라인 발표자는 제외입니다.
※ 온라인 발표자는 '오프라인 발표자/참가자 사전등록'으로 등록 하셔야 합니다.
※ 온라인 발표 및 참가는 현장등록을 받지않습니다.

## ■ 문의

**한국해양공학회 학회사무국**
Tel. : 051-759-0656 / Fax. : 051-759-0657
E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr / ijoseys@ksoe.or.kr
URL : www.ksoe.or.kr/

# Contents

프로그램 안내

## 기조연설

### 기조연설

"강원도권 해안침식 대응의 경성화 분석 및 연성화 전략" ..... 15
이정렬 (성균관대학교)

### 기획세션: 접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발

12월 3일(목) 15:20-17:20, R5 [미팅룸D] 좌장 : 황선규(㈜화인)

**기획 내용: 해양쓰레기 국제 규제 대응 및 미세플라스틱 저감을 위해 해양플라스틱 쓰레기 저감을 위한 수거장비, 처리, 수거지원 기술을 개발 및 실증**

R5201 해양쓰레기 수거선 개발 연구 ..... 42
황선규, 윤인창, 김재훈(㈜화인)

R5202 나노버블을 이용한 해안쓰레기 세척 기술 연구 ..... 44
김보민, 최문석, 박찬규(한국산업기술시험원)

R5203 해양쓰레기 선별선내 인공지능 적용 선별프로세스 ..... 45
한봉석, 박상재, 황미섭, 한영수(엔에이치씨)

R5204 해양플라스틱쓰레기 재활용을 위한 처리공정기술 및 재활용 방안 ..... 46
이주형, 서상욱(한국건설생활환경시험연구원)

R5205 해양쓰레기 수거장비의 성능평가 계획 ..... 47
김민, 이훈성, 차명훈, 지성(한국조선해양기자재연구원)

R5206 해양쓰레기 수거선의 파랑중 안정성 해석 ..... 48
남설, 전규목, 박종천(부산대학교)

# Contents

## Online 1: 유체

**12월 4일(금) 09:00-10:40, Online 1** **좌장 : 김국현(동명대학교)**


Online101 Cold Seawater Recirulation Study for Enhancing Regasification Operation of an FSRU ····· 50
권성환(인하대학교), 정병욱 (Univ. of Strathclyde), 백광준(인하대학교)

Online102 Experimental and Numerical Studies on Sloshing-coupled Ship Motion in Head Waves ····· 51
주장, 이재학, 박태현, 이재훈, 김용환(서울대학교)

Online103 LNG-CCS 구조응답 추정에 있어 유체-기체 밀도비 및 상변화로 인한 슬로싱 하중의 영향에 대한 연구 ····· 53
이정규, 안양준, 김용환(서울대학교), 김지웅(삼성SDS)

Online104 예인선의 비선형 동역학 특성에 관한 수치 시뮬레이션 연구 ····· 55
남보우(서울대학교), 홍사영(KRISO)


## Online 2: 해양로봇장비

**12월 4일(금) 10:50-12:30, Online 2** **좌장 : 우주현(한국해양대학교)**


Online201 자가학습기반 단일 카메라 깊이 추정 알고리즘의 해상환경 적용 ····· 56
장준우, 김종휘, 김진환(카이스트)

Online202 강화학습을 이용한 예인선 지원 선박의 자율 접안 ····· 60
홍승조, 김진환(카이스트)

Online203 수중글라이더의 제어알고리즘을 통한 에너지 효율 개선 ····· 64
나승규, 이신제, 최형식, 김준영(한국해양대학교)


※ 한국해양공학회 2020 추계학술대회 온라인 세션 (Zoom 미팅 접속)

- 일시: 2020년 12월 4일 08:45 - 12:00
- 회의 ID: 881 0169 8001 / 암호: 051759

# Contents

## R11: 선박/해양플랫폼-유체1
## 해양 신재생 에너지-기타 신재생에너지

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 정세민(조선대학교)**


R1101 불규칙파 중 원통형 부유체의 운동 수치 시뮬레이션 ····· 69
손보훈, 정세민(조선대학교)

R1102 횡동요를 고려한 쌍축선박의 정수 중 조종성능에 관한 수치적 연구 ····· 73
이왕국, 김상현, 김인태, 김지수, 채순재(인하대학교), 정두진(대우조선해양)

R1103 실해역 데이터를 이용한 LNG 벙커링 셔틀의 내항성능과 운항적합성 평가 ····· 77
박준범, 이민아, 최신표, 이창희(한국해양대학교), 정동호(KRISO)

R1104 해수온도차발전플랜트의 육상형 및 접안형 플랫폼 개념 설계 ····· 78
김현주, 이호생, 김영석, 문정현, 서종범, 홍사영(KRISO)

R1105 세계 해수온도차발전의 가용량 및 프로젝트 조사 결과 ····· 79
문정현, 윤지원, 서종범, 임승택, 이호생, 김현주(KRISO)


## R12: 선박/해양플랫폼-유체2

**12월 3일(목) 15:20-17:00, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 박종천(부산대학교)**


R1201 전진중인 모형선의 선수부 접수선 형상에 대한 실험적 해석 ····· 80
이재훈, 황승현, 이영연(KRISO)

R1202 사항상태 모형선의 선미 유동장 계측 ····· 82
이재훈, 이준형, 황승현, 이영연, 임정택(KRISO)

R1203 전진속도가 있는 수륙양용버스의 운동 및 저항성능에 관한 실험적 연구 ····· 86
신다균, 박성부, 신성윤, 길성진, 박현정, 정광효(부산대학교), 정윤석(프랑스선급)

R1204 극저온 액화가스 저장 탱크 내 Boil-Off Gas 변화에 슬로싱이 미치는 영향에 관한 수치적 연구 ····· 87
전규목, 박종천(부산대학교), 이영범, 김덕수, 이상범, 이상원(대우조선해양)

# Contents

## R13: 선박/해양플랫폼-유체3

**12월 4일(금) 09:00-10:40, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 백광준(인하대학교)**


R1301 y+와 가상유체를 사용한 프로펠러 표면에서의 유동해석 연구 ····· 88
김관우, 백광준(인하대학교), Mehmet Atlar, 송순석(Univ. of Strathclyde)

R1302 Numerical Study of Convection from Perforated Plate Insulation – Influence of Space Distance ····· 89
정현수, 최정호(동아대학교)

R1303 FW-H를 이용한 Tip Vortex Cavitation(TVC)에 의한 진동 및 소음 연구 ····· 92
황홍식, 백광준(인하대학교), 송지수(삼성중공업)

R1304 RANS 난류 모델이 원형 실린더 주위 Wave Run-up에 미치는 영향에 관한 연구 ····· 93
서인덕, 정광열(NEXTfoam), 정재환, 조석규(KRISO)

R1305 Study on PIV-based Pressure Estimation Method of Wave Loading under Fixed Deck ····· 98
쯔엉 띠엔 쭝, 이강남, 박현정, 정광효(부산대학교)


## R14: 선박/해양플랫폼-유체4

**12월 4일(금) 10:50-12:30, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 정재환(KRISO)**


R1401 임베디드 파랑 생성 기법을 이용한 파랑 수조 내 파랑 생성 시뮬레이션 ····· 100
오승훈, 박병원, 김진하(KRISO)

R1402 심해공학수조의 조류속도 계측 및 분포 연구 ····· 101
정성준, 정재상, 이용국, 박병원, 황성철, 박인보, 김진하(KRISO)

R1403 Modeling the roughness effect on the circular cylinder using CFD at high Reynolds number ····· 102
장윤호, 백광준(인하대학교), Demirel Yigit, 송순석(Univ. of Strathclyde)

R1404 심해공학수조의 바람발생장치 성능평가에 관한 연구 ····· 103
이용국, 정재환, 김남우, 박인보, 정재상, 박병원, 김진하(KRISO)

R1405 KRISO Semi-Submersible 모형시험 불확실성 연구 ····· 104
박병원, 서민국, 김남우, 정성준, 김진하(KRISO)

# Contents

## R21: 선박/해양플랫폼-구조&재료

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R2 [볼룸C]** **좌장 : 안석환(중원대학교)**


R2101 Jack-up rig의 Brace재에 용접강관 적용 ····· 105
임성우, 정준모(인하대학교)

R2102 Jack-up rig에서 Leg 상세의 피로성능 ····· 106
임성우, 정준모(인하대학교)

R2103 충격에 의한 해양구조물의 동적파단 예측 ····· 107
서재훈, 정준모 (인하대학교)

R2104 4340M 강의 베이킹열처리 후의 잔류응력 분포 ····· 108
안석환(중원대학교)

R2105 선박용 연료전지의 내구성 향상을 위한 고담지 백금 촉매의 탄소 나노 코팅 연구 ····· 112
안치영, 조성필, 강희진, 김영식(선박해양플랜트연구소)


## R22: 선박/해양플랫폼-구조1

**12월 3일(목) 15:20-17:00, R2 [볼룸C]** **좌장 : 송창용(목포대학교)**


R2201 근사최적화 기법을 이용한 플로트오버 설치 작업용 수동형 갑판 지지 프레임의 근사최적설계 ····· 116
박우창, 송창용(목포대학교), 이강수, 성홍근(선박해양플랜트연구소)

R2202 LNG 추진 선박용 극저온 파이프라인의 구조해석과 설계 민감도 평가 ····· 117
이동준, 송창용, 박신우, 오민주(목포대학교)

R2203 기관실 보조탱크의 구조해석과 설계 민감도 평가 ····· 118
김훈관, 박성근, 문경환, 송창용(목포대학교)

R2204 IMO TYPE-C LNG CARRIER 열분포 특성 연구 ····· 119
차인환(현대미포조선), 황안동, 정준모(인하대학교)

R2205 Design Considerations of Deepwater Suction Pile for Taut/Semi-taut Mooring System ····· 126
여정환, 최봉균, 이민정, 김봉재, 이동연(삼성중공업)

R2206 해양플랜트용 장비 모형제작을 통한 PM기법 적용 및 학습효과에 대한 연구 ····· 132
홍민종, 백승주, 김영훈, 이대형, 신정활, 김병창(경남대학교)

# Contents

## R23: 선박/해양플랫폼-유체5

**12월 4일(금) 09:00-10:40, R2 [볼룸C]** **좌장 : 서민국(KRISO)**


R2301 Dual Barge를 이용한 Spar 플로트오버를 수치해석 ····· 133
정성준, 곽현욱, 박병재, 이강수(KRISO)

R2302 DP 설치선을 이용한 반잠수식 해양구조물의 플로트오버 도킹작업에 관한 모형시험연구 ····· 134
권용주, 송형도, 원영욱, 김현성, 오영재, 이지훈, 김남우, 곽현욱, 이강수(KRISO)

R2303 Numerical Study on the Unified Seakeeping and Maneuvering Analysis of the Russian Trawler in Wind and Wave ····· 135
Van Minh Nguyen, Thi Thanh Diep Nguyen, Hyeon Kyu Yoon (Changwon National Univ.)

R2304 절단계류를 고려한 KRISO 표준 반잠수식 해양구조물 (KSEMI)의 내항성능 및 wave run-up 모형시험 평가 ····· 143
서민국, 박병원, 김남우, 김병완, 김진하(선박해양플랜트연구소)


## R24: 선박/해양플랫폼-공정/안전

**12월 4일(금) 10:50-12:30, R2 [볼룸C]** **좌장 : 임영섭(서울대학교)**


R2401 수증기 잠열을 이용한 수소 연료전지 추진 선박용 메탄올 수증기 개질 시스템의 엑서지 분석 및 연소기 최적 운전 방법에 대한 연구 ····· 144
조희주, 최정호(동아대학교)

R2402 FPSO용 플레어팁 성능 실증시험 및 분석 ····· 151
이승열, 정효석(부산대학교)

R2403 CO2-CH4 대량 해저 수송을 위한 Multi-Fluid 수학적 모델링 개발 ····· 155
김진우, 허철(한국해양대학교), 김우식(한국가스공사)

R2404 선박 연료 및 기관 출력이 Onboard Carbon Capture에 미치는 영향 분석 ····· 157
채운형, 허철(한국해양대학교), 정동호(선박해양플랜트연구소)

R2405 LNG 저장 탱크 타입 별 선박 운영 주기를 이용한 Greenhouse Gas Emission 분석 연구 ····· 159
박은영, 최정호(동아대학교)

# Contents

## R31: 해양 토목-유체, 수리 & 환경

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R3 [볼룸D]** **좌장 : 강태순(지오시스템리서치)**


R3101 고립파 월파에 관한 실험적/수치적 해석에 관한 고찰 ····· 166
이우동, 최선용, 허동수(경상대학교)

R3102 서리 생성 메커니즘 분석 및 실용성 연구 ····· 167
이성우, 최성웅(경상대학교)

R3103 연성해석을 통한 지진해일에 의한 표류물 거동모의에 관한 고찰 ····· 168
이우동, 황태건, 허동수(경상대학교)

R3104 Swash 대역에서의 유속 측정을 위한 STIV의 적용성 검토 ····· 169
김연중, 윤종성(인제대학교), 정재훈(HTI 코리아)

R3105 오픈 소스 기반 중규모 해양모델 개발 ····· 170
정세민, 손보훈(조선대학교)


## R32: 해양 토목-연안방재

**12월 3일(목) 15:20-17:20, R3 [볼룸D]** **좌장 : 도기덕(한국해양대학교)**


R3201 1:20 경사면에서 쓰나미 파형에 따른 처오름 특성에 관한 고찰 ····· 171
이우동, 허동수(경상대학교)

R3202 Large-scale Physical Experiment of Overland Flow Effects on Built Environment defended by Seawall and Submerged breakwater ····· 172
Hai Van Dang, 이다연, 이은주, 신성원(한양대학교)

R3203 해빈보호를 위한 강성식생 공법의 적용성 검토 ····· 173
허동수, 이정흠, 정연명(경상대학교)

R3204 The Development of the Earthquake – Tsunami Relationship Analysis: a Case Study of Potential Tsunami Impacts on Korea ····· 174
Hai Van Dang, 이은주, 김지창, 신성원(한양대학교)

R3205 현장조사 자료를 이용한 표사계 내의 모래층량 분석기법 ····· 175
남정빈, 김진훈, 장성열, 이형석, 김인호(강원대학교)

R3206 종합 표사수지 분석을 위한 하이브리드 하구사주 붕괴 및 생성 모델 ····· 176
우정윤, 김연중, 김태우, 윤종성(인제대학교)

# Contents

## R33: 선박/해양플랫폼-빙해공학&구조

**12월 4일(금) 09:00-10:40, R3 [볼룸D]** **좌장 : 이탁기(경상대학교)**


R3301 선박 및 해양플랜트 구조물의 성능기반 내화설계를 위한 열–구조 연성해석에 관한 연구 ..... 177
기민석, 박범진, 이강수, 박병재(선박해양플랜트연구소)

R3302 반응 표면 분석법을 이용한 파형 웨브 조립보의 구조 거동 고찰 ..... 178
박성주(동명대학교), 정준모(인하대학교), 김국현(동명대학교)

R3303 유한요소 해석과 포텐셜 이론에 기반한 쇄빙선의 빙저항 추정에 관한 연구 ..... 182
한동화, 정준모, 황안둥, 팜티큔마이(인하대학교)

R3304 Ice Load Monitoring System의 적용현황 및 주요 선급 지침에 대한 비교 분석 ..... 184
김근곤, 유기연, 박현진, 이탁기(경상대학교)

R3305 충돌 진자 장비를 이용한 빙충돌 실험 및 빙-구조 상호작용 분석 기초 연구 ..... 185
장호상, 황세윤, 이장현(인하대학교)


## R34: 선박/해양플랫폼-구조2

**12월 4일(금) 10:50-12:30, R3 [볼룸D]** **좌장 : 정준모(인하대학교)**


R3401 전선구조해석을 위한 하중생성 소프트웨어 소개 ..... 189
전기영, 변석호, 이정렬(한국선급)

R3402 모델 축소 기법을 활용한 용접 잔류 응력 해석 ..... 194
신한섭, 박준범, 부승환(한국해양대학교)

R3403 반복동적응축기법을 이용한 주파수응답 및 과도응답 해석 ..... 195
고도현, 박준범, 부승환(한국해양대학교)

R3404 이방성 보의 모달특성을 이용한 재료 물성치 산정 ..... 196
김국현, 박성주(동명대학교)

R3405 함정 RCS와 전술선회직경을 고려한 대함미사일 대응 디코이 효과도 시뮬레이션 ..... 198
김국현(동명대학교)

# Contents

## R41: 설계 & 기계학습

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R4 [볼룸E]** **좌장 : 박선호(한국해양대학교)**


R4101 선박 배관 Auto-Routing을 위한 커리큘럼 학습 적용 방안 연구 ····· 201
김영수, 이경호, 이정민, 한영수(인하대학교)

R4102 HVAC 장비 최적화 설계를 통한 순수전기추진의 폐열의 에너지 재활용 설계 ····· 202
김규범, 김영식(KRISO)

R4103 딥러닝을 활용한 무인수중선의 동적 위치 제어 ····· 206
진한솔, Huang Jiafeng, 이지형, 최형식(한국해양대학교)

R4104 그래픽 데이터를 활용한 기계학습 적용 파랑 예측 기초 연구 ····· 210
김윤호, 조석규, 최종수, 박지용(KRISO)

R4105 Hyper-Parameter Optimization of ANN-Based Mooring Line Tension Prediction System Using Bayesian Optimization ····· 211
이대수, 임지수, 이승재(한국해양대학교)


## R42: 신재생에너지

**12월 3일(목) 15:20-17:00, R4 [볼룸E]** **좌장 : 구원철(인하대학교)**


R4201 확장 칼만필터 기반의 스파형 부유식 풍력터빈의 블레이드 피치 시스템 고장검출 알고리즘 ····· 215
조성필, 안치영, 심형원, 김영식(KRISO)

R4202 고정식 진동수주형 파력 발전기의 수치 및 실험적 연구 ····· 219
정현철, 김홍빈, 성우진, 구원철(인하대학교)

R4203 부유식 파력 발전장치의 운동성능 해석을 위한 유체-다물체 동역학 연성해석 기술 개발 ····· 223
윤상문, 박종천(부산대학교), 석준(중소조선연구원)

R4204 이차원 완전 비선형 수치 조파수조를 활용한 경사형 고정식 진동수주형 파력발전 장치의 성능해석 ····· 224
양현재, 구원철(인하대학교)

R4205 유향 변화에 따른 삼각배치 조류터빈의 성능 및 발전량 분석 ····· 228
조철희, 조선근, 정승원, 문건웅(인하대학교)

# 2020년도 한국해양공학회 추계학술대회

## 프로그램 안내

# 정기총회 및 시상식 / 개회식 및 기조연설 / 오찬회

## 정기총회 및 시상식

**12월 3일(목) 10:30 – 11:30, 그랜드볼룸 ABC** **사회 : 성홍근(KRISO)**

Ⅰ. 개회사
Ⅱ. 경과보고 및 사업계획
Ⅲ. 학회상 및 우수논문발표상 시상식
Ⅳ. 기념촬영

## 개회식 및 기조연설

**12월 3일(목) 11:30 – 12:30, 그랜드볼룸 ABC** **사회 : 성홍근(KRISO)**

Ⅰ. 개 회 사 : 조철희 (한국해양공학회 회장)
Ⅱ. 축 사 : 김한근 (강릉시장)
Ⅲ. 기조연설 : 이정렬 (성균관대학교)
"강원도권 해안침식 대응의 경성화 분석 및 연성화 전략"

## 오찬회

**12월 3일(목) 12:30 – 13:30, 베이홀**

## 기획세션: 접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발

12월 3일(목) 15:20-17:20, R5 [미팅룸D] 좌장 : 황선규(㈜화인)

**기획 내용: 해양쓰레기 국제 규제 대응 및 미세플라스틱 저감을 위해 해양플라스틱 쓰레기 저감을 위한 수거장비, 처리, 수거지원 기술을 개발 및 실증**

R5201 해양쓰레기 수거선 개발 연구
황선규, 윤인창, 김재훈(㈜화인)

R5202 나노버블을 이용한 해안쓰레기 세척 기술 연구
김보민, 최문석, 박찬규(한국산업기술시험원)

R5203 해양쓰레기 선별선내 인공지능 적용 선별프로세스
한봉석, 박상재, 황미섭, 한영수(엔에이치씨)

R5204 해양플라스틱쓰레기 재활용을 위한 처리공정기술 및 재활용 방안
이주형, 서상욱(한국건설생활환경시험연구원)

R5205 해양쓰레기 수거장비의 성능평가 계획
김민, 이훈성, 차명훈, 지성(한국조선해양기자재연구원)

R5206 해양쓰레기 수거선의 파랑중 안정성 해석
남설, 전규목, 박종천(부산대학교)

# 일반세션 12월 3일(목)

## R11: 선박/해양플랫폼-유체1
## 해양 신재생 에너지-기타 신재생에너지

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 정세민(조선대학교)**

R1101 불규칙파 중 원통형 부유체의 운동 수치 시뮬레이션
손보훈, 정세민(조선대학교)

R1102 횡동요를 고려한 쌍축선박의 정수 중 조종성능에 관한 수치적 연구
이왕국, 김상현, 김인태, 김지수, 채순재(인하대학교), 정두진(대우조선해양)

R1103 실해역 데이터를 이용한 LNG 벙커링 셔틀의 내항성능과 운항적합성 평가
박준범, 이민아, 최신표, 이창희(한국해양대학교), 정동호(KRISO)

R1104 해수온도차발전플랜트의 육상형 및 접안형 플랫폼 개념 설계
김현주, 이호생, 김영석, 문정현, 서종범, 홍사영(KRISO)

R1105 세계 해수온도차발전의 가용량 및 프로젝트 조사 결과
문정현, 윤지원, 서종범, 임승택, 이호생, 김현주(KRISO)

## R12: 선박/해양플랫폼-유체2

**12월 3일(목) 15:20-17:00, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 박종천(부산대학교)**

R1201 전진중인 모형선의 선수부 접수선 형상에 대한 실험적 해석
이재훈, 황승현, 이영연(KRISO)

R1202 사항상태 모형선의 선미 유동장 계측
이재훈, 이준형, 황승현, 이영연, 임정택(KRISO)

R1203 전진속도가 있는 수륙양용버스의 운동 및 저항성능에 관한 실험적 연구
신다균, 박성부, 신성윤, 길성진, 박현정, 정광효(부산대학교), 정윤석(프랑스선급)

R1204 극저온 액화가스 저장 탱크 내 Boil-Off Gas 변화에 슬로싱이 미치는 영향에 관한 수치적 연구
전규목, 박종천(부산대학교), 이영범, 김덕수, 이상범, 이상원(대우조선해양)

## R21: 선박/해양플랫폼-구조&재료

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R2 [볼룸C]** **좌장 : 안석환(중원대학교)**

R2101 Jack-up rig의 Brace재에 용접강관 적용
임성우, 정준모(인하대학교)

R2102 Jack-up rig에서 Leg 상세의 피로성능
임성우, 정준모(인하대학교)

R2103 충격에 의한 해양구조물의 동적파단 예측
서재훈, 정준모 (인하대학교)

R2104 4340M 강의 베이킹열처리 후의 잔류응력 분포
안석환(중원대학교)

R2105 선박용 연료전지의 내구성 향상을 위한 고담지 백금 촉매의 탄소 나노 코팅 연구
안치영, 조성필, 강희진, 김영식(선박해양플랜트연구소)

## R22: 선박/해양플랫폼-구조1

**12월 3일(목) 15:20-17:00, R2 [볼룸C]** **좌장 : 송창용(목포대학교)**

R2201 근사최적화 기법을 이용한 플로트오버 설치 작업용 수동형 갑판 지지 프레임의 근사최적설계
박우창, 송창용(목포대학교), 이강수, 성홍근(선박해양플랜트연구소)

R2202 LNG 추진 선박용 극저온 파이프라인의 구조해석과 설계 민감도 평가
이동준, 송창용, 박신우, 오민주(목포대학교)

R2203 기관실 보조탱크의 구조해석과 설계 민감도 평가
김훈관, 박성근, 문경환, 송창용(목포대학교)

R2204 IMO TYPE-C LNG CARRIER 열분포 특성 연구
차인환(현대미포조선), 황안동, 정준모(인하대학교)

R2205 Design Considerations of Deepwater Suction Pile for Taut/Semi-taut Mooring System
여정환, 최봉균, 이민정, 김봉재, 이동연(삼성중공업)

R2206 해양플랜트용 장비 모형제작을 통한 PM기법 적용 및 학습효과에 대한 연구
홍민종, 백승주, 김영훈, 이대형, 신정활, 김병창(경남대학교)

# 일반세션 12월 3일(목)

## R31: 해양 토목-유체, 수리 & 환경

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R3 [볼룸D]** **좌장 : 강태순(지오시스템리서치)**

R3101 고립파 월파에 관한 실험적/수치적 해석에 관한 고찰
이우동, 최선용, 허동수(경상대학교)

R3102 서리 생성 메커니즘 분석 및 실용성 연구
이성우, 최성웅(경상대학교)

R3103 연성해석을 통한 지진해일에 의한 표류물 거동모의에 관한 고찰
이우동, 황태건, 허동수(경상대학교)

R3104 Swash 대역에서의 유속 측정을 위한 STIV의 적용성 검토
김연중, 윤종성(인제대학교), 정재훈(HTI 코리아)

R3105 오픈 소스 기반 중규모 해양모델 개발
정세민, 손보훈(조선대학교)

## R32: 해양 토목-연안방재

**12월 3일(목) 15:20-17:20, R3 [볼룸D]** **좌장 : 도기덕(한국해양대학교)**

R3201 1:20 경사면에서 쓰나미 파형에 따른 처오름 특성에 관한 고찰
이우동, 허동수(경상대학교)

R3202 Large-scale Physical Experiment of Overland Flow Effects on Built Environment defended by Seawall and Submerged breakwater
Hai Van Dang, 이다연, 이은주, 신성원(한양대학교)

R3203 해빈보호를 위한 강성식생 공법의 적용성 검토
허동수, 이정흠, 정연명(경상대학교)

R3204 The Development of the Earthquake – Tsunami Relationship Analysis: a Case Study of Potential Tsunami Impacts on Korea
Hai Van Dang, 이은주, 김지창, 신성원(한양대학교)

R3205 현장조사 자료를 이용한 표사계 내의 모래층량 분석기법
남정빈, 김진훈, 장성열, 이형석, 김인호(강원대학교)

R3206 종합 표사수지 분석을 위한 하이브리드 하구사주 붕괴 및 생성 모델
우정윤, 김연중, 김태우, 윤종성(인제대학교)

## R41: 설계 & 기계학습

**12월 3일(목) 13:30-15:10, R4 [볼룸E]** **좌장 : 박선호(한국해양대학교)**

R4101 선박 배관 Auto-Routing을 위한 커리큘럼 학습 적용 방안 연구
김영수, 이경호, 이정민, 한영수(인하대학교)

R4102 HVAC 장비 최적화 설계를 통한 순수전기추진의 폐열의 에너지 재활용 설계
김규범, 김영식(KRISO)

R4103 딥러닝을 활용한 무인수중선의 동적 위치 제어
진한솔, Huang Jiafeng, 이지형, 최형식(한국해양대학교)

R4104 그래픽 데이터를 활용한 기계학습 적용 파랑 예측 기초 연구
김윤호, 조석규, 최종수, 박지용(KRISO)

R4105 Hyper-Parameter Optimization of ANN-Based Mooring Line Tension Prediction System Using Bayesian Optimization
이대수, 임지수, 이승재(한국해양대학교)

## R42: 신재생에너지

**12월 3일(목) 15:20-17:00, R4 [볼룸E]** **좌장 : 구원철(인하대학교)**

R4201 확장 칼만필터 기반의 스파형 부유식 풍력터빈의 블레이드 피치 시스템 고장검출 알고리즘
조성필, 안치영, 심형원, 김영식(KRISO)

R4202 고정식 진동수주형 파력 발전기의 수치 및 실험적 연구
정현철, 김홍빈, 성우진, 구원철(인하대학교)

R4203 부유식 파력 발전장치의 운동성능 해석을 위한 유체-다물체 동역학 연성해석 기술 개발
윤상문, 박종천(부산대학교), 석준(중소조선연구원)

R4204 이차원 완전 비선형 수치 조파수조를 활용한 경사형 고정식 진동수주형 파력발전 장치의 성능해석
양현재, 구원철(인하대학교)

R4205 유향 변화에 따른 삼각배치 조류터빈의 성능 및 발전량 분석
조철희, 조선근, 정승원, 문건웅(인하대학교)

# 일반세션 12월 4일(금)

## R13: 선박/해양플랫폼-유체3

**12월 4일(금) 09:00-10:40, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 백광준(인하대학교)**

R1301 y+와 가상유체를 사용한 프로펠러 표면에서의 유동해석 연구
김관우, 백광준(인하대학교), Mehmet Atlar, 송순석(Univ. of Strathclyde)

R1302 Numerical Study of Convection from Perforated Plate Insulation – Influence of Space Distance
정현수, 최정호(동아대학교)

R1303 FW-H를 이용한 Tip Vortex Cavitation(TVC)에 의한 진동 및 소음 연구
황홍식, 백광준(인하대학교), 송지수(삼성중공업)

R1304 RANS 난류 모델이 원형 실린더 주위 Wave Run-up에 미치는 영향에 관한 연구
서인덕, 정광열(NEXTfoam), 정재환, 조석규(KRISO)

R1305 Study on PIV-based Pressure Estimation Method of Wave Loading under Fixed Deck
쯔엉 띠엔 쭝, 이강남, 박현정, 정광효(부산대학교)

## R14: 선박/해양플랫폼-유체4

**12월 4일(금) 10:50-12:30, R1 [볼룸AB]** **좌장 : 정재환(KRISO)**

R1401 임베디드 파랑 생성 기법을 이용한 파랑 수조 내 파랑 생성 시뮬레이션
오승훈, 박병원, 김진하(KRISO)

R1402 심해공학수조의 조류속도 계측 및 분포 연구
정성준, 정재상, 이용국, 박병원, 황성철, 박인보, 김진하(KRISO)

R1403 Modeling the roughness effect on the circular cylinder using CFD at high Reynolds number
장윤호, 백광준(인하대학교), Demirel Yigit, 송순석(Univ. of Strathclyde)

R1404 심해공학수조의 바람발생장치 성능평가에 관한 연구
이용국, 정재환, 김남우, 박인보, 정재상, 박병원, 김진하(KRISO)

R1405 KRISO Semi-Submersible 모형시험 불확실성 연구
박병원, 서민국, 김남우, 정성준, 김진하(KRISO)

## R23: 선박/해양플랫폼-유체5

**12월 4일(금) 09:00-10:40, R2 [볼룸C]** **좌장 : 서민국(KRISO)**

R2301 Dual Barge를 이용한 Spar 플로트오버를 수치해석
정성준, 곽현욱, 박병재, 이강수(KRISO)

R2302 DP 설치선을 이용한 반잠수식 해양구조물의 플로트오버 도킹작업에 관한 모형시험연구
권용주, 송형도, 원영욱, 김현성, 오영재, 이지훈, 김남우, 곽현욱, 이강수(KRISO)

R2303 Numerical Study on the Unified Seakeeping and Maneuvering Analysis of the Russian Trawler in Wind and Wave
Van Minh Nguyen, Thi Thanh Diep Nguyen, Hyeon Kyu Yoon(Changwon National Univ.)

R2304 절단계류를 고려한 KRISO 표준 반잠수식 해양구조물 (KSEMI)의 내항성능 및 wave run-up 모형시험 평가
서민국, 박병원, 김남우, 김병완, 김진하(선박해양플랜트연구소)

## R24: 선박/해양플랫폼-공정/안전

**12월 4일(금) 10:50-12:30, R2 [볼룸C]** **좌장 : 임영섭(서울대학교)**

R2401 수증기 잠열을 이용한 수소 연료전지 추진 선박용 메탄올 수증기 개질 시스템의 엑서지 분석 및 연소기 최적 운전 방법에 대한 연구
조희주, 최정호(동아대학교)

R2402 FPSO용 플레어팁 성능 실증시험 및 분석
이승열, 정효석(부산대학교)

R2403 CO2-CH4 대량 해저 수송을 위한 Multi-Fluid 수학적 모델링 개발
김진우, 허철(한국해양대학교), 김우식(한국가스공사)

R2404 선박 연료 및 기관 출력이 Onboard Carbon Capture에 미치는 영향 분석
채운형, 허철(한국해양대학교), 정동호(선박해양플랜트연구소)

R2405 LNG 저장 탱크 타입 별 선박 운영 주기를 이용한 Greenhouse Gas Emission 분석 연구
박은영, 최정호(동아대학교)

# 일반세션 12월 4일(금)

## R33: 선박/해양플랫폼-빙해공학&구조

**12월 4일(금) 09:00-10:40, R3 [볼룸D]** **좌장 : 이탁기(경상대학교)**

R3301 선박 및 해양플랜트 구조물의 성능기반 내화설계를 위한 열-구조 연성해석에 관한 연구
기민석, 박범진, 이강수, 박병재(선박해양플랜트연구소)

R3302 반응 표면 분석법을 이용한 파형 웨브 조립보의 구조 거동 고찰
박성주(동명대학교), 정준모(인하대학교), 김국현(동명대학교)

R3303 유한요소 해석과 포텐셜 이론에 기반한 쇄빙선의 빙저항 추정에 관한 연구
한동화, 정준모, 황안둥, 팜티큔마이(인하대학교)

R3304 Ice Load Monitoring System의 적용현황 및 주요 선급 지침에 대한 비교 분석
김근곤, 유기연, 박현진, 이탁기(경상대학교)

R3305 충돌 진자 장비를 이용한 빙충돌 실험 및 빙-구조 상호작용 분석 기초 연구
장호상, 황세윤, 이장현(인하대학교)

## R34: 선박/해양플랫폼-구조2

**12월 4일(금) 10:50-12:30, R3 [볼룸D]** **좌장 : 정준모(인하대학교)**

R3401 전선구조해석을 위한 하중생성 소프트웨어 소개
전기영, 변석호, 이정렬(한국선급)

R3402 모델 축소 기법을 활용한 용접 잔류 응력 해석
신한섭, 박준범, 부승환(한국해양대학교)

R3403 반복동적응축기법을 이용한 주파수응답 및 과도응답 해석
고도현, 박준범, 부승환(한국해양대학교)

R3404 이방성 보의 모달특성을 이용한 재료 물성치 산정
김국현, 박성주(동명대학교)

R3405 함정 RCS와 전술선회직경을 고려한 대함미사일 대응 디코이 효과도 시뮬레이션
김국현(동명대학교)

## Online 1: 유체

**12월 4일(금) 09:00-10:40, Online 1** **좌장 : 김국현(동명대학교)**

Online101 Cold Seawater Recirulation Study for Enhancing Regasification Operation of an FSRU
권성환(인하대학교), 정병욱 (Univ. of Strathclyde), 백광준(인하대학교)

Online102 Experimental and Numerical Studies on Sloshing-coupled Ship Motion in Head Waves
주장, 이재학, 박태현, 이재훈, 김용환(서울대학교)

Online103 LNG-CCS 구조응답 추정에 있어 유체-기체 밀도비 및 상변화로 인한 슬로싱 하중의 영향에 대한 연구
이정규, 안양준, 김용환(서울대학교), 김지웅(삼성SDS)

Online104 예인선의 비선형 동역학 특성에 관한 수치 시뮬레이션 연구
남보우(서울대학교), 홍사영(KRISO)

## Online 2: 해양로봇장비

**12월 4일(금) 10:50-12:30, Online 2** **좌장 : 우주현(한국해양대학교)**

Online201 자가학습기반 단일 카메라 깊이 추정 알고리즘의 해상환경 적용
장준우, 김종휘, 김진환(카이스트)

Online202 강화학습을 이용한 예인선 지원 선박의 자율 접안
홍승조, 김진환(카이스트)

Online203 수중글라이더의 제어알고리즘을 통한 에너지 효율 개선
나승규, 이신제, 최형식, 김준영(한국해양대학교)

※ 한국해양공학회 2020 추계학술대회 온라인 세션 (Zoom 미팅 접속)

- 일시: 2020년 12월 4일 08:45 - 12:00
- 회의 ID: 881 0169 8001 / 암호: 051759

# 2020년도 한국해양공학회 추계학술대회

## 기조강연




## CONTENTS

I 강원도권 경성화 요인 분석

II 연성화 추진 전략
1. 침식원인 규명체계 수립 및 원인에 최적화된 맞춤대응
2. 설계가이드라인수립에 따른 연성공법의 효율성 확보

III 목표해안선 유지목적에 준한 비용 분석

01 침식저감공법 소개 및 장단점 분석

02 동해안 침식 주원인의 분석

03 양빈 목적별 배치설계 가이드

04 경성과 연성 공법 비용 분석
-수중방파제와 양빈 비용(Cost) 분석-

05 결론

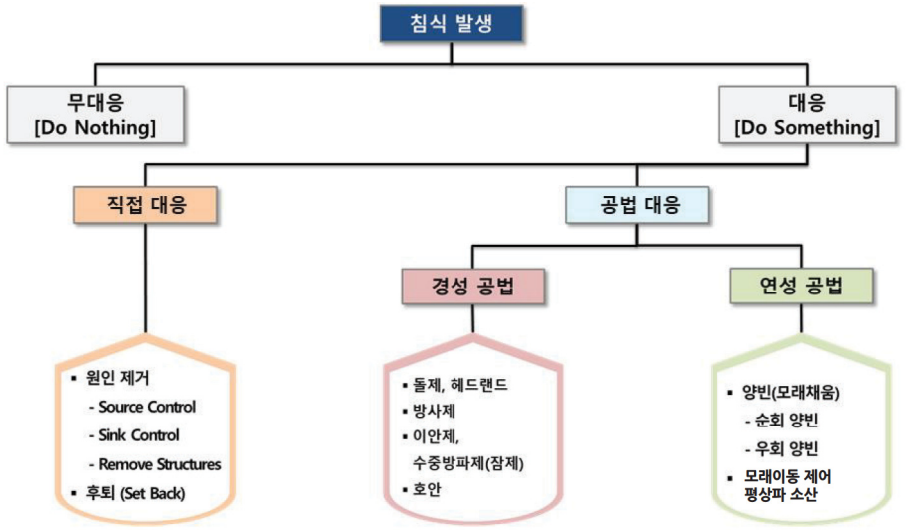
# 01

## 침식저감공법 소개 및 장단점 분석

**1.1** 침식 대응의 분류
**1.2** 경성 및 연성 공법의 종류
**1.3** 경성화 분석 및 조사
**1.4** 경성공법과 연성공법의 장단점

## 1.1 침식 대응의 분류

### 침식 대응의 분류 체계

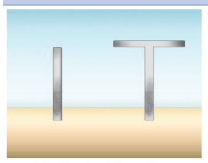
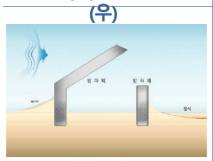
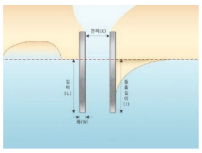



원인별 직접 저감 방안

원인별 간접 저감 방안

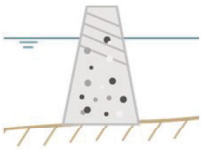
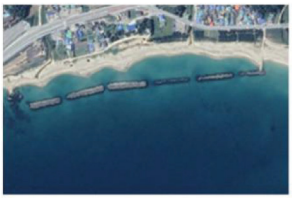
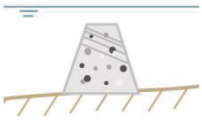
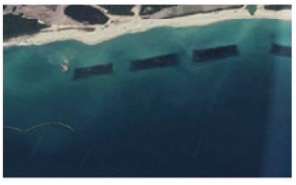
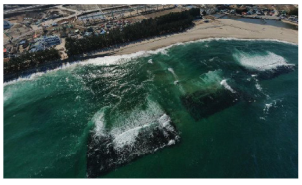
## 1.2 경성 및 연성공법의 종류

### 연안표사제어 침식저감시설 – 돌제/방사제/도류제

| 시설명 | 정의 | 국내·외 적용 사례 | |
|---|---|---|---|
|  돌제(좌), 헤드랜드(우) | 연안표사를 제어할 목적으로 해안에서 직각방향으로 배치 |  경북 송도해수욕장 – 돌제, 헤드랜드 |  강원 삼척시 원평해변 |
|  방사제 | 항만 매몰 방지를 위해 해안선에서 외해쪽으로 길게 배치 |  강원도 주문진항 - 방사제 |  경북 구산항 - 방사제 |
|  도류제 | 수로의 퇴사를 막거나 수로로의 모래 유실을 막을 목적으로 수로를 따라 설치하는 구조물 |  전남 만흥지구 - 도류제 |  미국 캘리포니아 Humboldt Bay harbor |

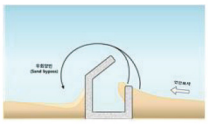
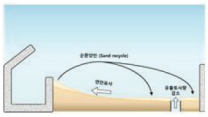
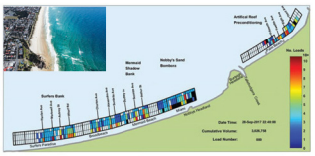
## 1.2 경성 및 연성공법의 종류

### 횡단표사제어 침식저감시설 – 이안제/수중방파제

| 시설명 | 정의 | 국내·외 적용 사례 | |
|---|---|---|---|
|  이안제 | - 횡단표사를 제어할 목적으로 해안에서 떨어뜨려 해안선에 평행하게 배치<br>- 상단 마루는 해수면보다 높음 |  경북 덕신리 해변 |  미국 Erie호 presque Island |
|  수중방파제(잠제) | - 횡단표사를 제어할 목적으로 해안에서 떨어뜨려 해안선에 평행하게 배치<br>- 상단 마루는 해수면보다 낮음 |  경북 울진군 구산항 |  강원 삼척시 원평해변 |

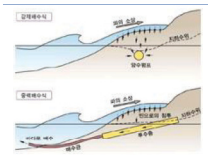
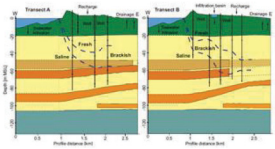
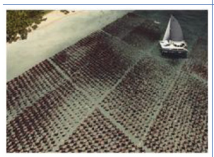
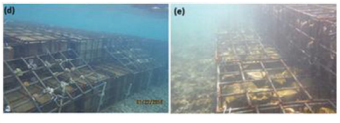
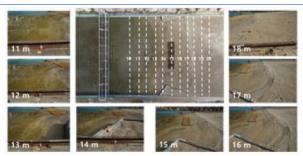
## 1.2 경성 및 연성공법의 종류

### 연성공법의 종류-모래 공급

| 시설명 | 정의 | 국내·외 적용 사례 | |
|---|---|---|---|
|  양빈 (모래채움) | 침식된 해안 지역에 모래를 공급하는 공법 |  변산 해수욕장 |  Myrtle beach, USA |
|  우회양빈 | 다른 표사계의 모래를 양빈을 통해 공급하는 공법 |  Tweed River, Australia |  천해용 우회양빈, 국내연구사례 |
|  순환양빈 | 같은 표사계 내에서 양빈을 통해 모래를 공급하는 공법 |  Gold Coast Beach, Australia |  Zuid-Holland Beach, Netherland |

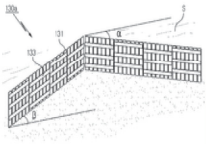
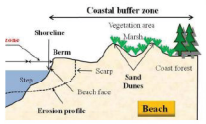
## 1.2 경성 및 연성공법의 종류

### 연성공법의 종류-수중 모래이동 제어

| 시설명 | 정의 | 국내·외 적용 사례 | |
|---|---|---|---|
|  목책 돌제 | 투수성 목책을 두어 연안표사를 부분적으로 제어하는 공법 |  꽃지해수욕장 |  Breskens, Netherland |
|  지하수 제어 | 지하수위를 인위적으로 저감하여 백사장 침식 및 토사포락을 방지하는 공법 |  Solleveld, Netherland |  Alassio, Italy |
|  인공산호초 | 자연산호초의 파고저감, 표사유출 방지기능에 힌트를 얻어 인공적인 산호초를 조성하는 공법 |  Telescope beach, Grenada |  국내 연구 (2019) |

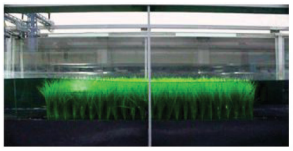
## 1.2 경성 및 연성공법의 종류

### 연성공법의 종류-육상 모래이동 제어

| 시설명 | 정의 | 국내·외 적용 사례 | |
|---|---|---|---|
|  모래포집기 | 바람에 날리는 모래의 이동을 제어하고 모래의 퇴적을 촉진하는 공법 |  제주 사계리 해안 (목책 말뚝형) |  신두리 해안사구 (그물형) |
|   육상식생대 | 육상에 식생을 조성하여 모래이동을 제어 |  변산 해수욕장 |  Victoria, Austraila |
|  목책 호안 | 투과를 허용하여 배후의 모래의 유실을 방지하는 공법 |  Trimingham, England |  Happisburgh, England |

## 1.2 경성 및 연성공법의 종류

### 연성공법의 종류-평상파 파랑소산

| 시설명 | 정의 | 국내·외 적용 사례 | |
|---|---|---|---|
|   수중식생대 | 수중에 식생을 조성하여 파랑에너지를 저감시킴으로서 해빈을 보호하는 공법 |  국내 연구 (2019) |  Gun beach, USA |
|  지오튜브 | 합성수지 내부에 모래 등을 채워 파력과 조력에 저항토록 설치하는 공법 |   백사장해수욕장 |  Atlantic City, USA |
|  돌망태/모래그물망 | 연안의 직각방향으로 석재 또는 모래를 이용하여 포집망 설치하는 공법 |  백사장해수욕장 |  Pantai Morib, Austraila |

## 1.3 경성화 분석 및 조사

### 해외대비 동해안의 경성화 비율

○ 해외의 해안길이 대비 경성화 비율을 조사한 결과 **이탈리아와 일본의 경성의존도가 높고, 미국과 영국은 상대적으로 낮음**. 현재 해외대비 동해안의 경성비율은 낮은 편이나, 점점 경성공법을 시행하는 곳이 많아지는 추세임.

| 국가 | 미국 | | 스페인 | | 이탈리아 | | 호주 | 일본 | 네덜란드 | 영국 | 대한민국 동해안 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 캘리포니아 | 플로리다 | 남부 | 북부 | 서부 | 동부 | | | | | |
| 해안길이 대비 경성화 비율 | 0.126 | 0.027 | 0.205 | 0.382 | 0.569 | 0.713 | 0.228 | 0.406 | 0.303 | 0.156 | 0.179 |









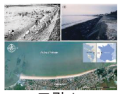







## 1.3 경성화 분석 및 조사

### 해외 연성화 연성화 성공 사례

| 적용 사례 | 침식원인 | 경성시도 | 양빈대응 |
|---|---|---|---|
|  미국 Miami 해변 | • 연안을 따라 형성된 사구 훼손과 호텔, 콘도 등 주거시설의 개발 및 해빈 잠식으로 인한 침식 문제 발생 | • 초기에 비교적 비용이 저렴한 돌제군 (groyne group)을 이용 하여 연안 표사를 포집하는 경성 공법으로 침식 문제를 해결하려 하였으나, 모래 포집 효과가 미미 하고 경관이 훼손 | • 양빈 공법을 이용해 모래량 부족으로 인한 침식 문제를 근본적으로 개선하고 충분한 레저 및 완충 구간을 확보함. |
|  이탈리아 Pellestrina 해변 | • 북측과 남측의 도류제 축조로 인한 모래 공급의 차단으로 침식문제 발생<br>• 해빈경사가 점차 증가하여 폭풍에 의한 방호섬 유실 위험 증가 (18세기) | • 노출돌제, 잠형돌제, 수중보 시스템 양빈 460만 m³와 병행 축조 (1995년) | • 남단셀 양빈 3년 후 유실율 2%로 모래유지성능이 탁월한 것으로 판단<br>• 1997~2002년 동안 수중보 1.8~2.0m 침하 |
|  프랑스 Chtellaillon 해변 | • 남측돌제 축조 후 인접해안 퇴적, 북측해안 침식 발생 (1857년) | • 북측해안 방호를 위해 축조한 호안이 남하함에 따라 호안 기조부 침식 확산<br>• 호안 기저부 세굴 방지공을 설치 하였으나 침식으로 인한 관광지 기능 상실 (1857년 이후) | • 1980년대 후반부터 양빈을 시행하여 관광객 수가 1984년 4,000명에서 2000년 44,000명으로 증가 (1차 89~91년 33만, 2차 98년 11만 m³) |
|  호주 Tweed River 해변 | • 1800년대부터 항행수로 확보를 위한 하구준설을 시행<br>• 연평균 표사율이 800,000 m³/yr 으로 최대 1,200,000 m³/yr 에 이를 때도 있음 | • 1962~1965년 도류제(380m) 건설에 따라 입구 매몰이 일시적으로 저감되었으나 재발<br>• 도류제 남측이 퇴적되고 북측은 침식되어 퀸즐랜드 골드코스트 해안 남측까지 미침 | • 1974~1990년 골드코스트 남측해안 양빈 6,180,000 m³<br>• 1995~1997년 트위드강 입구 모래 3,100,000 m³를 준설하여 골드코스트 남측해안 양빈<br>• 2000년 1월~5월 네랑강 시스템과 유사한 우회 양빈 시스템 건설 |

## 1.4 경성공법과 연성공법의 장단점 분석

### 공법별 장·단점 분석

**경성공법**

**경성공법의 장점**

O 해안 구조물 설치를 통해 직접적으로 침식 방지 효과를 발휘할 수 있음.

**경성공법의 단점**

O 돌제, 잠제 등에 의한 침식저감공법은 고파랑 유입시 과도한 파랑에너지 소산과 해빈류의 발생을 일으켜 **부유사의 외해 유실**을 부추기는 **pumping effect** 발생



< 경성공법 사례: 봉평/영랑해수욕장 >

**연성공법**

**연성공법의 장점**

O 양빈, 지오튜브, 지하수제어 공법 등과 같이 설치 및 해체가 용이하며 환경친화적인 공법으로 대다수의 국가에서 지향하고 있음.

**연성공법의 단점**

O **주기적인 양빈**을 위한 유지관리 비용이 지속적으로 투자되어야 함.

O 지오튜브의 경우 **고파랑 내습시** 침하가 발생하여 **기능을 상실**한 사례가 있음.



< 연성공법 사례: 꽃지해수욕장 >

## 1.4 경성공법과 연성공법의 장단점 분석

### 공법별 환경 분석



**경성공법에 유리한 환경**

- 고파랑 환경
- 주변 양빈에 적합한 모래자원이 부족한 환경
- 외해로의 모래 손실율 제어 가능 해변(역기능이 발생)
- 경성구조물(수중방파제 등)에 의하여 계절별 빗각 고파랑 제어에 유리한 환경

**연성공법에 유리한 환경**

- 고조차 환경
- 관광지로서 조망권이 필요한 환경
- 친환경적 공법이 필요한 환경 (환경변화 최소화 필요)
- 식생공간이 넓은 환경
- 계절별 반복적인 파향 변화가 있는 환경 (순환/우회양빈)



## 1.4 경성공법과 연성공법의 장단점 분석

### 동해안 경성화 요인 분석

✓ 기술환경적 요인
- 연성 대비 경성공법의 설계 및 시공 체계 유리
- 연성 공법에 의한 기대효과 및 효율성에 대한 불확실
- 연성 침식대응 기술의 해석기법 미비
- 양빈사 확보 어려움
- 경성의 계절별 파향 제어에 유리
- 연성공법에 대한 2/3차원 지형변동 실험, 사후 모니터링 등 관련 연구 미비

✓ 사회적 요인
- 이상파랑 유입시 발생하는 해안침식은 자연적으로 다시 회복되는 현상에 대한 인식 부족
- 연안정비사업이 해안구조물을 설치하는 경성공법 위주의 사업이며 양빈은 실효성이 없는 보조적 복원 사업 또는 단기간 대응 조치인 것으로 판단

✓ 제도적 요인
- 예산집행 체계에 있어 경성공법 채택의 유리
- 설계용역 수익에 있어 경성공법 채택의 유리
- 공법 관리체계에 있어 연성공법의 높은 불확실성
- 양빈사 활용을 위한 모래자원의 관리체계의 부재

해결방안

- 연성공법의 효율성 제고를 위한 해석기법 마련 **(WPP개념수립, 양빈설계가이드북)**
- 양빈자원 조사 및 관리체계 도입
- 연성 해석기법 지원을 위한 관련연구 활성화

- 연성 및 경성 실증 사례 발간
- 연성 및 경성 장단점에 대한 홍보 및 교육
- 침식저감 협의회의 활성화

- 연성공법 채택상의 혜택 부여
- 공사중 및 사후모니터링의 제도화로 연성공법의 관리부담 및 불확실성 개선
- 양빈사 자원관리를 위한 법.제도 개선

# 02

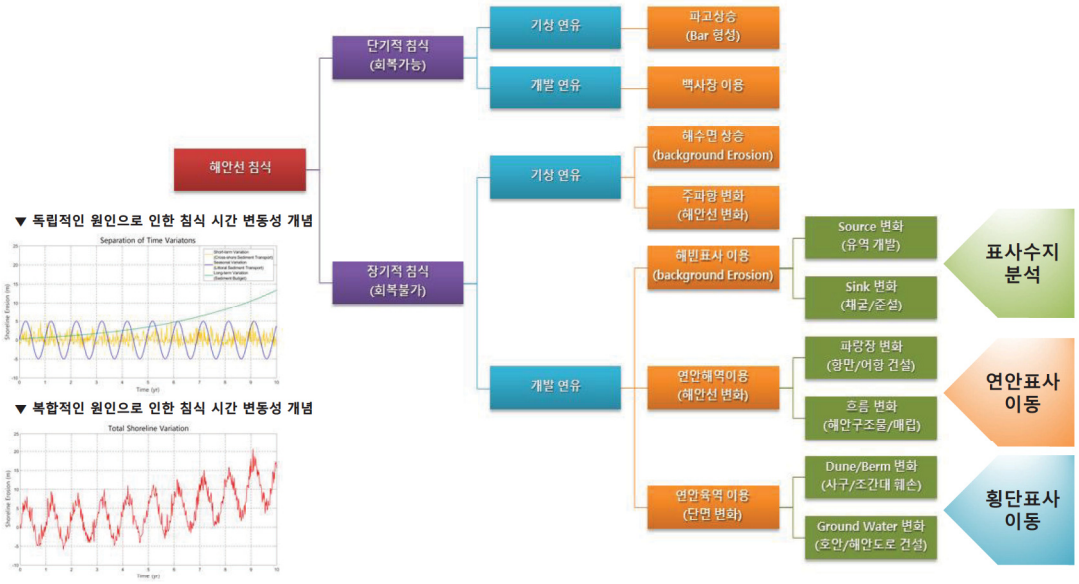
# 동해안 침식 주원인의 분석

**2.1** 침식원인의 분류 및 분석
**2.2** 연안침식 원인규명 가이드라인
**2.3** 실증해안(봉포해변)에의 적용

## 2.1 침식원인의 분류 및 분석

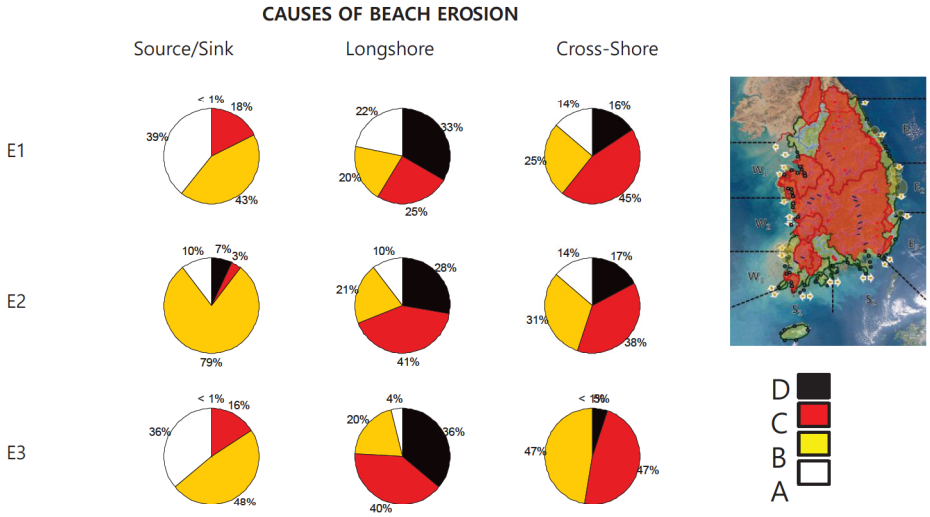
### 침식원인의 분류 (fault tree)

- 개발 유형(Driving Force)에 따른 침식 유형(Impact) 분석
- 침식유발 요인 중 개발 연유에 따른 표사수지, 연안표사, 횡단표사 변화를 주된 요인으로 분류



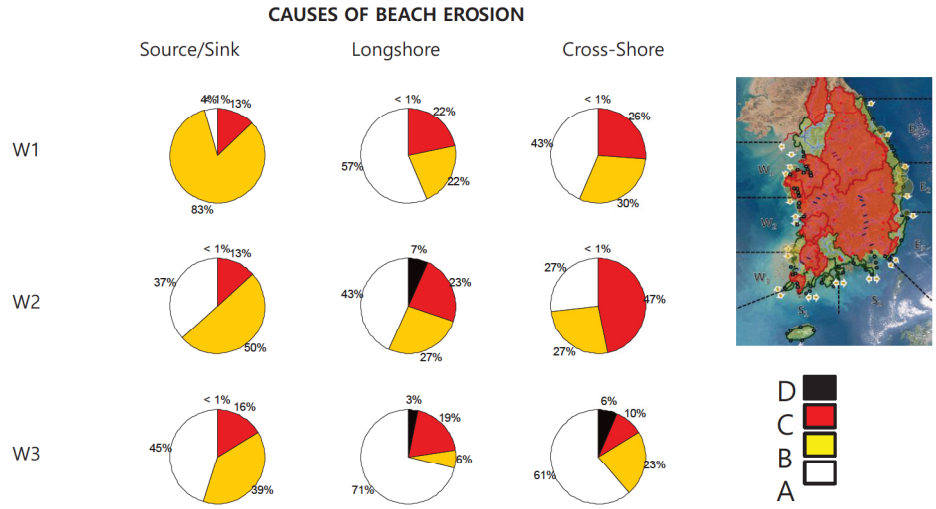

## 2.1 침식원인의 분류 및 분석

### 동해안 침식원인 분석



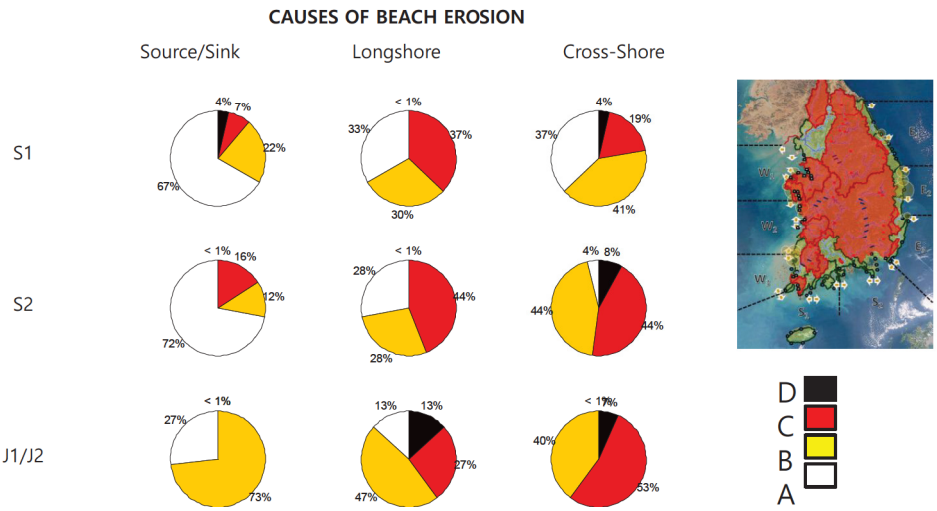
## 2.1 침식원인의 분류 및 분석

### 서해안 침식원인 분석




## 2.1 침식원인의 분류 및 분석

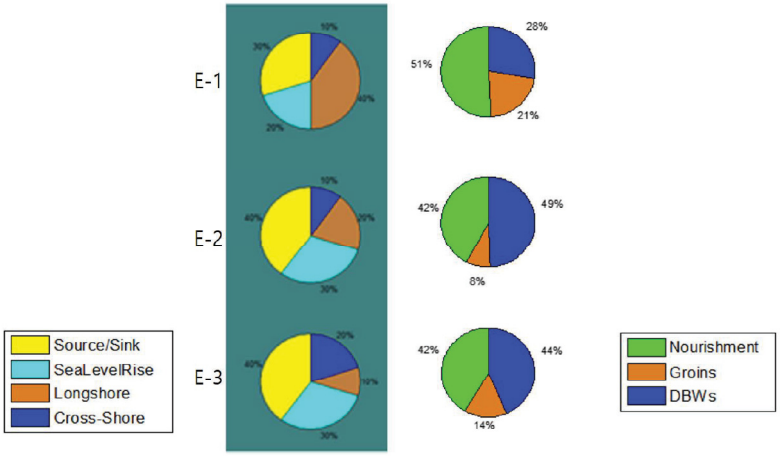
### 남해/제주 침식원인 분석



## 2.1 침식원인의 분류 및 분석

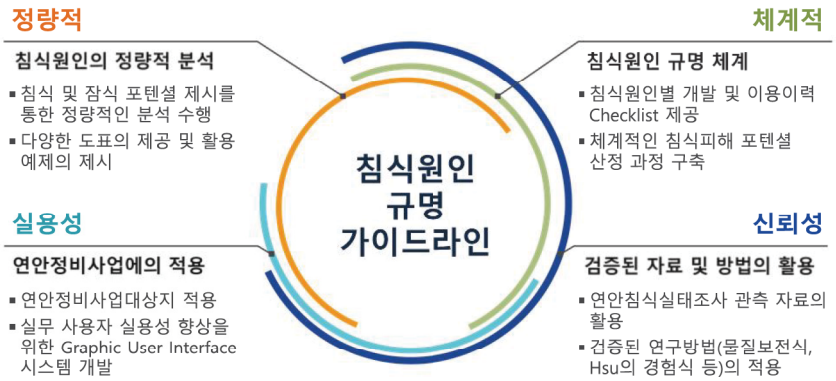
### 동해 원인대비 대응비교

- 동해안 광역표사계에 대하여 침식저감시설(길이단위로 비교)에 대한 침식 저감 대응 요소(표사수지, 연안표사, 횡단표사)의 비중 조사




## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

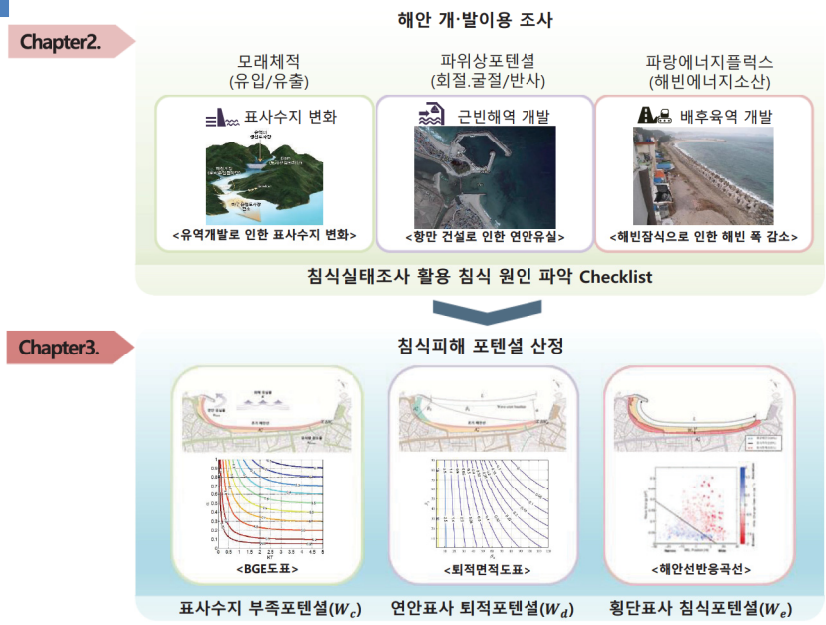
### 침식원인규명 가이드라인




"본 가이드북은 연안침식의 원인규명을 위해 필요한 개념, 조사·분석 방법, 규명 과정, 국내 적용 사례에 대한 안내서이다."

## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

### 침식원인규명 가이드라인 구성




## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

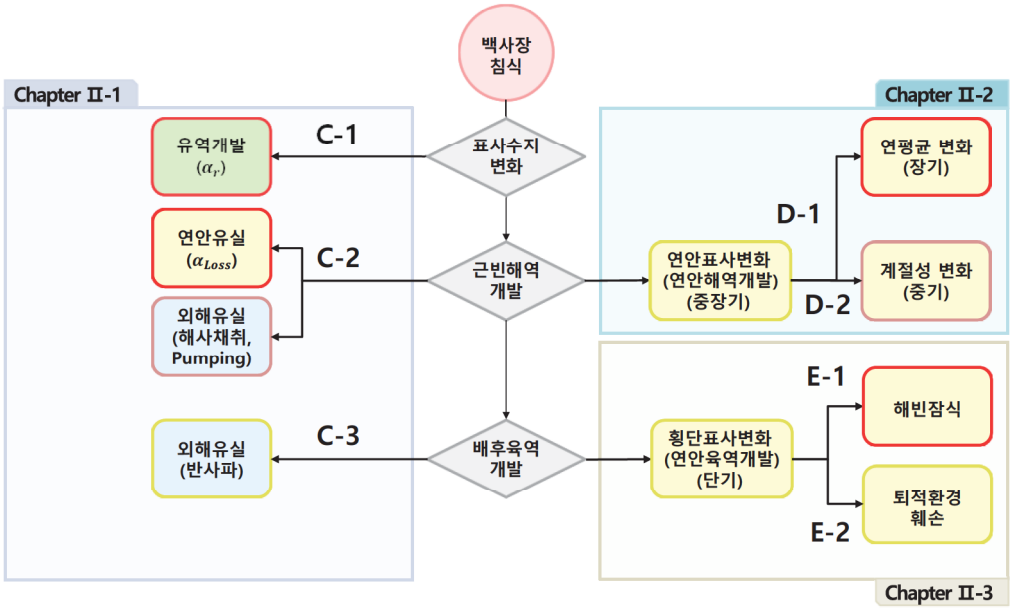
### 개발 및 이용 이력조사 Checklist 구축

**개발 및 이용 이력조사 Checklist(안)**

| 침식 원인 | 표사수지 변화 | | | 연안표사 변화 | | 횡단표사 변화 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 유역개발 | 연안유실 | 외해유실 | 연평균 변화 | 계절성 변화 | 배후육역개발 |
| 침식 유형 | ☐ Source 차단 (산림화 등)<br>☐ 댐/보 (유사량차단)<br>☐ 하천정비 (유사량제거) | ☐ 항만/어항<br>☐ 하구준설 | ☐ 사구훼손<br>☐ 잠제(군)<br>☐ 해사채취 | ☐ 항만구조물 (방파제/방사제)<br>☐ 파랑제어시설 (이안제/잠제) | ☐ 헤드랜드 유형<br>☐ 돌제/도류제 유형 | ☐ 주택잠식<br>☐ 해안도로/주차장<br>☐ 호안/고층빌딩 |
| 지표 | $W_c$ | | | $W_d$ | | $W_e$ |

## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

### 해안 개발 및 이용 이력에 따른 침식원인 분류




## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

### 침식원인 포텐셜 산정 - 표사수지 부족포텐셜

○ 유역이나 해역의 개발 그리고 해사채취는 표사계의 모래 유입과 유출의 변화를 초래하고 모래물질보전식으로부터 표사계 모래량(해빈육역면적)의 변화를 추정할 수 있음.

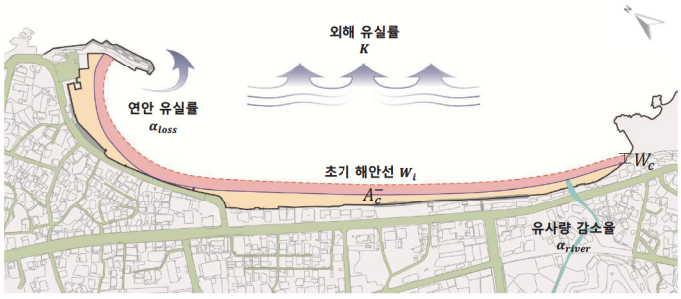
$$\frac{dV}{dt} = Q_r - Q_p + L_b(q_w - q_d) \qquad \frac{dA}{dt} = \frac{Q_r - Q_p}{D_s} - K(A - A_o)$$

○ 어항이나 항만으로 모래유실을 무시하고 만약 하천으로부터의 유사량이 현재보다 $\alpha$만큼 줄어든다면 아래 해석해가 성립함.

$$A(t) = (1-\alpha)A_i + \alpha A_i \exp(-Kt)$$

○ 여기서, $\alpha$는 하천유사량 감소율, $A_i$는 초기 해빈 육역면적 그리고 $K$는 외해로의 모래 유실률임. 위 식의 우변 첫 항은 유사량 감소에 따른 궁극적인 잔류면적이며 $A_c = \alpha A_i$가 **표사수지 부족포텐셜**로 정의됨(Lee and Lee, 2020).

○ 또한 표사수지 부족 포텐셜을 해안선 길이로 나누어 표사수지 침식포텐셜 해빈폭 $W_c$을 계산할 수 있음. $W_c = \frac{A_c}{L_c}$



## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

### 침식원인 포텐셜 산정 - 연안표사 퇴적포텐셜

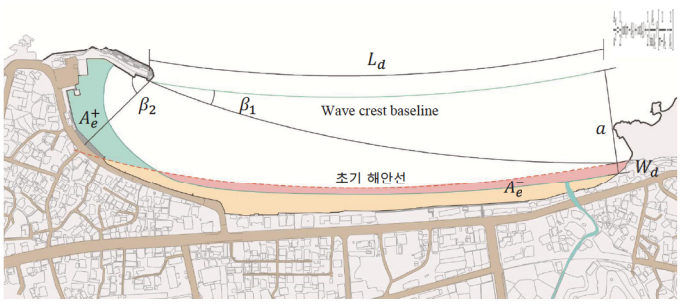
O 구조물 축조 등으로 인한 연안표사 이동은 평형해안선의 변화를 일으켜 해안의 침식을 일어남(이때, 침·퇴적 면적은 서로 같음). 연안표사로 인한 퇴적 면적은 Hsu et al.(1987)의 포물선형 평형해안선의 근사식을 활용하여 구할 수 있음.

$$R(\theta) = \frac{\beta_1}{\sin\beta_1}\frac{a}{\theta} \qquad \frac{A_d}{a^2} = \frac{1}{2}[\cot(\pi-\beta_2) + cot\beta_1] + \frac{1}{2}(\frac{\beta_1}{\sin\beta_1})^2\left[\frac{1}{\pi-\beta_2} - \frac{1}{\beta_1}\right]$$

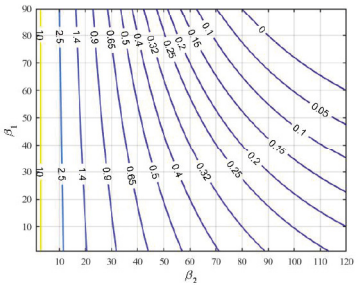
근사식: $\frac{A_d}{a^2} \cong \frac{28.8}{\beta_2} - 0.004\beta_1$ (unit : degree)

O 그리고 이를 활용하면, 우측 그림과 같은 도해표를 얻으며 이를 활용하여 침·퇴적 면적을 구할 수 있다. 이 면적을 **연안표사 퇴적포텐셜**이라 정의함.

O 퇴적 면적을 해안선 길이로 나누어 연안표사 퇴적포텐셜 해빈폭 $W_d$를 구할 수 있음. $W_d = \frac{A_d}{L_d}$




▼ 침식포텐셜 평가도구 : 무차원 도해표
(연안표사 퇴적포텐셜, $W_d = A_d/a^2$)



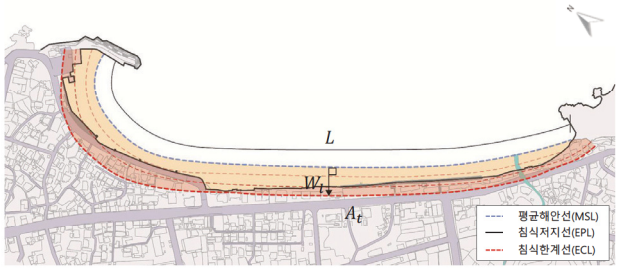

## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

### 침식원인 포텐셜 산정 - 횡단표사 침식포텐셜

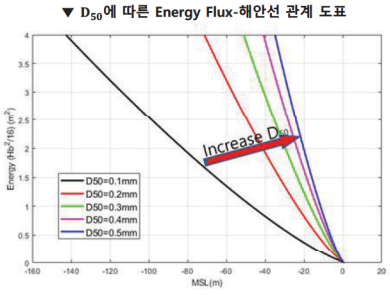
O Yates(2009)의 관측 결과와 침식실태조사의 해안선 관측 자료를 분석하여 입사 파랑에너지 플럭스에 따른 해안선의 후퇴에 대한 연구를 수행함. 아래 그림은 2차년도 연구 성과로서 중앙입경에 따라 고파랑 에너지플럭스에 의한 서로 다른 평형해빈단면의 후퇴폭을 제시하는 것이고 식은 에너지플럭스 $F_b$에 따른 MSL의 평형에 도달한 후퇴폭 $S_{eq}$이 됨.

$$S_{eq} = \frac{F_b - b}{a}$$

O 본 가이드라인에서는 30년 빈도의 파고에 대한 평형해빈단면의 후퇴폭을 횡단표사 침식포텐셜 해빈폭으로 정의한다. 그리고 그에 따른 침식 면적을 횡단표사 침식포텐셜로 정의함.




▼ $D_{50}$에 따른 Energy Flux-해안선 관계 도표



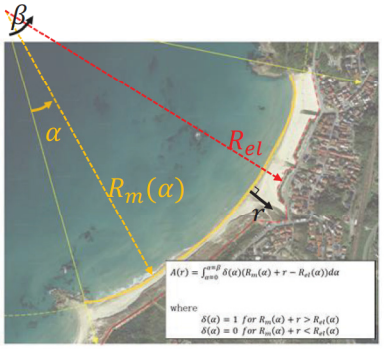
## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

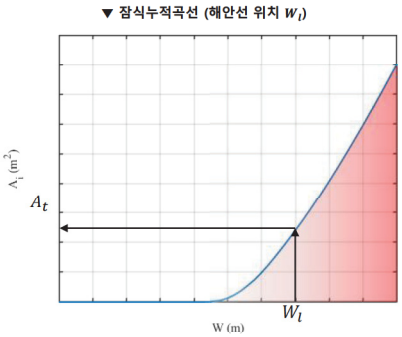
### 침식피해 포텐셜 산정 - 육역 잠식포텐셜 (잠식누적곡선)

○ 해안도로, 호안, 매립, 주택 등 해빈 잠식에 의하여 연안 침식의 피해로부터 보호하여 할 경계선을 침식저지선이라 하면 임의의 해안선을 기준으로 누적되는 침식저지선 내측의 표사계 총 면적에 대한 곡선을 구할 수 있으며 이를 **잠식누적곡선**이라고 함.

○ 잠식누적곡선이 얻어지면 침식으로 인하여 후퇴된 해안선의 위치 $W_l$에 따라 피해를 받는 면적 즉, 침식피해포텐셜 $A_t$를 쉽게 계산할 수 있다. 여기서, 누적곡선은 평균해안선으로부터 onshore 거리에 따라 침식해안정선($W_l$)까지 침범하는 면적을 누적한 곡선임.

○ 누적된 침식 면적을 해안선 길이로 나누어 침식피해 포텐셜 해빈폭 $W_t$이 계산됨. $W_t = \frac{A_t}{L_c}$



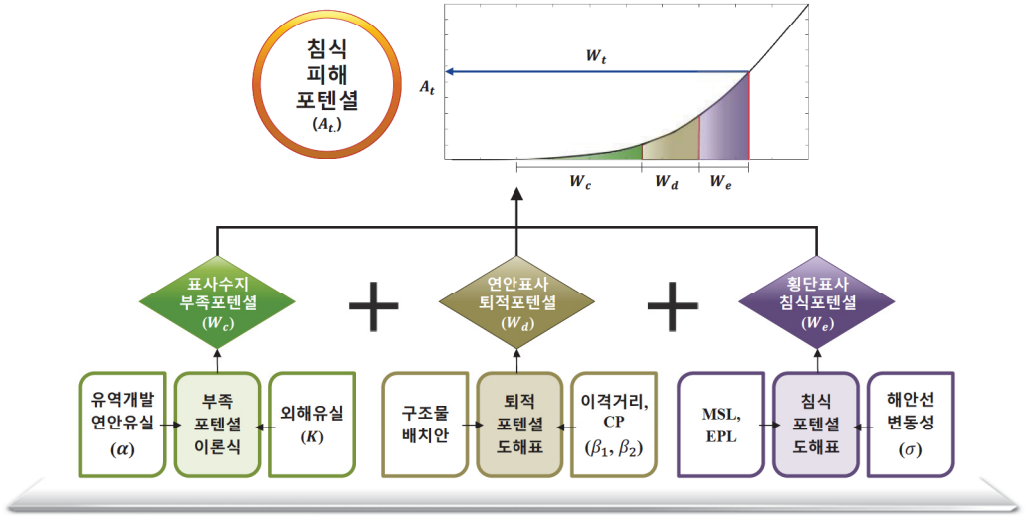




## 2.2 연안침식 원인규명 가이드라인

### 침식피해 포텐셜 산정

○ 침식피해 포텐셜($A_t$)은 육역 잠식포텐셜 산정에서 활용된 **누적곡선**을 활용

○ 따라서 침식피해포텐셜은 각각 표사수지 부족포텐셜, 연안표사 이동포텐셜의 해빈 폭과 침식한계폭의 합산($W_t$)으로 누적곡선을 통해 산정



## 2.3 실증해안(봉포 표사계)에의 적용

### 침식원인규명 실증 사례 – 봉포 표사계

표사수지 변화 ------→ 잠제(군)건설로 인한 외해유실

연안표사 변화 ------→ 천진항 방파제 건설로 인한 해안선 변화

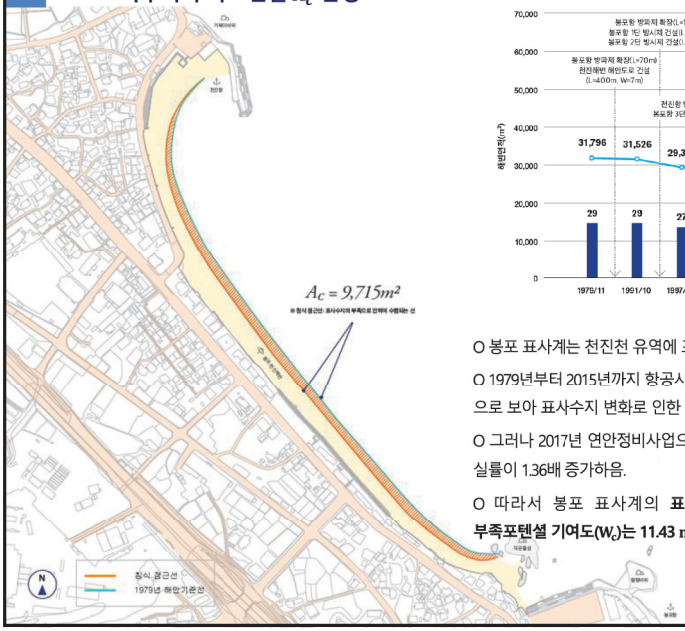
횡단표사 변화 ------→ 해안도로 / 주차장 건설로 인한 해빈폭 감소

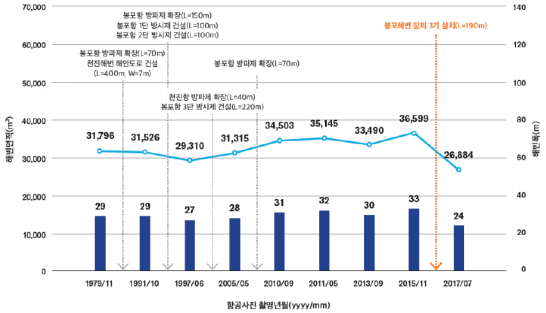
| 침식원인 | 표사수지 변화 | | | 연안표사 변화 | | 횡단표사 변화 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 유역개발 | 연안유실 | 외해유실 | 연평균 변화 | 계절성 변화 | 배후육역개발 |
| 침식유형 | ☐ Source 차단 (산림화 등)<br>☐ 댐/보 (유사량차단)<br>☐ 하천정비 (유사량제거) | ☐ 항만/어항<br>☐ 하구준설 | ☐ 사구훼손<br>☑ 잠제(군)<br>☐ 해사채취 | ☑ 항만구조물 (방파제/방사제)<br>☐ 파랑제어시설 (이안제/삼제) | ☐ 헤드랜드 유형<br>☐ 돌제/도류제 유형 | ☐ 주택잠식<br>☑ 해안도로/주차장<br>☐ 호안/고층빌딩 |
| 지표 | $W_c$ | | | $W_d$ | | $W_e$ |

## 2.3 실증해안(봉포 표사계)에의 적용

### 침식원인규명 실증 사례 – 봉포 표사계

**표사수지 부족포텐셜 $A_c$ 산정**




O 봉포 표사계는 천진천 유역에 포함되어 있음.

O 1979년부터 2015년까지 항공사진을 통한 해빈면적 분석결과 침.퇴적 면적이 유지되는것으로 보아 표사수지 변화로 인한 침식원인은 없는것으로 판단됨.

O 그러나 2017년 연안정비사업으로 건설된 남측잠제 3기가 해빈류 발생을 일으켜 모래유실률이 1.36배 증가하음.

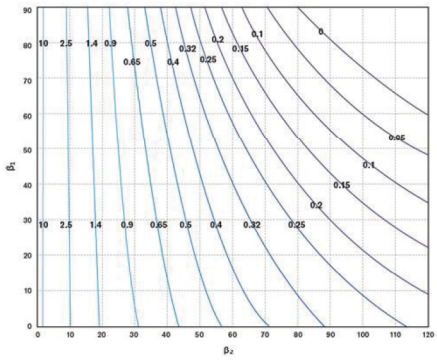
O 따라서 봉포 표사계의 **표사수지 부족포텐셜($A_c$)은 9,715 $m^2$**이고 **표사수지 부족포텐셜 기여도($W_c$)는 11.43 m**임.

## 2.3 실증해안(봉포 표사계)에의 적용

### 침식원인규명 실증 사례 – 봉포 표사계

**연안표사 퇴적포텐셜 $A_d$ 산정**




○ 봉포 표사계는 과거에 비하여 북측에는 퇴적이 일어난 반면 남측에는 일부 침식이 발생하였으며 이에따라 연안표사 변화로 인해 해안선 변화가 일어났음을 알 수 있음.

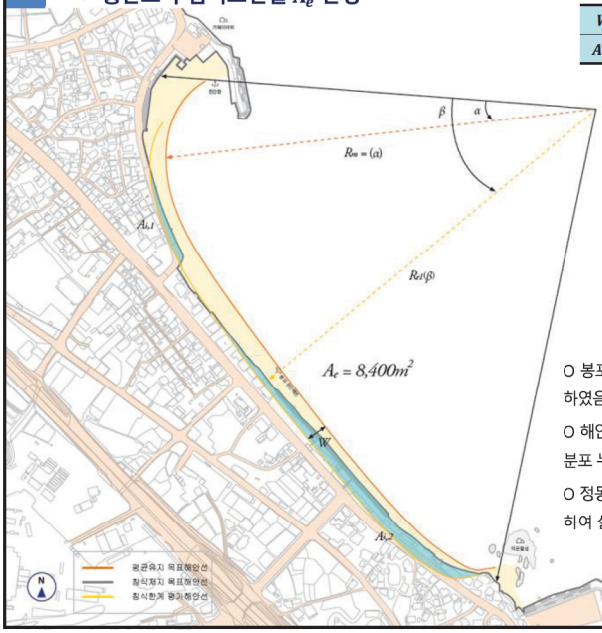
○ 천진항 북방파제는 초기 건설과 두번의 증축에 따른 총 110m 축조로 인한 $\beta_1$과 $\beta_2$는 각각 9.68°와 4.2°로 주정되며 부자원 포텐셜은 0.69를 얻음.

○ 따라서 **연안표사 퇴적포텐셜($A_d$)은 14,500 m²**이고 **연안표사 퇴적포텐셜 기여도($W_d$)는 침식발생길이($L_d$) 850 m로 나눈 17 m**임.

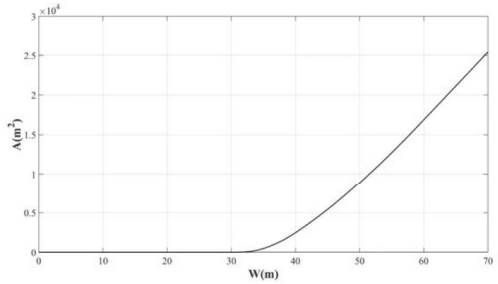
## 2.3 실증해안(봉포 표사계)에의 적용

### 침식원인규명 실증 사례 – 봉포 표사계

**횡단표사 침식포텐셜 $A_e$ 산정**




| $W\ (m)$ | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|
| $A_e\ (m^2)$ | 0 | 0 | 0 | 2,473 | 16,877 |




○ 봉포 표사계는 과거에 비해 해안도로, 주자장 등 인한 잠식으로 해빈폭이 감소하였음.

○ 해안선관측데이터를 통해 얻어진 해안선 변동 최대 **표준편차는 6.17** 이며 정규분포 누적곡선에서의 30년빈도 **표준편차는 3.74 m** 임.

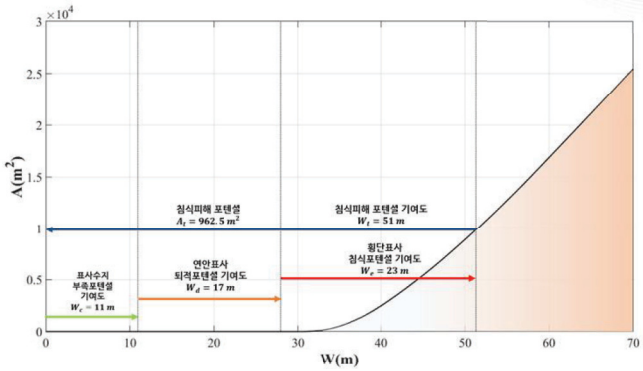
○ 정동진 표사계의 해안선 변동성 표준편차와 정규분포 30년 빈도 표준편차를 곱하여 설정된 횡단표사 침식포텐셜 기여도($W_e$)는 약 23 $m$임.

## 2.3 실증해안(봉포 표사계)에의 적용

### 침식원인규명 실증 사례 – 봉포 표사계

**침식피해 포텐셜 산정**

표사수지 부족포텐셜 기여도 $W_c = 11\ m$ + 연안표사 퇴적포텐셜 기여도 $W_d = 17\ m$ + 횡단표사 침식포텐셜 기여도 $W_e = 23\ m$ → 침식피해 포텐셜 (기여도) $A_t - 962.5\ m^2$ $(W_t = 51\ m)$




# 03

## 양빈 유형 및 배치설계 가이드

**3.1** 양빈 유형 및 양빈의 필요성
**3.2** 양빈공법 및 설계가이드 개요
**3.3** 양빈 평면배치 가이드라인
**3.4** 양빈 단면배치 가이드라인

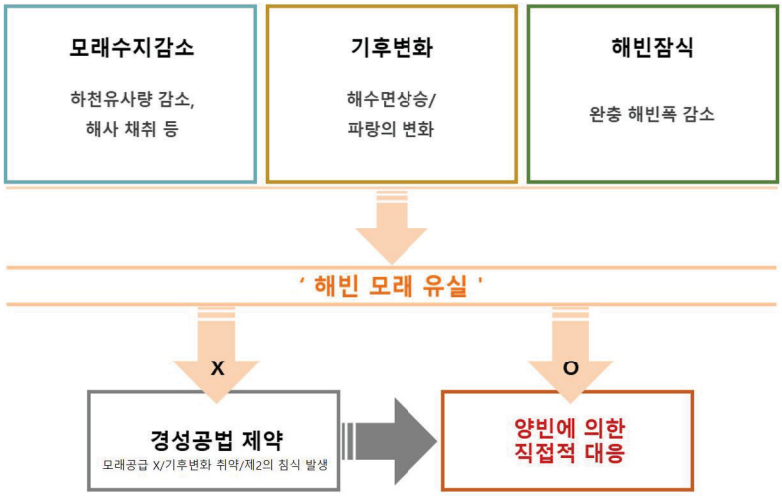
## 2.1 침식원인의 분류

### 양빈(모래채움)의 필요성

**양빈의 필요성**

O 모래잔류량의 지속적 감소와 기후변화로 인한 모래의 유실, 연안육역의 잠식 등에 의한 직접적이고 근본적인 해결 방안 부족

O 해빈 유지에 필요한 양만큼 지속적으로 해빈에 모래를 제공하는 양빈공법(모래채움)이 필요




## 3.2 양빈공법 및 설계 가이드 개요

### 양빈의 목적 및 종류

**양빈의 목적**

O 빈번한 침식으로부터 충분한 완충구간을 확보하여 **배후 시설 보호**

O 바닷가 생태에 **친화적인 모래환경**을 **유지**하여 생태 환경 보전

O 백사장의 질 개선과 충분한 공간을 확보하여 **해빈의 이용가치 증대**

**양빈의 목적별 분류**

O **방호(防護, Protection)** : 침식대비양빈(방전, 防前), 침식대응양빈(방후, 防後)

O **보전(保傳 , Prevention)** : 양적보전양빈(보양, 保量), 질적보전양빈(보질, 保質)

O **이용(利用, Utilization) :** 해빈레져양빈, 인공해변양빈(본 연구에서는 미고려)

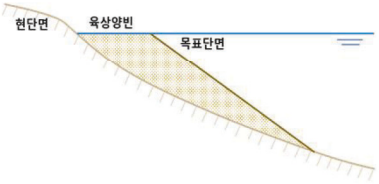


## 3.2 양빈공법 및 설계 가이드 개요

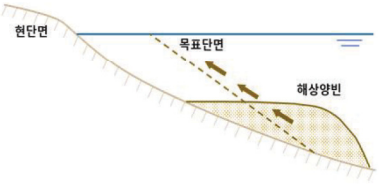
### 양빈의 유형 분류

○ **정적양빈** : 주로 외부모래자원의 인위적 공급을 통해 친환경적인 모래환경 유지하기 위한 목적으로 실시하는 양빈.

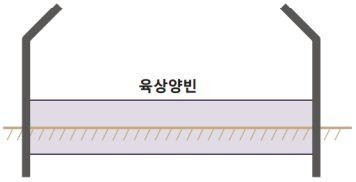
○ **동적양빈** : 자연스러운 표사이동 특성을 이용하여 좀 더 친환경적인 부분을 도모하는 양빈.



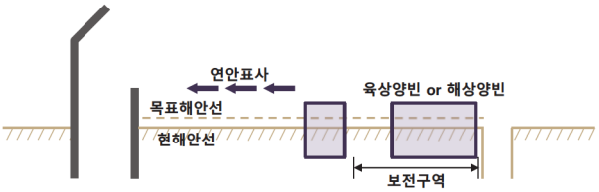

< 횡단표사 정적양빈 >




< 횡단표사 동적양빈 >



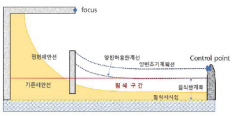
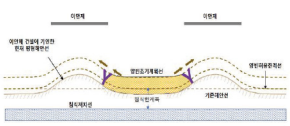
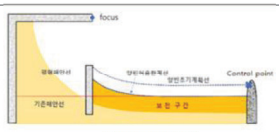
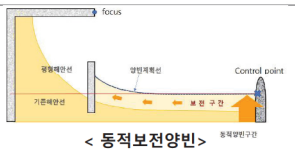
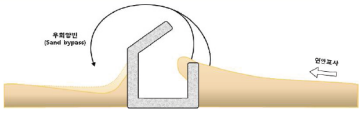
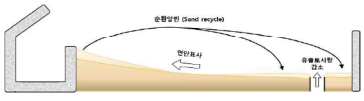

< 연안표사 정적양빈 >




< 연안표사 동적양빈 >

## 3.2 양빈공법 및 설계 가이드 개요

### 목적별 양빈 유형 분류

| 분류 | 배치 설계 | |
|---|---|---|
| 정적 대응 |  < 정적대응양빈 - 외곽방파제> |  < 정적대응양빈 - 이안제> |
| 침식 대비 |  < 정적대비양빈> |  < 동적대비양빈> |
| 양적 보전 |  < 정적보전양빈> |  < 동적보전양빈> |
| 질적 보전 |  < 질적보전양빈-우회양빈> |  < 질적보전양빈-순환양빈> |

## 3.2 양빈공법 및 설계 가이드 개요

### 양빈 설계 전략 및 과정

#### 양빈 설계 전략

O 방호, 보전 및 이용 측면에서 목표 설정 후 원래의 해빈 상태에 대한 철저한 분석을 통해 공학적, 경제적, 환경적 효과를 극대화 할 설계(안)이 완료되도록 **양빈 설계 전략(PSI)** 과정을 적용

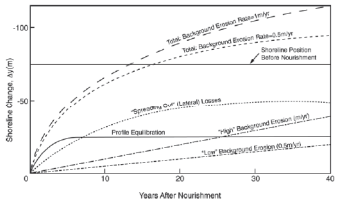



#### 양빈 설계 과정

O 안정과정에서의 유실, 할증과정에서의 유실, 파랑작용에의한 유실 등 3가지 양빈사 주요 유실 요소에 대한 시간적 변화 구분

O 양빈 설계 전략에 따른 세부적 양빈설계 검토

- Pre-process (input) : 목적설정, 방법선정, 평면배치설계, 모래분석
- Design (system) : 기존모래 분석, 평형해안선 설정, 외해모래유실율 계산
- Post-process(output) : 유실항목별 모래 감소율 계산, 양빈단면 변화분석 및 설계




< 양빈사 유실 요소에 대한 시간적 변화 모식도 >

## 3.3 양빈 평면배치 가이드라인

### 양빈 평면배치 설계

#### 양빈 배치 설계 적용 해안선

O 표사계 수지분석/ 고파랑 침식 특성 대변 : ①최적 양빈구간 설정 위한 표사수지로부터 결정되는 **평형해안선** ②30년 빈도 **침식한계선**

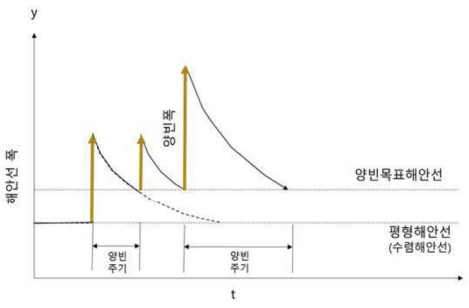
O 관리해안선 개념에 기초한 목표관리선 : ③**평균유지목표해안선** ④침식에 의한 피해를 허용하지 않는 **침식저지목표해안선**

O 목적에 따라 선정되는 양빈관리해안선 : ⑤양빈 후 시간적 후퇴를 감안한 **양빈초기계획선** ⑥해안선 후퇴 허용한계인 **양빈허용한계선**

- **침식대응** 침식저지목표해안선 ≤ 양빈허용한계선 - 침식한계선
- **침식대비**

  **정적대비양빈** : 침식저지목표해안선≤양빈초기해안선-침식한계선

  **동적대비양빈**: 침식저지목표해안선≤양빈허용한계선-침식한계선
- **양적보전** 평형해안선 ≤ 양빈허용한계선
- **질적보전** 정적평형해안선 ≤ 동적평형해안선
- **해빈레져** 평균유지목표해안선 ≤ 양빈허용한계선
- **인공해빈** 평형해안선 ≤ 양빈허용한계선

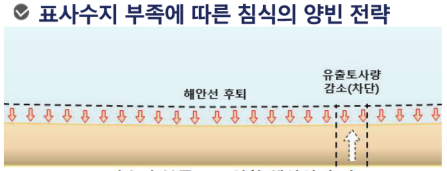



양빈목표해안선 설정 개념

## 3.3 양빈 평면배치 가이드라인

### 침식 원인별 양빈 평면배치 설계

**표사수지 부족에 따른 침식의 양빈 전략**

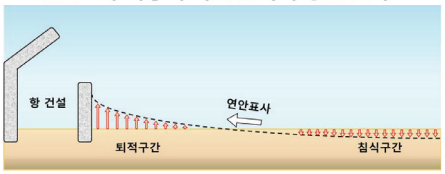



< 표사수지 부족으로 인한 해안선 후퇴 >

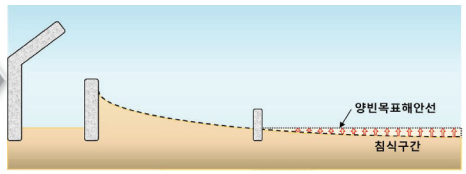



< 전 해변 정적양빈 >

**연안표사 이동에 따른 침식의 양빈 전략**

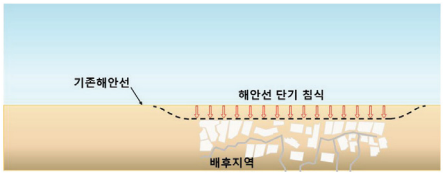



< 해상 개발로 인한 해안선 변형 >

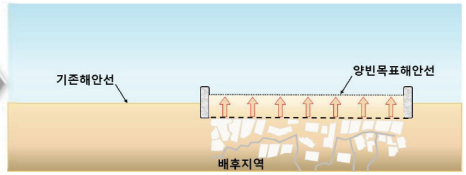



< 침식 구간에 대한 정적양빈(연안표사 제어시설 포함) >

**횡단표사 잠식에 따른 침식의 양빈 전략**




< 완층구간 훼손으로 인한 침식피해 >




< 잠식 구간 한정 정적양빈(Setback 권장) >

## 3.3 양빈 평면배치 가이드라인

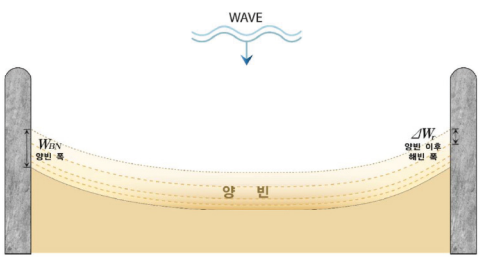
### 양빈사 유실예측 및 주기 설계

O 양빈은 지속적인 모래 유실의 발생으로 한번의 시행으로 해안선이 유지되지 않고 후퇴되는 공법으로서 외해 모래유실율($K$) 지속적인 모래 유실의 발생으로 한번의 시행으로 해안선이 유지되지 않고 후퇴됨.

**표사수지 변화에 의한 반감기**

O 표사수지 변화(외해 손실율)에 의한 반감기는 모래유실율($K$)에 따라서 아래와 같이 산정됨.

$$\tau_{0.5} = \frac{ln0.5}{K}$$

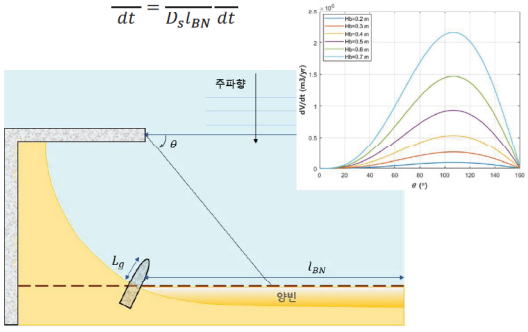



< 초기 양빈 후 침식 폭 산정 정의도 : 표사수지 >

**연안표사 변화에 의한 반감기**

O 연안표사 변화에 의한 양빈을 수행할 경우에는 방파제 부근과 유실속도가 서로 다르므로 양빈의 중앙에서의 유실속도가 평균이라고 가정하여 양빈후 시간당 유실율을 산정할 수 있음.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{D_s l_{BN}} \frac{dV}{dt}$$




< 양빈 유실량 산정 정의도 : 연안표사 >

# 3.4 양빈 단면설계 가이드라인

## 양빈사 분석

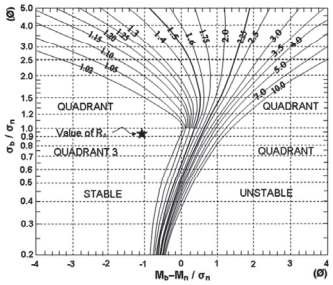
O 양빈사는 기존 모래 위에 포설하는 관계로 기존 모래에 비하여 양빈사의 이질감이 크면 양빈 후 모래 유실이 급격히 증가함.
O 따라서 모래 입경 특성을 파악하여 양빈사로서 얼마나 적절한 지 판단해야함.

### 입도분석

O 어느 해안의 표사현상을 명확히 파악하기 위해서는 입도조성, 형상, 비중, 공극률 등을 조사해야 함.

### 모래 할증율 계산

O James(1974)에 의한 Adjusted SPM(Shore Protection Manual)은 양빈사의 모래 입경이 기존 해빈의 모래 입경보다 가늘어서 횡단 표사가 우월하거나 동적 양빈과 같이 완전히 섞일 수 있는 환경에 적용할만한 할증율 계산법임.

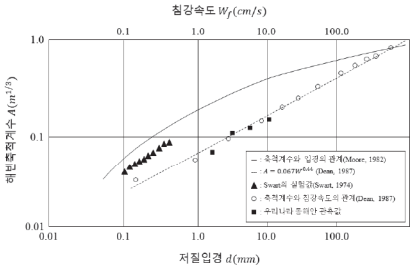



< 양빈사 할증율(James, 1974) >

### 해빈 축적 계수

O 해안의 침강속도를 이용하여 해빈축적계수 A를 산정하고 Dean(1987)의 평형해빈단면 개념을 이용한 양빈사 입경을 검토하여야 함.

$$A = 0.067 w_f^{0.41} \quad \text{and} \quad h = Ay^{2/3}$$




< 해빈축적계수 $A$와 저질침강속도 $w_f$의 관계 >

# 3.4 양빈 단면설계 가이드라인

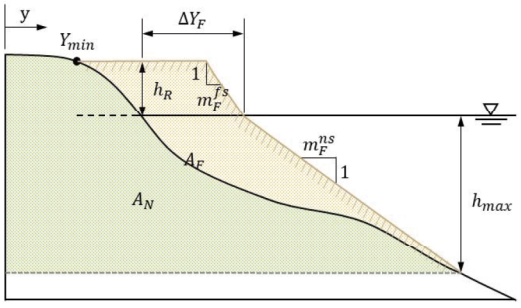
## 양빈의 단면설계

O 입경 분포와 해빈단면 특성에 따라 최소 50m로부터 최대 300m 간격의 기준점에 대하여 단면 설계를 수행하는 것이 바람직함. 단면 설계 요소는 다음 4가지 요소에 대하여 단면 설계를 실시함.

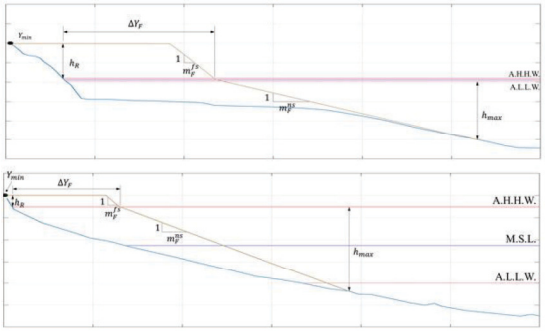
**단면 설계 요소 : 후빈고( $h_B$ ), 전빈 경사( $m_F^{fs}$ ), 근빈 경사( $m_F^{ns}$ ), 양빈 폭( $\Delta Y_F$ )**

O 요소가 결정되면 기준점별 단위폭당의 양빈량을 아래 수식을 이용하여 계산할 수 있음. 이때 해빈단 높이는 일정한 것으로 가정함.

$$\Delta A_F = (h_R + h_{F_{max}})(y_{sl} + \Delta Y_F - h_R m_F^{fs}) + \frac{(h_R^2 + 2h_{F_{max}} h_R) m_F^{fs}}{2} + \frac{h_{F_{max}}^2 m_F^{ns}}{2}$$




< 양빈단면 설계 요소 개념도 >




< 양빈단면 해변 적용 예 – (위)강릉 경포해변 (아래) 태안군 꽃지해변>

## 3.4 양빈 단면설계 가이드라인

### 양빈의 단면설계

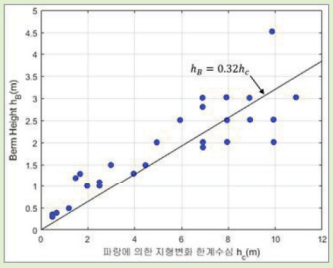
**후빈고**

해빈단 높이 산정방법으로는 Sunamura(1975)의 관계식에 주기특성을 고려한 아래의 Takeda and Sunamura(1983)의 방법을 들 수 있음(양빈지침서, 2005).

$$h_B = 0.125\tilde{H}_b^{5}(gT^2)^{3/8} \text{ for } 3.5D_{50}/\tilde{H}_b \le \tilde{H}_b/gT^2 \le 10D_{50}/\tilde{H}_b$$

파랑조건을 사용하지 않는 방법으로는 파랑에 의한 모래이동한계수심으로 산출하는 아래 식을 활용함.

$$h_B = 0.32h_c$$




< 해빈단 높이와 모래이동한계수심의 관계>

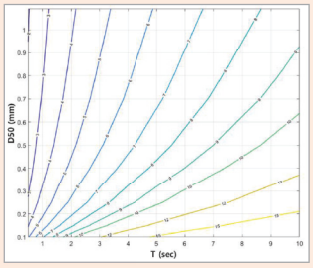
**전빈경사**

파위상포텐셜 개념을 적용한 전빈에서의 평형해빈 단면 식을 활용하여 양빈 단면설계시 전빈경사 산정을 할 수 있음.

양빈 전빈경사는 다음과 같이 파주기 와 전빈에서의 해빈축척계수로 산정할 수 있음.

$$m_F^{fs} = \frac{dy}{dh} = \frac{3\sigma}{2k\sqrt{g}A^{3/2}} = \frac{3C_u}{2\sqrt{g}A^{3/2}} = \frac{0.8647}{A^{3/4}}\sqrt{T}$$

양빈 전빈경사 산정식을 통해 아래와 그림과 같이 입경과 주기에 따른 양빈 전빈경사 도표를 제시함.




< 파주기와 중앙입경에 따른 전빈경사>

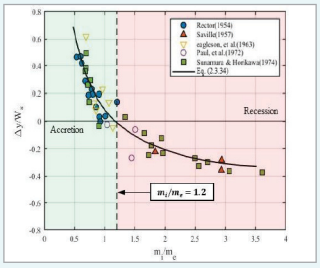
**근빈경사**

직선적인 양빈 경사로 인하여 평형해빈단면으로 변화하면서 생기는 해안선 변화는 다음과 같음.

$$\Delta y = \left(\frac{3m_F^{ns}}{5m_e} - \frac{1}{2}\right)W_*$$

위의 식을 활용하여, 평형해빈단면으로 변환하여도 해안선 측면에서 변화가 없는 양빈 초기 근빈경사 조건은 아래와 같이 산정됨.

$$m_F^{ns} = \frac{5}{6}\frac{W_*}{h_*} = \frac{5}{6}\frac{W_*^{1/3}}{A} = \frac{5}{6}\frac{\sqrt{h_*}}{A^{3/2}}$$




< 양빈경사와 평형해빈경사에 따른 유형분류>

# 04

## 경성과 연성의 비용분석

**4.1** 분석 방법 개요
**4.2** 경성 수중방파제 비용 분석
**4.3** 연성 양빈 비용 분석
**4.4** 비교 분석

# 4.1 분석 방법 개요

## 전제 조건

O 연성과 경성 모두 평균목표해안선과 목표침식저지선의 유지

O 생애주기동안 경성공법인 수중방파제 전달률 유지로 침식저감 기능 유지

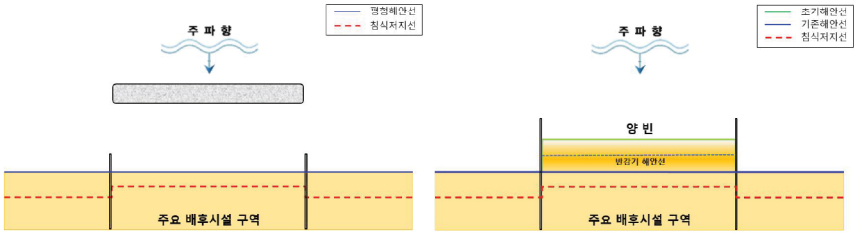
O 양빈사 유실은 외해모래유실만 고려(양빈사 함수율, 할증률, 그리고 연안표사에 의한 평형화 무시)

## 양빈공법과 경성공법의 비용 분석

O 경성공법의 비용 $C_h$(연평균치)와 양빈공법 비용 $C_s$(연평균치)를 서로 비교하여 비용 분석을 수행함.

O 공법의 시공 및 기능 그리고 유지관리 측면에서의 뚜렷한 차별성으로 인하여 양 공법의 침식저지선(red dashline)이 아래와 같이 동일하도록 하는 재해관리 기능상 동일한 조건에서 경제성(시공상 요구되는 비용 발생 측면)을 상호비교 평가함.

O 상호 비교한 결과, 잠제의 형태에 따라 그리고 해빈의 침식한계폭에 따라 다르지만 보조구조물(돌제, 전빈이안제, 지오튜브 등)에 의한 모래유실율 K의 제어에 따라 연성공법이 비용 측면에서 유리할 수도 있는 것으로 평가됨.




< 주요 배후시설 보호를 위한 공법별 경제성 평가 (좌)경성공법 (우)양빈공법 >

# 4.2 경성 수중방파제 비용(Cost)분석

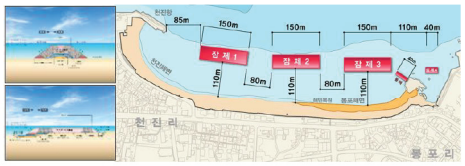
## 경성공법 비용 산정

### 경성공법의 시공비용 산정식

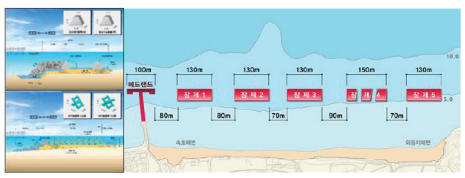
O 경성공법의 비용 $C_h$(연평균치)는 아래와 같이 경성공법 시공비용(구조물길이×길이당시공단가)에 구조물생애주기 $T_L$ 나눠서 산정

O 국내 연안정비사업 대상지역인 강원 고성군 봉포와 속초해수욕장의 잠제 T.T.P 공법에 대한 단위길이당 비용은 아래와 같음.

$$C_h = f(L_h, c_h, T_h) = \frac{L_h \times c_h}{T_L}$$




< 봉포 연안정비사업 평면 및 잠제 단면도 >




< 속초 연안정비사업 평면 및 잠제 단면도 >

| 구 분 | 설계길이 | 총비용 (백만원) | $c_h$ 단위길이당 비용 (백만원) | $T_L$ 구조물생애주기(yr) | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|
| 봉포-잠제1기 | 150 m | 5,300 | 35.33 | 50 | T.T.P 12.5톤급 |
| 봉포-잠제2기 | 150 m | 5,360 | 35.73 | | T.T.P 12.5톤급 |
| 봉포-잠제3기 | 150 m | 5,212 | 34.75 | | T.T.P 12.5톤급 |
| 평균 사업비 | | 5,291 | 35.27 | | |
| 속초-잠제1기 | 130 m | 3,960 | 30.46 | 50 | T.T.P+콘크리트블록 복합형 |
| 속초-잠제2기 | 130 m | 3,912 | 30.09 | | T.T.P+콘크리트블록 복합형 |
| 속초-잠제3기 | 130 m | 3,954 | 30.42 | | T.T.P+콘크리트블록 복합형 |
| 속초-잠제5기 | 130 m | 4,146 | 31.89 | | T.T.P+콘크리트블록 복합형 |
| 평균 사업비 | | 3,993 | 30.72 | | |
| 속초 잠제4기 | 150 m | 2,808 | 18.72 | 50 | 다기능 블록 설치 |
| 평균 사업비 | | 2,808 | 18.72 | | |

※ 해양수산부(2015), 강원 고성군 봉포지구 연안정비사업 기본 및 실시설계용역 보고서
해양수산부(2014), 강원도 속초해수욕장 연안정비사업 기본 및 실시설계용역 보고서

## 4.3 연성 양빈의 비용(Cost)분석

### 양빈공법 비용 산정

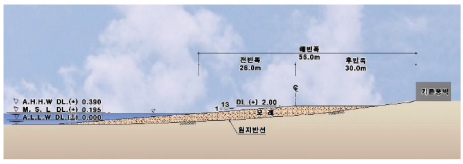
#### 양빈공법의 시공비용 산정식

O 양빈공법의 비용 $C_s$(연평균치)는 양빈 시공비용(양빈체적×양빈시공단가)에 반감기 $\tau_{0.5}$를 곱하여 아래와 같이 산정

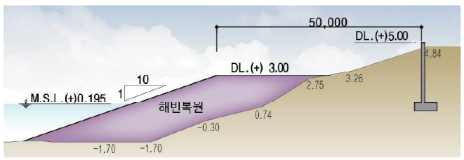
O 여기서 양빈시공단가는 양빈사 구입 단가와 양빈시공 비용을 합한 값으로 양빈방법에 따라 차등 책정됨.

O 국내 연안정비사업 대상지역인 강원 고성군 봉포와 속초시 속초해수욕장의 양빈 공법에 대한 시공단가의 산정 내역은 아래와 같음.

$$C_s = f(V_s, c_s, \tau_{0.5}) = \frac{V_s \times c_s}{\tau_{0.5}}$$



< 봉포 연안정비사업 해빈복원 단면도 >




< 속초 연안정비사업 해빈복원 단면도 >

| 구 분 | $W_{30}$ 30년 빈도 침식한계폭 | $D_s$ 표사이동 수직거리 | 설계 | | 비용 (백만) | $c_s$ 단위 당 비용(원) | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 봉포-해빈복원 | 13.72 m | 11.6 m | 49,766 $m^3$ | 기초굴착토 유용 | 289 | 5,807 | 해빈폭 56.0 m 전빈구배 1:13 |
| 속초-해빈복원 (1단계) | 20.16 m | 11.4 m | 68,108 $m^3$ | 기초굴착토 57,108 $m^3$ | - | - | 해빈폭 50m 전빈경사 1:10 |
| | | | | 신수로 준설모래 11,000 $m^3$ | 86 | 7,818 | |
| 속초-해빈복원 (2단계) | | | 42,033 $m^3$ | 기초굴착토 유용 | - | - | |
| 총사업비 | | | | | 187.5 | 6,813 | |

※ 해양수산부(2015), 강원 고성군 봉포지구 연안정비사업 기본 및 실시설계용역 보고서
해양수산부(2014), 강원도 속초해수욕장 연안정비사업 기본 및 실시설계용역 보고서

## 4.4 비교 분석

#### 봉포 및 속초 해수욕장 수중방파제에 대한 적용

O 상호 비교한 결과, 잠제의 형태에 따라 그리고 해빈의 침식한계폭에 따라 다르지만 모래유실율 K의 제어에 따라 연성공법이 비용 측면에서 유리할 수도 있는 것으로 평가됨.

| 구분 | 경성공법 (잠제 150m 단위) | | 양빈공법 (잠제 150m 단위) | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|
| 봉포해변 (T.T.P) | 시공비용 | 5,291 백만원 | 시공비용 | 2,745 백만원 | $C_h < C_s$ |
| | 연평균비용 | 106 백만원 | 연평균비용 | 137 백만원 | |
| 속초해변 (T.T.P+콘크리트블록 복합형) | 시공비용 | 4,608 백만원 | 시공비용 | 5,336 백만원 | $C_h < C_s$ |
| | 연평균비용 | 92 백만원 | 연평균비용 | 267 백만원 | |
| 속초해변 (다기능 블록 설치) | 시공비용 | 2,808 백만원 | 시공비용 | 5,336 백만원 | $C_h < C_s$ |
| | 연평균비용 | 56 백만원 | 연평균비용 | 267 백만원 | |

※경성공법 시공비용은 50년 생애주기 / 양빈공법은 반감기 적용

#### 외해모래유실율의 개선 방안

O 양빈의 비용은 양빈반감기(외해모래유실율)에 의하여 크게 좌우된다.

O 외해모래유실은 횡단표사유실과 연안표사유실로 구분되며, 횡단표사 유실은 단면설계를 철저히 따르는 것을 전제로 비용산출이 되었으므로 이를 따르지 않는 경우 경성과 비교하여 반감기가 줄어들어 효율성이 크게 저하될 수 있다. 또한 양빈사 모래입경 조립화로 개선될 수 있으며 또한 수심이 낮은 전빈에서의 월파허용 이안제 또는 지오튜브로 효과적으로 제어할 수 있다.

O 평면배치상에서 부분적으로 양빈이 이루어지는 경우 연안표사유실은 양빈영역 양단에 돌출길이가 길지않은 돌제나 방사제 등을 두어 연안표사에 의한 유실을 크게 개선할 수 있다.

# 05

## 결론

### 6 맺음 말

- 동해안의 경성화가 아직 유럽, 일본 등과 비교하여 덜 진행된 편이지만 딱히 연성화 공법이 기술적, 사회적, 제도적으로 자리를 잡지 못하고 있는 우리나라의 여건을 감안하면 우려되는 바가 큽니다.
- 일방적인 경성화는 지향해야겠지만 양빈의 효율성을 높이려면 해안구조물에 의한 표사이동제어로 양빈 잔류율(반감기)을 높이는 연성 및 최소한의 경성 구조물과의 결합 방법은 필요한 것으로 판단됩니다.
- 친환경적인 요인 뿐만이 아니라 미래 기후변화에 대한 장기적 대응 측면에서 연성화 전략 수립이 시급한 시점이며 이에 대한 기술적, 사회적, 제도적 기반을 구축하기 위한 법.제도의 보완, 조사 및 모니터링, 연구 활성화를 위한 관계기관 및 전문가 집단의 특별한 조치가 필요합니다.
- 기술적으로는 목표해안선 유지를 위한 연성공법의 가이드라인 수립과 이에 따른 효율 및 비용 분석, 그리고 모니터링 등에 의한 관리 체계 수립이 필요합니다.
- BSMC(Beach&Shore Management Center)에서는 설명드린 바와 같이 이를 위한 실증 기반 기술이 수립되고 있으며 이러한 정량적, 체계적 기술 진전에 준하여 법.제도, 그리고 사회 인식 전환을 위한 다양한 교육 프로그램 또는 홍보 활동이 동반되기를 기대합니다.


감사합니다

# 2020년도 한국해양공학회 추계학술대회

## 기획세션

# 해양쓰레기 수거선 개발 연구

황선규 · 윤인창 · 김재훈(주식회사 화인)

최근 우리나라는 1인 가구 증가, 간편식 시장 확산 등으로 플라스틱 사용량이 전 세계 최고 수준이다. 유럽 플라스틱 및 고무산업 제조자협회에서 전 세계 63개국을 대상으로 플라스틱 사용량 등을 추정한 결과에 따르면 우리나라는 63개국 중 벨기에 다음으로 1인당 플라스틱 사용량이 많은 것으로 나타나고 있다. 개수 기준으로 플라스틱 58.1%, 스티로폼 12.6% 등 플라스틱류가 70% 이상을 차지하는 것으로 나타난다.(외국기인 쓰레기는 2.6%로 예년의 5%보다 약간 낮은 수준.) 무게 기준으로는 플라스틱 39.2%, 나무 20.9%, 스티로폼 19.8% 순으로 높은 비율을 차시했고, 부피는 스티로폼 38.5%, 플라스틱 34.9%, 나무 11.0%였음. 개수 결과와 마찬가지로 스티로폼을 포함한 플라스틱류가 59%로 무게에서도 가장 높은 비중차지하고 있다. [17년도 해양쓰레기 상위 10위 항목] 가장 많이 발견된 쓰레기는 밧줄/로프(9.9%, 2.5~50cm 6.5% + 50cm 이상 3.4%), 각종 뚜껑(9.1%), 플라스틱 음료수병(8.0%), 스티로폼 부표 (2.5~50 cm)(6.6%), 플라스틱 기타(5.9%), 비닐봉투(5.8%) 등이었다.

해양쓰레기는 근본적으로 육지의 쓰레기와 다르지 않고, 사람이 살면서 생긴 모든 부산물이 바다로 들어가 못쓰게 되면, 그것이 곧 해양쓰레기디ㅏ. 육지에서 바다로 들어갔건, 바다에서 버려졌건 모든 물건, 도구, 구조물 등이 해양쓰레기가 될 수 있고 그 중에서 주로 플라스틱류에 관점에서 접근하였다.

해양쓰레기의 원인 중 육상기인과 해상기인으로 나누었고, 본 연구에서 육상과 해상을 나누어 수거하는 방안으로 나누어 고려하였다.

: [육상] 육상에서 발생하는 쓰레기들이 십중호우, 폭우, 홍수 때 하천, 강을 통해 바다로 들어가 발생하는 경우 및 해변에 출입하는 관광객이나 연안에 사는 주민들의 쓰레기 방치 또는 무단투기로 인해 발생하는 경우.

: [해상] 어업, 낚시활동 관련 행위(레저용 낚시행위 포함)로 부터 발생하는 경우 및 여객선이나 상선 등 선박의 운항이나 해양시설에서 발생하는 경우.

해양쓰레기는 일단 유입되면 바로 빠르게 확산될 뿐만 아니라, 15,000km에 이르는 전국 해안선을 따라 광범위하게 발생하고 있어 적기에 전체수거량을 수거하는데 한계가 있다.

: 육상기인(67%) 쓰레기가 해상기인(33%)보다 많은 비중을 차지하는 것으로 나타나 바다로 모여들기 전 육상에서부터 발생량을 줄이고 유입원인을 차단하는 것이 효율이 적인 해양쓰레기 문제해결 방법으로 분석된다.

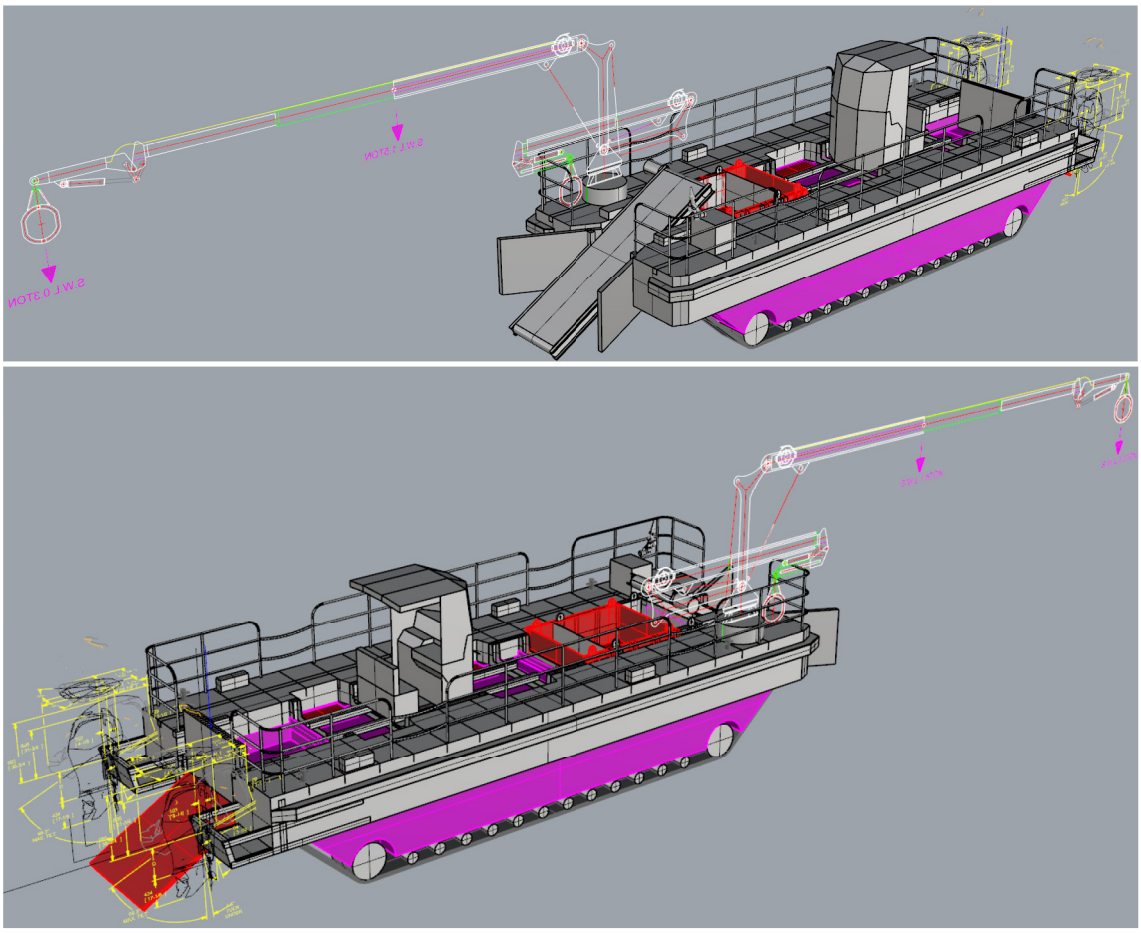
우리는 이러한 다양한 조건에서 모두 활용할 수 있도록 해상접근형 및 육상접근형에 대한 수륙양용선박으로 해결하고자 하였다.

대부분 수작업으로 수거가 이용되거나 간단한 장치를 이용하던 것을 all in one(해상용 + 육상용) 교체식 수거장치 및 흡입기를 활용하고자 하였다.

이러한 신개념의 기구적 장치를 활용하여 해양쓰레기 중 재활용 가능 품들로 인한 수익성과 활용 보급서비스 비즈니스 모델을 구상하였다. 이를 보다 현실화 하기 위해 지자체・민간기업에서 기존에서 설치되어진 바지선을 임대하여 이동형 컨테이너를 설치하고 재활용선별 사업 가능하도록 구상 하였다.

접근이 어려운 해안에 해양쓰레기 수거 인력 및 기존 장비의 투입시 사고 위험이 매우 높아 효과적인 안전관리 대책 마련이 필요하며, 국내의 접근이 어려운 해안의 해양쓰레기 수거 기술 개발은 선무한 상황을 해결할 수 있을 것으로 본다. 본 기술의 활용 및 효율성을 높이기 위하여 관련 내역 사업(수거지원-수거장비-수거처리) 간 협의체 구성으로 성공적 실증실현을 목표로 하고 있다.

해양쓰레기 수거 및 선별 프로세스 산업의 스마트공장 구축용 레퍼런스 기술 관련 글로벌 표준(IEC/ISO) 부합화 및 표준연계 방안 제시 및 검증기술마련하는데 참고로서 활용이 가능하고, 해수부에서 정책적으로 추진 중인 대표 수거-처리시스템, 데모수거시스템, 업종별 수직형 통합패키지 및 해양쓰레기 수거 데이터 공동 활용 플랫폼 등과 연계하여 상시홍보 및 확산전략 수립, 실행 가능할 것이다.



## 후 기

본 연구는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 나노버블을 이용한 해안쓰레기 세척 기술 연구

김보민 · 최문석 · 박찬규(한국산업기술시험원)

삼면이 바다인 우리나라 특성상 긴 해안선을 따라 쓰레기 수거장비 및 인력 접근이 어려운 지역에 해양쓰레기가 방치되고 있다. 국내 연안의 대형 해양쓰레기는 물론 미세플라스틱의 오염수준이 세계적으로 가장 높은 수준을 보이고 있어 해양쓰레기의 적절한 수거를 위한 기술이 필요하다. 하지만 적절한 쓰레기수거 기술이 개발되어도 해양쓰레기에 염분 및 이물질 부착 등으로 오염도가 높기 때문에 처분 단계에서의 적절한 처리가 이루어지지 않는다면 해양쓰레기 처리 및 재활용이 제한적으로 이루어질 수 있다. 효과적으로 해양쓰레기를 처리하기 위한 전처리를 포함한 친환경 처리 공정 구축으로 해양쓰레기 처리 지연에 따른 환경오염을 줄이고 처리비용을 절감할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 그림 1과 같이 나노버블을 사용한 해양쓰레기 전처리 시스템을 구축하여 해양쓰레기 표면의 염분을 제거한다. 또한, 나노버블이 해양쓰레기 표면의 염분 제거에 미치는 영향을 비교 분석하여 해양쓰레기 전처리 시스템의 최적 운전 조건을 도출한다.

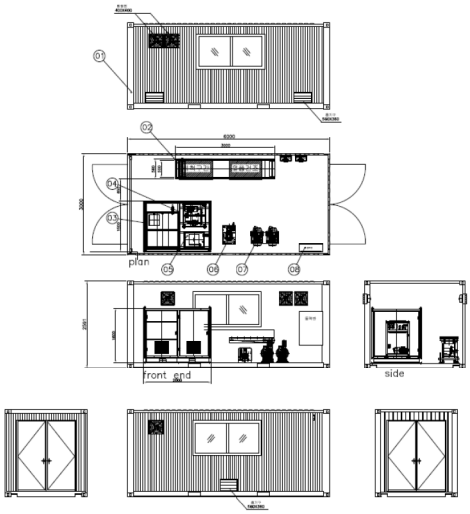



그림1. 컨테이너 내장형 해안쓰레기 세척설비

## 후 기

본 연구는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 해양쓰레기 선별선 내 인공지능 적용 선별 프로세스

한봉석 · 박상재 · 황미섭 · 한영수(앤에이치씨)

해양 쓰레기는 시 · 공간적으로 수거 여건이 열악하고, 염분 및 이물질 부착 등으로 오염도가 높아 폐자원으로서 가치가 낮아 시장기능에 의존한 처리에 한계가 있다. 또한 해양쓰레기의 고유 특성 때문에 전용 처리시설이 요구되나 민간처리업체의 자발적 시장 진입이 어려운 상황이며, 재활용 역시 높은 전처리 비용과 수요 부족으로 인하여 폐어망 일부, 스티로폼 부표, 플라스틱 김발장 등 매우 제한적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 무작위로 수거된 해양쓰레기를 재활용 쓰레기와 소각해야 하는 폐기물로 선별하는 프로세스에 대해 연구하였다. 그림1과 같이 영상 인식을 2D와 3D 동합 비전 시스템과 재활용/소각용을 구분하기 위한 딥러닝 선별 알고리즘, 재활용품 Pickup을 위한 델타로봇, 재활용품 압축을 위한 압축 시스템으로 구성하여, 효율적으로 선별하도록 한다.

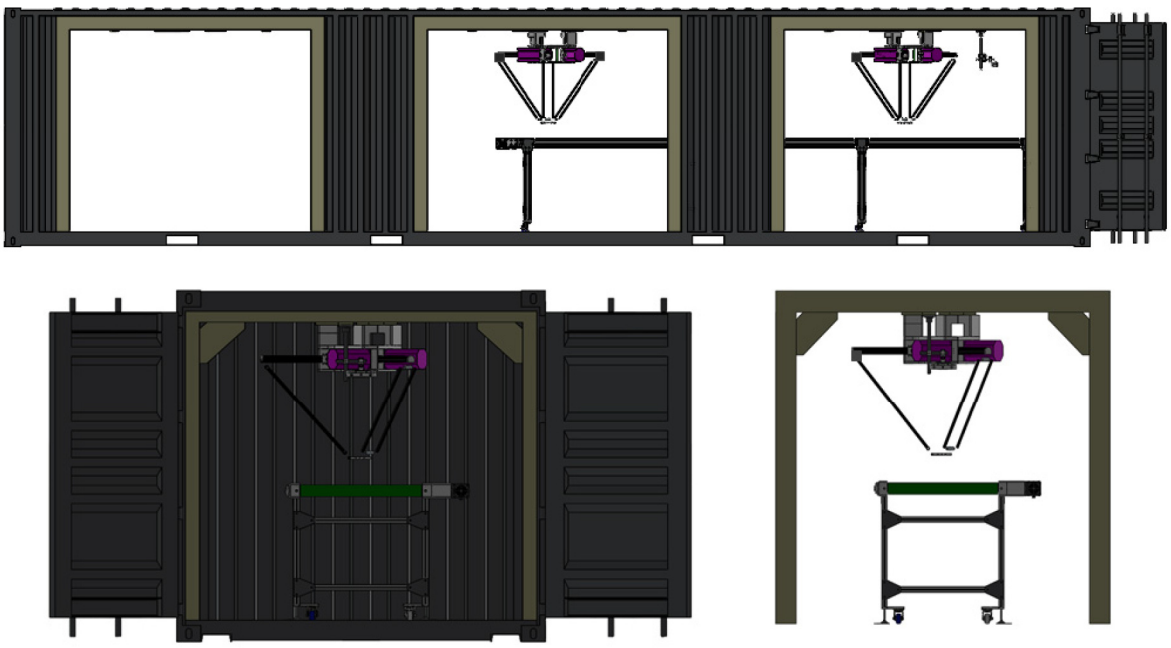


그림1. 컨테이너 내장형 해안쓰레기 인공지능 적용 선별 시스템

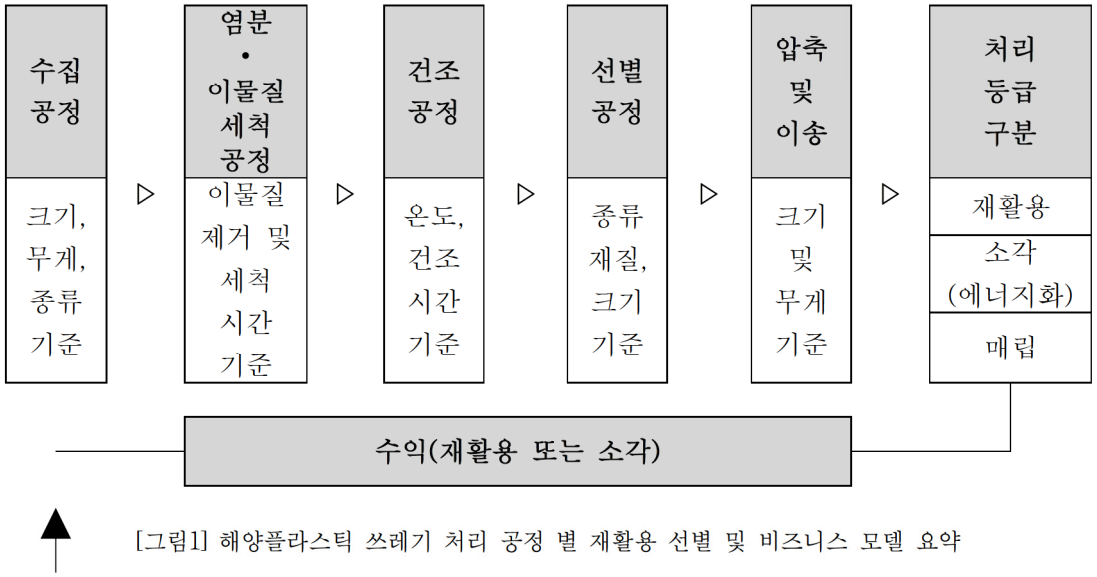
## 후 기

본 연구는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 해양플라스틱쓰레기 재활용을 위한 처리공정기술 및 재활용방안

이주형 · 서상욱(한국건설생활환경시험연구원)

최근 플라스틱 사용량의 급증으로 발생되는 해양플라스틱쓰레기에 대한 관심이 증가하고 있으며 국제사회에서도 해양 플라스틱쓰레기 저감을 위한 노력을 하고 있는 상황이다.
국내는 특히 양식장 및 수거가 어려운 도서지역의 해양쓰레기의 심각성은 인식하고 있으나 기존 정부 및 지자체 예산지원을 통한 비영리지방단체 또는 협회 등의 수거와 위탁처리방식으로는 한계가 있는 상황이다. 또한 해변 및 갯벌 등의 접근이 어려운 해양쓰레기 수거하기 위한 국내기술개발이 필요하며 본 연구는 해양플라스틱쓰레기 처리공정기술에 대한 조사와 재활용률을 높이기 위해 해양 쓰레기의 수집 · 염분과 이물질 제거 · 자동선별 기준을 마련하고 효율적인 쓰레기 전처리 및 자동선별시스템을 통한 처리비용을 절감함으로써 현 공공 주도의 해양플라스틱쓰레기 처리의 한계점을 극복하고 민간주도형 해양플라스틱쓰레기 자원순환화 자립 비니지스모델를 도출하는 연구이다




[그림1] 해양플라스틱 쓰레기 처리 공정 별 재활용 선별 및 비즈니스 모델 요약

## 후 기

본 연구는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 해양쓰레기 수거장비의 성능평가 계획

김민 · 이훈성 · 차명훈 · 김지성((재)한국조선해양기자재연구원)

삼면이 바다인 우리나라 특성상 긴 해안선을 따라 쓰레기 수거장비 및 인력 접근이 어려운 지역(갯바위, 무인도, 해안 절벽. 테트라포드 등)의 해양쓰레기가 방치되는 실정이다.

접근이 어려운 해안에 해양쓰레기 수거 인력 및 기존 장비의 투입시 사고 위험이 매우 높아 효과적인 안전관리 대책 마련이 필요함에도 불구하고 국내의 접근이 어려운 해안의 해양쓰레기 수거 기술 개발은 전무한 상황이다.

본 연구는 접근이 어려운 지역의 쓰레기를 수거하기 위한 장비를 개발함에 있어서, 직접 쓰레기를 수거하는 수거선과, 이를 해양에서 1차 처리하는 Station(바지선 형태)의 구성을 고려하였으며, 특히 이들이 전에 없는 가혹한 조건에서 요구하는 성능을 발휘하기 위해 고려해야 할 성능평가항목을 도출해 봤다.

또한 기존 선박에 적용되는 선급규칙이나 선박용물건의 형식승인과 같은 규칙뿐만 아니라 IMO 규제사항, 연안환경 관련 법, 수거장치의 육상 규제정책과의 비교 등을 통하여 장비가 개발되기 전에 고려해야 할 규제사항을 정리함으로서 개발의 시행착오를 최소화 하기위한 데이터를 확보하는 것이 목적이다.

그리고 유사환경 성능시험 및 실증을 통하여, 연구개발에서 끝나는 것이 아니라 상용화 까지 고려된 상황을 고려하여 데이터 확보를 위한 성능평가 계획을 작성하여 보았다.

## 후 기

본 연구는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 해양쓰레기 수거선의 파랑중 안정성 해석

남설 · 전규목 · 박종천(부산대학교)

해양플라스틱쓰레기가 전 지구적으로 문제가 되면서 해양플라스틱쓰레기에 의한 해양환경 문제와 경제적 손실에 대해 산업체 간 파트너쉽을 통한 의식증진 및 문제개선의 중요성이 대두되고 있다. 특히 접근이 어려운 해안의 해양플라스틱쓰레기의 수거 및 선별처리를 위해 관련 시스템 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 ㈜화인을 중심으로 개발중인 해양플라스틱쓰레기 수거선(수륙양용선)과 선별처리 스테이션(바지선)의 파랑중 안정성 평가를 수행할 예정이며, 이를 위해 실험 및 수치해석을 통해 실해역 파랑환경의 재현과 부유체 운동 특성을 분석한다. 작업 수행 해역은 전남 신안항과 경남 통영항이며 관련 해양 데이터 수집 및 파랑 스펙트럼을 산출하였다. 그림 1은 선별처리를 위한 스테이션인 바지선을 나타내며, 주어진 파랑 조건하에서 포텐셜 및 CFD 해석을 통해 파랑중 부유체 운동을 예측하고 상호 비교 분석한다. 바지선의 실제 운용 해상조건은 WMO SSC(Sea State Code) 2 이하의 해상상태이며, 이에 대해 해상작업 안정성 평가 및 성능평가를 진행하고 가이드라인을 제시하도록 한다.

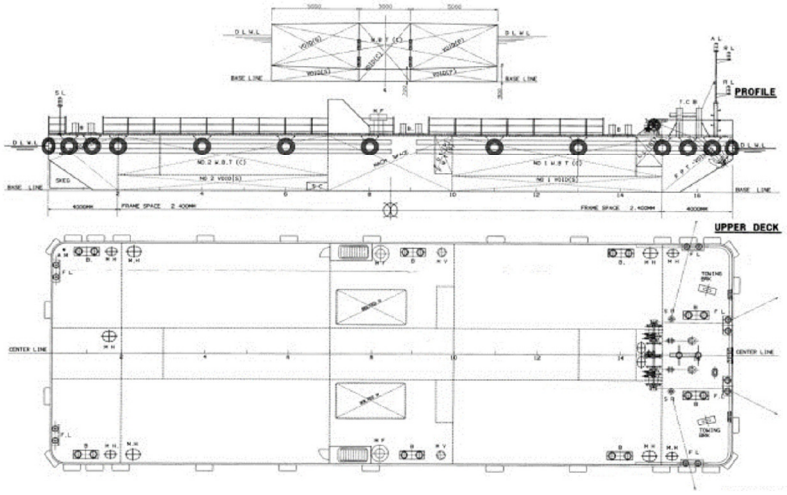



그림1. 해양플라스틱쓰레기 선별 스테이션의 선도(37.5m)

## 후 기

본 연구는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 2020년도 한국해양공학회 추계학술대회

## 온라인세션

# COLD SEAWATER RECIRCULATION STUDY FOR ENHANCING REGASIFICATION OPERATION OF AN FSRU

Seong-Hwan Kwon(University of Inha) · Byong-Ug Jeong(University of Strathclyde) · Kwang-Jun Paik(University of Inha)

This research was aimed to stress the importance of the cold seawater recirculation study to enrich the regasification operation of FSRUs. To achieve this goal, four(4) major steps, operating scenario analysis, geometry modeling, CFD simulation, and risk expenditure analysis were adopted. By selecting a real FSRU project in Iskenderun Bay, the extent of reality for this study has been increased using the actual metocean and topographic data during the first two steps. To investigate the temperature drop at the seawater suction occurring by the recirculated cold seawater, the CFD programme of Simcenter Star-CCM+ was employed and the related flow through the K-Epsilon model has been analysed. Four(4) case studies have been entirely performed varying current velocity and the angle between FSRU and current direction. Once the temperature drop for each case has checked, the risk expenditure has been quantitatively estimated calculating the steam consumption required. As a result, it has been known the most severe case which has the highest expenditure is when low current velocity flows, and an FSRU is located at the perpendicular position against the current direction. In the case, it has been found that the temperature drop is approximately 0.13K and the connected risk expenditure is around US$ 127,296/month. The location of the seawater inlet is also associated with the temperature change as the flow of the cold seawater is moving through the bottom of the FSRU. Hence, due to anticipating high risk expenditure even though a small temperature drop is occurring, the necessity of performing the cold seawater recirculation study was emphasised and the efforts of minimising the issued phenomena through the study should be required. These research findings are quite novel, so they are most trusted to present meaningful direction into further future studies.

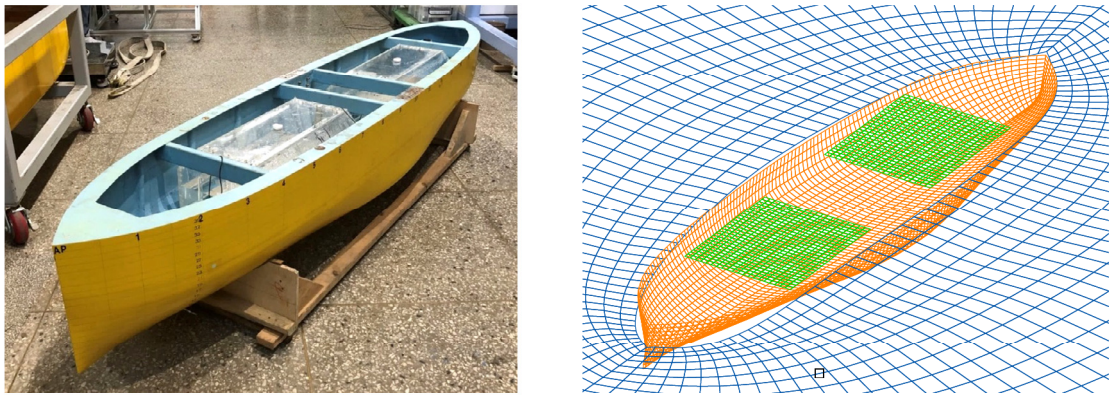
**KEY WORDS**: FSRU, Regasification, Cold seawater, CFD, K-Epsilon turbulence model, Risk expenditure analysis

# Experimental and Numerical Studies on Sloshing-coupled Ship Motion in Head Waves

주장 · 이재학 · 박태현 · 이재훈 · 김용환(서울대학교)

Sea-trial is a standard step before classifying a vessel, and one of its primary purpose is to confirm the contract speed according to the resistance measurement. Considering the real sea-trial condition that involves both external wave field and internal filling ballast water, the trial ship in fact undergoes a coupling effect between the wave-induced ship motion and the inner sloshing fluid. Thus an understanding of the coupling effect is important to analyze the components of total resistance measured in sea trial. In this study, the hydrodynamic responses of the ship are observed under the coupling effect between the inner sloshing and the external wave excitation, using both experimental measurement and numerical computations. The ship model is a 3-meter blunt modified Wigley hull equipped with two inner tanks, as shown in Fig. 1. Ship Froude number is 0.2, and the sloshing coupling effect is observed at three inner filling conditions ($0.7H_T$, $0.5H_T$, $0.7H_T$ fillings, where $H_T$ is inner tank height). Ship towing tank test is carried out at Seoul National University towing tank facility (Dimension $L/B/D$ = 110m/8m/6m), and regular head waves are of the main interests. For validation purposes, numerical computation is performed using the WISH (Wave-Induced loads and SHip motion) program which is based on the three-dimensional Rankine panel method adopting B-spline basis function. Linear potential theory is considered for both the ship seakeeping and internal sloshing flow; and direct pressure integration method is used to evaluate the added resistance induced by incoming wave and sloshing flow.

The results show sufficient agreement between experimental and numerical validation regarding the ship motion responses and resistance with or without the inner sloshing effect. As Fig. 3, the results show that sloshing effect only occurs when the encounter wave frequency is close to the natural frequency of the inner tanks; and ship has restrained surge response at low filling condition while ship has significantly increased surge response at medium or high filling conditions. This phenomena is due to the inertia effect of internal tanks. However, ship heave motion and pitch motion are generally insensitive to the sloshing effect, and the same tendency is also observed on added resistance. Only one special case is that $\lambda/L$=1.0 and $0.5H_T$ filling condition, the pitch response is apparently reduced as shown in Fig. 4; the pitch reduction is caused by the sloshing coupling effect since the wave-induced pitch phase has no obvious change. Added resistance is also reduced only at the special condition, corresponding to the reduced pitch motion, as shown in Fig. 5(b).



(a) Experimental setup (b) Rankine panel model

Fig. 1 Blunt modified Wigley with two inner tanks

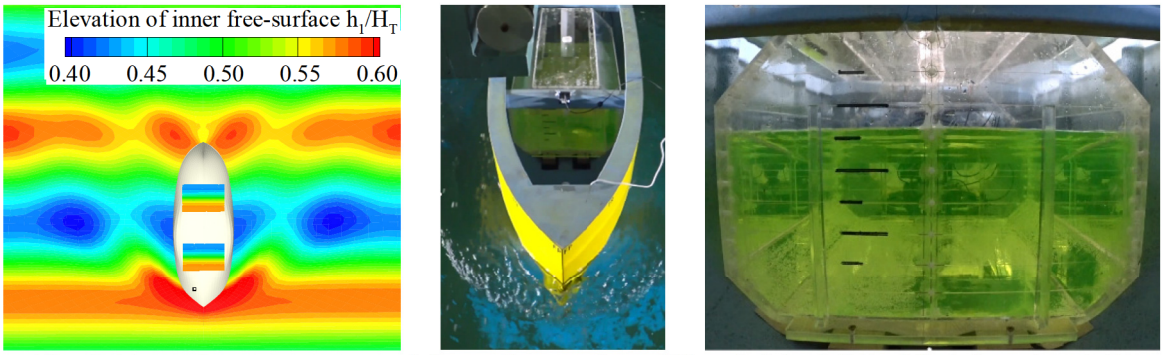
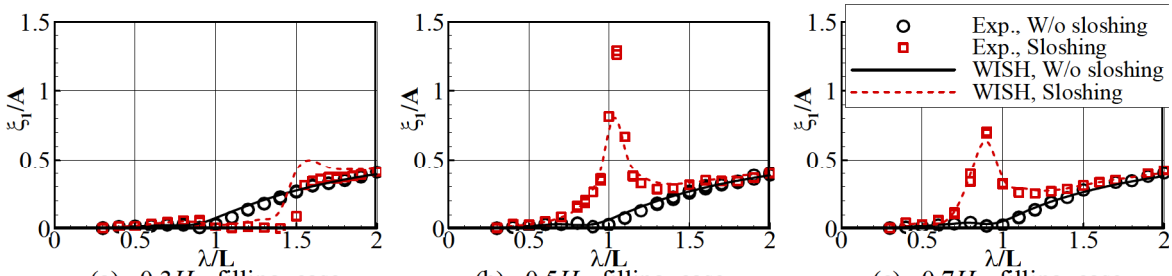
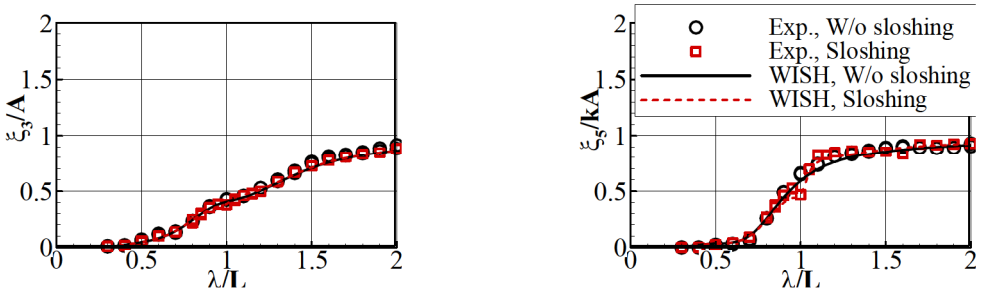



Fig. 2 External wave pattern and inner flow surface: filling height $0.5H_T$, $\lambda/L$=1.0, $\omega_e/\omega_0$=1.17
(Left figure: WISH calculation; middle & right figures: experimental snapshots)



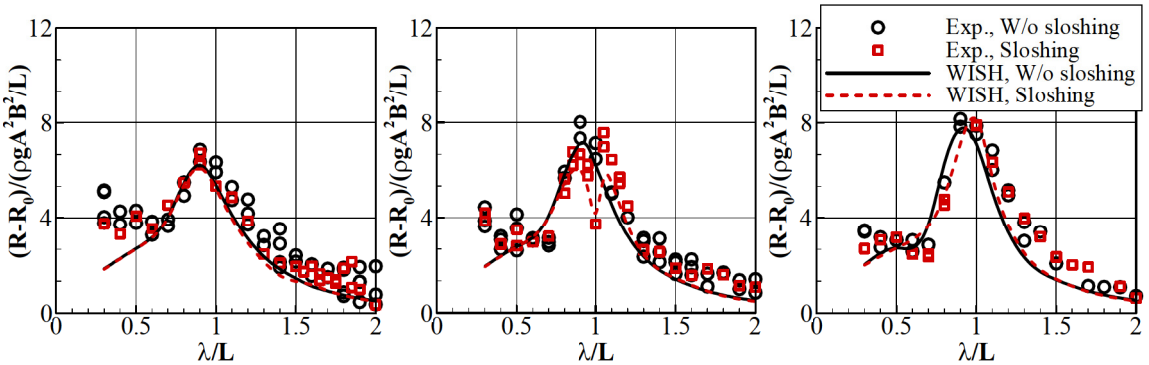

(a). $0.3H_T$ filling case ($\omega_e/\omega_0$=1.08 at $\lambda$/L=1.55)
(b). $0.5H_T$ filling case ($\omega_e/\omega_0$=1.14 at $\lambda$/L=1.05)
(c). $0.7H_T$ filling case ($\omega_e/\omega_0$=1.14 at $\lambda$/L=0.90)

Fig. 3 Ship surge response




(a) Heave response
(b) Pitch response

Fig. 4 Ship heave response and pitch response (only $0.5H_T$ case)




(a). $0.3H_T$ filling case
(b). $0.5H_T$ filling case
(c). $0.7H_T$ filling case

Fig. 5 Ship added resistance

# LNG-CCS 구조응답 추정에 있어 유체-기체 밀도비 및 상변화로 인한 슬로싱 하중의 영향에 대한 연구

이정규 · 안양준 · 김용환(서울대학교) · 김지응(삼성 SDS)

본 연구는 액화천연가스(LNG) 화물창 내부에서 슬로싱 현상이 발생할 때 유체의 상변화가 슬로싱 충격에 미치는 영향에 대한 실험적 접근을 다루고 있다. 기존의 슬로싱 실험 연구들은 비용이나 안전성 측면에서 LNG를 사용하는데 어려움이 있기 때문에, 물과 공기를 이용한 실험들이 주를 이루었다. 이로 인해 실제 현상과 비교하여 기체의 밀도를 액체의 밀도로 나눈 밀도비의 차이(물과 공기는 0.0012, LNG-NG는 0.0040), 액체와 기체 사이의 상변화 등의 한계점들이 나타났다.

따라서 본 연구에서는 상온에서의 밀도비가 0.0041이고, 끓는점이 34° C인 NOVEC 7000이라는 액체를 사용하여 슬로싱 충격 시에 밀도비 및 상변화가 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 상온과 끓는점 부근에서 단일 충격 실험 및 규칙 운동 실험을 수행하여 각 유체 조건에서의 실험 결과를 비교 · 분석하였다.

Fig. 1은 단일 충격 실험을 고속 카메라로 촬영한 결과의 일부를 나타낸 것이다. 기포를 수반한 슬로싱 충격을 구현하였으며 상온의 물, 상온의 NOVEC 7000, 끓는점에서의 NOVEC 7000을 이용하여 실험을 수행하였다. 상온에서의 물과 NOVEC 7000의 결과를 통해 밀도비의 증가함에 따라 인해 충격 압력의 크기가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 기포를 수반한 충격이기 때문에 상온 조건에서는 기포의 압축과 팽창으로 인해 충격 압력의 진동이 나타나지만, 끓는점 부근에서는 충격이 가해질 때 기포 내부의 상변화로 인해 기포가 압축성을 잃게 되면서 진동이 감소하고 최대 충격 압력에 도달하는 시간이 증가하게 된다.

다음으로 이러한 단일 충격에서 나아가 밀도비와 상변화가 구조적 분석에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 규칙 운동 실험을 통해 얻은 충격 압력값에 동적 하중 계수(Dynamic Amplification Factor, DAF)를 적용하여 비교해 보았다. DNV-GL-CG-0158에서 제공하는 단순화된 형태의 동적 하중 계산 방법을 적용하여 Fig. 2에 도시하였다. 밀도비의 증가 및 상변화로 인해 최대 충격 압력의 크기가 감소하고 압력 상승 시간이 길어지게 되면서, DAF 적용 시 끓는점에서의 NOVEC 7000를 이용한 실험의 결과가 상온의 물과 공기를 이용한 실험에 비해 최소 20% 수준으로 작게 나타난 것을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 슬로싱 모형실험 방법을 통해 실제 화물창 내부에서 일어나는 상변화를 고려한 슬로싱 현상을 보다 정확하게 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

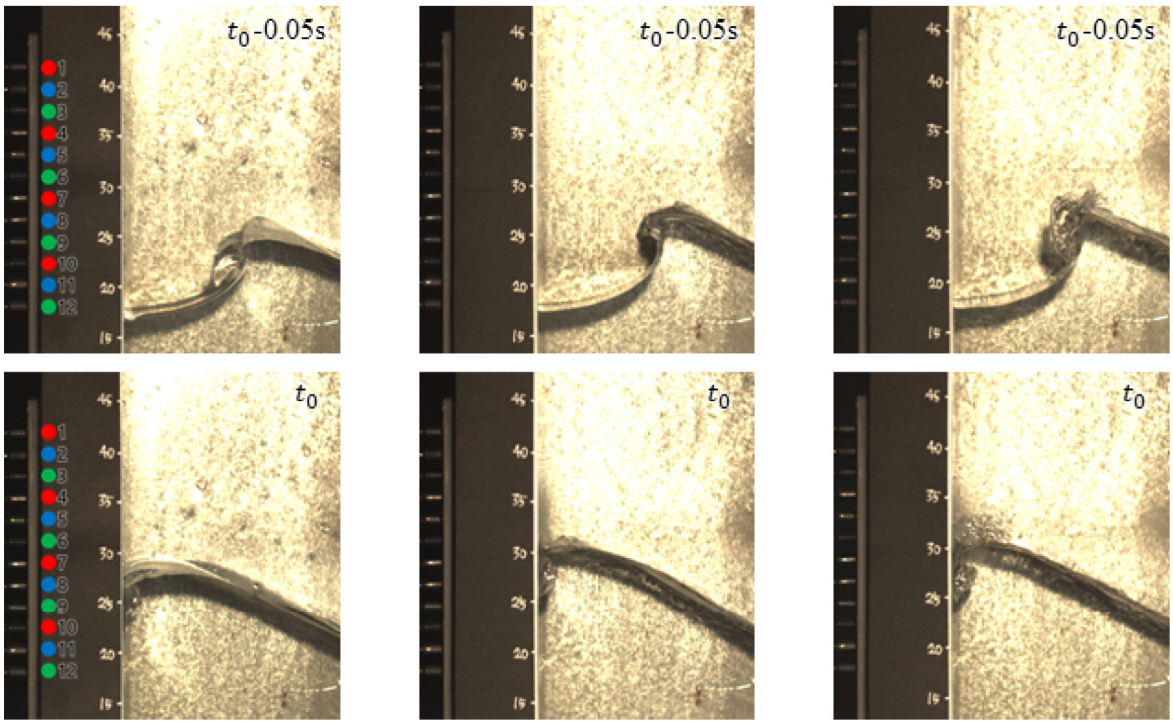



Fig. 1 Images of single impact: Water at 25°C (left), NOVEC 7000 at 25°C (middle), NOVEC 7000 at 34°C (right)

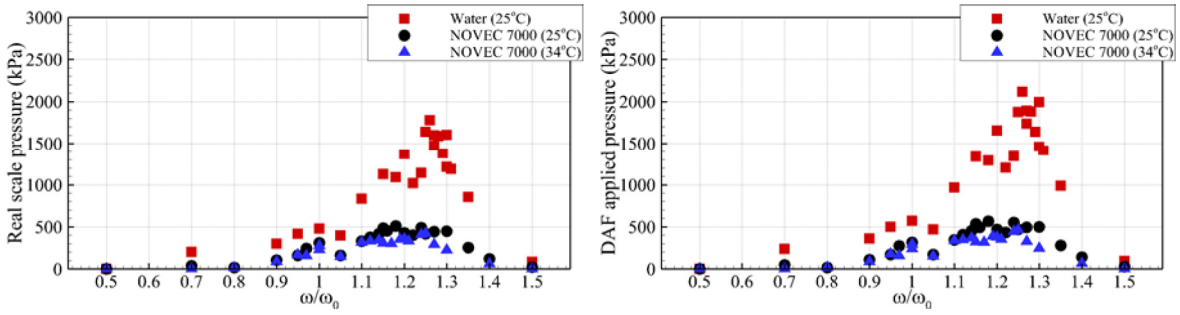



FIg. 2 Real scale impact pressure(left) and DAF applied impact pressure(right)

# 예인선의 비선형 동역학 특성에 관한 수치 시뮬레이션 연구

남보우(서울대학교) · 홍사영(KRISO)

In this study, nonlinear dynamic responses of a simple autonomous towing system was numerically investigated, where a vessel is passively towed by a tug via a towline. Three degree-of-freedom equations of maneuvering motion is used to described the nonlinear dynamics of the towed vessel. At first, the simulation results are directly compared with the model test data to validate the numerical model. Good agreements are found between the numerical results and experimental data. Then, the motion responses of a towing system are studied with phase plane analysis. It can be observed that the unstable towing operation shows particular limit cycles due to the large sway-yaw coupled motions of the towed vessel. Also, various simulation parameters are changed and their resulting limit cycles are compared in terms of towing stability. Finally, the effects of wind and towline are discussed based on the simulation results.

# 자가학습기반 단일 카메라 깊이 추정 알고리즘의 해상환경 적용

장준우*·김종휘*·김진환*
*카이스트 기계공학과

# Self-supervised Depth Estimation using a Monocular Camera in Maritime Environments

Junwoo Jang*, Jonghwi Kim* and Jinwhan Kim*
*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Self-supervised depth estimation 깊이 추정 자가학습, Unmanned surface vehicle 무인선, Target tracking 목표 추적

ABSTRACT: *Generating depth data from images is attractive to autonomous vehicles because it could inexpensively complement LIDAR sensors and open up the possibility of automated docking or collision avoidance. Depth estimation of urban scenes using deep learning has been extensively studied and demonstrated promising results. However, in the maritime environment, it is very challenging to acquire the ground truth depth data so that taking advantage of supervised learning is relatively difficult. In addition, most of images from the maritime environment do not have abundant visual features which is problematic to train a depth estimation network even with self-supervised learning approaches. To overcome feature-less environments, we used a canal dataset which has both water surface and feature-abundant land on the side. We validated the trained network through the boat tracking problem and presented its performance.*

## 1. 서 론

인공지능의 고도성장과 함께 해상시스템의 다양한 플랫폼에 인공지능 기술을 접목시키는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 해상환경에서 요구되는 대부분의 임무에는 선박이 사용되고 있기 때문에 선박을 운용하는데 필요한 기술들이 특히 주목을 받고 있으며 여러 기술들의 결합을 통해 완전한 자율성이 확보된 무인선(USVs: Unmanned surface vehicles) 개발이 이루어진다면 효율적인 해안 감시, 탐사, 사고대응 등의 임무가 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

무인선의 자율 운항을 위해서는 카메라와 라이다, 레이더 등의 다양한 인식 센서들이 이용되고 있다. 라이다와 레이더는 거리 측정에 활용되고, 카메라의 경우 물체 탐지 및 식별에 활용되는 것이 일반적이지만 자연의 다양한 생명체들이 시각 정보만을 기반으로 거리를 판단하는 것이 가능함에 영감을 받아 카메라만을 통해 거리 정보를 얻는 시도들이 진행되고 있다. 카메라로 거리 측정을 하게 되면 전체 시스템의 비용을 크게 절감할 수 있을 뿐 아니라 동시에 얻어지는 물체 탐지 정보를 이용하여 더 높은 수준의 센서 활용을 기대할 수 있다.

스테레오 카메라를 이용하여 동일점을 다른 위치에서 관찰하게 되면 관찰 위치를 아는 경우 삼각측량법을 이용하여 해당점의 위치를 알 수 있어, 픽셀별 깊이 추정이 가능하다. 이러한 원리를 이용하여 스테레오 카메라에서 각 이미지의 정합과정을 거치고 이로부터 시차맵(disparity map)을 생성하면, 시차맵과 깊이맵(depth map)은 역관계를 지니고 있어 쉽게 깊이맵으로 변환 가능하다. 하지만, 스테레오 카메라의 경우 두 카메라간의 동기화 등의 시스템 설비 과정이 번거로워 많은 연구들이 단일 카메라만을 이용하는 방향으로 이루어지고 있다.

단일 카메라만을 이용하더라도 카메라의 설치 정보 및 자세를 정확하게 알고 있으면 평면 바닥이 관찰되고 있다는 가정하에 바닥위의 객체에 대해서는 거리 추정이 가능하다. 단, 이런 경우에서는 특정 물체의 바닥이 위치해있는 점만 거리 추정이 가능하여 복잡 형태의 구조물의 픽셀별 깊이 추정은 어렵다는 단점이 있다. 반면, 머신러닝을 활용한 데이터 기반 접근법은 픽셀별 깊이 추정이 가능함을 보인다. 먼저 학습시에만 스테레오 카메라 데이터셋을 활용하면 단일 카메라의 이미지 만으로 시차맵을 예측할 수 있음을 보인 연구(Godard, C., et al., 2017)가 있으며, 더 나아가 단일 카메라의 연속된 사진 데이터셋을 활용하여 이미지의 주변 프레임으로부터 카메라의 에고 모션을 추정하고 에고 모션을 기반으로 스테레오 정합을 활용해 깊이 맵을 추정한 연구(Zhou, T., et al., 2017)가 진행되었다. 해당 연구들은 자가학습(Self-supervised learning)에 근거하여 라벨링 된 데이터 없이도 깊이맵을 안정적으로 추정하는데 성공하였다.

자가학습을 통해 깊이맵을 추정하는 인공신경망을 학습하는 경우 실제 깊이맵이 주어진 상황에서 지도학습을 통해 학습하는 것보다 성능은 떨어지지만 학습의 용이함이 크게 증가한다는 장점이 있다. 특히, 해상환경의 경우 해수면에 대한 거리는 라이다 등의 거리 센서를 통한 측정이 물리적으로 불가능하기 때문에 지도학습 자체가 불가능하다는 문제를 지닌다. 또한, 스테레오

카메라를 통해 시차맵을 추정하는 데에 있어서도 비슷한 형태가 반복되는 해수면의 경우 정합과정에 어려움이 발생할 수 있다.

이에 따라, 본 논문에서는 상대적으로 시각 특징점들이 많이 존재하는 운하 데이터셋을 통하여 깊이맵 추정 네트워크를 학습하였다. 제안하는 알고리즘은 기존 수평선 대비 거리 측정 알고리즘에 비하여 근거리에서 높은 거리 추정 성능을 보였으며 카메라의 전 픽셀에 대한 깊이 추정이 가능하므로 추후 무인선의 접안 및 충돌회피 등 다양한 종류의 임무 수행에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

## 2. 깊이 추정 네트워크

### 2.1 깊이 추정 방법론

이미지로부터 깊이맵을 추정하는 알고리즘은 컴퓨터 비전분야에서 오랜 기간 동안 연구되어온 분야이다. 삼각측량법을 활용하여 두 이미지의 정합과정을 통해서 깊이맵을 추정하는 것이 기존 알고리즘의 표준화된 방법이지만 인공신경망 네트워크를 통해 이미지를 바로 깊이맵으로 변환시키는 네트워크의 활용이 가능함이 보여짐에 따라 end-to-end 형태의 학습이 진행되기도 한다. End-to-end 학습을 위해서는 실제 깊이맵이 확보되어야하기 때문에 라이다 센서를 이용한 데이터 취득이 선행되어야 한다. 그러나 라이다의 경우에도 센서가 가지는 해상도 및 거리 범위 한계가 있으며 유리나 물, 노이즈 등에 대해서도 합당한 데이터 처리 과정이 적용되어야 한다는 번거로움이 있다.

인공신경망 네트워크를 통해 깊이 추정이 가능함이 보여짐에 따라 자가학습을 통해 인공신경망을 학습시키려는 시도도 수행되었다. 삼각측량법의 원리에 따라 스테레오 정합을 기반으로 비용함수를 정의하면 실제 깊이맵 없이도 성공적으로 깊이맵 추정이 가능하다. 단일 카메라만을 활용하는 경우 두 이미지의 위치 관계가 주어지지 않으므로 연속으로 촬영된 이미지 프레임간의 매칭과정을 통해 카메라의 이동 정보를 예측하고 이로부터 깊이맵을 측정한다. 하지만, 이 경우 움직이는 물체에 대해서 카메라의 움직임인 에고 모션(ego motion)과 해당 물체의 움직임을 구분하기 어렵다는 문제가 발생하는데, 이 또한 카메라의 물체 식별 알고리즘을 통해 동적 물체를 식별하고 해당 동적 물체의 움직임은 따로 추정하는 방식으로 비용함수를 정의하여 깊이 추정이 이루어졌다(Casser, V. et al, 2019).

### 2.2 Monodepth2

본 논문에서는 다양한 자가학습 단일 카메라 깊이 추정 알고리즘 중에서 Monodepth2(Godard, C. et al., 2019)를 활용하였다. Monodepth2의 경우 타 알고리즘 대비 상대적으로 간단한 방법으로 정의된 비용 함수를 통하여 높은 추정 성능을 지닌다.

알고리즘은 단일 카메라 이미지를 깊이맵으로 변환하는 깊이 네트워크 및 연속된 두 장의 이미지로부터 카메라의 이동 정보를 추정하는 자세 네트워크로 구성된다. 깊이 네트워크의 경우 decoder-encoder 형태의 U-net 구조가 사용되어 디코딩 된 특징 변수가 점차적으로 상향되는 특징을 활용한다.

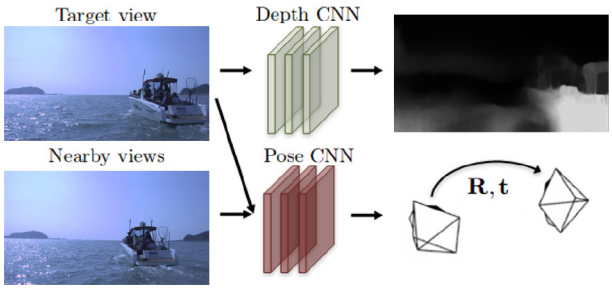



Fig. 1 depth estimation frame work



Fig. 2 Monocular video dataset for depth estimation learning (left : Jeon-gok hang, right : Pohang canal)

연속된 두 이미지간의 거리 측정을 위한 비용함수로는 이전 논문에서 제시된 photometric error 함수를 활용하였으며 이는 한 이미지를 다른 이미지로 투영시 픽셀의 유사도를 나타낸다. 픽셀의 유사도를 계산할 때 카메라의 촬영 각도에 의한 폐색(occlusion)이나 이개(disocclusion) 등이 발생할 수 있는데 이러한 경우에서 픽셀 유사도를 비용함수에서 제외하기 위해서 연속된 프레임 중 가장 낮은 픽셀 유사도를 기반으로 비용함수를 사용하는 방안을 제시하였다. 이미지를 투영하기 위해서는 카메라 자세 정보도 필요하며 이 또한 같이 학습을 통해서 얻어진다.

또한, 카메라와 같은 속도로 움직이는 물체는 이미지 상에서 시차가 발생하지 않아 무한의 깊이를 가지는 것으로 추정되는 문제가 발생하는데, 이를 해결하기 위하여 이미지상에서 정지되어 있는 픽셀을 고려하지 않는 auto-masking 기법을 도입하였다.

### 2.3 학습 데이터셋

Monodepth2 알고리즘의 경우 KITTI 데이터 셋(Geiger, A., et al., 2013)을 활용하여 도로위의 객체에 대한 깊이 추정이 효과적으로 됨을 보였으나 해상 환경에서 깊이 추정이 가능하기 위해시는 동일 환경에시 깊이 추정을 힉습하는 과정이 필요하다. 이를 위해 해상에서 USV에 장착된 카메라에서 녹화된 영상을 1Hz로 추출하여 연속된 이미지를 취득하였으며 급격한 밝기 변화가 발생하거나 물방울이 묻어있는 이미지는 제외하였다.

다양한 해상 데이터 중 상대적으로 시각적 정보가 많이 담겨있는 데이터셋을 활용하고자 하였으며 이에 따라 양 옆이 인도 및 가로수 등으로 구성되어 있는 포항 운하에서 실험한 데이터셋을 이용하였다. 해당 데이터의 경우 Wam-V 플랫폼에 장착된 FCB-EH6500 카메라로 촬영되었으며 조도가 다른 시각에서 촬영된 여러 영상을 병합하여 총 5470장의 운하 데이터셋을 구성하였다. 별개로, 전곡항에서 취득한 5452장의 해역 데이터셋을

추가로 확보하여 데이터셋에 따른 학습결과를 파악하고자 하였다.

## 3. 실해역 데이터 성능 검증

### 3.1 깊이 추정 네트워크 학습

학습에 사용된 데이터에 따른 거리 추정 성능을 비교하였다. 확보한 데이터셋의 경우 약 5000장의 이미지로 구성되어 있으나 같은 공간에서 반복적으로 취득된 데이터가 많아 비슷한 형태의 이미지가 다수이며 기존 알고리즘에서 학습된 약 4만장의 KITTI 데이터셋에 비해서는 적은 숫자를 지닌 이유로 인하여 고유 데이터셋만을 이용하여 학습을 하는 경우에는 학습이 제대로 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. 이에 따라, KITTI 데이터를 통해 학습된 네트워크에 추가적으로 해상 데이터셋을 학습시키는 fine-tuning 기법을 사용하였다.

### 3.2 깊이맵 결과

Fig. 3은 학습 때 활용한 데이터 셋에 따라 추정되는 깊이 이미지를 보여준다. 픽셀별 실제 깊이 데이터의 부재로 인하여 정량적인 판단은 불가하였으나 선박 혹은 양옆의 구조물 등의 상대적인 거리를 깊이 이미지 상에서 파악할 수 있음이 보여진다. 진곡항 데이터셋을 이용하여 fine-tuning을 진행한 경우 깊이 이미지에서 선박이나 구조물 등이 잘 드러나 보이지 않으므로 깊이 추정이 성공적으로 되지 않은 것으로 파악되며 이는 학습한 데이터셋의 대부분의 이미지가 바다 및 하늘로 구성이 되어 있어서 시각적 특징점을 찾지 못하였기 때문이라고 여겨진다. 포항 운하 데이터셋을 이용하여 fine-tuning을 진행한 경우에는 더욱 명확하게 구조물에 대한 깊이를 확인할 수 있으며 선박 깊이에 한해서 전곡항의 해상환경에도 잘 적용이 되는 것을 볼 수 있다. 두 경우 모두 수면에 대해서는 수평선에 가까워질수록 깊이가 멀어지는 경향이 잘 나타나지는 않아 추정에 어려움이 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 선박 탐지 결과

제안하는 알고리즘의 깊이 추정의 경우 실해역 데이터의 실제 깊이맵 부재로 인하여 모든 픽셀의 깊이 추정 정확도를 계산하기가 어렵다. 이에 선박의 충돌회피 실험을 목적으로 취득한 전곡항 데이터셋에 포함된 타 선박의 GPS 정보를 통해 실제 타선과의 거리를 구하고, 이를 추정한 타선의 픽셀별 깊이와 비교하여 깊이 추정의 성능을 평가하였다.

이미지 상에서 선박에 해당하는 픽셀 좌표를 얻어내기 위하여 선박 탐지 알고리즘이 적용되어야 하며 이를 위해 딥러닝을 기반으로한 Mask R-CNN 알고리즘을 적용하였다. Mask R-CNN 알고리즘은 픽셀 수준에서 객체 단위의 물체 탐지, 식별이 가능한 인스턴스 단위 분할 알고리즘 중 대표적이며 기존 연구(김종휘 등, 2020)에서 성공적으로 선박을 탐지하였다. 본 연구에서도 기존 연구와 마찬가지로 선박 하단 중앙을 이미지 내 선박 위치로 가정하였다.

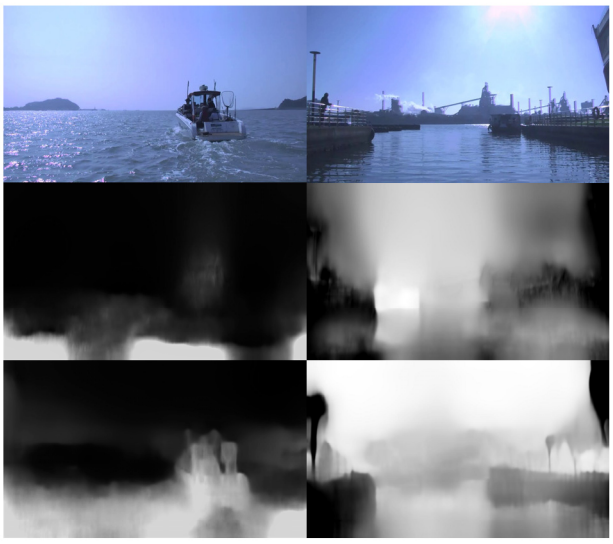


**Fig. 3** Per-pixel depth estimation result (top : original image, middle : KITTI+Jeon-gok hang, bottom : KITTI+Pohang canal)

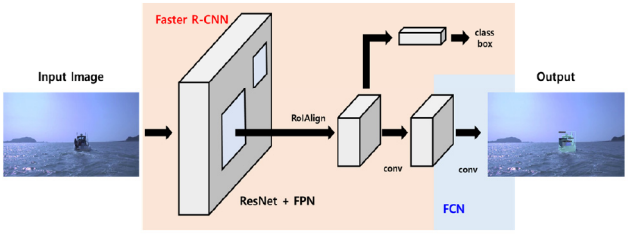



**Fig. 4** Mask R-CNN framework

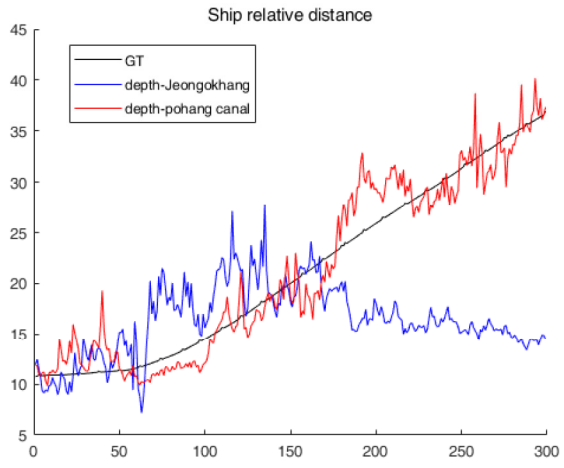



**Fig. 5** Ship relative distance estimation through per-pixel depth estimation

단일 카메라를 활용한 깊이 추정의 경우 깊이 변화는 쉽게 구해지지만 정확한 깊이 수치에 대한 범위는 알기 어렵다는 문제가 발생하며 이는 학습 데이터셋별 실제 타 선박과의 거

리 데이터를 통하여 대략적으로 구하였다.

Fig. 5는 시간에 따라 촬영된 이미지에서 추정된 선박과의 상대거리를 나타낸다. 전곡항 데이터셋을 이용한 깊이 네트워크를 통해 선박과의 상대 거리를 구한 결과는 실제 상대 거리와 크게 차이나지만 포항 운하 데이터셋을 이용한 깊이 네트워크의 경우 선박이 점점 멀어지는 상황에서 성공적으로 상대거리를 추정할 수 있음을 보인다. 픽셀별 깊이 추정 기법이 정량적으로도 유효함이 보여짐에 따라 근거리에서 복잡한 형태의 구조물을 회피하는데 사용될 수 있는 가능성을 보인다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자가학습을 이용한 단일 카메라 깊이 추정 알고리즘을 통해 선박과의 거리를 예측하였다. 실제 깊이맵을 취득하기 어려운 해상환경의 특성을 고려하여 자가학습에 기반하여 깊이 추정을 학습하였으며 상대적으로 시각적 특징이 많은 포항 운하 데이터셋을 통하여 해상 환경에서도 깊이 추정 알고리즘이 작동하는 것을 정성적으로 확인하였다. 정량적인 비교를 위하여 선박과의 거리가 알고 있는 상황에서 목표물 추정을 진행하였으며 수치적으로 제안하는 알고리즘의 경우 수평선을 기준으로 선박과 거리를 추정하는 기존 알고리즘 대비 좋은 측정값을 생성하였다. 또한, 이미지의 픽셀별 깊이 정보를 알 수 있으므로 조우하는 선박 및 다양한 장애물을 회피하는데 사용될 수 있음은 물론 자율 접안 등에도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 “전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개발“에 의해 수행되었습니다 (PMS4420).

## 참 고 문 헌

김광현, 홍성준, 최배훈, 김일호, 김은태 (2017). “Faster R-CNN을 이용한 해양에서의 선박 검출”, 정보 및 제어 논문집, 10호, pp 158-159.

김종휘, 김근환, 이찬규, 김진환, 이필엽 (2018), “단안 카메라 영상을 이용한 합성곱 신경망 기반 선박 탐지 및 추적“, 한국해양공학회 추계학술대회.

김종휘, 조용훈, 한솔, 김진환 (2020), “선박 자동 탐지 및 추적을 위한 딥러닝 기반의 인스턴스 단위 분할 적용”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.

He, K., Gkioxari, G., Dollár, P. and Girshick, R. (2017). “Mask r-cnn”, Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp 2961-2969.

Hermann, D., Galeazzi, R., Andersen, J.C. and Blanke, M. (2015). “Smart sensor based obstacle detection for high-speed unmanned surface vehicle”, IFAC-PapersOnLine, Vol 48, No 16, pp 190-197.

Moosbauer, S., Konig, D., Jakel, J. and Teutsch, M. (2019). “A Benchmark for Deep Learning Based Object Detection in Maritime Environments”, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp 916-925.

Park, J., Kim, J. and Son, N.S. (2015). “Passive Target Tracking of Marine Traffic Ships Using Onboard Monocular Camera for Unmanned Surface Vessel”, Electronics Letters, Vol 51, No 13, pp 987-989.

Zhang, Y., Li, Q.Z. and Zang, F.N. (2017). “Ship detection for visual maritime surveillance from non-stationary platforms”, Ocean Engineering, Vol 141, pp 53-63.

Godard, C., Mac Aodha, O., Firman, M., and Brostow, G. J. (2019). “Digging into self-supervised monocular depth estimation”, Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp 3828-3838.

Gladstone, R., Moshe, Y., Barel, A. and Shenhav, E. (2016). “Distance estimation for marine vehicles using a monocular video camera”, In 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp 2405-2409.

Kim, Heesu, Evangelos Boulougouris and Sang-Hyun Kim. (2018), “Object detection algorithm for unmanned surface vehicle using faster R-CNN”, World Maritime Technology Conference.

Wang, H. and Wei, Z. (2013). “Stereovision based obstacle detection system for unmanned surface vehicle”, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp 917-921.

Godard, C., Mac Aodha, O. and Brostow, G. J. (2017). “Unsupervised monocular depth estimation with left-right consistency”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp 270-279.

Zhous, T., Brown, M., Snavely, N. and Lowe, D. G. (2017). “Unsupervised learning of depth and ego-motion from video”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp 1851-1858.

Geiger, A., Lenz, P., Stiller, C. and Urtasun, R. (2013). “Vision meets robotics: The kitti dataset”, The International Journal of Robotics Research, pp 1231-1237.

Casser, V., Pirk, S., Mahjourian, R. and Angelova, A. (2019). “Depth prediction without the sensors: Leveraging structure for unsupervised learning from monocular videos”, In proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, pp 8001-8008.

# 강화학습을 이용한 예인선 지원 선박의 자율 접안

홍승조*· 김진환*
*KAIST 기계공학과

# Autonomous Ship Berthing Assisted by Tugboats Using Reinforcement Learning

Seungjo Hong* and Jinwhan Kim*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejon, Korea

KEY WORDS: Ship berthing 선박접안, Reinforcement learning 강화학습, Hybrid system 하이브리드 시스템

ABSTRACT: *Berthing operation is essential for all types of ships. In particular, tugboats are required for a large vessel with limited actuation capabilities at low speed to dock safely. Tugboat automation is known to be a challenging research topic, it is not straightforward to apply conventional control algorithms. Recently, reinforcement learning has been attempted to solve various challenging control problems and shown promising results. In this research, we apply the proximal policy optimization(PPO) algorithm which is one of the reinforcement learning algorithms to the berthing control problem using tugboats. The tugboat dynamics is modeled as a hybrid system in which continuous and discrete dynamic models interact with each other. The performance and feasibility of the proposed method were verified through the simulation.*

## 1. 서 론

저속 기동성이 제한되는 대형 상선의 경우 항구의 특정 위치에 접안, 수리 등의 목적으로 건선거에 진출입하거나 좁은 갑문을 통과하는 등 정밀한 작업이 필요할 때는 예인선의 지원이 필수적이다.

예인선에 의한 선박 이접안 작업은 도선사의 지시에 따라 예인선 선상이 예인선을 조작하여 본선에 원하는 힘을 가하여 움직이는 고난이도 작업으로서 도선사 및 예인 운용 인원 등 고도로 훈련된 인력이 다수 필요한 작업이다. 이와 같은 고난이도 작업은 운용자의 숙련도가 작업 효율과 안전성에 결정적인 영향을 미치게 되는데 최근 이러한 종류의 문제들에 있어 자동화 및 자율화 기술의 적용이 시도되고 있다.

선박 접안 작업에서 예인선의 자율화 문제는 예인선의 위치 이동 문제와 제어 문제가 복합적으로 이루어진 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기계학습의 종류 중 하나인 강화학습 방법을 이용한 문제 해결을 시도해 볼 수 있다. 강화학습은 매우 복잡한 비선형 문제나 연속적 비연속적 시스템의 상호작용으로 이루어진 하이브리드 시스템 문제와 같이 기존 제어방법으로는 해결하기 어려운 문제에 대하여 가용한 해를 제공한다는 장점이 있다.

예인선을 사용한 선박 자율 접안 관련 연구로는 선박의 계류위치에 추진기가 장착되어 있는 것과 같이 예인선을 모델링 하고, 이를 슬라이딩 모드 제어 방식으로 접안 작업을 하는 연구(Kawai, et al, 2011)가 있었으며, 신경망(Neural network)을 이용하여 신경망의 출력값을 선박과 예인선의 제어 입력 값으로 사용하는 연구(Im Namkyun, et al, 2012)가 있었다. 하지만 기존 연구의 대부분은 예인선이 가하는 힘을 선박에 부착된 추진기 혀애로 모델링한 후에 기존 제어기법을 적용한 것이어서 예인선이 선박 주변에서 이동해가며 본선을 밀거나 당기는 실제 운용 방식과는 큰 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 예인선의 운용 방식을 최대한 고려하여 정책 경사(Policy gradient) 방법의 강화학습 알고리즘 중 하나인 PPO(Proximal policy gradient) 알고리즘을 이용하여 예인선의 위치 이동까지 고려한 선박의 접안 문제를 해결하고자 하였다. 예인선이 선박에 계류하는 위치를 2가지 모드로 정의하였으며 각각의 모드에서 예인선 제어 문제를 강화학습으로 해결하였다. 강화학습에서 동역학적 모델의 구성을 위하여 각 모드에서 예인선의 계류 위치와 선박의 기하학적 관계를 이용하여 선박에 작용하는 힘을 계산하되 바람에 의한 외란을 고려한 모델을 구성하였다. 제안하는 강화학습 기반 접안 방법의 유용성을 확인하기 위하여 외란이 없는 환경뿐만 아니라 외란이 강하게 존재하는 환경에서 학습 및 검증을 수행하였다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 선박 모델링

선박 모델은 비선형 3 자유도 선박 모델을 사용하였다. 선박의 상태는 추진 방향의 종방향 운동(Serge)과 그 직각 방향인 횡방향 운동(Sway) 그리고 선박의 수직축 중심의 회전 운동(Yaw)

으로 계산되며 운동방정식은 식 (1)과 같다(Perez, 2009).

$$M\dot{\nu}+D\nu=\tau, \quad \dot{\eta}=R(\psi)\nu \tag{1}$$

$\eta$, $\nu$는 $\eta=[x, y, \psi]^T\in R^3$, $\nu=[u, v, r]^T$를 나타내며 $\eta$는 배의 위치$(x, y)$와 선수각$(\psi)$, $\nu$는 $x, y$ 방향의 선형 속도와 선회율을 의미한다. $\tau$는 선박에 가해지는 힘과 모멘트 값이며, 선박의 제어 입력값으로 사용된다.

$M\in R^{3\times3}$과 $D\in R^{3\times3}$은 각각 관성행렬(Inertia matrix)과 제동행렬(Damping matrix)을 의미하며 $M$은 선박의 질량과 유체역학적 추가 질량(Hydrodynamic added mass)으로 계산되고, $D$는 선형 제동행렬, $R(\psi)$은 회전행렬(Rotation matrix)이다. 각각의 행렬은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$M=\begin{bmatrix} m-X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m-Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & I_z-N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$
$$D=\begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix} \tag{2}$$
$$R(\psi)=\begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.2 예인선 모델링

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 2대의 예인선을 활용하며, 각 예인선은 지정된 위치에 계류한다. 예인선의 힘의 작용점은 변하지 않는다고 가정한다. 선박에 가해지는 힘 $\tau$는 각 예인선의 힘이 선박의 중심에 작용하는 힘의 기하학적 관계로 식 (3)과 같이 계산된다.

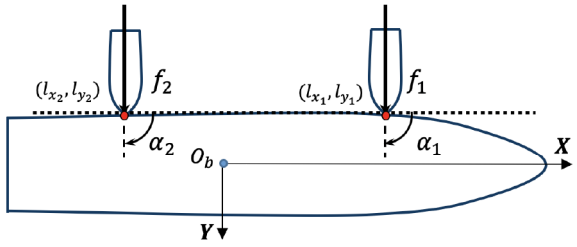



Fig. 1 Ship motion by tugboats

$$\tau=\begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) & -l_{y_1}\cos(\alpha_1)+l_{x_1}\sin(\alpha_1) \\ \cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) & -l_{y_2}\cos(\alpha_2)+l_{x_2}\sin(\alpha_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$f_1$, $f_2$는 두 대의 예인선이 작용하는 힘, $\alpha_1$, $\alpha_2$는 예인선의 힘의 방향을 나타낸다. 이는 본체 고정 좌표(Body fixed frame)의 $x$축을 기준으로 한다. $l_{x_i}$, $l_{y_i}$는 선박의 중점에서부터 $i$번 째 예인선의 작용점까지의 거리를 의미한다.

### 2.3 하이브리드 시스템 모델링

선박 접안 문제는 예인선의 제어를 나타내는 연속 시간 동적 모델과 예인선의 위치변화에 따른 이산 시간 동적모델이 조합되어 구성된 형태이며, 해당 문제의 모델링을 위하여 연속적, 비연속적 동적모델이 상호작용하는 하이브리드 시스템 개념을 활용하여 문제를 정의하였다.

본 연구에서는 예인선의 위치이동을 정의하기 위해서 예인모드와 접안모드의 두 가지로 설정하였다. 예인모드에서는 예인선이 선박의 선수, 선미 방향에서 서로 당기며, 접안모드에서는 예인선이 선박의 한 현측에 계류하여 선박을 밀고 당기는 역할을 한다.

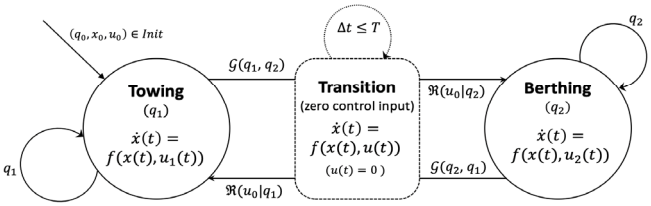



Fig. 2 Tugboat transition hybrid system

Fig. 2는 예인선 전환 하이브리드 시스템을 도식화한 것이다. 예인선은 $q$값에 의해서 모드가 전환되며 $q_1$은 예인모드(Towing mode), $q_2$는 접안모드(Berthing mode)를 나타낸다. 모드가 전환될 때에는 예인선의 위치 변화가 이루어진다. 예인선은 선박에서 이탈하여 계류 위치를 변경하고, 변경하는 시간 $T$ 동안에는 제어입력 $\tau$가 0이 되도록 하였다. $G$ 함수는 변수 $q$ 값이 이전 값과 같으면 해당 예인선 모드를 유지하며, 이전 값과 다르면 모드 전환이 이루어진다. 새로운 모드가 시작될 때는 $R$ 함수에 의해 제어 입력값이 초기화된다.

### 2.4 외란 모델링

해양환경에서는 바람, 조류, 파도에 의한 외란이 작용하나, 선박 접안이 이루어지는 항구에서는 바람에 의한 영향이 조류, 파도에 의한 영향에 비해서 지배적으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 바람에 의한 외란의 영향을 고려하였다.

선박에 미치는 바람의 힘은 선박의 측면 투영면적과 풍력 계수로 식 (4)와 같이 표현된다(Fossen, 2011).

$$\tau_{wind}=\frac{1}{2}\rho_a V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_X(\gamma_{rw})A_{Fw} \\ C_Y(\gamma_{rw})A_{Lw} \\ C_N(\gamma_{rw})A_{Lw}L_{oa} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$V_{rw}$, $\gamma_{rw}$는 각각 바람의 상대속력과 상대방향, $\rho$는 기온에 따른 공기밀도를 의미한다. $A_{Fw}$, $A_{Lw}$는 각각 선박의 전방, 측면 투영 영역의 면적, $L_{oa}$는 선박의 길이를 의미한다. $C_X$, $C_Y$, $C_N$은 바람의 상대방향에 따른 바람 계수이다(Blendermann, 1994). 바람의 속력과 방향은 평균값을 기준으로 가우시안 분포(Gaussian density distribution)에서 추출하여 사용한다.

## 3. 강화학습 알고리즘

### 3.1 근위 정책 경사 알고리즘 (Proximal policy optimization)

본 연구에서는 에이전트의 연속 행동공간(Continuous action space)에 적합하고, 안정적이고 높은 성능으로 최근 강화학습에 가장 많이 쓰이고 있는 PPO 알고리즘을 사용하였다.

PPO 알고리즘은 신뢰 영역 기반의 정책 경사 알고리즘으로 연속 행동 집합인 정책을 업데이트 할 때 그 범위를 제한하여 안정적인 업데이트를 보장한다. 손실 함수는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$L(\theta)=E_t\left[\min(r_t(\theta),\ clip(r_t(\theta),1-\epsilon,1+\epsilon))\hat{A}_t\right], r_t(\theta)=\frac{\pi_\theta(a|s)}{\pi_{\theta_{old}}(a|s)} \quad (5)$$

$\theta$는 정책을 의미하며 $\pi_\theta$는 정책 $\theta$를 따랐을 때 행동 $a$를 취할 확률값이다. $r_t(\theta)$는 이전 정책과 현재의 정책의 확률값의 비율이고, 이 값과 $\epsilon$값에 따라서 clipping 된 값 중에서 작은 값을 손실함수 값으로 취하게 된다. $\hat{A}_t$는 시간 t에서 이득값을 의미하고(Schulman, 2017), 보상함수 식 (6)으로 계산되는 보상값 $R$을 이용하여 계산된다.

### 3.2 학습 네트워크

PPO 알고리즘에서는 가치 네트워크와 정책 네트워크를 공동으로 사용한다. 공동 네트워크는 2개의 hidden layer를 사용하며 각 layer는 64 노드로 구성되어 있으며 활성 함수(Activation function)로는 Tanh를 사용하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 학습 네트워크이며, 네트워크의 출력은 예인선의 제어 입력값으로 사용한다. 네트워크의 출력값은 각 예인선의 힘의 변화량과 힘의 방향의 변화량 그리고 예인선 모드를 선택하는 총 5개의 값$(\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, k)$으로 구성되어 있다. 이 중 $k$값은 예인선의 이산화된 모드 변화를 나타내기 위하여 -1에서 1까지의 연속적인 action 값을 2개로 이산화하였다. $-1 \le k < 0$이면 $q_1$ (예인모드), $0 \le k \le 1$이면 $q_2$ (접안모드)로 예인선 모드를 선택하도록 하였다.

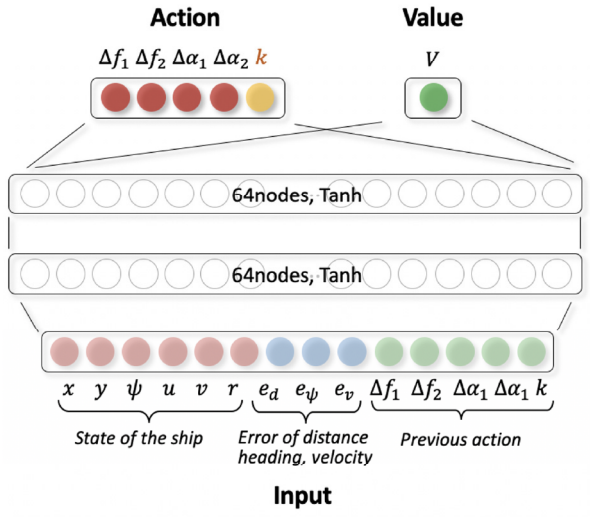



Fig. 3 Policy network and value network configuration

네트워크 입력은 관찰 공간(observation space)으로 선박의 상태를 나타내는 $x, y, \psi, u, v, r$과 보상함수 계산에 사용되는 $e_d, e_\psi, e_v$ (거리오차, 방위오차, 속력오차) 그리고 이전 단계의 출력값을 현재 단계에서의 네트워크 입력값으로 설정하였다. 네트워크 출력값이 제어입력의 변화량이기 때문에 네트워크가 이를 학습하게 만들기 위해서 이전 단계의 출력값을 다음 단계 입력값으로 정해주었다.

### 3.3 보상함수

보상함수는 목표하는 선박의 상태를 기준으로 현재 상태와의 오차를 계산하여 오차가 최소가 되었을 때 보상값 1을 받도록 설계하였으며 식 (6)과 같이 정의된다. $e_d$는 목표 지점과 현재 위치와의 오차, $e_\psi$는 목표 선수각과 현재 선수각과의 오차를 의미하며 $e_v$는 선박의 목표 속력과 현재 속력의 오차를 의미한다. 실제 접안에서는 선박이 저속으로 기동하기 때문에 목표 속력을 1.5m/s로 설정하였다.

$$R=\frac{-\|e_d\|-\|e_\psi\|-c\|e_v\|+\alpha}{\alpha}\ |\ p \quad (6)$$

세 개의 오차 값 중에서 속력 오차 값은 상대적으로 작기 때문에 그 비율을 고려하여 상수 $c$를 곱해주었고, $\alpha$값은 정규화 인자(normalization factor)로 보상 값을 0에서 1사이의 값으로 만들어주는 상수이다. $p$ 값은 벌점으로 선박이 부두에 부딪히면 받는 값으로 -1로 설정하였다.

보상함수 값은 매 시간 스텝마다 계산되어 네트워크 가중치를 업데이트하기 위한 손실함수 계산에 사용된다.

## 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 실제 인천 내항의 부두입항 시나리오로 구성하였다. Fig. 4는 인천 내항의 위성사진과 이 중 일부의 레이아웃을 이용하여 만든 시뮬레이이다.

예인선은 예인모드로 좁은 갑문에서 시작하여 목표 지점에 접안하도록 하는 시나리오를 구성하였으며 예인선의 모드전환은 매 200초 마다 한 번씩 결정되며 제어 주기는 1초이다.

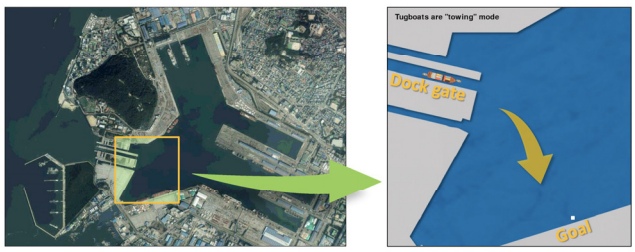



Fig. 4 Image of Incheon inner port and simulator

예인선은 실제 사용하는 예인선의 제원을 고려하여 미는 힘은 800마력(596kN), 당기는 힘은 미는 힘의 60%인 480마력(358kN)으로 설정하였다. 제어입력에 대한 제약조건은 Table 1과 같다.

**Table 1** Constraints of control input

| | Towing mode | | Berthing mode | | Unit |
|---|---|---|---|---|---|
| | Min | Max | Min | Max | |
| $f_1$ | -596 | 0.0 | -358 | 596 | kN |
| $f_2$ | -358 | 0.0 | -358 | 596 | kN |
| $\alpha_1$ | -240 | -120 | 30 | 150 | ° (deg) |
| $\alpha_2$ | -60 | 60 | 30 | 150 | ° (deg) |
| $\Delta f$ | -59.6 | 59.6 | -59.6 | 59.6 | kN |
| $\Delta\alpha$ | -1.9 | -1.9 | -5.7 | -5.7 | ° (deg) |

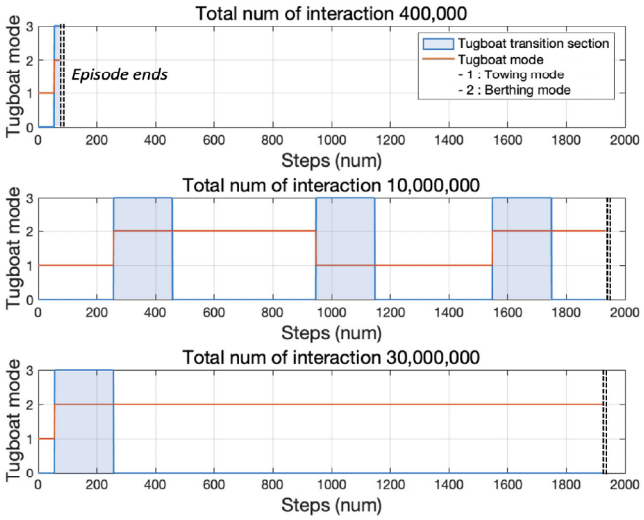



**Fig. 5** Tugboat mode transition according to training progress

Fig. 5는 학습 경과에 따른 예인선 모드 전환을 나타낸 것이다. 학습 초기에는 좁은 갑문을 통과하기 때문에 선박이 부두에 부딪혀 에피소드가 일찍 종료되었지만 학습이 진행됨에 따라 선박은 갑문을 통과하였다. 이후 모드전환이 2회 이상 일어났으며 최종 학습 단계에서는 단 한 번의 모드전환이 실행되고 접안모드로 최종 위치에 도달하도록 학습되었다.

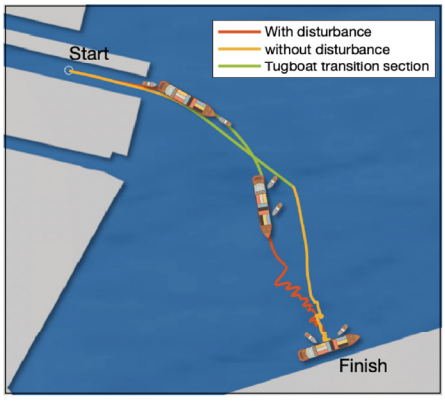



**Fig. 6** Training result on simulator

Fig. 6은 학습된 결과를 시뮬레이터 화면상에 나타낸 것이다. 빨간색, 노란색 궤적은 각각 외란이 작용할 때와 작용하지 않을 때 선박의 궤적을 의미하며 녹색 구간에서 예인선 모드 전환이 이루어졌다. 외란은 풍속 11~13m/s, 풍향은 205~215° 로 설정하였다. 강한 외란에서도 강화학습 기반의 제어 방법으로 자율 접안이 가능하다는 유용성을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 정책 경사 방법의 강화학습 알고리즘 중 하나이 PPO 알고리즘을 이용하여 예인선의 위치 이동까지 고려한 선박의 접안 문제 해결을 시도하였다. 예인선 2대에 대해 선박에 계류하는 위치에 따라 예인모드와 접안모드 2가지로 예인선 모드를 정의하였으며 각 모드에서 예인선의 제어문제를 강화학습을 이용하여 해결하였다.

예인선을 이용한 접안 제어 문제를 다루되 강화학습 기법을 활용하여 예선의 이동과 운용 판단의 자율화를 시도하고 그 가능성을 확인한 국내 최초의 연구 사례이며 이후 지속적인 연구를 통해 연구 내용과 결과를 구체화할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2020년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 '자율운항선박 기술개발사업(PMS4460, 지능형 항로 의사결정 기능을 갖는 자율운항 시스템 개발)' 연구 결과입니다.

## 참 고 문 헌

Blendermann, Werner. (1994). "Parameter identification of wind loads on ships." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. pp 339-351.

Fossen, Thor I. (2011) "Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control." John Wiley & Sons.

Im, Namkyun. (2012). "A study on ship automatic berthing with assistance of auxiliary devices." International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 4, No 3, pp 199-210.

Kawai, Hideki, Young Bok Kim, and Kwon Soon Lee. (2011) "A ship berthing system design with four tug boats." Journal of mechanical science and technology 25, No 5, p 1257.

Perez, Tristan, and Thor I. Fossen. (2009) "A matlab toolbox for parametric identification of radiation-force models of ships and offshore structures." , pp 1-15.

Schulman, John, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, and Oleg Klimov. (2017) "Proximal policy optimization algorithms." arXiv preprint arXiv:1707.06347.

# 수중글라이더의 제어알고리즘을 통한 에너지 효율 개선

나승규* · 이신제* · 최형식** · 김준영*
*한국해양대학교 조선기자재공학과
**한국해양대학교 기계공학과

# Improving energy efficeincy through the control algorithm of underwater gliders

Seung-Kyu La*, Sin-Je Lee*, Hyeung-Sik Choi** and Joon-Young Kim*

*Division of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime and Ocean University Busan, Korea
**Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University Busan, Korea

**KEY WORDS:** Underwater glider 수중글라이더, Buoyancy control 부력제어, Motion control 자세제어, Control algorithm 제어 알고리즘

**ABSTRACT:** *Underwater gliders use the difference between buoyancy and gravity to gain momentum. The buoyancy is adjusted to obtain propulsion, and the buoyancy is changed through volume change using a buoyancy controller. The attitude of the underwater glider changes due to the change of the center of mass and the moment of inertia by the change of the position of the internal moving mass battery using PID control of the driven yaw angle tracking. In this paper, energy efficiency improvement and behavior were confirmed through simulation by improving and changing the control algorithm.*

## 1. 서 론

최근 육지 자원의 부족 및 다양한 연구 활동을 위해 해양탐사의 수요 증가가 이루어지며, 효율적이고 장기적으로 활용 가능한 탐사 장비 수요가 증가하고 있다. 해양 탐사 장비들 중에서 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 것은 원격제어 무인잠수정과 자율 무인잠수정과 같은 형태이나, 그 활동 범위가 제한적이고 수중에서의 운용 시간 및 활용 한계성을 지닌다. 이러한 제한적인 활동범위와 운용 시간을 극복하며 넓은 범위 및 장기간 운용 가능한 해양 탐사를 자율적으로 수행하기 위해 수중에서의 무인잠수정의 전력 소비 최소화하는 시스템 개발이 요구되어진다.

추진기를 통해 추진력을 얻는 무인잠수정과는 달리 수중글라이더는 선체 내부 이동질량 배터리와 부력 엔진을 통해 선체의 자세와 부력을 조절하여 추진력을 얻는다. 추진력을 얻기 위해 지속적으로 에너지 소모를 해야하는 무인잠수정과 달리 잠항과 부상을 위한 부력 변경과 배터리 이동에 대한 에너지 소모를 통해 추진력을 얻어 에너지 효율을 극대화 시킬 수 있다. 이와 같은 장점을 바탕으로 탐사 장비 탑재를 통해 해양환경 조사 및 정보 수집이 장기간 가능하다는 특징을 가진다.

본 논문에서는 무인 수중글라이더의 에너지 효율 개선을 위한 내부 이동질량 배터리 이동을 최소화하고자 제어 알고리즘 설계를 수행하였다. 이를 위해 6자유도 운동 모델링을 수행하고, Matlab/Simulink를 통해 수중글라이더의 운동 특성 및 기존 PID 제어와 새로 적용된 제어 알고리즘을 각각 적용해 확인하였다.

## 2. 시스템 구성 및 동역학 모델링

### 2.1 시스템 구성

일반적으로 무인 수중글라이더의 형상은 수중에서 효율적인 거동을 위해 Fig. 1과 같이 어뢰형으로 되어있다. 선체 중앙에 두 개의 수평 날개가 설치되어있고, 선미에는 안테나를 포함하는 수직 조향 제어기가 부착되어있다. 선수와 선미는 Myring profile을 적용하여 설계되었으며, 선수 노즈콘 속에 부력제어를 담당하는 오일 블레더(Oil Bladder)가 위치하도록 설계하였다(Fig. 2(a)). 선미의 카울링에는 수직 조향 제어기와 진회수 장치가 위치하도록 설계되었다. 선체의 내부는 선수 부분, 선체중앙, 선미 부분으로 나뉜다. 선수 부분에는 부력을 제어하기 위해 사용되는 유체인 오일을 담기 위한 오일탱크와 수중글라이더 장기운용을 위한 고정배터리가 위치하도록 설계되었으며, 선체 중앙은 페이로드를 적용하도록 설계되었다. 페이로드에는 해양 탐사 및 운용 목적에 맞게 센서 및 장비를 탑재하거나 장기 운용을 위한 배터리 설치 공간으로 이용된다. 선미 부분의 내부 이동질량 배터리는 조향 제어기가 따로 없어 내부 이동질량 배터리의 회전으로 선회하는 수중글라이더와 달리 모터를 이용해 전,후진만을 하며 이를 통해 종동요각에 대한 자세 제어가 가능하도록 설계되었다(Fig. 2(b)). 선수 부분의 모터를 이용해 노즈콘의 블레더로 토출과 탱크로의 흡입은 일정한 유량만큼 이동하도록 설계하였다.

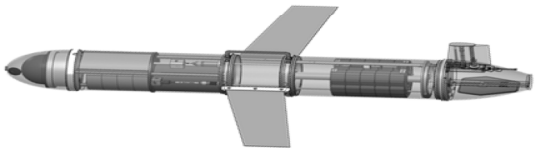
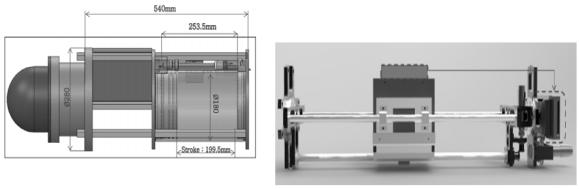


Fig. 1 3D illustration and internal structure of the underwater glider



(a) Oil bladder (b) Mass shifter unit

Figure. 2 Controller of buoyancy and posture

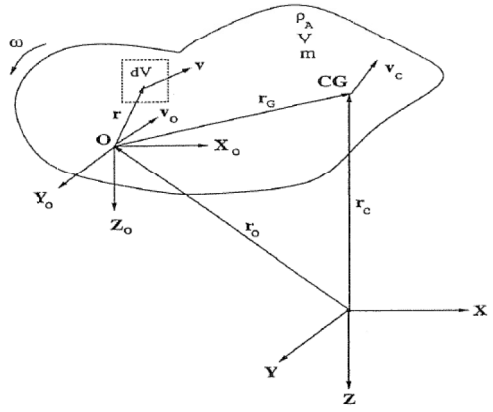



Fig. 3 The inertial earth-fixed frame and body-fixed frame

## 2.2 좌표계 설정 및 운동 모델링

설계된 무인 수중글라이더의 부력 추진기와 내부 이동질량 배터리에 따른 자세제어장치에 따른 동적 거동 파악과 제어 성능 확인을 위해 수중글라이더의 수학적 동역학 모델이 필요하다. 수중글라이더에 대한 6자유도 운동방정식을 유도하기 위해 좌표계를 Fig. 3와 같이 지구 고정좌표계와 선체 고정좌표계를 설정하였다.

Fig. 3에서 정의된 좌표계에 따라 병진운동과 회전운동에 대한 운동방정식은 식(1)과 같이 표현된다. (Fossen, 1994).

여기서 $u,v,w$ 와 $p,q,r$은 각각 $x,y,z$ 축에 대한 수중글라이더의 병진운동 속도와 회전운동 각속도를 나타내며, $I$는 각 첨자 축의 질량관성모멘트를 나타낸다. 식 우변에 있는 $X,Y,Z,K,M,N$은 수중글라이더에 작용하는 외력과 모멘트이다.

$$
\begin{aligned}
&m[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})]=X\\
&m[\dot{v}-wp+vr-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(pq+\dot{r})]=Y\\
&m[\dot{w}-up+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(pr-\dot{q})+y_G(qr+\dot{p})]=Z\\
&I_{xx}\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr-(\dot{r}+pq)I_{xz}+(r^2-q^2)I_{yz}+(pr-\dot{q})I_{xy}\\
&\quad+m[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)]=K\\
&I_{yy}\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})rp-(\dot{p}+qr)I_{xy}+(p^2-r^2)I_{zx}+(qp-\dot{r})I_{yz}\\
&\quad+m[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)]=M\\
&I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq-(\dot{q}-rp)I_{yz}+(q^2-p
\end{aligned}
\tag{1}
$$

무인 수중글라이더의 질량은 식(2)와 같이 선체의 질량, 선체의 고정 질량, 부력제어기 속 블레더와 탱크 오일의 질량, 자세제어기의 내부 이동 질량의 합으로 정의된다. 부력제어기의 유체의 이동과 자세제어기의 내부 이동질량 배터리의 이동으로 실시간으로 변화한다. 부력 제어기와 자세 제어기의 변동으로 인해 질량 중심(식(3))과 부력 중심(식(4)), 질량관성모멘트(식(5))의 변화는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 유체의 특성상 고정된 형태가 아니므로 노즈콘에 위치한 블레더의 형태는 구의 형태로 가정하여 산출되며, 이 변화에 의해 발생한 선체의 질량 관성모멘트를 고려하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$
m_t = m_{hull} + m_{stat} + m_{\tan k} + m_{oil} + m_{mov} \tag{2}
$$

$$
\overrightarrow{r_{cg}} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \frac{m_{hull}\overrightarrow{r_h} + m_{stat}\overrightarrow{r_s} + m_{\tan k}\overrightarrow{r_t} + m_{oil}\overrightarrow{r_o} + m_{mov}\overrightarrow{r_m}}{m_t} \tag{3}
$$

$$
\overrightarrow{r_{cb}} = \begin{bmatrix} x_{cb} \\ y_{cb} \\ z_{cb} \end{bmatrix} = \frac{V_{fix} \bullet \overrightarrow{r_{fix}} + \Delta V \bullet \overrightarrow{r_{be}}}{V_{fix} + \Delta V} \tag{4}
$$

$$
\begin{aligned}
I = &(I_{hull} - m_{hull}\hat{r}_h\hat{r}_h) + (I_{stat} - \hat{r}_s\hat{r}_s) + (I_{oil} - \hat{r}_o\hat{r}_o)\\
&+ (I_{\tan k} - \hat{r}_{tk}\hat{r}_{tk}) + (I_{mov} - \hat{r}_m\hat{r}_m)
\end{aligned}
\tag{5}
$$

위의 식에서 $I_{hull}$은 선체고정좌표계의 원점에서 선체(hull)의 질량관성모멘트, $I_{stat}$은 내부고정질량의 질량관성모멘트, $I_{mov}$은 위치에 따라 변화하는 내부 이동질량 배터리의 질량관성모멘트, $I_{oil}$은 구의 형태로 가정한 오일 블레더의 유체 유출입으로 인해 변화하는 질량관성모멘트, $I_{oil}$은 선수 내부에 위치하는 오일 탱크의 유체에 따른 질량관성모멘트를 나타낸다. 왜대칭행렬(skew symmetric matrix)을 의미하는 연산자 $\hat{}$를 이용해 실시간으로 변화하는 수중글라이더의 관성모멘트 $I$를 구할 수 있다.

## 3. 제어 알고리즘 변화 및 운동성능 해석

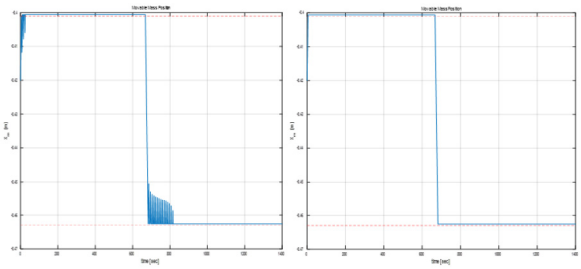
### 3.1 제어알고리즘 적용

비선형 6자유도 운동방정식과 부력제어기, 내부 이동질량 배터리의 이동을 고려하여 고전적인 PID 제어를 이용해 종동요각(Pitching Angle) 추종 제어를 해왔다. 적합하지 않은 PID 계수를 적용하거나 외란으로 인하여 잦은 자세 제어기의 가동으로 에너지 비효율을 초래할 수 있다.

본 논문의 글라이더는 장기간 운용을 목적으로 하므로 에너지 효율 증가가 필수적이다. 부력제어기는 상승, 하강 운동 전환 시 요구 유체량만큼만 이송하며, 전기회로 부분에서는 필수적인 요소 외 전원 공급을 차단하여 에너지 효율을 증가시킨다. 이 외에 자세 제어기인 내부 이동질량 배터리에서 에너지 소모를 감소시키고자 제어알고리즘을 적용하였다.

본 글라이더의 부력제어기는 공기압을 이용해 해수를 흡입 및 토출하는 것과 달리 노즈콘의 블레더로 유체를 이동시켜 부력을 제어한다. 이로 인해 발생하는 질량관성모멘트의 영향으로 자세제어가 불안정해 일반적인 PID 제어 시 내부 이동질량 배터리의 이동으로 에너지 소모가 발생함을 확인할 수 있다(Fig. 4(a)). 본 논문의 제어알고리즘은 상승 하강 운동 시 목표 종동요각 ±35°으로 모터 출력을 이용해 일정하게 내부 이동질량 배터리를 이동시킨다. 배터리의 위치를 식(6)을 이용하여 산출한다. 관성으로 발생한 오차는 Fig. 5와 같이 실험적으로 설정된 λ의 범위 내에서만 PID 제어를 작동하여 종동요각을 유지한다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_{cg} - x_{cb}}{z_{cg} - z_{cb}}\right) \tag{6}$$



(a) Classical PID Control (b) Adjusted PID Control

Fig. 4 Position of Movable Mass(Battery)

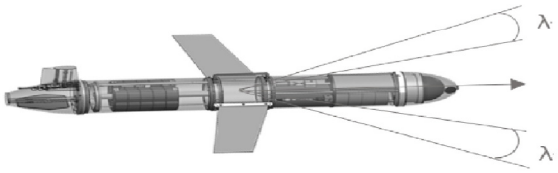



Fig. 5 Range of adusted PID control

### 3.1 운동성능 해석

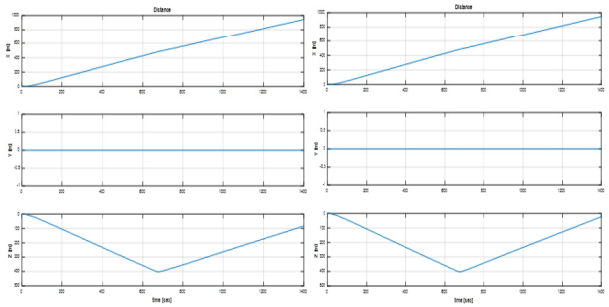
Matlab/Simulink를 통해 기존 PID 제어를 이용했을 때와 제한적인 범위에서 PID 제어를 사용했을 때 각각의 시뮬레이션을 구성하여 비교한다. 시뮬레이션 시 유체는 외란의 영향이 없다는 가정 후 시뮬레이션을 수행하였다.

부력제어기는 모터를 통해 일성하게 증가 감소하며, 내부 이동질량 배터리의 움직임을 통해 자세 제어를 수행한다. Fig. 4(a)는 일반적인 PID 제어를 사용했을 때 배터리의 전후진이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4(b)은 내부 이동질량 배터리의 자세 제어 시간은 Fig. 4(a)에 비해 오래 걸리나 배터리 전후진이 적다. Fig. 4을 통해 제어알고리즘 변경으로 에너지 소모 감소로 인해 운용시간 증가가 가능함을 확인할 수 있다.

수중글라이더의 상승 하강 운동의 한 사이클을 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 제한적인 PID 제어 사용을 한 Fig. 6(b)에서 상승, 하강 운동을 하는 시간보다 Fig. 6(a)의 상승, 하강 운동 시간이 더 소요되는 것을 확인할 수 있다. 수평 진행 거리에서도 Fig. 6(b)에서 효과가 있음을 알 수 있다.

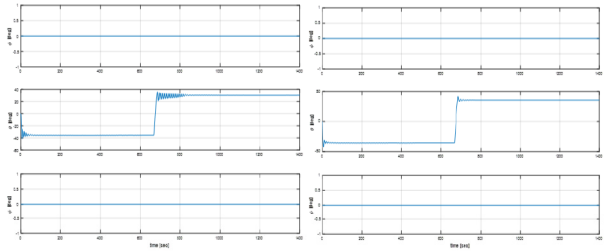
피스톤 방식으로 부력제어를 하는 수중글라이더에 비해 유체를 이용하는 방식인 본 연구의 수중글라이더는 유체의 이동에 따른 관성모멘트의 변화가 크다. 따라서 자세 제어기의 이동이 수중글라이더의 종동요각에 미치는 영향이 크기 때문에 내부 이동질량의 이동이 중요한 역할을 한다. Fig. 4(a)에서 내부 이동질량의 이동 시에 종동요각에 미치는 영향을 Fig. 7 (a)에서 확인할 수 있듯이 해당 구간에서 종동요각이 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 해당 구간의 감소를 위해 제어알고리즘을 변경하여 적용 시 오차 구간을 줄이고 빠르게 목표 종동요각에 수렴하는 것을 Fig. 7(b)를 통해 확인할 수 있다.

자세 제어 및 부력 제어가 수중글라이더의 선체 속도의 안정화에 미치는 영향은 Fig. 8을 통해 알 수 있다. 일시적으로 선속의 증가가 있으나 Fig. 6를 같이 확인하면 수평 속도 및 수직 속도 모두에서 기존의 PID 제어가 비효율적인 모습을 보이고 있다.



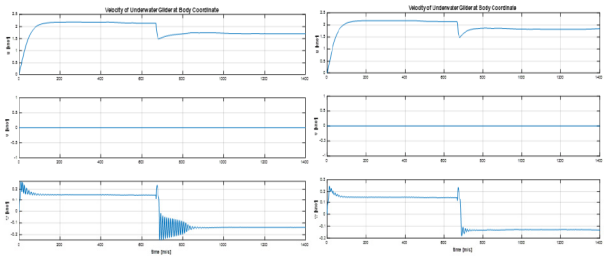
(a) Classical PID Control (b) Adjusted PID Control

Fig. 6 2D trajectory of pitch control



(a) Classical PID Control (b) Adjusted PID Control

Fig. 7 Angles of underwater glider when moving mass move forward and backward



(a) Classical PID Control (b) Adjusted PID Control

Fig. 8 Velocity of underwater glider

## 5. 결 론

본 논문에서는 수중글라이더의 운동특성을 반영하여 동역학 모델링을 수행하였고, 전개된 6자유도 운동방정식을 이용하여 Matlab 프로그램을 통해 시뮬레이션을 구성하였다. 운동 시뮬레이션에 기존의 PID 제어와 변경된 제어 알고리즘을 적용하여 수중글라이더의 운용 목적인 장기 운용을 위한 에너지 효율을 비교하였고 에너지 효율 증가 가능성을 확인하였다. 또한 자율 운항을 위한 부력제어기와 자세제어기의 제어 가능성을 확인하였다. 추후 해당 제어알고리즘의 타당성 검증을 위해 실험적으로 산정한 제어알고리즘 가동 범위를 수식적으로 정립하고, 외란 및 조향 제어기를 추가한 시뮬레이션 프로그램 구성을 추진할 계획이다. 또한 운용 가능성 확인을 위한 소형 글라이더 제작을 통해 실해역 실험을 추진할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업을 통해 수행 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Bhatta,P., Leonard,N.E, 2008. “Nonlinear gliding stability and control for vehicle with hydrodynamic forcing.”, Automatica, 44(5), 1240-1250.

Fossen,T.I, (1994). “Guidance and control of ocean vehicles”, John wiley & sons, New York.

Leonard,N.E, Graver,J.G, (2001). “Model-based feedback control of autonomous underwater gliders”, IEEE. J of oceanic engineering, Vol 26, no 4, pp 633-645.

Yu,J.C, Zhang,A.Q, Jin,W.M, Chen,Q, Tian,Y, Liu, C.J, (2011)“Development and experiment of the sea-wing underwater glider”, China ocean eng., Vol 25, No.4, pp 721-736.

# 2020년도 한국해양공학회 추계학술대회

## 일반세션

# 불규칙파 중 원통형 부유체의 운동 수치 시뮬레이션

손보훈* · 정세민**
*조선대학교 선박해양공학과
**조선대학교 스마트이동체융합시스템공학부

# Numerical Simulation of Cylindrical Floating Body's Motion in Irregular Waves

Bo-Hun Son*, Se-Min Jeong**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea
**Faculty of Smart Vehicle System Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

**KEY WORDS:** Numerical Wave Tank 수치조파수조, Target Wave-fields 목적 파랑장, Input Wave Spectrum 입력 파랑 스펙트럼, Parameter Study 파라미터 연구, Motion Response Spectrum 운동 응답 스펙트럼

**ABSTRACT:** *The impact force acting on a fixed or floating body from waves and the motion performance of a floating body, are important topics in naval architecture and ocean engineering, and have been mainly performed by experimental methods or potential-based analytical methods. However, in recent years, researches using a Numerical Wave Tank (NWT) have been actively performed by replacing experiments owing to the rapid development of CFD techniques and computer performance.*

*In this study, a parameter study was carried out to find optimum grid system, the number of input wave components and numerical technique for reproducing the wave field that satisfies input wave spectrum when implementing NWT using Siemens' STAR-CCM+, a commercial CFD SW widely used to fluid-related analysis in the naval architecture and ocean engineering. Based on the results of parameter study, the numerical simulation of floating body's motion in irregular waves was carried out. And the pitch and heave motion response spectrum were compared with the results of potential based motion analysis, a commercial SW ANSYS AQWA.*

## 1. 서 론

파랑으로 인해 고정 혹은 부유된 물체에 작용하는 충격력과 파랑중 부유체의 운동 및 내항 성능 예측은 조선해양공학에서 중요한 주제이다. 특히, 해양에 설치되어 위치를 유지하며 작업을 수행하는 부유식 구조물의 경우, 구조물의 고유 진동수와 작업 해역의 파랑 진동수가 가까워지면 공진(Resonance)으로 인해 큰 운동이 발생할 수 있다. 이러한 큰 운동은 동적 안정성 상실, 작업능률 저하 및 구조적 손상을 야기할 수 있어 이를 방지 및 억제해야 하지만, 파력 발전장치(Wave energy converter)처럼 운동을 어느 정도까지 크게 하여 에너지 추출 효율을 높이기도 한다. 어떤 경우이던, 부유식 구조물의 파랑중 운동성능의 추정은 매우 중요하다.

파랑에 의한 충격력 예측 및 파랑중 부유체의 운동성능 예측은 주로 실험적인 방법이나 포텐셜 기반의 해석적 방법으로 수행되어져 왔다. 하지만, 최근에는 CFD 기법과 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 실험을 대체하여 수치조파수조(Numerical Wave Tank, NWT)를 활용하는 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. NWT에서 중요한 것은 목적 파랑장(Wave-fields)을 효율적으로 정확히 구현하는 것으로, 파 형상의 수치 확산 최소화, 경계에서의 반사파 억제 등이 난제이며, 목적파(스펙트럼)에 맞는 최적의 격자비, 시간간격 등을 선정하는 것 또한 중요하다. Perić and Abdel-Maksoud(2017)과 Perić(2019)은 상용 SW STAR-CCM+를 활용한 수치조파수조에서의 반사파의 억제와 관련한 파라미터 연구를 수행하였다. Miquel et al.,(2018)은 OpenSource 프로그램인 REEF3D를 이용하여, 수치조파수조내의 반사파 억제를 위한 수치 기법을 개발하였다. Gatin et al.,(2017)은 포텐셜 유동을 기반으로 하는 High Order Spectrum 방법을 OpenFOAM과 결합하여 불규칙파를 재현하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 최근 조선해양공학 분야에서 널리 사용되고 있는 상용 SW인 Simens사의 STAR-CCM+를 이용하여, 수치조파수조에서 목적 파 스펙트럼을 만족시키는 불규칙파를 효율적으로 재현하기 위한 파라미터 연구를 수행하였다. 불규칙파 재현 파라미터 연구는 계산 비용을 고려하여 2차원 수치조파수조에서 수행되었다. 설정한 파라미터는 유의 파고당 격자수, 각 방향 격자비, 파 구성 개수, 시간 간격 및 계산 시간이다. 재현된 불규칙파의 정도 검증을 위해서 시계열 결과는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 이용하여 스펙트럼으로 변환한 후 목적 파랑장의 스펙트럼과 비교하였다. 불규칙파 중 등부표의 운동 시뮬레이션에는 2차원 불규칙파 재현 시뮬레이

션의 결과 중 가장 효율적이라고 판단되는 조건을 사용하여 수행하였다. 이를 통해 추정된 pitch와 heave 운동 응답 스펙트럼을 포텐셜 기반 운동 해석(AQWA) 결과와 비교하였다.

## 2. 수치 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 2가지 수치 시뮬레이션(2차원 불규칙파 재현 시뮬레이션 & 불규칙파 중 운동 시뮬레이션)을 수행하였다. 먼저, 목적 파랑 스펙트럼을 만족시키기 위한 2차원 불규칙파 재현 시뮬레이션을 수행하고, 이를 통해 얻어진 가장 효율적이라고 판단되는 파라미터 조합을 도출하였고, 이를 사용하여 불규칙파 중 운동 시뮬레이션을 수행하였다.

### 2.1 지배 방정식

사용된 지배 방정식은 비정상(Unsteady) 및 비압축성(Incompressible) 난류유동의 지배방정식으로 연속방정식과 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였으며, 각각 식 (4)와 식 (5)으로 나타내어 질 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\nu + \nu_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right\} + f_i \tag{5}$$

여기서 $u$는 속도벡터, $x$는 좌표, t는 시간, $\rho$는 밀도, $p$는 압력, $\nu$는 동점성계수, $\nu_t$는 와동점성계수, $f$는 외력을 나타낸다.

### 2.2 수치 시뮬레이션 조건

불규칙파 재현 시뮬레이션과 불규칙파 중 운동 시뮬레이션 모두 난류모델로는 Realizable k-$\varepsilon$ model을 이용하였으며, 자유수면(Free surface)의 포착에는 VOF(Volume of fluid)법을 이용하였다. CFD 해석 프로그램은 STAR-CCM+ 14.06d을 사용하였다. 4장에서 설명하는 부유체의 운동을 구현하기 위해 중첩 격자계(Overset grid)를 적용하였으며, 6자유도(Degree of Freedom)를 모두 허용하였다.

## 3. 불규칙파 재현 시뮬레이션

불규칙파를 재현하기 위한 해양파 스펙트럼으로는 완전 발달된 해상 상태를 나타내는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 이용하였다(식 (1)). 본 연구에서 설정한 실해역 조건은 Beaufort Wind Scale 4이다(Table 1). Beaufort Wind Scale 4의 유의 주기와 유의 파고를 통해 계산된 스펙트럼은 Fig. 1과 같이 표현된다. 불규칙파는 다수의 규칙파를 선형 중첩(Linear Superposition)을 통하여 재현된다(식 (2)). 스펙트럼으로부터 불규칙파의 진폭은 주파수 간격이 동일한 경우, Journee(2001)에 의해 제안된 식 (3)으로 구해진다. 구해진 불규칙파의 진폭은 수치 시뮬레이션에서 경계 조건으로 사용된다. 수치 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 시계열 결과는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 이용하여 주파수 영역의 에너지 밀도 스펙트럼으로 변환 되었으며, 데이터의 평활화를 위해 Hamming Window를 적용하였으며 이를 목표 스펙트럼과 비교하였다.

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi}\frac{H_{1/3}^2}{4\pi T^4}\left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^5 \exp\left(-\frac{1}{\pi T^4}\left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^4\right) \tag{1}$$

$$\zeta(x,t) = \sum_{n=1}^{N} \zeta_n \cos(k_n x - \omega_n t + \epsilon_n) \tag{2}$$

$$S(\omega)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_{an}^2 \tag{3}$$

여기서, $\omega_e$는 유의 파진동수, $H_{1/3}$는 유의 파고, $T$는 주기, $\zeta_n$은 불규칙파의 각 성분의 진폭, $k_n$은 파수, $\omega_n$은 각주파수, $\epsilon_n$은 위상각을 나타낸다. 위상각 $\epsilon_n$은 난수 생성기를 통해 생성하였으며, Seed를 고정하여 매 회 같은 값이 나오도록 하였다.

**Table 1** Environmental condition regarding Beaufort wind scale

| No. | $H_{1/3}$ [m] | $T_{1/3}$ [s] |
|---|---|---|
| 1 | 0.1 | 1.22 |
| 2 | 0.2 | 1.73 |
| 3 | 0.6 | 2.99 |
| **4** | **1.0** | **3.86** |

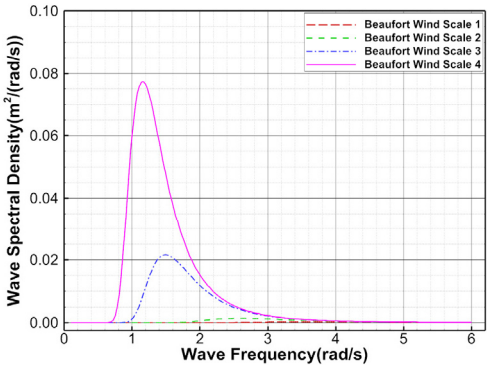



**Fig. 1** Pierson-Moskowitz wave spectrum

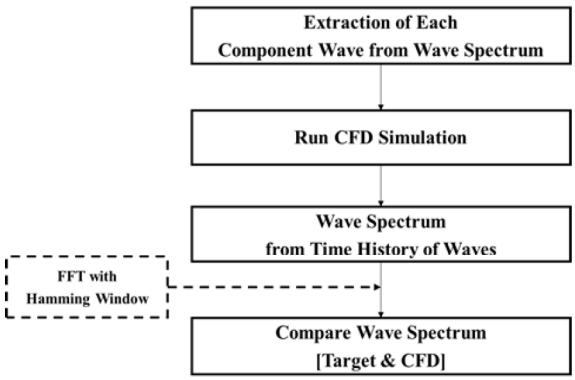



**Fig. 2** Procedure for simulation of reproduction of irregular waves

### 3.1 계산 영역, 경계조건 및 격자계

계산영역의 연직 아랫 방향에서 천수 효과(Shallow Water Effect)를 받지 않도록 충분한 깊이를 설정하였다. 경계 조건은 상부 경계에 Pressure Outlet을 적용하였으며, 이 외의 경계에는 Wave Forcing을 적용하기 위해 모두 Velocity Inlet을 적용하였다. CFD Zone은 2.0 $\lambda_P$ 그리고 파 강제 구간은 1.0 $\lambda_P$를 설정하였다. 불규칙파를 포착하기 위한 격자계의 생성을 위해서 STAR-CCM+에 내장되어 있는 격자 생성기인 Trimmer를 이용하였다. Trimmer의 특성상 각 방향의 격자 크기는 Base Size의 $2^n$으로 결정되기 때문에, 유의 파장당 격자수 혹은 유의 파고당 격자수와 종속 관계에 있다. 본 연구에서는 파고당 격자수를 선정한 이 후 $dx_{\min}/dz_{\min}$의 비에 따라 파장당 격자수가 결정되도록 하였다. 파고당 격자수 $N_z$는 극치파($\approx H_{1/3}$의 2배)의 파고를 기준으로 30개를 설정하였으며, 이에 대응하는 파장당 격자수 $N_x$는 173개이다. 또한 Trimmer의 특성상 1Cell의 격자 생성이 어려우므로, OpenFOAM의 ExtrudeMesh 기능을 1Cell 격자로 변환하였다.

**Table 2** Standard parameter of reproduction of irregular waves

| Parameters | |
|---|---|
| $N_x$ | 173 |
| $N_z$ | 30 |
| $dx_{\min}/dz_{\min}$ | 4 |
| $dt$ | $T_P/256$ |
| Length of Forcing Zone | $1\lambda_P$ |
| Length of CFD Zone | $2\lambda_P$ |
| Number of Wave Components | 256 |

### 3.2 불규칙파 재현 시뮬레이션 결과

Fig. 3에 CFD 영역의 시작점에서 1피크 파장 떨어진 위치에서의 불규칙파 재현 결과를 나타내었다. 목표 스펙트럼과의 피크의 차이는 약 40%이며, 면적의 차이는 약 53%로 나타난다.

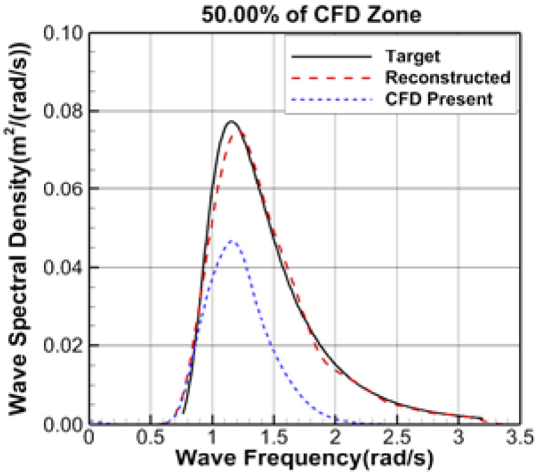



**Fig. 3** Comparison of spectrum between input irregular waves and CFD result at the start of CFD zone

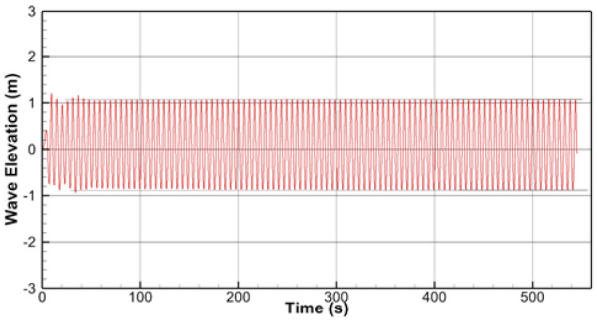


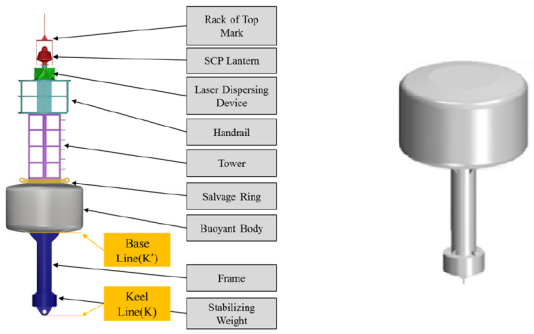

**Fig. 4** The time histories of single regular wave, which has $\lambda_P$ and $H_{max}$ under same analysis conditions

Fig. 4에 최대 파고 $H_{max}$(=2m)와 피크 파장 $\lambda_P$을(=46.231m) 가지는 단일파 규칙파의 결과를 보이고 있다. 이 시계열의 FFT를 수행하게 되면, 입사파의 진폭과 약 4%의 오차만을 보인다. 이에 비해 불규칙파의 경우는 약 40~50%인데 이는, 피크에서 상대적으로 멀리 떨어져있는 성분파들이 damping이 빠르게 일어나고, 위상 속도 차이로 분산(dispersion)하려고 하는 각 성분파들간의 중첩 등의 상호작용에서 기인하는 오차라고 생각된다.

## 4. 불규칙파 중 운동 시뮬레이션

### 4.1 해석 대상

최근 개발된 LL-24형 경량형 등부표(Jeong et al., 2020)를 대상으로 하였으며(Fig. 5(a)), 간략화 된 해석 모델의 높이는 4.08m, 부력체의 직경은 2.40m이다(Fig. 5(b)).




(a) Target lightweight light-buoy (b) simplified model

**Fig. 5** Target light buoy

**Table 3** Main particulars and hydrostatic properties

| Properties | Base |
|---|---|
| Mass [kg] | 2,423 |
| Diameter[m] | 2.40 |
| draft[m] | 3.036 |
| GM [m] | 1.052 |
| Ixx [kg·m$^2$] | 10,902 |
| Iyy [kg·m$^2$] | 10,913 |

### 4.2 계산 영역, 경계 조건 및 격자계

불규칙파 중 운동 시뮬레이션을 위한 계산 영역을 보이고 있다. 계산 영역의 크기 및 경계 조건은 3.1절에 나타낸 2차원 불규칙파 재현 시뮬레이션의 계산 영역, 경계조건은 동일하게 하였다. 격자계는 $dx_{\min}/dz_{\min}$의 비는 8로 변경하여 수행하였고, 이 때 생성된 격자수는 약 250만개이다. 등부표의 초기 위치는 CFD Zone의 0.125$\lambda_P$에 위치시켰다(Fig. 6).

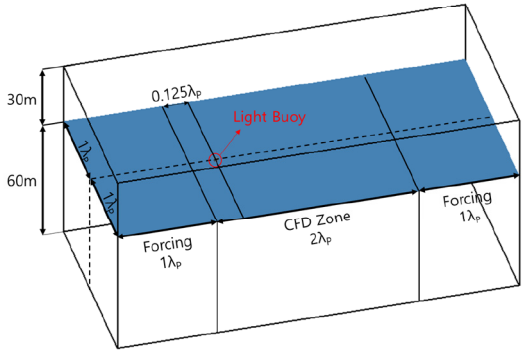



**Fig. 6** Computational domain for motion simulation in irregular waves

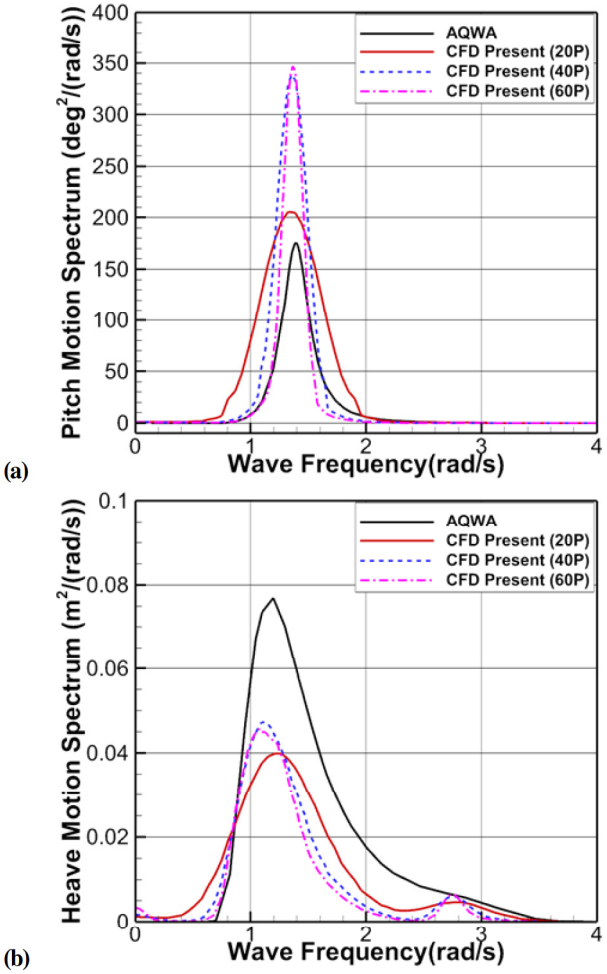



**Fig. 7** Motion response spectrum of (a)pitch and (b)heave

### 4.3 불규칙파 중 운동 시뮬레이션 결과

Fig. 7에 CFD를 통해 얻어진 pitch와 heave의 운동 시계열을 FFT 변환을 통해 스펙트럼으로 변환한 이 후 AQWA의 결과와 비교하여 나타내었다. CFD의 결과는 불규칙파 피크 주기를 기준으로 계산 시간을 20주기, 40주기 그리고 60주기 달리하여 나타내었다. 상대적으로 40주기와 60주기는 스펙트럼의 면적과 형상이 유사하게 나타나지만, 20주기는 다르게 나타난다. CFD를 통해 산출한 운동 스펙트럼에서 pitch는 AQWA보다 크게 추정되는 것으로 보이며, heave는 상대적으로 작게 추정하고 있는 것으로 나타난다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 불규칙파 중 원통형 부유체의 운동 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저, 2차원 불규칙파 재현 시뮬레이션을 수행하여, 목적 파랑 스펙트럼을 만족시키기 위한 파라미터 연구를 수행하였다. 불규칙파 재현 시뮬레이션을 통해 가장 효율적이라고 판단되는 파라미터 조합을 도출하였고, 이를 기반으로 불규칙파 중 운동 시뮬레이션을 수행하여, 얻어진 운동 응답 스펙트럼을 포텐셜 기반 운동 해석프로그램의 결과와 비교하였다.

## 참 고 문 헌

Perić, R. and Abdel-Maksoud, M., (2016). “Reliable Damping of Free-surface Waves in Numerical Simulations”, Ship Technol. Research., Vol 63, No 1, pp 1-13.

Peric, R., (2019). “Minimizing Undesired Wave Reflection at the Domain Boundaries in Flow Simulations with Forcing Zones”, Technische Universität Hamburg.

Miquel, A. M., Kamath, A., Alagan Chella, M., Archetti, R., Bihs, H., (2018). “Analysis of Different Methods for Wave Generation and Absorption in a CFD-based Numerical Wave Tank”, J. Mar. Sci. Eng., Vol 6, No 2, pp 73.

Gatin, I., Vukčević, V., Jasak, H., 2017, “A Framework for Efficient Irregular Wave Simulations using Higher Order Spectral Method Coupled with Viscous Two Phase Model”, J. Ocean Eng. Sci., Vol 2, No 4, pp 253-267.

Jeong, S.M., Son, B.H., Lee, C.Y. (2020). “Estimation of the Motion Performance of a Light Buoy Adopting Ecofriendly and Lightweight Materials in Waves”, Journal of Marine Science and Engineering, Vol 8, No 2, pp 139.

# 횡동요를 고려한 쌍축선박의 정수 중 조종성능에 관한 수치적 연구

이왕국* · 김상현* · 김인태* · 김지수* · 채순재* · 정두진**
*인하대학교 조선해양공학과
**대우조선해양

# A Numerical Study on the Maneuverability of a Twin-Screw Ship Considering Roll Motion

Wang-Gook Lee*, Sang-Hyun Kim*, In-Tae Kim*, Ji-Soo Kim*, SoonJae Chae* and DooJin Jung**

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea
** Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering co., LTD, Siheung, Korea

KEY WORDS: ONR tumblehome, Twin-screw ship, Roll motion, Manoeuvrability, Free running simulation, Computational fluid dynamics (CFD)

ABSTRACT: 일반적으로 정수 중 조종 성능에 대한 연구에서는 횡동요의 영향을 고려하지 않고 있다. 하지만 대형 컨테이너선, 고속 쌍축선 등의 선박은 조종 운동 시 횡동요 연성 효과를 무시할 수 없다. 특히 파랑 중에서 운항하는 선박의 경우 횡동요가 크게 발생하며 이를 고려한 조종 성능 추정이 이루어져야 한다. 본 연구는 파랑 중 쌍축선박의 조종 성능 추정 연구에 관한 기초 연구로써, ONR Tumblehome 선형을 대상으로 CFD를 이용한 자유항주시험을 통해 횡동요가 고려된 정수 중 조종 성능을 추정하였다. 횡동요의 영향을 연구하기 위해 5 자유도(Surge, Sway, Heave, Pitch, Yaw)와 6 자유도(Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw) 상태에서의 35 ° 선회 시뮬레이션 및 10 ° /10 ° 지그재그 시뮬레이션을 수행하고 공개된 자유항주 모형시험 결과와 비교하였다. 시뮬레이션 결과 횡동요를 고려한 경우에 조종 성능을 상대적으로 정도 높게 추정하고 있는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 정수 및 파랑 중 조종 성능 추정 시 횡동요의 영향에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 1. 서 론

선박의 정수 중 조종 성능을 추정하는 것은 중요한 주제이다. 일반적으로 정수 중 선박의 조종 성능 추정 시 횡동요의 영향을 고려하지 않고 있다. 하지만 횡메타센타 높이(GM)가 작은 대형 컨테이너선이나 고속으로 운항하는 쌍축선 등의 선박은 조종 운동 시 횡동요가 크게 발생한다. Kim et al(2011)은 KCS 선형을 대상으로 4자유도 조종 시뮬레이션을 수행하였으며, 3자유도 조종 시뮬레이션 결과와 비교하여 3자유도 추정에 비해 4자유도 추정 시 선회성능이 자유항주시험 결과에 더 근접하고 있다는 것을 보였다.

특히 파랑 중 운항하는 선박은 횡동요가 더욱 크게 발생하며 이를 고려한 조종 성능의 추정이 이루어져야 한다. Seo et al(2019)은 횡복원력이 매우 작은 KCS 선형에 대해 parametric roll을 포함한 파랑 중 선회 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구는 파랑 중 쌍축 선박의 횡동요의 영향을 고려한 조종 성능 추정 연구에 관한 기초 연구로써 SIMMAN2020에서 공개한 벤치마크 선종 ONR Tumblehome 선형을 대상으로 35° 선회 시뮬레이션 및 10° /10° 지그재그 시뮬레이션을 수행하고 공개된 자유항주 모형시험 결과와 비교하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 대상 선형

본 연구에서 선정한 ONR Tumblehome 선형은 SIMMAN 2020에서 공개한 벤치마크 선형으로, 2축 2타로 구동하며 수선면 위로 올라갈수록 좁아지는 tumblehome형 선형이다. ONR Tumblehome의 형상과 주요 제원은 각각 Fig. 1, Table 1에 나타내었다.

**Table 1** Main particulars of ONR Tumblehome

| Particulars | | Full Scale | Model Scale |
|---|---|---|---|
| Scale | | 1 | 48.9355 |
| Length of waterline [m] | | 154.0 | 3.147 |
| Maximum beam of waterline [m] | | 18.78 | 0.384 |
| Depth [m] | | 14.5 | 0.266 |
| Draft [m] | | 5.494 | 0.1123 |
| Wetted surface area (fully appended) [$m^3$] | | NA | 1.5 |
| Block coefficient | | 0.535 | |
| Propeller diameter [m] | | NA | 0.1066 |
| Propeller center location | $x/L_{PP}$ | 0.4267 | |
| | $y/L_{PP}$ | 0.02661 | |
| | $z/L_{PP}$ | -0.03565 | |
| Propeller shaft angle [deg] | | NA | 5 |
| Rudders turn rate [deg/s] | | 5.00 | 35 |



Fig. 1 ONR Tumblehome

### 2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어 STAR-CCM+ 13.06을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 계산 영역은 Fig. 2와 같으며, ITTC Recommended Procedures and Guidelines – Guideline on Use of RANS Tools for Manoeuvring Prediction(ITTC, 2011)에서 제안하고 있는 계산 영역에 만족하도록 지정하였다

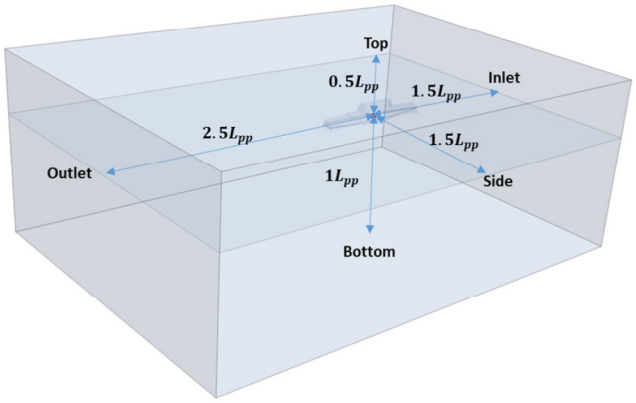



Fig. 2 Computational domain

격자는 STAR-CCM+가 제공하는 트리머 격자(Trimmed mesh) 기법과 경계층 격자(Prism layer) 기법을 사용하여 생성하였다. 트리머 격자를 이용하여 유동 특성에 따라 격자의 구성과 크기를 달리하였다. 자유수면과 선체주변에서는 격자의 크기를 비교적 작게 지정하고, 단순한 유동영역에서는 격자의 크기를 비교적 크게 지정하였다. 경계층 격자를 이용하여 선체 표면의 경계층 유동을 비교적 정확하게 계산하였고, 방향타와 선체의 움직임을 고려하기 위하여 DFBI 기법과 Overset mesh 기법을 사용하였다. 수치계산에 사용된 격자수는 약 420만개이다.

자유수면을 고려하기 위하여 VOF(Volume of fluid) 모델을 사용하였고, 난류 모델은 안정적이고 효율적인 수치계산을 위해 Realizable 모델을 사용하였다. 시간, 공간 이산화에는 각각 1차 음해법(Implicit method)와 2차 상류차분법(Upwind scheme)을 사용하였다. 수치계산 영역의 경계조건은 다음과 같다. 유입경계면(Inlet boundary)은 속도 유입 조건(Velocity inlet), 유출경계면(Outlet boundary)은 압력 유출 조건(Pressure outlet)을 지정해주었으며, 상하부 및 측면에서도 속도 유입 조건을 지정해주었다.

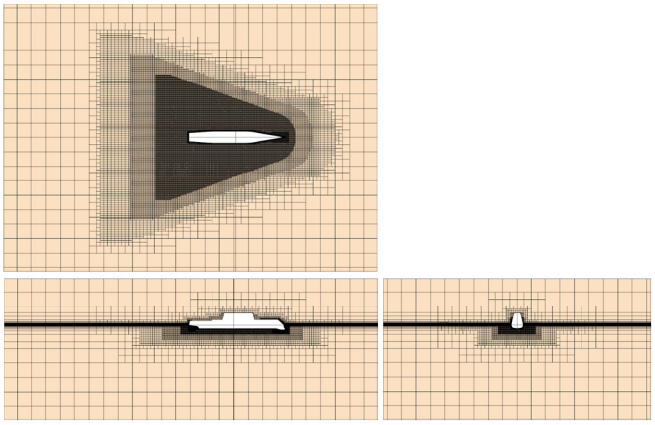


Fig. 3 Volume Mesh

Table 2 Boundary condition

| | Boundary condition |
|---|---|
| Inlet | Velocity inlet |
| Outlet | Pressure outlet |
| Side | Velocity inlet |
| Top | Velocity inlet |
| Bottom | Velocity inlet |
| ONRT | Wall |

## 3. 수치해석 검증

### 3.1 저항 해석

본 연구에서 저항 수치계산은 Fully appended ONRT의 설계선속(Fn=0.2, 1.111m/s)에서 수행하였으며, 선박을 고정시킨 채 유입속도를 주어 수행하였다. 저항 수치 계산의 검증을 위하여 IIHR의 모형시험 결과와 비교하였으며, 추가적으로 전저항계수($C_T$)의 성분을 마찰저항계수($C_F$)와 압력저항계수($C_P$)로 나누어 Lee et al.(2019)의 수치해석 결과와 비교하여 Table. 3에 나타내었다.

Table 3 Comparison of resistance coefficients

| | $C_T\ (\times 10^3)$ | $C_F\ (\times 10^3)$ | $C_P\ (\times 10^3)$ |
|---|---|---|---|
| IIHR EFD | 4.916 | - | - |
| CFD (Lee et. al, 2019) | 4.79 | 3.717 | 1.073 |
| CFD (Present study) | 4.83 | 3.732 | 1.098 |

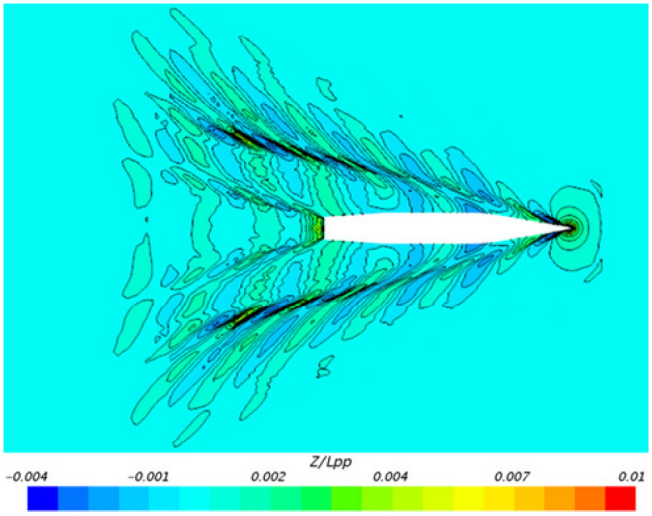



Fig 4 Resistance simulation wave pattern

### 3.2 프로펠러 단독성능

프로펠러의 경우 격자수와 수치 계산의 효율을 위하여 Virtual disk model을 사용하여 Body force propeller method를 적용하였다. Virtual disk를 사용하여 수행한 단독성능시험 수치해석 결과와 IIHR의 단독성능시험 결과를 Fig. 4에 비교하였다. 본 연구에서는 회전수를 8.97rps로 고정하여 유입속도 조절을 통해 전진비 0.1~1.5까지 계산하였다. 모형시험 결과와 수치결과는 만족스러운 일치를 보인다고 판단하고 이후 계산을 수행하였다.

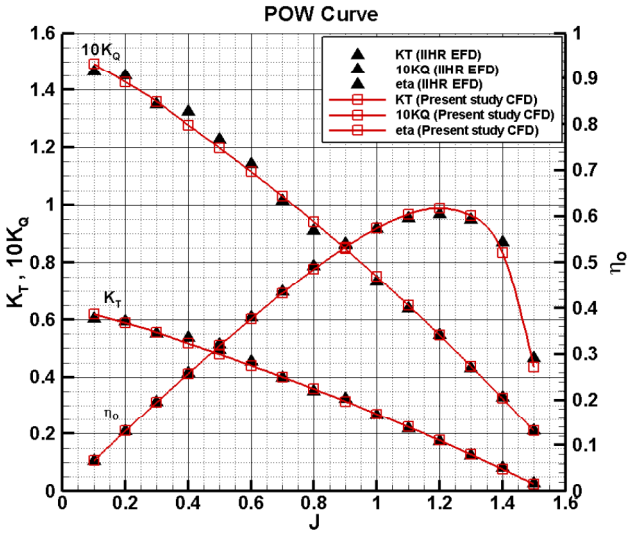



Fig. 4 Comparison of POW curve

### 3.3 모형선 자유항주 프로펠러 회전 수 해석

본 연구에서는 ONRT 자유항주에 대한 프로펠러 회전수를 찾기 위하여 설계선속에서 프로펠러 회전수를 변화시켜가며 저항 및 추력을 계산하였다. 대상 프로펠러 회전수는 IIHR의 자유항주 모형시험에서 사용한 프로펠러 회전수를 참고하여 8rps와 9rps로 선정하였으며, 내삽을 통해 저항과 추력이 같아지는 지점의 프로펠러 회전수를 추정하였다. IIHR의 모형시험 및 타 연구에서 사용한 프로펠러 회전수와 본 연구에서 사용한 프로펠러 회전수를 Table. 4에 비교하였다.

Table 4 Comparison of propeller rps at free running

| | n(rps) | |
|---|---|---|
| | Value | Difference. % |
| IIHR EFD | 8.97 | - |
| IIHR CFD | 9.449 | 5.34 |
| Lee et al. CFD | 8.629 | -3.80 |
| Present study | 8.528 | -4.93 |

## 4. 자유항주 시뮬레이션 결과

Fig. 5에 10° /10° 지그재그 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 본 연구에서는 5자유도와 6자유도에서의 자유항주 시뮬레이션을 수행하였으며, Wang et al(2018)의 연구에서 공개된 자유항주 모형시험의 결과와 비교였다.

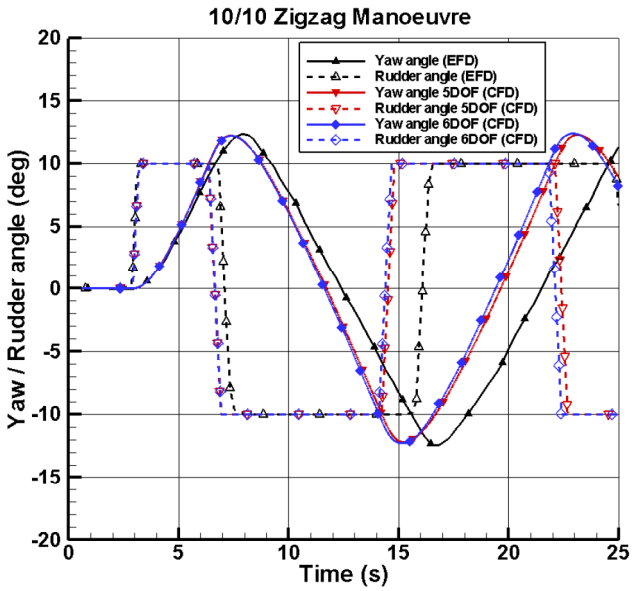



Fig. 5 Time history of yaw and rudder angle

## 5. 결 론

본 연구에서는 정수 중 운항하는 쌍축선박의 조종 성능에 횡동요가 미치는 영향에 대해 연구하였다. 수치 해석을 위하여 CFD를 이용해 10° /10° 지그재그 시뮬레이션을 수행하였으며, 횡동요의 유무에 따른 조종 성능의 변화를 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 10° /10° 지그재그 시뮬레이션 결과 5자유도와 6자유도의 차이에 따른 조종 성능은 유의미한 차이를 보이지 않았다.

(2) 이는 쌍축 선박의 조종 특성으로, 2축 2타의 영향으로 단축 선박에 비해 직진 성능이 우수하기 때문으로 판단된다.

향후 35° 선회 시뮬레이션 및 파랑 조건에서의 시뮬레이션을 수행하여 쌍축 선박의 선회 성능 및 파랑 중 조종 성능에 횡동요가 미치는 영향에 대해 연구할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부 '산업전문인력역량강화사업'의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원(2020년 미래 해양 플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업, 과제번호 : P0012646)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업(No. 2020R1F1A1071610)의 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

Araki, M., Sadat-Hosseini, H., Sanada, Y., Tanimoto, K., Umeda, N., & Stern, F. (2012). "Estimating maneuvering coefficients using system identification methods with experimental, system-based, and CFD free-running trial data", Ocean Engineering, Vol 51, pp 63-84.

Kim, Y.-G., Yeo, D.-J., Son, N.-S., Kim, S.-Y., Yun, K.-H., & Oh, B.-I. (2011). "Prediction of Maneuverability of KCS with 4 Degrees of Freedom", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol 48, No 3, pp 267-274.

Lee, J.-H., & Suh, S.-B. (2019). "A Study on the Estimation of the Effective Wake Ratio for ONR Tumblehome by the Numerical Analysis", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol 56, No 2, pp 109-116.

Sanada, Y., Elshiekh, H., Toda, Y., & Stern, F. (2019). "ONR Tumblehome course keeping and maneuvering in calm water and waves", Journal of Marine Science and Technology (Japan), Vol 24, No 3, pp 948-967.

Sanada, Y., Tanimoto, K., Takagi, K., Gui, L., Toda, Y., & Stern, F. (2013). "Trajectories for ONR Tumblehome maneuvering in calm water and waves", Ocean Engineering, Vol 72, pp 45-65.

Shen, Z. (2016). "Numerical Simulations of Ship Self-Propulsion and Maneuvering Using Dynamic Overset Grids in Openfoam", (Issue December 2015).

Wang, J. H., Zhao, W. W., & Wan, D. C. (2016). "Free maneuvering simulation of ONR tumblehome using overset grid method in naoe-FOAM-SJTU", 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, September, 15.

Wang, J., Zou, L., & Wan, D. (2018). "Numerical simulations of zigzag maneuver of free running ship in waves by RANS-Overset grid method", Ocean Engineering, Vol 162, pp 55-79.

# 실해역 데이터를 이용한 LNG 벙커링 셔틀의 내항성능과 운항적합성 평가

박준범 · 이민아 · 최신표 · 이창희(한국해양대학교) · 정동호(선박해양플랜트연구소)

# Seakeeping Performance and Operation Fitness Assessment of LNG Bunkering Shuttle by Using the Real Wave Occurences

Jun-Beom Park · Minah Yi · Shin-Pyo Choi ·
Chang-Hee Lee(Korea Maritime & Ocean University) ·
Dong-Ho Jeong(Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering)

In the international community, regulations are tightened about air pollutants caused by ships, and accordingly, Republic of Korea are promoting the establishment of an infrastructure to convert existing ship fuel oil, which cannot respond to current regulations, to LNG fuel, green energy. In this study, in order to support the LNG fuel supply infrastructure establishment policy, the seakeeping performance and the operation fitness of the LNG bunkering shuttle was assessed assuming the operation of the Busan New Port LNG terminal↔Busan Port south anchorage. The route of operation of the LNG bunkering shuttle was specified for the assessment of seakeeping performance and operation fitness based on the actual sea data, and the actual sea data observed for 5 years at the Dadaepo wave measurement buoy located in the navigation course and the TMA wave spectrum suitable for the Busan coast were applied. For the Assessments, the results obtained by doing convolution the ship motion RAO obtained from the motion caculation based on the potential flow analysis and the real sea-based TMA spectrum were divided by significant wave height section. This was performed in comparison with the criteria for evaluating seakeeping performance. As a result, the horizontal acceleration motion acting on the bridge at a significant wave height of 2 m or more exceeded the seakeeping performance assessment criteria, and according to the result of assessing the operational fitness of the LNG bunkering shuttle using wave data for five years and the seakeeping performance assessment performed for each significant wave height section, It was found that the period during which the LNG bunkering shuttle satisfies the seakeeping performance criteria and can stably operate is 98.8 % of the total observation period. Through this study, if the LNG bunkering shuttle's departure restrictions or operation management are applied at seas exceeding a certain significant wave height, it can be utilized to improve the stability of the LNG bunkering shuttle.

**KEY WORDS**: LNG bunkering shuttle, 부산신항↔부산항 해역 데이터, TMA Wave spectrum, 선체 운동 RAO, 내항성능 평가, 파랑 발생빈도, 운항적합성 평가

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 "LNG 벙커링 운영체계 및 위험도 평가기반 운영기술개발"의 결과물임을 밝히는 바입니다.

# 해수온도차발전플랜트의 육상형 및 접안형 플랫폼 개념 설계

김현주 · 이호생 · 김영석 · 문정현 · 서종범 · 홍사영(선박해양플랜트연구소)

# Conceptual Design of On-land type and Berthing type platforms for OTEC Power Plant

Hyeon-Ju Kim · Hosaeng Lee · Youngseok Kim · Junghyun Moon · Jongbeom Seo · Sa Young Hong (KRISO)

해수온도차발전은 적도해역에서 연중 안정적 운전이 가능하여, 기저부하를 담당할 수 있어서 안정적 재생에너지로 상대적인 경쟁력을 가질 수 있다. 즉, 변동성있는 재생에너지를 이용하는 마이크로 그리드의 경우, 발전하지 못하는 시간을 고려한 에너지저장장치(ESS)를 필요로 한다. 따라서, 이를 고려한 재생에너지 발전단가를 비교해 보거나 현지 디젤발전과 비교해도 적용 가능성이 적지 않은 것으로 판단된다. 이를 실용화하기 위한 연구개발을 통해 실증실험이 키리바시 타라와섬에서 추진될 계획이나 코로나19 사태로 인해 차질을 빚고 있다.

당초, 1MW 해수온도차발전은 육상형 플랜트로 추진될 계획이었으며, 이를 위해 플랜트 핵심장치의 개발이 2016년부터 2018년까지 진행되었고, 2019년 상반기에 전체를 바아지 상에 조립하여 2019년 9월말 동해 구룡포 외해에서 단기 시운전 실험을 완료하였다. 이를 분해하여 키리바시로 운반하기 위한 준비를 해 놓고, 2020년에 육상 플랜트동 및 펌프핏을 설계, 건설하고, 플랜트를 운반해 갈 계획이었다. 이를 바탕으로 2021년에는 취수관을 제작, 운반 및 설치하고, 플랜트를 완성하여 장기운전 및 성능평가 실증실험을 완료할 계획이었다.

코로나19로 인해 1년 이상이 순연되어야 할 상황이고, 2년까지 순연될 수 있어서 현장 작업기간을 최소화하는 대안을 필요한 상황이다. 따라서, 해수온도차발전 플랜트를 전용 바아지에 효율적으로 고정 설치하여, 라군 내부에 접안하고 돌핀 또는 말뚝 계류로 유지시켜서 장기 운전이 가능하도록 하는 방안을 고안하였다. 이를 위한 OTEC 바아지의 설계, 운반 및 설치 시나리오 등을 정리하여 개념설계를 실시하였고, 육상형 플랜트와 비교함으로써 새로운 보급모델의 하나가 되도록 하고자 한다.

## 감사의 글

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D 사업인 “1 MW급 해수온도차발전 실증플랜트 개발(5/6)” (PMS4320)에 의해 수행되었습니다.

# 세계 해수온도차발전의 가용량 및 프로젝트 조사 결과

문정현 · 윤지원 · 서종범 · 임승택 · 이호생 · 김현주(선박해양플랜트연구소)

# Survey Results of Global Ocean Thermal Energy Conversion Capacity and On-going Project

Junghyun Moon, · Jiwon Yoon · Jongbeom Seo · Seungtaek Lim · Hosaeng Lee · Hyeon-Ju Kim(KRISO)

해수온도차발전은 재생에너지의 한계 또는 단점으로 인식되고 변동성 및 간헐성이 거의 없는 안정적인 해양에너지로서 주목받아 왔으나 기술 실증 및 경제성 확보 등이 완료되지 않아서 연구개발 및 시범사업이 진행되고 있다. 따라서, 이를 통해 실용화가 이루어지면 어느 해역에서 어느 정도의 활용이 이루어 질 수 있을지에 대하여 다양한 관점에서 검토되고 있고, 이를 위한 조사 분석 및 연구개발이 이루어지고 있다.

해수온도차에너지는 해양표층수와 해양심층수의 온도차를 기준으로 랭킨싸이클에 의해서 전력으로 변환될 수 있는 에너지량으로 표현될 수 있다. Nihous 등(0000)에 의해 이루어져 왔고, 환경영향을 고려한 이론적 가용량은 7TWh/yr에 달하는 것으로 알려지고 있다. 이를 바탕으로 기술적, 사회적 여건을 고려하여 다양한 해석이 이루어지고 있으며, 여러 가지 제한 조건을 고려해도 1TWh/yr 이상은 가용하다는 주장도 제기되고 있다. 현재, 우리나라 동해에서도 여름철에는 발전이 가능하며, 가동율은 %에 달할 것으로 예측되고 있다. 지구온난화에 따른 해수온 상승으로 가동율은 날이 갈수록 높아질 것으로 예상된다.

IEA-OES의 요청으로 KRISO는 매 분기마다 세계 해수온도차발전 프로젝트 현황을 조사하고 있다. 조사대상은 계획부터 실증까지를 대상으로 하며, 열교환기 등의 핵심장치 및 시스템을 대상으로 온라인 설문조사를 실시하고 있다. 그 결과, 세계적으로 20여 개의 프로젝트가 계획되었거나 실행되고 있다. 이를 활용하여 기술개발 및 전력시장 동향을 파악하고 있으며, 해수온도차발전 실용화라는 공동 목표를 달성하기 위하여 협력을 강화하고 있다.

## 감사의 글

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D 사업인 “1 MW급 해수온도차발전 실증플랜트 개발(5/6)” (PMS4320)에 의해 수행되었습니다.

# 전진중인 모형선의 선수부 접수선 형상에 대한 실험적 해석

이재훈 · 황승현 · 이영연
선박해양플랜트연구소

# An Experimental Analysis for the Instantaneous Waterline Characteristics of Ship with Advance Speed in Calm Water Test

Jaehoon Lee, Seunghyun Hwang, Young-Yeon Lee

*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Korea*

**KEY WORDS:** Ship waterline 선측 접수선, Stereo vision 스테레오 비전, Image processing 영상처리, Model test 모형시험, Wave resistance 조파저항

**ABSTRACT:** *Stereo vision technique and edege detection algorithm are applied to extract three-dimensional coordinates of ship waterline. Published advanced calibration algorithm is applied for improving accuracy of the system. Those methodologies are combined and applied for model test in towing tank. Repeatability is analyzed for zero mean waterline and run-up waterline with advancing speed during the test. Efficiency, accuracy and reliability of this process; and on-going development topics are discussed.*

## 1. 서 론

전진 중인 선박의 접수면 형상은, 선박의 조파저항과 밀접한 관련이 있으며, 전통적으로 선수부 형상 설계에 반영이 되어 왔다. 최근에는 에너지설계효율지수 및 황천시 최소추진마력 규제 등으로 정수 중 뿐만 아니라 파랑 중에서의 선박의 속도성능이 중요해지고 있으며, 이를 평가하기 위한 중요요소인 파랑 중 부가저항에 대한 연구도 증가하고 있다. 파랑 중 부가저항에 대한 연구는 수치해석적인 방법과 실험적인 방법 등으로 수행되며, 수치해석을 통한 해석결과는 그 유효성 검증을 위해 파랑 중 부가저항 계측 값, 순간적인 선측 접수면 형상, 선체 주변 파계 구조 등의 실험결과와의 비교가 필요하다. 본 연구는 순간적인 선측 접수면 형상을 계측할 수 있는 실험기법의 정도향상에 대한 것이다.

비접촉식 비전 방식 기반 신행연구로, Ruiz, et al. (2013)은 모형선 표면에 형광 물질 도포 후, 예인수조에서 자외선 특수 조명을 사용하여 1대의 카메라로 접수선 좌표를 추출한 바 있다. 다만, 이러한 방식은 일반 모형시험 시 사용하는 모형선 표면에, 특수 처리를 해야하는 번거로움이 있다. 본 소 주요사업의 일환으로 진행 되었던 선행연구에서는, 이를 극복하고자 2대의 카메라를 사용하는, 스테레오 비전 방식을 적용 검토한 바 있으며 (Hong, et al., 2019), 외국 유사 연구로는 노르웨이 SINTEF 그룹에서 이루어진 SES 선박에 대한 적용도 있다(Nataletti, et al., 2019).

선행 과제의 연구 결과(Hong, et al., 2019)에서는 Zhang (2002)의 카메라 교정(Calibration) 방법을 이용하여 진행하였으며, 본 연구에서는 Datta, et al. (2009)이 제안한 반복법을 추가적으로 적용하여, 스테레오 비전 시스템의 교정 정확도를 향상하고자 하였다. 또한, 적용 대상선형 범위를 확장하여, 선수부가 날렵하고 설계속도가 중속 영역인 컨테이너선에 대한 파형 해석을 수행하였다. 정지 중 및 정수 전진 중 반복 계측을 통해, 반복성 및 분산 정도를 확인하였다.

## 2. 실험적 해석법

### 2.1 스테레오 비전 캘리브레이션

스테레오 비전을 바탕으로 물리적 치수를 추출하기 위해서는, 카메라 캘리브레이션이 선행되어야 한다. 캘리브레이션 과정에서, 카메라 이미징 센서와 렌즈 간의 거리관계 및 왜곡 특성, 더 나아가 여러 대의 카메라 간의 공간 상 상대위치를 파악할 수 있다. 이를 통하여, 이미징 센서에서 획득한 데이터와 실제 공간에서의 물리적인 길이 간의 상관관계를 도출할 수 있다.

이를 위해, 캘리브레이션 플레이트를 사용하며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 체커보드, 원형 패턴보드 등을 이용하고, 도형의 정밀한 치수를 미리 알고 있다고 전제한다. 널리 사용되는 방법으로, Zhang(2000)에 의해 제안된 방법을 사용하며, 오픈소스(e.g. OpenCV) 및 상용프로그램(e.g. MATLAB, Fig. 2 참조) 등에서 도입되어 있다. 위 방법은 캘리브레이션 플레이트의 치수

정보만 정확하게 알고 있으면, 플레이트와 카메라 간의 거리 등 부가적인 정보를 계측하지 않아도 된다는 강점이 있다. 이 기법을 사용하기 위해서는, 캘리브레이션 플레이트가 완전한 평면(fronto-parallel)이라는 가정을 만족하여야 하나, 일반적인 프린팅 방식에서는 이러한 가정이 쉽게 어긋날 수 있고, 오차를 유발하게 된다. 이러한 문제를 최소화 하고자, Datta, et al.(2007)은 반복법을 이용하여 canonical fronto-parallel 이미지를 구하고, 이를 통하여 위의 fronto-parallel 조건을 확보하여, 체커보드 교차점 탐색 시, 기울기 직교성(gradicnt orthogonality)을 향상시키고, 정확도를 개선할 수 있음을 보였다.

본 연구에서는, 기존에 진행되었던 비전 기반 선측 접수선 연구(Hong, et al., 2019) 외에 추가적인 계측을 수행하고, 개선된 캘리브레이션 방법(Datta, et al., 2007)을 적용하여, 결과를 확인하였다.

## 3. 모형선의 전진 중 접수선 계측 결과

… 중략 …

## 4. 결　　론

스테레오 비전 기법을 전진중인 모형선의 선수부 접수선 계측에 적용하고, 정도향상 기법을 적용하는 연구를 수행하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 캘리브레이션 플레이트의 오차를 교정할 수 있는 반복기법을 적용하여, 스테레오 비전 기반 시스템의 계측 정확도를 향상하고자 하였다.

(2) 전진중인 모형선의 접수선 형상 촬영을 수행하고, 스테레오비전 기반 해석을 수행하였으며, 이를 통해 실시간 접수선 좌표값을 추출할 수 있었다.

## 후　　기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 “스테레오 비전 기술 기반 선측파형 해석시스템 고도화”로 수행된 연구결과입니다(PES3740).

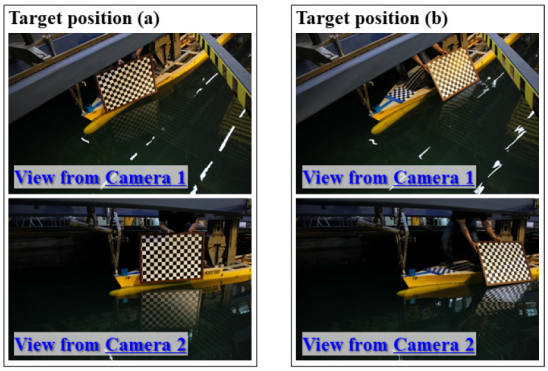



**Fig. 1** Stereo camera calibration using checker board

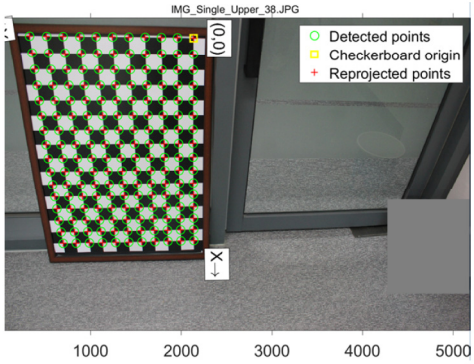



**Fig. 2** Camera calibration results using MATLAB® Toolbox

## 참 고 문 헌

Datta, A., Kim, J.S. & Kanade, T. (2009). “Accurate Camera Calibration using Iterative Refinement of Control Points”, Proc. of IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, Kyoto, Japan, pp 1201-1208..

Hong, S., Kim, J. & Hwang, S. (2019). “Automatic Waterline Detection and 3D Reconstruction in Model Ship Tests using Stereo Vision”, Electronics Letters, Vol 55, No 9, pp 527-529.

Nataletti, M., Savio, L., Hassani, V. & Austad, Ø. (2019). “3D Measurement of the Waterline of a Surface Effect Ship”, Proc. of The Sixth International Conference on Advanced Model Measurement Technology for The Maritime Industry, Rome, Italy.

Ruiz, M.T., Geerts, S., Delefortrie, G. & Vantorre, M. (2013). “Automatic Waterline Registration of a Ship Model in Waves”, Proc. of The 3rd International Conference on Advanced Model Measurement Technologies for the Maritime Industry, Gdansk, Poland, pp 487-501.

Zhang, Z. (2000). “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 22, No 11, pp 1330-1334.

# 사항상태 모형선의 선미 유동장 계측

이재훈 · 이준형 · 황승현 · 이영연 · 임정택
선박해양플랜트연구소

# Flow Field Measurement in Drift Tests using Stereoscopic Particle Image Velocimetry

Jaehoon Lee, Joon Hyoung Lee, Seunghyun Hwang, Young-Yeon Lee, Jungteak Im

*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Korea*

**KEY WORDS:** Drift tests 사항시험, Stereoscopic Particle Image Velocimetry 스테레오 입자 영상 유속계, Ship model tests 선박모형시험

**ABSTRACT:** *Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) technique was applied for the flow field measurement around KRISO Container Ship(KCS) under steady drift tests in the KRISO towing tank. A special device was developed for restraining model ships for drift conditions. Upgraded CMOS cameras with 25 mega pixel resolution were applied. Upgraded 300mJ dual Nd:YAG Laser source was adopted. Resultant system can capture stereo images with expanded field of view and better resolution. Overall quality of flow field measurement was examined through the uniform flow. Flow fields were measured at propeller plane for straight forward ($\beta$=0°) and drift test condition ($\beta$=6°), and design speed and load condition. Analysis technique and the results were presented.*

## 1. 서 론

사항 상태로 전진하는 선박은, 직진하는 선박과 비교하여, 횡방향 유입류가 발생하므로, 조종 및 저항 성능관점에서, 유동 특성을 면밀히 검토할 필요가 있다. 다만, 모형시험의 경우, 다축 분력계를 이용한 힘과 모멘트 계측결과에 비해, 유동장 계측 결과는 드물기 때문에, 수치해석 비교검증 목적을 비롯하여, 국부 유동장 결과에 대한 요구가 지속되어 왔다.

사항 조건을 포함한 수상선 모형시험 연구는 다음과 같다. Falchi, et al.(2014)은 DELFT 372 catamaran 모형선의 사항 중 선미 유동장을 SPIV 계측한 바 있다. Yoon(2009)는 DTMB 5512 모형선에 대하여 사항 시험 조건을 포함하여, 수평면 강제운동(HPMM) 시험 중 SPIV 유동장 계측을 수행하였다. Capone, et al.(2019)은 내시경 방식을 차용한 SPIV 촬영법을 적용하여, 쌍축신 모형에 대한 사항 중 신미 유동장 계측을 수행하였다.

선박해양플랜트연구소 선형시험수조에서 SPIV 시스템을 이용한 저항 및 자항 중 유동장 계측은, 직진 예인 중 이루어진 바 있다(Kim, et al., 2011; Hwang, et al., 2012). 본 연구에서는 신규 사항장치를 도입하여, 공시선형(공개선형)인 KCS 선형의 소형 모형선(축척비 1/65.833)에 대한 사항 예인 모형시험을 수행하였다. 본 연구에서는 힘 계측은 다루지 않고 있으며, 선미 주위의 유동장 계측 및 결과 해석에 집중하여 다루고 있다. 본 연구에서는 저속에서의 조종 특성 등을 살피기 위해, 사항 조건 중 선미 유동장 계측을 수행하였다.

## 2. SPIV 계측 기반 사항 유동장 해석법

선박해양플랜트연구소 선형시험수조의 SPIV 시스템 구성 및 주요 유동장 계측결과는 Kim, et al. (2011) 및 Hwang, et al. (2012)에서 다루고 있다. 본 연구에서는 위 논문의 TSI 사(社)의 수중 영상획득 시스템을 기반으로, 전반적인 시스템 업그레이드를 진행하였다. 듀얼헤드 300mJ Nd:YAG 레이저와 CMOS 타입 25MP 카메라 2대를 도입하였고, 초점거리 85 mm(앞) 및 135 mm(뒤) 렌즈를 이용하여, 기존 시스템 대비 향상된 밝기(Intensity)와 계측영역(Field of View; FOV)을 도출할 수 있었다. 이를 바탕으로, 5K x 5K 12비트 이미지를 초당 120장 계측가능하고, 초당 30장의 2D-3C 유동장을 측정 가능한 시스템을 구성하였다. Fig. 1에는 SPIV 시스템의 수중 촬영용 장치부를 나타내었다.

사항 모형시험을 위해, 모형선 탈착 없이 다양한 사항각을 구현 하도록 특수 제작된 장비를 도입하였으며, 실제 모형선을 부착한 모습을 Fig. 2에 나타내었다. 본 장비에는 정밀 엔코더와 거리 측정장치를 활용하여, 각도 구현 정도를 확인할 수 있도록 하였다. 선형시험수조 SPIV 시스템은 예인전차와 동일 방향으로 길이방향 축을 정렬하였으며, 사항 조건 구현시 모형선 고정 좌표계와 예인전차 좌표계와의 상대적인 변화를 고려하였다.

SPIV의 캘리브레이션 및 유동장 해석은 LaVision 사의 DAVIS 소프트웨어 8.4.0 버전을 사용하였다. 캘리브레이션 과정에서 카메라 모델링에는 다차 다항식 모델을 적용하였다. 수중 조명을 사용하여, 캘리브레이션 플레이트 촬영 이미지 품질을 높였으며, 외부 노이즈로부터 강건하도록 100장 평균 이미지를 사용하였다.

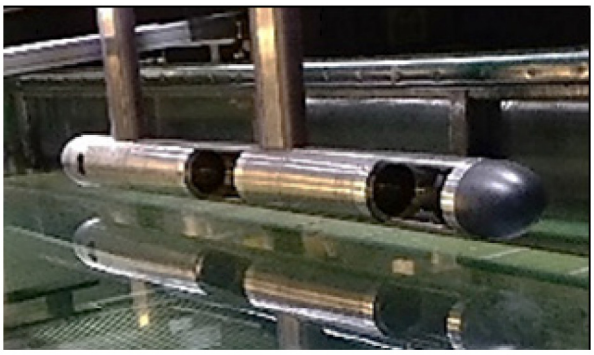


**Fig. 1** Submersible SPIV system in KRISO towing tank




**Fig. 2** Measurement device for drift tests

유동장 해석 시에는, 적응형(Adaptive) PIV계산법을 사용하였고(Wieneke, et al., 2010), 조사영역(interrogation window)은 128 x 128pixel 50% overlap 조건을 적용하였다.

다수의 위치에서 캘리브레이션 이미지를 획득하였으며, 계측 평면을 기준으로 ±3.0mm 구간에 대하여, 0.5mm 단계로 총 13개 구간에 대한 촬영을 진행하고, 이를 바탕으로 다차 다항식 모델을 계산하였다. Fig. 3에는 위의 스테레오 카메라 모델링 결과를 바탕으로, 촬영 이미지들을 각각 공간좌표계로 변환(Dewarping)하고, 동시에 투영한 결과를 나타내었다. 각 이미지들이 정교하게 매핑되는 것을 확인할 수 있으며, 캘리브레이션이 잘 진행되었음을 확인할 수 있다. 또한, 계측 영역(FOV)의 크기는 약 400mm x 300mm임을 알 수 있다. 본 교정과정에서는 캘리브레이션 플레이트와 계측 평면이 일치한다고 가정하고, 이를 구현하기 위해 정교한 실험적 셋팅을 진행하는데, 실제 이러한 노력에도 불구하고, 굉장히 미소한 양의 기울기 등이 발생할 수 있다. 이는 뒤에서 소개할 균일류 계측 결과를 바탕으로, 셀프 캘리브레이션(Self-calibration) 기법(Wieneke, 2005)을 적용하여, 미소한 편차까지 보정할 수 있으며, 이를 바탕으로 최종 해석을 진행하였다.

한편, 이미지 센서와 계측 환경 특성 상, 배경 노이즈(Background noise)가 존재할 수 있으며, 보다 노이즈에 강인한 결과를 도출하고자, 100장의 이미지를 평균하고, 각 이미지에서 위 평균 이미지를 빼기 연산 적용하였다. 이는 Hwang, et al. (2012)에서 소개한 바 있으며, 이를 통하여, 유동에 따라 변화하는 입자 이미지 데이터를 중점적으로 추출할 수 있다. 이미지에서 동일하게 나타나는 전기적 노이즈나 배경 선체 등의 픽셀 밝기가 뚜렷하게 줄어든 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있고, 이미지 상관관계(image correlation) 계산을 통한 속도벡터 분석 시, 향상된 결과를 기대할 수 있다.

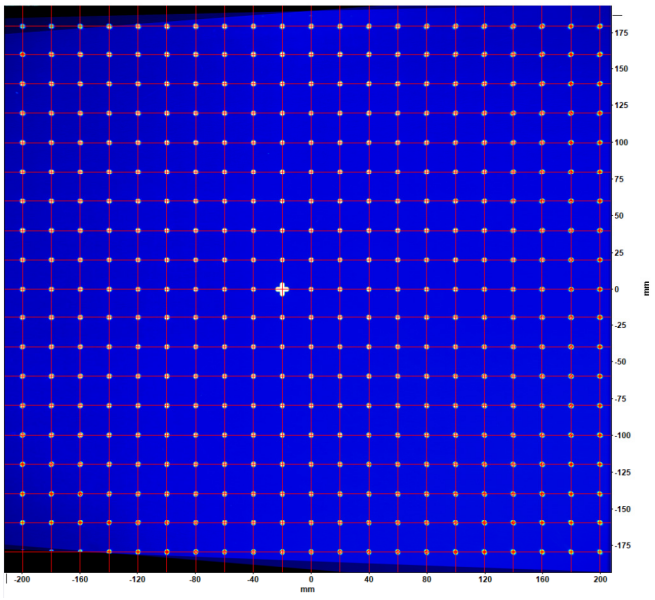



**Fig. 3** Summation image after calibration and dewarping

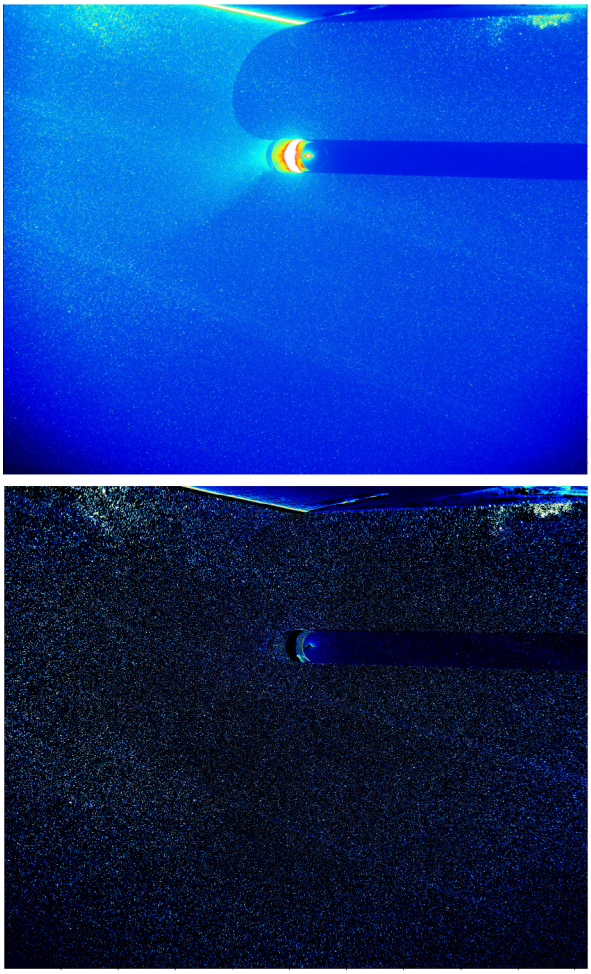


**Fig. 4** Background image subtraction (upper: raw, lower: result)

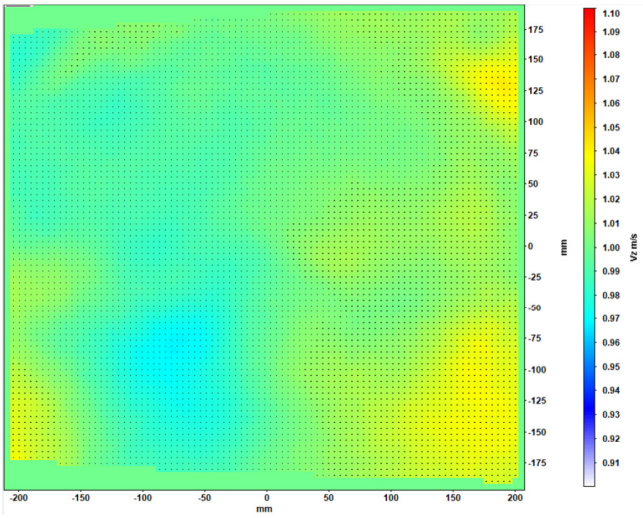


**Fig. 5** Velocity contour and vector map for uniform flow

모형선이 없는 조건(Free stream)에서, 단위속도 1.0m/s 로 SPIV 장치를 예인하며, 균일류(uniform flow) 계측을 진행하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 예인속도와 계측속도의 차이가 ±4% 수준으로, 캘리브레이션이 적절하게 수행되었음을 확인하였다. 측정에 대상이 되는 프로펠러가 위치할 영역(Fig. 5에서, (0,0) 좌표 기준으로 상하좌우 60mm 구간)에서는 그 차이가 보다 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 프로펠러 평면에서의 유동장 계측은 전체영역 대비 보다 정확한 계측이 가능할 것임을 추정할 수 있다.

## 3. 사항시험 유동장 계측 결과 및 고찰

선박해양플랜트연구소(KRISO)의 공시 선형 KCS의 축소모형(축척비 1/65.833)에 대하여, 다양한 사항 각도에 대한 유동장 계측 및 해석을 수행하였다. 본 논문에는 일부 결과를 수록하였으며, KCS 설계속도에 해당하는 Fn=0.26 속도에 대하여, 직진 상태(β=0°)와 선수 우현 사항각 조건(β=6°)에 대하여 선미 유동장을 계측하였다. 계측 위치는 프로펠러 평면에 해당하는 X위치에서, Y-Z 평면에 해당하는 유동장 결과를 다루고 있다.

모형선의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. 모형선은 Fig. 6에 나타내었으며, 사항 시 물 넘침을 방지하고자, 데크 높이(depth)에서 수직벽을 적용하였다. 또한, 레이저 광원의 반사를 최소화 하고자, PIV 계측이 이루어지는 모형선 선미에 무광 흑색 도료를 적용하였다. 모형시험시, 러더와 프로펠러는 없는 알몸선체(bare hull) 조건으로 진행하였다.



**Fig. 6** Target hull (KCS 1/65.833 model)

**Table 1** Principal dimension of target hull (KCS)

| Designation | | Unit | Ship | Model |
|---|---|---|---|---|
| Scale ratio | | - | 1 | 1/65.833 |
| Speed | V | *m/s* | 12.356 | 1.522 |
| Froude number | Fn | - | 0.26 | 0.26 |
| Length between perpendiculars | Lpp | *m* | 230.0 | 3.49 |
| Breadth | B | *m* | 32.2 | 0.489 |
| Depth | D | *m* | 19.0 | 0.289 |
| Draft | T | *m* | 10.8 | 0.164 |
| Wetted surface area | Sw | $m^2$ | 9530 | 2.20 |
| Displacement | | $m^3$ | 52030 | 12.01 |
| Block coefficient | Cb | - | 0.651 | 0.651 |

**Table 2** Test conditions

| Type | Unit | Model |
|---|---|---|
| Speed | *m/s* | 1.522 |
| Froude number | - | 0.26 |
| Drift angle | ° | 0, 6 |
| Appendage | - | Bare hull |

직진상태(β=0°)에서 설계속도(Vs=24kts)로 전진하는 모형선의 선미 유동 계측결과를 바탕으로, 평균 속도 벡터장을 Fig. 7에 나타내었다. 속도 벡터장 산출 시, 30Hz로 계측한, 100프레임 이미지 셋트를 바탕으로 벡터계산를 수행하고, 평균 속도장 결과를 도출하였다. 계측 영역은 프로펠러가 놓이는 기준평면을 포함하고 있다. 선미부에서 허브 주위로, 빌지 보텍스와 그 형태를 관찰할 수 있다.

선수우현 사항상태(β=6°)로 전진하는 모형선의 선미 유동장 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 직진상태(β=0°)와 동일한 예인속력에서 계측을 진행하였고, 계측 영역은 직진 조건과 동일한 위치로써, 사항조건(β=6°)에서는, 프로펠러 기준면에서 6° 만큼 기울어진 상태로 계측이 진행된다. 실제 사항조건 계측 시에는 3개 이상의 평면에 대하여 계측을 수행하였으나, 본 논문에서는 직진 상태와 동일한 위치에서 계측한 결과만을 수록하였다. 사항 상태의 선미 유동장에서는 횡방향 유입류의 영향으로 좌우 비대칭성이 나타나며, 빌지 보텍스의 위치와 형태도 직진 상태와 비교하여 변형된다. 사항각도에 대한 선미 유동장의 상세한 영향 파악은, 추가 결과 분석이 필요하다.

향후 여러 평면에서의 유동장 계측 결과와 6° 이상의 사항각도에서 확장된 계측 영역에서 획득한 결과를 바탕으로 추가 분석을 수행할 예정이다. 또한, 알몸선체 상태의 경우, 프로펠러 허브 부근 계측시, 레이저 광원이 도달하지 못하는 음영 구간이 발생하므로, 이를 보완하기 위하여, 선수좌현 사항조건(β=-6°)에서의 계측을 수행하였고, 추후 음영지역을 최소화 한 결과를 다룰 예정이다.

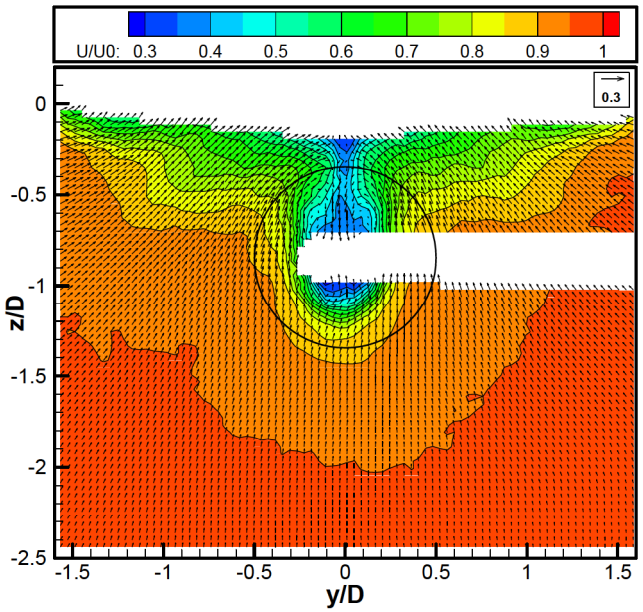



**Fig. 7** Averaged velocity contours of axial component (U) and cross-flow vector (V, W) for β=0°

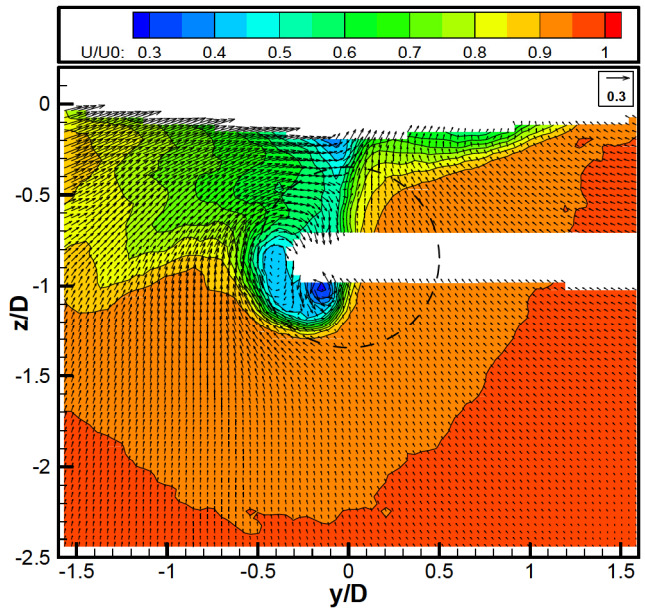



**Fig. 8** Averaged velocity contours of axial component (U) and cross-flow vector (V, W) for β=6°

## 5. 결 론

선박해양플랜트연구소 선형시험수조에서 수행한 사항상태 모형선 선미 유동 SPIV 계측을 통하여, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 레이저, 이미지센서, 렌즈를 포함한 시스템 업그레이드를 통해, 25MP 12bit 스테레오 유동장 이미지를 초당 120장 획득하고, 초당 30장의 2D-3C 유동장을 계측할 수 있었으며, 캘리브레이션이 완료된 시스템을 모형선이 없는 균일류 계측에 적용하여, 유동장 계측정도를 간접적으로 확인하였다.

(2) 대상선인 KCS의 설계 속도(Vs=24kts)에서, 직진 상태(β=0°)와 사항각이 존재하는 조건(β=6°)에서 각각 추진기 설치 위치 근방의 유동장을 계측하였다. 본 시스템의 계측 가능성을 확인하였고, 사항조건에서는 선미유동의 좌우 비대칭성과 직진상태 대비 변형된 빌지 보텍스의 위치와 형상이 나타남을 확인할 수 있었다. 보다 엄밀한 논의를 위해서는 다양한 계측 평면 및 추가적인 사항조건에서의 결과 분석이 필요하다.

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 "첨단운송체의 항내 운항성능향상을 위한 축척효과를 고려한 운항제어원천기술 개발(2/5)"로 수행된 연구결과입니다(PES3410).

## 참 고 문 헌

Capone, A., Alves Pereira, F., Maiocchi, A., & Di Felice, F. (2019). Analysis of the hull wake of a twin-screw ship in steady drift by Borescope Stereo Particle Image Velocimetry. Applied Ocean Research, 92.

Falchi, M., Felli, M., Grizzi, S., Aloisio, G., Broglia, R., & Stern, F. (2014). SPIV measurements around the DELFT 372 catamaran in steady drift. Experiments in Fluids, 55(11).

Hwang, S., Ahn, H., Lee, Y. Y., Kim, J., & Van, S. H. (2012, October). Flow measurement for KVLCC2 hull form with and without propeller and rudder using stereoscopic PIV in towing tank. In 10th International Conference on Hydrodynamics(ICHD 2012).

Kim, J., Hwang, S., Lee, Y.Y., Kim, C., Ahn, H., Van, S.H. (2011, April). The Flow Field Measurement around a Model Ship with Stereo-PIV System in a Towing Tank. In 2nd Advanced Model Measurement Technology for EU Maritime Industry(AMT'11).

Wieneke, B. (2005). Stereo-PIV using self-calibration on particle images. Experiments in Fluids, 39.

Wieneke, B. and Pfeiffer K. (2010). Adaptive PIV with variable interrogation window size and shape. In 15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.

Yoon, H. (2009). Phase-averaged stereo-PIV flow field and force/moment/motion measurements for surface combatant in PMM maneuvers.

# 전진속도가 있는 수륙양용버스의 운동 및 저항성능에 관한 실험적 연구

신다균· 박성부·신성윤·길성진·박현정·정광효(부산대학교)·정윤석(프랑스선급)

Amphibious vessels that can operate on land, sea or river have great advantages in movement and transport. The amphibious ship was mainly used for military purposes, but it is expected to be commercialized in various fields such as transportation, lifesaving, and tourism. Currently, there are many trials to introduce the amphibious bus operated at sea for tourism purposes in domestic. When an amphibious bus is operated at sea, it is expected that the motion response of the vehicle is relatively large due to the waves unlike in the river. Therefore, when designing an amphibious vessel operating at sea, the seakeeping performance of the vessel in waves must be evaluated. In this study, a model test and numerical analysis were performed to evaluate the seakeeping performance of an amphibious bus with a forward speed in waves and wave measurement data provided by the Korean Meteorological Administration were analyzed to select the wave conditions.
The linear roll damping coefficient is estimated through the free decay test of roll motion and this was reflected in the calculation of the 6-DOF motion RAO of the amphibious bus. In the case of heave RAO, the experimental results is estimated to be smaller than the results of numerical analysis. It seems that the heave damping force is increased by viscous effect due to the complex bottom shape. When the forward speed is increased, heave and pitch motion of the bus is increased at head sea condition, while roll motion is decreased at beam sea condition. In addition, maximum and root mean square motion of the amphibious bus with forward speed in irregular waves are calculated by hydrodynamic analysis in time domain. Also, the total resistance, effective horsepower, trim and sinkage of the amphibious bus were estimated through a resistance test in still water. It was confirmed that as the speed increased, the bow trim of the amphibious bus became larger.

# 극저온 액화가스 저장 탱크 내 Boil-Off Gas 변화에 슬로싱이 미치는 영향에 관한 수치적 연구

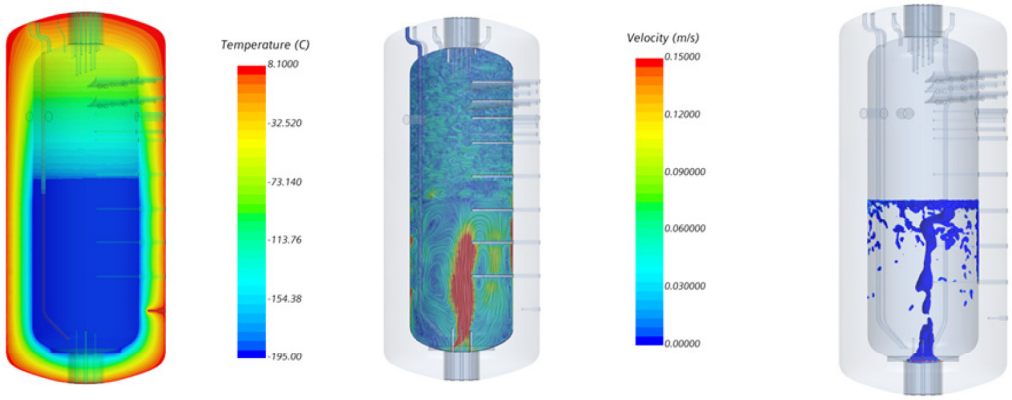
전규목 · 박종천(부산대학교) · 이영범 · 김덕수 · 이상범 · 이상원(대우조선해양)

# Numerical Study on the Effect of Sloshing on Change of Boil-Off Gas in Cryogenic Liquefied Gas Storage Tank

Gyu-Mok Jeon · Jong-Chun Park(Pusan National University) ·
Young-Bum Lee · Deok-Su Kim · Sang-Beom Lee ·
Sang-Won Lee(Deawoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.)

본 연구에서는 강제 Roll 운동에 의해 극저온 액화가스 저장 탱크 내에서 발생한 슬로싱 효과가 기화량 변화에 미치는 영향에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 수치 해석에는 상용유동해석 소프트웨어인 STAR-CCM+15.02이 사용되었으며, URaNS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 기반의 지배방정식에 Realizable k-epsilon 난류모델과 상변화모델인 VOF boiling model을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 상변화 모델의 검증을 위해 정적상태에서의 체적율 32%, 40%, 50%, 60% 그리고 75%인 극저온 액화가스 저장 탱크 내 발생하는 자연기화량 및 온도센서에서 계측한 온도분포를 실험결과와 비교하였다. 시뮬레이션 결과는 탱크내부에서 발생하는 기화현상을 잘 묘사하였으며, 실험과 매우 유사한 결과를 보였다. 이후 실험에서 강제 Roll 운동 조건하에서 체적율 32%와 50%의 경우 기화량이 매우 증가하는 경향을 나타냈으며 시뮬레이션 결과에서도 동일한 양상을 보였다.

KEY WORDS: Boil-off gas 기화량, Cryogenic Liquefied gas storage tank 극저온 액화가스 저장 탱크, Sloshing 슬로싱, Computational fluid dynamics 전산유체역학, Phase change model 상변화 모델




(a) Temperature (b) Velocity (c) Volume fraction of gas

**Fig. 1** Vaporization in LN2 tank at filling ratio 50%

## 후 기

본 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.2020R1I1A3072459) 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

# y+와 가상유체를 사용한 프로펠러 표면에서의 유동해석 연구

Kwanwoo- Kim · Kwang-Jun Paik(University of Inha) ·
Mehmet Atlar · Soon-Seok Song(University of Strathclyde)

The efficient use of the computational resources and time (performance) in the CFD applications has become critical with the challenge of predicting the ship performance in full-scale. Within this context, the selection of the appropriate range of non-dimensional wall-normal distance (y+) is critical affecting the grid size and hence computational performance. There are limited studies on the recommended y+values in the full-scale ship performance simulations requiring detailed investigation. Another attractive approach to improve the computational performance for the full-scale prediction of ship performance is to consider a virtual fluid concept through the model-scale CFD simulations, but there is a lack of detailed investigations for this application.

Based on the above background, the aim of this research study is to investigate the effect of different y+ values in the real fluid and the use of the virtual fluid concept to predict the full-scale performance of propellers using CFD. For these investigations, the commercial CFD tool, STAR CCM+, was used and applied to predict the propeller open water (POW) performance of the KRISO benchmark propeller (KP505) in the model and full-scale by using the model test data. The results from a series of the CFD simulation studies were presented and discussed for the main POW performance and other hydrodynamic characteristics of this propeller (e.g. pressures, friction, streamlines, tip vortex formation, etc) in the model and full-scale by using the real flow and virtual flow characteristics. Based on the main findings of this research study, one can recommend that the use of small wall y+ value is more important for the model scale simulations than for the full-scale simulations. This study also demonstrated that the advanced coefficient and Reynolds similarities could be satisfied simultaneously in the full-scale by using the virtual fluid properties in the CFD simulations without any need to conduct more computationally demanding full-scale simulations with the real fluid.

**Key words**: Marine propeller, CFD, Wall Y+, RANS, Reynolds similarity.

# Numerical study of convection from perforated plate insulation – Influence of space distance

Hyeon-Su Jeong* Jung-Ho Choi**

*Dept. of Engineering Competence Technology, Beerenberg AS, Busan, Korea
**Dept. of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

KEY WORDS: Personnel protection, Grid convergence index, Cfd, Insulation, Natural convection

ABSTRACT: *Due to the lack of standard and difficulty in the theoretical calculation, insulation using perforated plate has long been unable to consider the project's specificity, and design values used in previous projects have been arbitrarily selected. So this paper presents numerical analysis around the perforated plate installed on the bare pipe to suggest proper guidelines to estimate the design parameter.*

## 1. Introduction

The personnel protection using a perforated plate is one of the methods to prevent burn hazards from the operated pipe on the offshore platform. (Standards Norway, 2005) However, due to the lack of standard and difficulty in the theoretical calculation, insulation using perforated plate has long been unable to consider the project's specificity, and design values used in previous projects have been arbitrarily selected. For example, it is only acceptable to apply perforated plate insulation up to 150 ° C according to NORSOK STANDARD R004 (Standards Norway, 2005) But not for other projects. This can cause a waste of budget and potential safety issues. So this paper presents numerical analysis around the perforated plate installed on the bare pipe to suggest proper guidelines to estimate the design parameter. For the verification of numerical uncertainty, the Grid Convergence study, which Roache (Roache, P.J., 1998) derived, has been achieved on the basis of Richardson extrapolation.

## 2. Numerical Method

### 2.1 Geometry and mesh

The 4-inch pipe is modeled to simulate, and 30, 50, 75, 100, and 150 mm PP Space were designated, and 5 mm hole and 8 mm pitch was selected according to NORSOK STANDARD R004 (Standards Norway, 2005)

The course, medium, and fine mesh were generated to conduct a grid convergence study. The total cells are

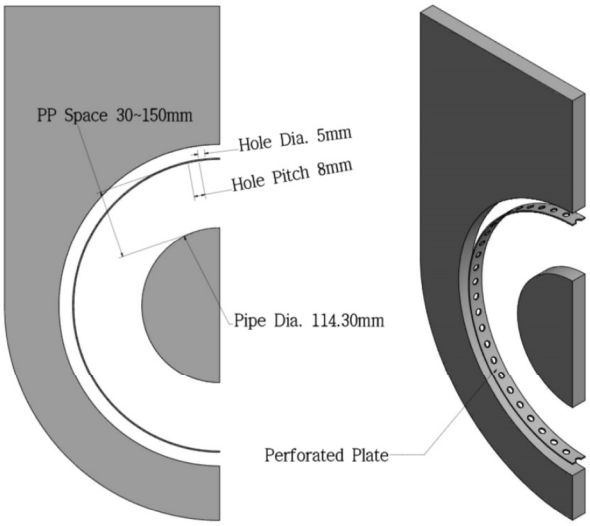



Fig. 1 Geometry of the model

224,771, 527,420 and 1,317,381 to conduct grid convergence study. The average GCI12 and GCI23 of the temperature around the holes are 0.85 % and 2.24 %, respectively, and 1 % and 3.05 % for velocity. Finally, the medium grid was selected for all the simulations.

### 2.2 Boundary conditions and setup

The initial temperature of the control volume is 35 ° C and atmospheric pressure. The pipe's operating temperatures are 100, 125, 150, 175, 200, and 250 ° C. All solid wall parts are assumed to be in non-slip condition. Perforated plate is assumed to be adiabatic. The three-dimensional steady-state simulation was carried out, and Boussinesq approximation and

the in-compressible fluid assumption were applied.

## 3. Result and Discussion

### 3.1 Solution verification

The GCI method is based on the generalized theory of Richardson extrapolation and involves the comparison of discrete solutions at two different girds of spacing and It is a practical and methodical approach to account for numerical uncertainty (Karimi et al., 2012). The method of the grid convergence index was first proposed by Roache (Mansour et al., 2018).

The $x_1$, $x_2$ and $x_3$ are the grids spacing of fine, medium and coarse. $\phi_1$. $\phi_2$ and $\phi_3$ are solutions.

$$r = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} \tag{1}$$

Constant r is not required but simplifies the analysis (Xing, T. et al., 2010)

$$\begin{aligned} \epsilon_{21} &= \phi_2 - \phi_1 \\ \epsilon_{32} &= \phi_3 - \phi_2 \end{aligned} \tag{2}$$

$\phi_k$ indicates the solution of the kth grid.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln\left|\epsilon_{32}/\epsilon_{21}\right| + q(p) \right| \tag{3a}$$

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s}\right) \tag{3b}$$

$$s = sgn(\epsilon_{32}/\epsilon_{21}) \tag{3c}$$

$q(p)$ = 0 for r = constant

$$e_2^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \tag{4}$$

$$GCI_{Fine}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \tag{5}$$

Equation (4) and (5) are approximate relative error and fine grid convergence index, respectively.

The three different grids combinations were set according to refinement ratio 1.5 and the solutions of the coarse, medium and fine-meshed model's convergence were confirmed. The results of the grid convergence study are presented in Table 1. As a result, the solutions were in the asymptotic range of convergence. Figures 3, 4 exhibited the data is in the convergence too. Some of specified points were selected to calculate GCI in Figure 6. The result indicates that the numerical uncertainty due to the discretization error is not large enough to affect the reliability of the simulated solutions.

**Table 1** Result of the gird convergence study

| Temeprature | | Velocity | |
|---|---|---|---|
| Ave. GCI 21 [%] | Ave. GCI 23 [%] | Ave. GCI 21 [%] | Ave. GCI 23 [%] |
| 0.85 | 2.24 | 1 | 3.05 |

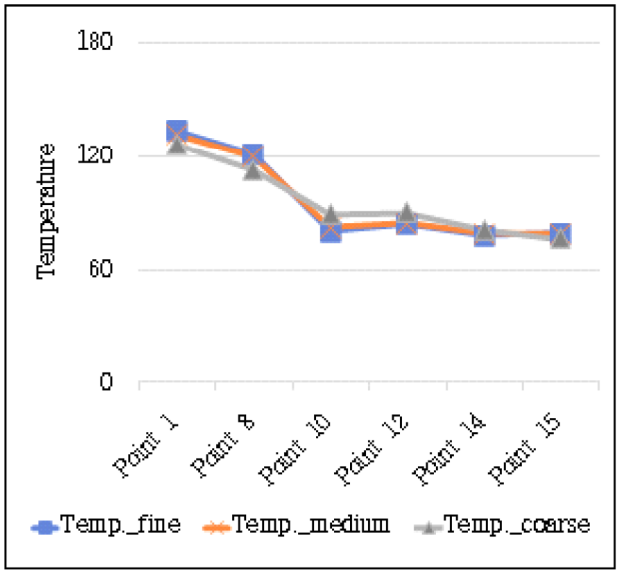



**Fig. 3** Temperature profile on the specified points

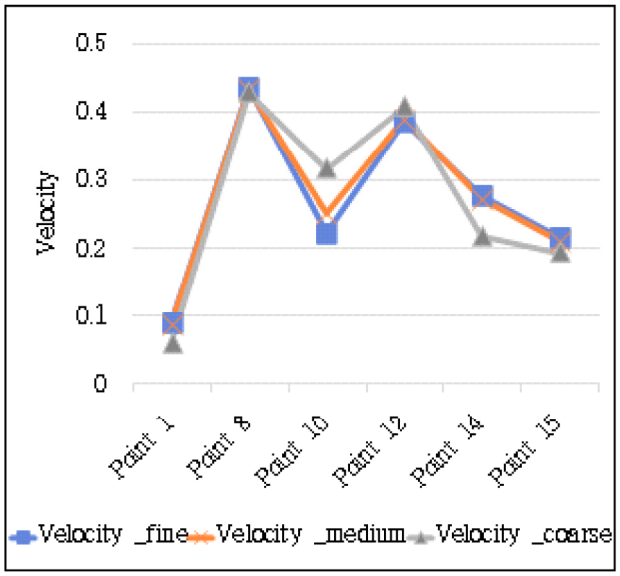



**Fig. 4** Velocity profile on the specified points on the XY axis

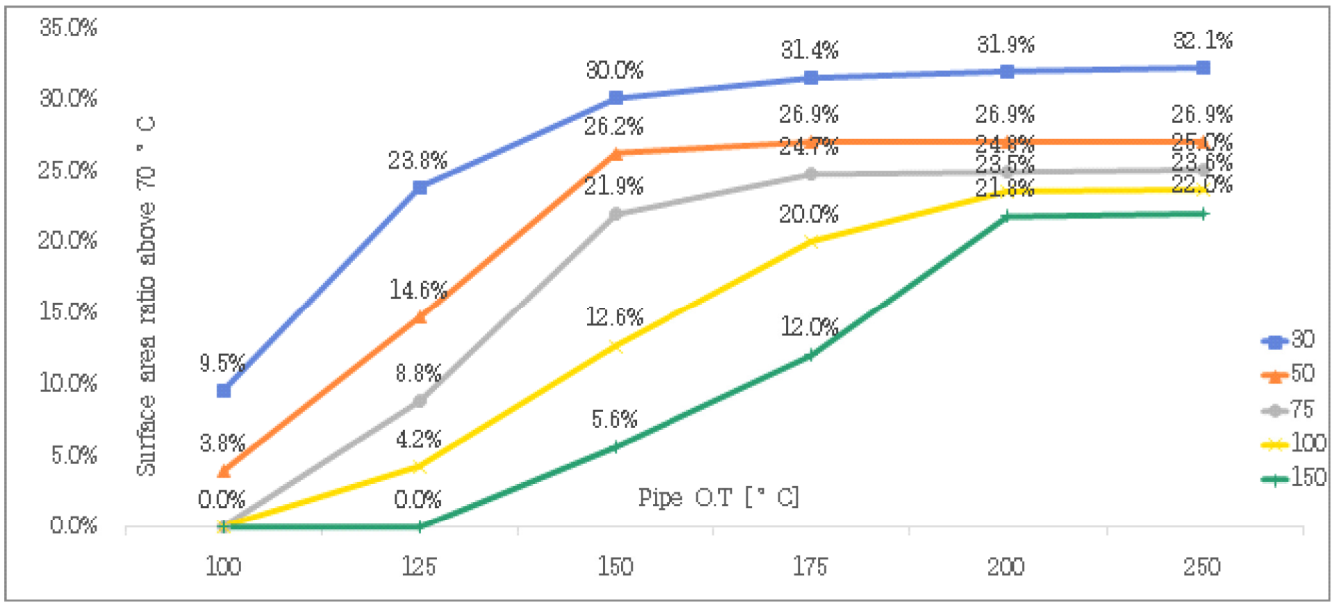



Fig. 5 Surface area ratio above 70 ° C above the holes.

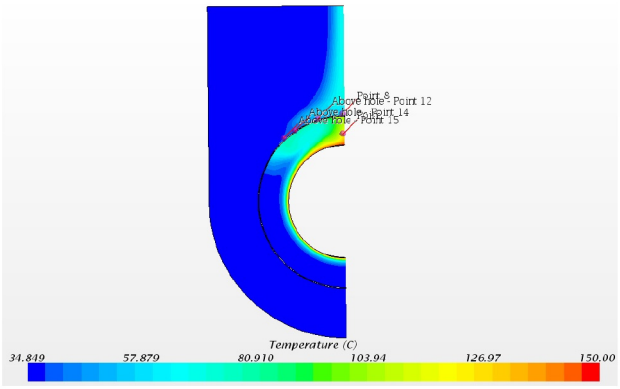



Fig. 6 Temperature contour of simulated case

### 3.2 Simulation results

The simulated results of all cases are presented in Figure 5. Totally thirty cases were carried out for the study. To investigate the influence of PP space distance, the surface area ratio was calculated. The equation of the shown data in Figure 5 is $degree_1$ / 360. $Degree_1$ is the exposed area's angle where the temperature above the hole is higher than 70 ° C in the radius. Figure 5 exhibit that the influence of increasing the PP space on the surface area reduction begins to decrease. It means that the selected thicker PP space can be too much conservative than required. For example, the 2.2 % difference in the radius between 50 and 75 mm on the 175 ° C is approximate 19 mm. The reduction of 25 mm of insulation thickness is significant for clash issues during construction. Based on this considerations more improved design parameter can be designated so that the pipe clash problem can be decreased.

## 4. Conclusions

The perforated plate insulation is not recommended to apply at a specified temperature according to PP space. Because the exposed area is not meaningfully improved even the space distance is increased at the temperature. This paper can help the end-user to design the improved design parameter, space distance, that can be selected according to each Company's safety criteria.

## References

Standards Norway (2005). Norsok Standard R-004. Piping and equipment insulation. Draft 1 for Rev. 3., Lysaker, Norway, NORSOK Standards, June 2005

Roache, P.J. (1998). Verification and validation in computational science and engineering. , Hermosapublishers, Albuquerque, N.M.

Karimi, M., Akdogan, G., Dellimore, K.H., Bradshaw, S.M. (2012). "Quantification of numerical uncertainty in computational fluid dynamics modelling of hydrocyclones", Comput.Chem.Eng., 43 (-) (2012) 45-54.

Mansour, A. and Laurien, E. (2018). "Numerical error analysis for three-dimensional CFD simulations in the two-room model containment THAI+: Grid convergence index, wall treatment error and scalability tests", Nuclear engineering and design, 326, 220-233.

Xing, T. and Stern, F. (2010). "Factors of Safety for Richardson Extrapolation", Journal of Fluids Engineering, 132(6), 061403.

# FW-H를 이용한 Tip Vortex Cavitation(TVC)에 의한 진동 및 소음 연구

황홍식 · 백광준(인하대학교) · 송지수(삼성중공업(주))

# A numerical study on noise and vibration by Tip Vortex Cavitataion(TVC) using FW-H model

Hong-Sik Hwang · Kwang-Jun Paik(Inha University) ·
Gisu Song(Samsung Heavy Industry Co. Ltd.)

Underwater radiated noise (URN) is increasing greatly due to increased commercial shipping, sonar activities and climate change. Among these Underwater Radiated Noise, the noise of cavitation from the propeller of a ship is affecting the URN. The Cavitation is a phenomenon in which rapid changes of pressure in a liquid lead to the formation of small vapor-filled cavities in places where the pressure is relatively low. This phenomenon results in poor efficiency of the propeller or turbine of the ship and results in noise, vibration and erosion. In this study, NACA16-020 was used to observe Tip Vortex Cavitation(TVC). The experimental paper of Olivier Boulon et al,.(1999) was referenced to study TVC. The turbulent models used in numerical analysis was LES (Large eddy simulation) model. Numerical analysis validation was completed by comparing the lift force of foil, cavitation features ,bubble length and vortex foot print with experimental results. Usually, URN is occurred by TVC. And it is measured by using FW-H (Ffowcs Williams-Hawkings) method. Using the results of the validation, correlation of URN from the occurrence of cavitation was analyzed according to cavitation number. Also, the effect of URN on cavitation was analyzed by comparing the magnitude of the noise over the measured distance. As a result, normally when cavitation occurs, URN increases due to pressure fluctuations.

KEY WORDS: NACA16-020, TVC(Tip Vortex cavitation), URN(Underwater Radiated Noise), LES, Cavitation, FW-H, Vibration, Shnerr-sauer model

# RANS 난류 모델이 원형 실린더 주위 wave run-up에 미치는 영향에 관한 연구

서인덕*·정광열*·정재환**·조석규**
*넥스트폼(주) 기술연구소
**선박해양플랜트연구소

# A Study on the Effect of RANS Turbulence Model on Wave Run-up Around a Circular Cylinder

In-Duk, Seo*, Kwang-Leol, Jeong*, Jae Hwan, Jung**, Seok-Kyu, Cho**
*Research Center, NEXTfoam Co. ltd, Seoul, Korea
**Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** CFD (Computational Fluid Dynamics), OpenFOAM (Open-source Field Operator And Manipulator), VoF (Volume of Fraction), RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation), Regular wave, Wave run-up, Circular mono-cylinder

**ABSTRACT:**
Performing a 2D regular wave generation CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis under RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equation) turbulence model using OpenFOAM (Open-source Field Operator And Manipulator), a wave damping phenomenon occurs in which the wave height gradually attenuates as the wave progresses. The reason why wave damping phenomenon is observed is because RANS turbulence models in OpenFOAM do not consider density variation around free surface, which is indispensable when using the VoF (Volume of Fraction) algorithm. To solve such problems, two modified RANS turbulence models, Density-modified model and Buoyancy-modified model, are used. When the modified RANS turbulence models are used, the wave damping problem is improved, but the 2D regular wave generation analysis is not suitable for observing the effect of the buoyancy term because the wave non-linearity is not strong. Therefore in this research, we performed wave run-up CFD simulation around circular mono-cylinder and compare the wave profile results with model test result.

## 1. 서 론

해양환경 중 해양구조물의 거동을 예측하는 것은 해양구조물의 안정성, 운영 효율성 그리고 작업자의 안전성 파악에 있어서 중요한 역할을 한다. 따라서 다양한 해상환경 중에서 가장 큰 영향을 미치는 파랑 중 해양구조물의 동역학적 특성을 추정하기 위한 CFD 해석이 활발히 진행되고 있다. 그 중 open-source CFD toolkit 중 하나인 OpenFOAM의 파랑 생성 라이브러리인 waves2Foam을 이요한 CFD 해석의 활용 폭이 넓어지고 있다.

송성진, 박선호 [2017]의 경우 OpenFOAM 라이브러리를 활용하여 규칙파 중 원형 기둥 구조물 주위의 wave run-up 해석을 수행하였다. 그러나 RANS 난류모델을 이용하여 규칙파 생성 해석 시 파고의 감쇠 및 파형의 이동(wave shift) 현상이 나타나는 것을 확인하였고 이에 대한 원인이 자유수면 근처에서 난류 에너지 확산이라고 추정하였다. Sun et al[2016]는 27th ITTC Ocean engineering committee [2014]에서 기술되어있는 단일 원형 실린더 주위 wave run-up 조건에 대하여 potential 해석 및 CFD 해석을 수행하였고 MOERI 모형시험 결과와 비교를 하였다. Devolder et al[2017] 의 경우 OpenFOAM을 이용하여 원형 기둥 근처에서 wave run-up 해석을 수행할 경우 밀도 구배에 의한 효과가 무시되어 파랑이 감쇠 된다고 주장하였고 이를 보완하였고 더 나아가 상용코드에서 사용되고 있는 부력 항을 추가하여 Breaking wave CFD 해석을 수행하였다. 또한 Devolder et al[2018]에서는 앞서 개발한 난류 모델을 Breaking wave 해석에 적용하였다. 그 결과 자유수면 근처에서 난류 에너지의 확산이 줄어들었음을 확인하였지만 Breaking wave의 파형의 개선은 확인하기 힘들었다.

본 연구에서는 Devolder et al[2017]에서 제시한 Density modified 난류 및 Buoyancy modified 난류모델을 적용하여 3차원 단일 원형 실린더 wave run-up 해석을 수행하여 Buoyancy modified 난류모델이 파랑 생성 CFD 해석에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다.

## 2. 해석 기법

### 2.1. 수치 해석 기법

속도-압력 연성을 위해 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) 알고리즘을 사용하였다. 일반적으로 파랑 생성 CFD 해석의 시간차분법은 2nd order Crank-Nicolson scheme을 사용하였다. Gradient scheme으로는 중심 차분법이 사용되

었으며 divergence scheme으로는 Limiter가 적용된 2nd order upwind scheme이 사용되었다.

다상 유동 해석을 수행하기 위해 VoF(Volume of Fraction) 기법이 사용되었으며, 체적분율($\alpha$)의 대류항은 TVD(Total Variation Diminishing) 기법 중 하나인 vanLeer가 사용되었다. 자유수면 확산을 막고 날카로운 상경계면을 구하기 위해 자유수면 압축 기법과 OpenFOAM에서 제공하는 FCT(Flux Correction Transport) 기법인 MULES(MULti-dimensionsal Limiter for Explicit Solution) 기법이 적용되었다.

### 2.2. Wave relaxation zone

규칙파 생성을 위해 입구면 인근 영역과 반사파 억제를 위해 출구면 인근 영역을 relaxation zone으로 설정하였다. Relacation zone 에서는 파 조건에 맞게 속도와 체적분율을 다음과 같이 explicit 한 형태로 계산된다.

$$\phi = \chi(\sigma)\phi_{computed} + (1-\chi(\sigma))\phi_{target} \quad (1)$$

이때 아래첨자 computed는 이전 step에서 계산된 값을 의미하고 target은 analytic 한 물리량을 의미한다. $\sigma$는 relaxation zone 길이로 무차원화 된 거리로 relaxation 계수인 $\chi(\sigma)$를 계산하는데 사용된다. $\sigma$에 대한 $\chi(\sigma)$는 다음과 같은 식으로 표현되며 relaxation zone에서 $\chi(\sigma)$의 분포는 **Fig. 1**과 같이 나타난다.

$$\phi = \chi(\sigma)\phi_{computed} + (1-\chi(\sigma))\phi_{target} \quad (2)$$

$$\chi(\sigma) = 1 - \frac{\exp(\sigma^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1}$$




**Fig. 1** Relaxation zone & relaxation parameter

### 2.3. RANS 난류모델

본 연구에서는 3가지 RANS 난류 모델을 사용하여 wave run-up 해석을 수행하였다.

1) $k-\omega$ SST 난류 모델

OpenFOAM에서 제공하는 RANS 난류모델 중 $k-\omega$ SST 난류모델은 식 (3)과 같이 표현된다. 비압축성 유동해석을 수행할 경우 'strictly incompressible' 가정이 적용되어 밀도에 대한 항이 좌우 변에서 소거되어있다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}[(\nu + \sigma_k \nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}] = P_k - \beta^* wk \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}[(\nu + \sigma_w \nu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}] = \frac{\gamma}{\nu_t} G - \beta\omega^2 + 2(1-F_1)\frac{\sigma_{w_2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

2) Density modified $k-\omega$ SST 난류모델

다상유동 해석을 수행할 경우 자유수면 근처에서 밀도는 체적분율($\alpha$)에 의한 식으로 표현된다.

$$\rho = \alpha\rho_{liquid} + (1-\alpha)\rho_{gas} \quad (4)$$

따라서 자유수면 인근에서 밀도는 체적분률에 의한 식으로 표현되기 때문에 일정하지 않다. 따라서 Devolder et al[2017] 에서는 밀도 변화를 고려한 Density modified $k-\omega$ SST 난류모델을 제안하였고 이는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho(\nu + \sigma_k \nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}] = \rho P_k - \rho\beta^* wk \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho(\nu + \sigma_w \nu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}] = \frac{\gamma}{\nu_t}\rho G - \rho\beta\omega^2 + 2(1-F_1)\rho\frac{\sigma_{w_2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

3) Buoyant modified $k-\omega$ SST 난류모델

Devolder et al[2017]은 중력에 의한 부력 항을 추가한 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류모델도 함께 제안하였는데 이는 Van Maele & Merci[2006]가 제안한 방법으로 공기 중 열에 의한 부력 효과를 고려한 방법으로 식 (6)과 같이 부력항이 추가된다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho(\nu + \sigma_k \nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}] = \rho P_k - \rho\beta^* wk - \frac{\nu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \rho}{\partial x_j}g_j \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho(\nu + \sigma_w \nu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}] = \frac{\gamma}{\nu_t}\rho G - \rho\beta\omega^2 + 2(1-F_1)\rho\frac{\sigma_{w_2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

## 3. 해석 조건

### 3.1. 계산 영역 및 경계조건

전체 해석 영역은 파가 진행하는 방향으로 10$\lambda$로 선정하였고 횡 방향으로는 Sun et al[2016] 의 wave run-up 시뮬레이션의 해석 영역을 참고하여 cylinder 지름의 5배로 선정하여 해석 영역을 구성하였다. 해석 영역의 깊이는 1$\lambda$로 선정하여 바닥에 의한 영향을 최소화했으며 높이는 0.5$\lambda$로 선정하였다.

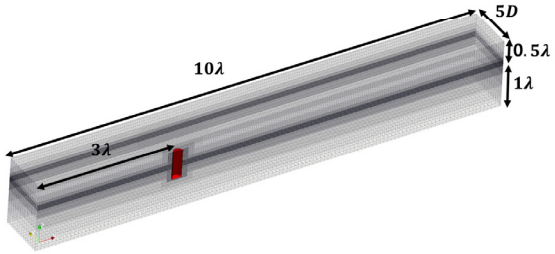



Fig. 2 Domain used in wave run-up simulation

입구 면에서 2λ 그리고 출구 면에서 4λ 떨어진 영역을 wave relaxation zone으로 설정하였으며 원형 cylinder는 입구 면에서 3λ 만큼 떨어진 곳에 위치 한다.

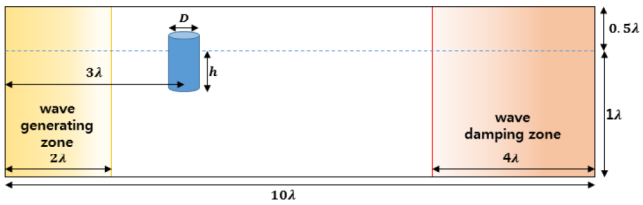



Fig. 3 Wave relaxation zone specification

### 3.2. 격자 생성 조건

비정렬 격자를 사용하여 해석을 수행하였으며 상경계면을 잘 포착하기 위해 자유수면 인근에서 격자를 z 방향으로 refine 하여 구성을 하였다. 이때 가장 많이 refine 되었을 때 격자 조건은 Table. 1과 같다.

Table. 1 Unstructured mesh refinement criteria

| Refine level | $z_{min}$ | $z_{max}$ | $\lambda/\Delta x$ | $\Delta x/\Delta z$ |
|---|---|---|---|---|
| Background | - | - | 12.5 | 2 |
| Refine 1 | -0.75λ | 0.5λ | 25 | 2 |
| Refine 2 | -0.5λ | 0.25λ | 50 | 2 |
| Refine 3 | -0.25λ | 0.125λ | 100 | 2 |
| Refine 4 | $-H$ | $H$ | 200 | 2 |

### 3.3. 파랑 조건

Stokes 5th 파 조건을 사용하였으며 MOERI에서 수행한 Single circular cylinder 모형시험 조건 중 일부를 사용하였다.

Table. 2 Wave specification

| Case No. | Period $T$ [s] | Steepness $H/\lambda$ [ · ] | Height $H$ [m] | Length $\lambda$ [m] |
|---|---|---|---|---|
| wave 1 | 9 | 1/30 | 4.21 | 126.36 |
| wave 2 | 7 | 1/16 | 4.78 | 76.44 |

Table. 2에서 나타난 조건의 경우 실스케일의 파조건이고 모형시험 조건은 축적비 1:50.314 로 축소시켜 수행을 했기 때문에 본 논문에서도 모형시험 스케일에 해당하는 파를 이용하여 해석을 수행하였다.

## 4. 해석 결과

### 4.1. 2차원 규칙파 생성 CFD 해석 결과

먼저 앞서 설명한 격자 criteria 조건 하에서 규칙파 생성이 잘 되는지 확인을 하기 위해 2차원 규칙파 생성 CFD 해석을 수행하였다.

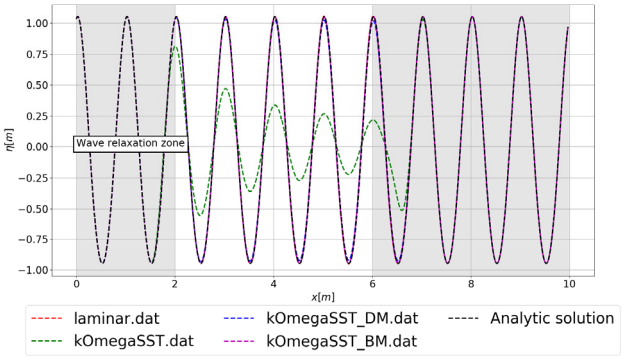



Fig. 4 Wave elevation for wave1 condition

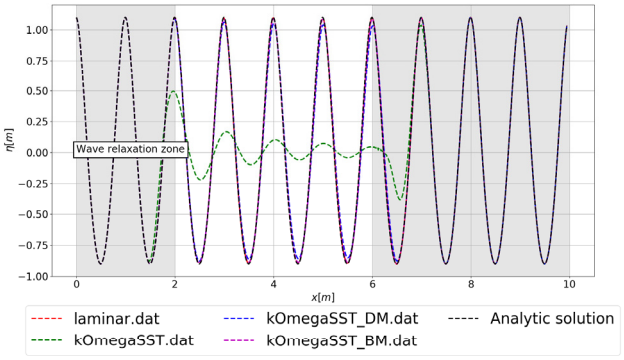



Fig. 5 Wave elevation for wave2 condition

Fig. 5 와 Fig. 6은 2차원 규칙파 생성 해석 수행 후 30 주기가 지난 후 wave elevation 형상이다. $k-\omega$ SST 난류 모델의 경우 파고 감쇠 효과가 발생하여 이론적인 파형을 추정하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그 외의 laminar, density modified $k-\omega$ SST, buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용한 결과 모두 이론적인 stokes 5$^{th}$ 파형을 잘 추정하는 것으로 보아 앞서 설명한 격자 criteria가 유효한 것을 알 수 있다.

### 4.2. 3차원 원형 실린더 wave run-up 해석 결과

$k-\omega$ SST, Density modified $k-\omega$ SST 그리고 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용하였을 때 wave run-up 해석 결과를 모형시험 결과와 비교하였다. 이때 지정된 위치에서 RAO (1st harmonics) 와 QTF (2nd harmonics) 결과를 비교하였으며 관측한 위치는 다음과 같다.

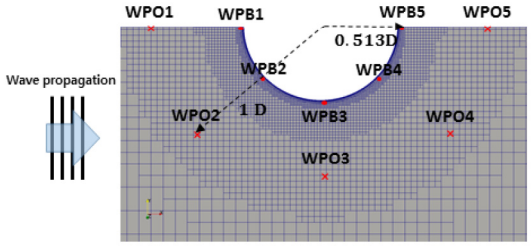



**Fig. 6** Wave probe location in 3D wave run-up simulation

**Table. 3** Wave probe location

| Inner | x [m] | y [m] | Outer | x [m] | y [m] |
|---|---|---|---|---|---|
| WPB1 | -0.1631 | 0.0 | WPO1 | -0.3180 | 0.0 |
| WPB2 | -0.1153 | 0.1153 | WPO2 | -0.2249 | 0.2249 |
| WPB3 | 0.0 | 0.1631 | WPO3 | 0.0 | 0.3180 |
| WPB4 | 0.1153 | 0.1153 | WPO4 | 0.2249 | 0.2249 |
| WPB5 | 0.1631 | 0.0 | WPO5 | 0.3180 | 0.0 |

RAO(Response Amplitude Operator) 와 QTF(Quadratic Transfer Function) 을 계산하기 위하여 5T ~ 10T 사이의 값을 사용하여 FFT(Fast Fourier Transform) 을 수행하였으며 먼저 wave1과 wave2 의 RAO 결과는 Fig. 8과 Fig. 9와 같다.

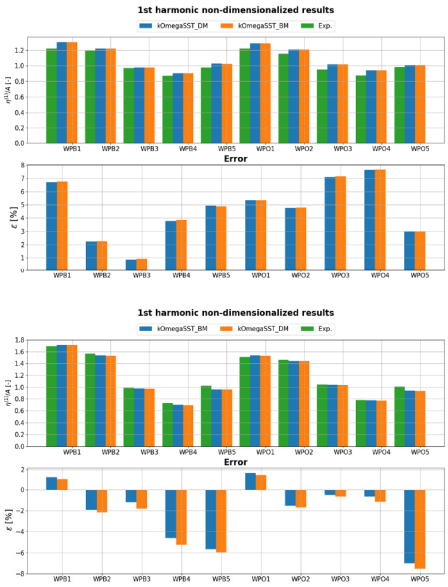



**Fig. 7** RAO results for wave1 & wave2

wave1과 wave2 의 QTF 결과는 다음과 같다.

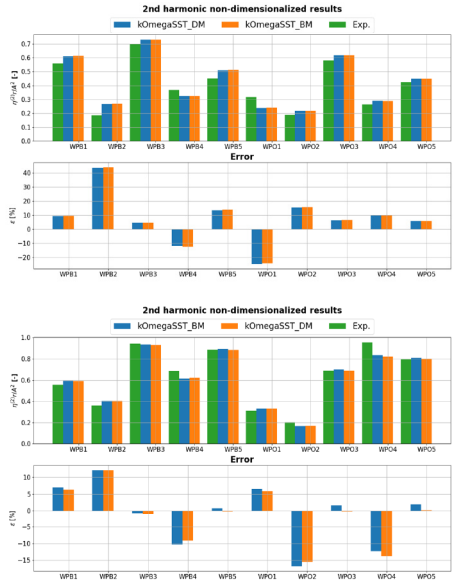



**Fig. 8** QTF results for wave1 & wave2

Density modified $k-\omega$ SST 난류모델 과 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 적용하였을 때 wave1과 wave2의 RAO 및 QTF 결과 모두 큰 차이를 보이지 못하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 3차원 원형 실린더 주위의 wave run-up 해석을 수행하였다. 이 때 사용된 난류 모델은 Density modified $k-\omega$ SST 난류모델 과 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용하였는데 자유수면의 비선형성이 강할 때 Buoyancy modified 난류 모델을 사용한 결과가 더 정확하라 것이라는 예상과는 달리 Density modified 난류모델과 Buoyancy modified 난류모델의 결과에는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양구조물 전역거동해석 전산유체역학 핵심기술 개발” 에 의해 수행 되었습니다 (PES3500).

This research was supported by a grant from Endowment Project of “Development of CFD Technology for Global Performance Analysis of Offshore Structure” funded by Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering (PES3500).

## 참 고 문 헌

Devolder, B., Rauwoens, P., & Troch, P. (2017). “Application of a buoyancy-modified k-$\omega$ SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to

regular waves using OpenFOAM®". Coastal Engineering, 125, 81-94.

Devolder, B., Troch, P., & Rauwoens, P. (2018). "Performance of a buoyancy-modified k-$\omega$ and k-$\omega$ SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®". Coastal Engineering, 138, 49-65.

Lee, J. H., Joo, Y. S., & Kim, J. B. (2004). "Development of mechanical structural design technology for liquid metal reactor" (No. KAERI/TR--2704/2004). Korea Atomic Energy Research Institute.

Sun, L., Zang, J., Chen, L., Taylor, R. E., & Taylor, P. H. (2016). "Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations". Applied Ocean Research, 59, 650-662.

Van Maele, K., & Merci, B. (2006). "Application of two buoyancy-modified k-$\varepsilon$ turbulence models to different types of buoyant plumes". Fire Safety Journal, 41(2), 122-138.

# Study on PIV-based Pressure Estimation Method of Wave Loading under Fixed Deck

Tien Trung Duong, Gang Nam Lee, Hyun Jung Park and Kwang Hyo Jung

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea*

**KEY WORDS:** Pressure estimation, Particle image velocimetry, Focused wave

**ABSTRACT:** *This study presents the evaluation of pressure fields from PIV velocity fields under a horizontal fixed deck model subjected to focused wave. A series of experiments was conducted in a 2D wave tank to measure the global forces, pressure and velocity fields under the deck by adopting Particle Image Velocimetry technique. Pressure estimation methods based on the Eulerian method and pseudo-tracking method (Lagrangian point of view) were proposed to calculate the pressure fields under the fixed deck. The normalized root-mean-square deviation was computed between the measured and calculated pressure to assess the feasibility of the pressure estimation methods. The results showed a good match between the calculated and measured pressure data. The variations of pressure distributions along the underside of the deck model during the loading process were investigated to understand the wave loading phenomena.*

## 1. Introduction

In the design of offshore structures, a sufficient air gap between underside of the lowest deck and crest height is required to prevent wave loads on deck. However, the uncertainty of determination of extreme wave crests as well as sea-level raise can lead to the generation of wave forces under the deck.

In this study, the pressures induced by focused wave into fixed deck were estimated from PIV data. A comparison between the calculated pressure and the measured pressure was performed to validate the pressure estimation method. Pressure distributions under the deck model were studied to understand the wave loading phenomena.

## 2. Experiments

The experiments were conducted in the wave flume having a length of 32 m, a width of 0.6 m with a piston-type wave maker as shown in Fig. 1. The 0.4 m× 0.6 m×0.008 m model was scaled down from fixed jacket platform in the Gulf of Suez (Raheem, 2016).

The vertical forces and pressure distributions were measured by using four load cells and five piezo-resistive pressure sensors, respectively. The velocity fields under the deck were obtained by using the PIV technique with the field of view was 0.44 m x 0.32 m. The PIV images were analyzed by using the adaptive correlation (Theunissen *et al.*, 2007) with 50% overlap.

The wave conditions used in the experiments were selected to model the conditions for the 100-year return period of Gulf of Suez. The center of the deck was chosen as the focal point. Fig. 2 shows the elevations of undisturbed waves measured at the center of the deck.

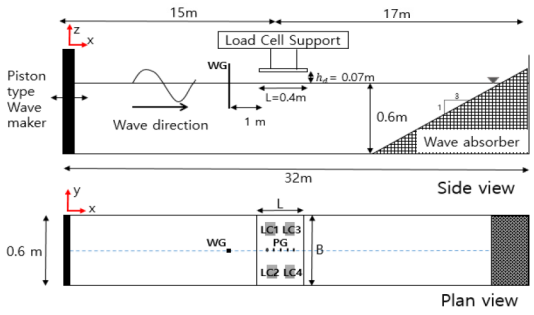



**Fig. 1** Sketch of experimental setup

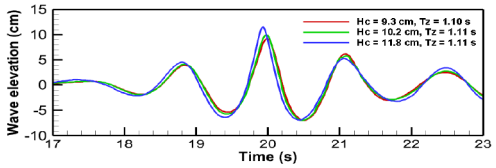



**Fig. 2** Wave elevations at center of the deck

## 3. PIV-besed Pressure Estimation Method

For 2D incompressible and inviscid flow, the Euler equation can be used to directly compute the pressure gradient components from the known velocity fields.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) - \rho g \quad (2)$$

where u, w denote the horizontal and vertical velocity components obtained from PIV technique. For the Eulerian method, the central finite difference

approximation is adopted to calculate the spatial and temporal derivatives:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x,z,t)=\frac{u(x+h,z,t)-u(x-h,z,t)}{2h} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x,z,t)=\frac{u(x,z,t+\Delta t)-u(x,z,t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad (4)$$

where h is grid spacing and $\Delta t = n\delta t$ is the time step and $\delta t$ is the time separation between two successive velocity fields. For the pseudo-tracking methhod, the position of the imaginary particle $\vec{x}_P^{\pm n}$ was calculated by:

$$\vec{x}_P^{\pm n} = \vec{x}_P^{\pm(n-1)} \pm \vec{V}_P^{\pm(n-1)} \times \delta t \quad (5)$$

where the velocity $\vec{V}_P^{\pm(n-1)}$ was estimated from bilinear interpolation from the surrounding velocity vectors. Then the total acceleration of the imaginary particle was computed from:

$$\vec{a}_P^{\pm n} = \frac{\vec{V}_P^{n} - \vec{V}_P^{n}}{2n\delta t} \quad (6)$$

Finally, the pressure gradient is spatially integrated from a boundary condition set at the free surface as shown in Fig. 3. From the known pressure in line L1 and L2, the space-marching integration method proposed by Baur and Kongerter (1999) was adopted to compute the unknown pressure over the rest of fluid domain.

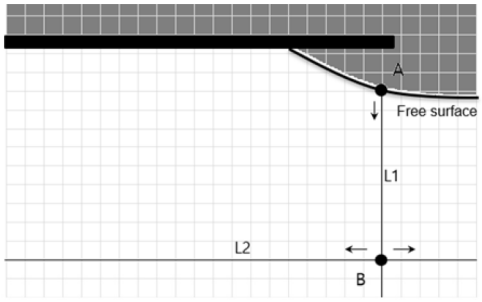



**Fig. 3** Pressure integration scheme in the present study

## 4. Results and Discussions

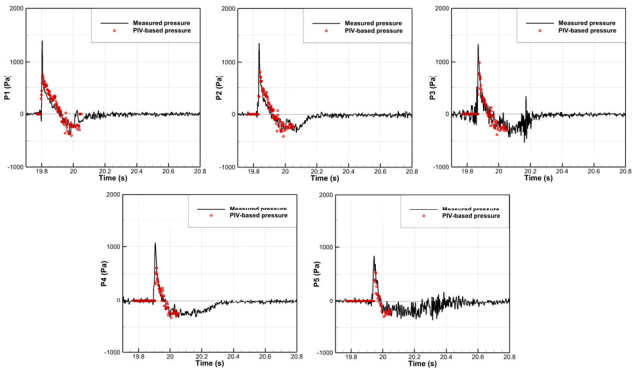


**Fig. 4** Time series of measured and calculated pressure from the Eulerian method.

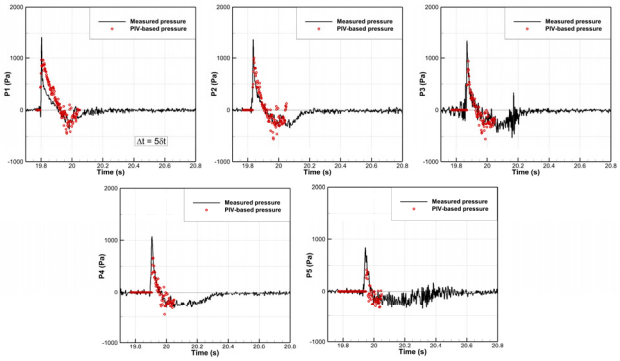


**Fig. 5** Time series of measured and calculated pressure from the pseudo-tracking method.

Fig. 4 and 5 show the comparison between the measured pressure and calculated pressure from the Eulerian method and the pseudo-tracking method, respectively, for the condition Hc=9.3 cm, Tz=1.10 s with the 6 cm deck clearance and time step $\Delta t = 10\delta t$. It was found that the calculated pressure agreed well with the measured pressure.

## 5. Conclusions

Two pressure estimation methods from PIV velocity data were proposed to compute the pressure under the deck. First, total acceleration was calculated from the Eulerian and pseudo-tracking methods. Then pressure gradient components were calculated inside the fluid domain by using the Euler equation. Finally, the pressure gradient was spatially integrated from a boundary condition set at free surface. The results show a good agreement between the calculated pressure and the pressure measured at five pressure sensors.

## Aknowledgements

This research is supported by Global Advanced Engineer Education Program for Future Ocean Structures(P0012646) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy.

## References

Raheem, A., (2016). "Nonlinear behaviour of steel fixed offshore platform under environmental loads", Ship and Offshore Structures, Vol 11, pp 1-15.

Theunissen, R., Scarano, F., & Riethmuller, M., L. (2007). "An adaptive sampling and windowing interrogation method in PIV", Measurement Science and Technology, Vol 18, pp 275-287.

Baur, T., & Kongeter, J., (1999). "PIV with high temporal resolution for the determination of local pressure reductions from coherent turbulent phenomena". 3rd Int. Workshop on Particle Image Velocimetry (Santa Barbara), pp. 101-6.

# 임베디드 파랑 생성 기법을 이용한 파랑 수조 내 파랑 생성 시뮬레이션

오승훈* · 박병원* · 김진하*
*선박해양플랜트연구소 심해공학연구센터

# Wave Generation Simulation in a Wave Tank using Embedded Wave Generation Technique

Seunghoon Oh*, Park Byeongwon*, Jin-Ha Kim

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering Deep Ocean Engineering Research Center, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Wave tank 파랑 수조, Spectral method 스펙트랄 방법, embedded wave generation technique 임베디드 파랑 생성 기법, additional potential method 추가 포텐셜 기법, Wave generation simulation 파랑 생성 시뮬레이션

**ABSTRACT:** *In this study, the wave generation simulation code was developed using the spectral method to simulate the wave tank. The pseudospectral basis of the Cosine function was used to apply the wall condition of the wave tank. Time integration was carried out using the Runge-Kutta fourth-order method for stable wave generation simulations. The cut-off method through half-rule was used to remove the aliasing effect. The embedded wave generation technique was applied for wave generation. To observe the characteristics of the embedded wave generation technique, the wave generation method using oscillation of free surface elevation and the wave generation method using the additional potential method were compared. Through the above comparative study, the simplicity and efficiency of the embedded wave generation technique were confirmed.*

## 1. 서 론

항상 해상에 있는 해양구조물의 설계 및 운용을 포함한 유지보수를 위해서는 정도 높은 파랑의 예측과 이해는 필수적이다. 따라서 수조를 이용한 파랑생성 모형시험은 파의 생성 및 전파 현상을 이해하기 위한 아주 좋은 수단이다. 이러한 목적에 부합하여 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO)에서는 세계 최대 규모의 심해공학수조(Deepwater Ocean Engineering Basin, DOEB)가 시험이 가동을 준비 중이다. 심해공학 수조의 모형시험은 시간과 비용이 많이 소요되므로 효율적인 시험조건 선정이 필수적이며 이를 위한 보조수단으로 수치수조의 중요성이 부각되었다.

심해공학수조와 같이 규모가 큰 수조의 파랑 생성 시뮬레이션을 위해서는 연산효율이 높은 수치기법을 필요로 한다. 스펙트럴 기법(spectral method)은 행렬 연산 없이 고속 푸리에 변환(Fast fourier transform, FFT)을 이용하여 경계치 문제의 해를 계산할 수 있기 때문에 다른 수치기법과 비교하여 연산 효율이 대단히 높은 방법이다. 하지만 , 자유수면 외의 경계조건을 정의할 수 없기 때문에 자유수면 동요를 통한 파랑 생성 전달함수를 사전 계산 하는 방법 또는 추가 포텐셜 기법을 활용하여 조파 경계면을 정의하는 방법(Bonnefoy et al.,2006))이 있다. 상기 두 방법은 사전 계산 또는 별도의 추가 경계치 문제를 도입해야하는 번거로움이 있다. 최근 Liam et al.(2014)은 임베디드 파랑생성 기법(Embedded Wave Generation Technique)을 통해 별도의 사전 계산 이나 추가 경계치 문제 없이 정확한 파랑 생성을 구현하였다.

본 연구에서는 수조 환경 모사를 위해 스펙트랄 기법을 활용하여 파랑생성 시뮬레이션 코드를 개발하였다. 수조의 벽조건을 구현하기 위하여 Cosine 함수의 의사스펙트럴 기저를 사용하였다. 자유수면 시뮬레이션에 안정적인 Runge-Kutta 4차 방법을 이용하여 시간적분을 수행하였다. 위신호 현상을 제거하는 방법으로 half-rule을 통한 cut-off 방법이 이용되었다. 파랑 생성을 위해 임베디드 파랑생성 기법을 적용하였다. 베디드 파랑생성 기법 의 특성을 관찰하기 위하여 자유수면 동요를 이용한 파랑생성 기법 및 추기 포텐셜 기법을 활용한 파랑생성 기법과 비교하였다. 상기 비교 연구를 통하여 임베디드 파랑생성 기법의 간결성과 효율성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 선박해양프랜트연구소에서 지원하는 〞심해공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발(PES3480)"의 결과물임을 밝히는 바입니다.

# 심해공학수조의 조류속도 계측 및 분포 연구

정성준 · 정재상 · 이용국 · 박병원 · 황성철 · 박인보 · 김진하(선박해양플랜트연구소)

# Current Measurement and Velocity Distribution of Deep Ocean Engineering Basin

Sung-Jun Jung · Jae-Sang Jung · Yong-Guk Lee · Byeong-Won Park · Kangsu Lee · Hong-Gun Sung(KRISO)

과거 해양플랜트 신조 산업이 활발했던 십여년 전 국내 해양플랜트 산업의 국제경쟁력과 해양플랜트의 초기 설계 기술(FEED) 및 성능 검증을 위한 대형 해양 공학 수조가 국내에 필요하다는 공감대가 형성되었으며, 이에 세계 최대 규모의 심해공학수조가 국내에 건설되었다.
본 연구에서는 독자적으로 설계한 조류 계측 지그를 통해, 심해공학수조 조류발생장치의 다양한 시운전 조건에서 조류 속도를 계측하였다. 15m 높이의 삼각-Truss 구조물 형태이며, 전동 모터-와이어 장치를 통해 계측센서는 15m 전구간 이동이 가능하다. 유체하중과 구조 안정성 해석을 수행하였으며, 1.0m/s의 조류 속도에도 큰 처짐이나 변형 없이 계측이 가능하였다.
본 장치를 통하여 심해공학수조의 조류발생장치 성능을 확인하였으며, 향후 해양플랜트 성능검증 모형시험을 위한 조류발생장치 운영 방법 및 한계를 정리할 수 있었다. 다양한 수직, 수평 위치에서 조류 속도가 계측되었다. 최대 구동 회전수를 포함한 다양한 회전수에서 깊이별 조류 속도 Profile을 도출하였다. 표층에서는 0.56m/s의 최대유속을 얻었으며, 현실적인 범위 내 해양플랜트 모형시험에 필요한 모든 조류조건이 달성 가능 할 것이다.
시간 및 공간에 따른 속도 변동 성분을 확인하였으며. 현재 모형시험을 위해 충분한 조류장을 확인하였으나, 보다 균질한 조류를 얻기 위해는 추가적인 난류제어장치를 토출구에 설치할 수 있다. 추가적인 유동 제어장치 설계 연구와, 이를 설치함으로 얻어질 균일 유동과 압력손실로 인한 속도 감소의 장단점을 비교하는 추가연구가 진행 될 것으로 기대한다.

KEY WORDS: Model test 모형시험, Current generator 조류발생장치, Deep ocean engineering basin 심해공학수조, Current velocity 조류 속도, Velocity measurement 속도 계측

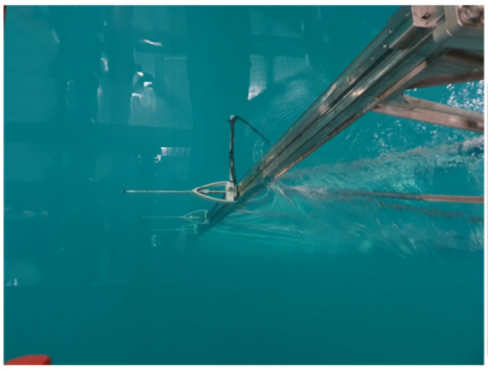


Fig. Current measurement with test zig

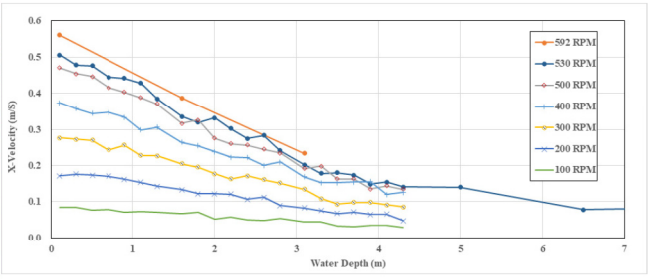



Fig. Current velocity profile

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업 '심해공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발(PES3480)' 에 의해 수행되었습니다.

# Modeling the roughness effect on the circular cylinder using CFD at high Reynolds number

Yoon-Ho Jang · Kwang-Jun Paik(University of Inha) ·
Yigit Kemal Demirel · Soon-Seok Song(University of Strathclyde)

Riser and marine pipe roughness can be caused by various factors such as mechanical causes, chemical and electrochemical processes (e.g. corrosion), and finally the colonization of biofouling, which is often the most critical. The associated safety problems such as increment of structural diameter, structural weight, and roughness can impact VIV which is a dangerous phenomenon in the subsea structure. Therefore, accurate predictions of the roughness effect on the subsea cylindrical structure are of great importance in the safety perspective. Although some studies have been conducted to investigate the roughness effect on the cylinder, most of the study related to the roughness effect on cylinder and VIV had been done by using the experimental method. Therefore, due to the limitation of the experiment, understanding in this field is still uncompleted. Based on the above background, this individual thesis aims to develop computational techniques to investigate the effect of biofouling on cylindrical simulation. This study consists of two distinct steps. Step 1 contains computational validations in terms of select the proper turbulence model and proper grid among the RANS simulation. For step 1, Both two different turbulent models were carried out by varying the Reynolds number (×105) of 1.4, 2.5, 3.8, 5.3, and 8.5. In Step 2, the possibility of using modified wall function on the cylindrical model had been reviewed by changing its maximum wall y+. This procedure is unavoidable because adjusting modified wall function on the cylindrical structure has some limitations. The result of RANS with transition model showed good agreement and it is observed that the possibility of modified wall function usage for the cylindrical simulation despite of some limitation.

**KEY WORDS**: Biofouling, Modified roughness wall function, CFD, Cylindrical structure, RANS, Roughness

# 심해공학수조의 바람발생장치 성능평가에 관한 연구

이용국 · 정재환 · 김남우 · 박인보 · 정재상 · 박병원 · 김진하(KRISO)

파랑, 조류 그리고 바람 하중 작용에 따른 해양구조물의 운동성능 평가를 위해 실시되는 해양공학실험에 있어 복합환경재현은 매우 중요하다. 최근 해양구조물의 상부 크기가 증가하고 신재생에너지에 대한 수요증가로 해상풍력발전설비가 점차 중요해지는 바, 복합환경하중 중에서도 바람하중에 대한 중요성이 점차 부각되고 있다. 최근 선박해양플랜트연구소에서 구축한 세계 최대 규모의 심해공학수조는 복합해양환경 재현을 위해 다방향 조파기, 조류 및 바람발생장치를 개발하였는데, 이 중에서도 해상풍 재현에 중요한 바람발생장치의 성능평가를 본 연구를 통해 수행하였다. 실험성능평가의 주요 목적은 크게 세 가지로 다음과 같다. 1) 바람발생장치 팬 성능 및 시험영역에서의 공간적 풍분포도 평가, 2) 실험을 통해 얻어진 성능평가 지표를 활용하여 바람발생장치 운영 방안 수립, 3) 바람발생장치의 성능이 모형시험에 미치는 영향분석을 통해 성능개선 필요성을 검토하는 것이다. 연구 목적 달성을 위해 바람장에 미치는 영향을 최소화 하면서, 난류에 의한 구조물의 진동을 최소화하고 열선 유속계 위치의 정밀 조정이 가능한 풍속계측 장비를 개발하였다. 계측을 통해 시험 모델이 주요하게 설치될 영역에서 속도 편차가 약 0.5m/s 이내, 난류 강도는 7~10%를 형성하는 것을 확인하였으며, 이것은 개방형 바람발생장치임을 감안하면 매우 준수한 성능이 도출된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실험장치 개발과정과 개발된 장치로부터 얻어진 실험 결과를 주요하게 다루었으며 결과를 바탕으로 풍동과 유사한 수준의 유질 개선은 어렵더라도 정도 높은 바람장 재현을 위한 개선안을 함께 도출하였다.

**KEY WORDS**: 바람발생장치, 심해공학수조, 난류강도, 풍분포도

**Acknowledgement**: 본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “심해공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발(2/3)”에 의해 수행 되었습니다 (PES3480).

# KRISO Semi-Submersible 모형시험 불확실성 연구

박병원* · 서민국* · 김남우* · 정성준* · 김진하*

*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

# Uncertainty study of model test for KRISO semi-submersible

Byeongwon Park*, Min-gun Seo*, Namwoo Kim*, Sungjun Jung*, Jinha Kim*

**Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea*

**KEY WORDS:** Model test 모형시험, Uncertainty, 불확도, Semi-submersible 반잠수식, Measurement 측정, Accuracy 정확도

*ABSTRACT: IIn this study, a model test was conducted to evaluate the seakeeping performance of KRISO standard Semi-submersible, KSEMI. The model test was carried out with a 1/50 scale model, and 12 mooring lines were included. Due to the limitations of the Ocean Engineering Basin's water depth, the truncated mooring line was designed and applied in this model test. Measurement items were 6-DOF motion, mooring line tensions, and wave run-up around the column and deck side. The uncertainty analysis was carried based on the ISO-GUM(International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements), which is referenced in ITTC Recommend. This study describes about the measurement uncertainty for each source such as GM setting and global response in regular waves, which can occur during model test preparation and procedure. From this study, the major component of uncertainty for model test can be identified and help improve the model testing accuracy.*

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 '심해공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발'로 수행된 연구결과입니다(PES3480).

## 참 고 문 헌

International Organization for Standardization (ISO), 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland.

International Towing Tank Conference (ITTC), 2011a, Seakeeping Experiments (7.5-02-07-02.1), ITTCRecommended Procedures and Guidelines. International Towing Tank Conference.

International Towing Tank Conference (ITTC), 2011b. Prediction of Power Increase in Irregular Waves from Model Test (7.5-02-07-02.2). ITTC – Recommended Procedures. International Towing Tank Conference.

International Towing Tank Conference (ITTC), 2011c. Ship Models (7.5-01-01-01), ITTC-Recommended Procedures and Guidelines.

Park, D.M. Lee, J.H. & Kim, Y.H., 2014. Uncertainty Study of Added Resistance Experiment. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 51(5) pp. 396-408.

Yum, D.J. Lee, H.Y. & Lee, C.M., 1993. Uncertainty Analysis for Seakeeping Model Tests. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 30(3) pp. 75-89.

# Jack-up rig의 Brace재에 용접강관 적용

임성우·정준모(인하대학교)

## 1. 서 론

Jack-up rig는 Triangular-shaped hull과 X-brass 형태의 승강이 가능한 Leg로 구성되어 있다. Leg는 각각 3개의 Rack과 Chord가 Truss를 구성하고 있다. 톱니 모양의 Rack과 반원 강관 모양의 Chord는 Leg 길이 방향으로 용접되어 있으며, 3개의 Rack과 Chord는 Brass로 연결되어 있다. Rack과 Chord 및 Brass의 재질은 모두 E690이다. CJ70 급과 같은 대형 Jack-up rig에서 는 일부 F690을 사용하고 있다.
Brass재는 관습적으로 무계목강관(Seamless steel pipe)을 사용한다. E690급 대형 직경의 무계목강관을 공급할 수 있는 강관사는 세계적으로 몇 회사 안 되기 때문에 독과점 체제이다. 무계목강관을 용접강관(SAW pipe)로 대체할 수 있다면 파급효과는 Jack-up rig를 넘어서 에너지 산업 전반에까지 미칠 수 있다.

## 2. 본 론

용접강관을 Brass재로 사용하기 위해서는 소재적 측면, 제관성 측면, 성능적 측면에서 검토가 필요하다. 소재 입장에서는 동일 또는 유사 등급의 후판을 강관으로 제관했을 경우 용접부에서의 기계적 성질이 설계 조건을 만족해야 한다. 제관성의 경우 Brass의 직경이 무계목강관에서는 대형이지만 용접강관의 경우에는 매우 소형이므로, 후육강관사의 강관 제관능력을 검토해야 한다. Brass 제관에 적합한 Bending sword와 소형 용접기기가 구비되었어도 후육강관사의 제관 경험이 풍부하지 못하면 제관의 치수 정밀도가 떨어진다. 성능적 측면에서는 잔류응력과 제관 오차가 구조 성능에 미치는 영향을 검토해야 한다. 무계목강관과 용접강관은 제관 방법이 다르기 때문에 제관 시 발생되는 잔류응력의 크기와 분포가 달라진다. 또한 제관 오차에도 차이가 있다. 잔류응력과 제관 오차를 고려하여 OD355xT25.4xL9000mm 강관의 압축강도를 평가하였다.

## 3.결 론

무계목강관과 용접강관은 소재와 제관성 측면에서 별다른 차이를 보이질 않았다. 구조 성능 면에서는 용접강관의 잔류응력이 무계목강관보다 다소 높음에도 불구하고 용접강관의 압축강도가 크게 저하되지 않았다. 또한 무계목강관과 용접강관 모두 최대 압축강도에 도달할 때까지 좌굴이 발생하지 않았다. 따라서 Jack-up rig의 Brace재로 용접강관을 사용해도 문제가 없을 것으로 사료된다.

# Jack-up rig에서 Leg 상세의 피로성능

임성우 · 정준모(인하대학교)

## 1. 서 론

Jack-up rig의 Leg는 Rack과 Chord로 구성되어 있다. MSC CJ50급의 경우 Rack과 Chord의 두께가 각각 183mm와 70mm이며, 강종은 해양구조용 강재 중에서 가장 고강도인 E690(EQ70)이다. Leg 길이가 122m이므로, 공장에서 Leg의 일부를 용접한 다음 현장에서 공장에서 제작된 Leg와 Leg를 수직으로 세워 용접을 해서 Leg를 제작한다. 고강도 극후판이기 때문에 강재를 공급하는 Mill사에서는 엄격한 용접조건을 준수할 것을 요구한다.

## 2. 본 론

국내 Mill사에서 개발한 E690 강재를 이용하여 공장 용접조건과 현장 용접조건의 Rack과 Rack, Chord와 Chord, Rack과 Chord, Spudcan의 Deck을 통과한 Bracket 상세에 대해서 피로시험을 수행하였다. FCAW와 SAW 모두 용접 입열량은 기존의 값보다 약간 높은 값을 사용하였다. 이때 강재의 두께는 시험기기의 용량을 고려하여 50mm로 하였다.

## 3.결 론

입열량이 기존 값보다 높았음에도 불구하고, 용접부의 기계적 특성이 E690 강재의 Spec.을 초과하였으며 Leg 상세의 피로성능도 설계기준을 만족하였다. 따라서 Jack-up rig의 Leg제로 국산 E690 강제를 사용해도 문제가 없을 것으로 사료된다.

# 충격에 의한 해양구조물의 동적파단 예측

서재훈 · 정준모 (인하대학교)

In this study, a rate-depedent ductile fracture model for shell elements, which was developed by the present authors recently, is used to simulate dynamic ductile fracture of steel-plated structures subjected to impulsive pressure loads. The considered loading may represent localized blast loads arising from close-field explosions.
The adopted model is a rate-dependent extension of the Hosford-Coulomb ductile fracture initiation model combined with a non-local localized necking criterion (rate-dependent DSSE-HC model) for predicting ductile fracture initiation in metals with shell finite elements at high strain rates. A Johnson-Cook-type hardening model, which consists of strain hardening, rate-sensitivity, and thermal softening terms, is used together with an associated flow rule. The temperature is treated as an internal state variable that was calculated from the plastic strain energy using a strain-rate-dependent weighting function between the isothermal and adiabatic conditions. The parameter associated with the localized necking locus for a specific strain rate is obtained using the instantaneous strain hardening rate. The material model is implemented in a user-defined material subroutine.
The model is used to investigate numerically the deformation and detachment path of simply-supported and fully clamped high-tensile strength steel quadrangular plates subjected to impulsive blast loads. The direction of crack propagation along the clamped plate support and the residual length are predicted for a wide range of impulse intensity, reproducing the failure modes observed experimentally. Furthermore, the developed model highlights the different failure mechanisms that occur in simply-supported plates, similar to those of panels subjected to localised blast loadings. Parametric studies are performed to establish dimensionless failure maps and investigate the influence of plate topology and boundary conditions on the dynamic response, for both square and rectangular geometries, thus offering an effective support for the design of impulsively loaded plates for advanced engineering applications.

# 4340M 강의 베이킹열처리 후의 잔류응력 분포

안석환
중원대학교 항공기계공학과

# Residual Stress Distribution after Baking Heat Treatment of 4340M Steel

Seok-Hwan Ahn
*Department of Aero Mechanical Engineering, Jungwon University, Chungbuk, Korea*

**KEY WORDS:** Residual stress 잔류응력, 4340M steel 4340강, Shot peening 쇼트피닝, Baking heat treatment 베이킹열처리

**ABSTRACT:** *Ferrous materials are used for aircraft landing gear materials. Aircraft landing gear must withstand impact energy during landing, and the used material is shot peened for fatigue resistance. Especially 4340M steel is used in aircraft landing gear components. This material is super high strength material with tensile strength above 2000 MPa, and has high strength and good toughness. In this study, 4340M steel was subjected to the shot peening treatment, and the baking heat treatment was performed as a post heat treatment process to prevent hydrogen embrittlement. The residual stress remaining in the material was investigated through the baking heat treatment performed after the shot peening treatment. The effect of the change in residual stress through baking heat treatment on the fatigue strength of the material was investigated. From the results, when the hardened depth was less than about 100㎛, the compressive residual stress of the shot peened specimen was higher than that of the baking heat treated specimen. However, when the hardened depth was deeper than this, the compressive residual stress of the bake heat treated specimen was appeared a tendency to be slightly higher. When the hardened depth was about 400㎛, residual stress almost disappeared and appeared uniformly. Fatigue limit of the baking heat treated specimen showed a tendency increasing than that of shot peened specimen when fatigue life is extended to VHCF (Very High Cycle Fatigue) regime.*

## 1. 서 론

4340M 강은 300M 강 및 AISI 4340 강과 더불어 항공기, 수상기, 해상과 육상에서 사용되는 수륙양용기 등의 랜딩기어용 소재로 널리 사용되고 있다. 특히 항공기의 특성상 착륙시의 충격흡수 및 이착륙 및 활주로 주행에 따른 피로방지가 필요하며, 또한 경량화를 위해 높은 비강도가 요구된다(Alsumait et al, 2019; Shin et al., 2000).

최근 항공기 부품소재의 장수명 및 내구성 향상 요구가 지속적으로 대두되고 있다. 이에 초고주기 신뢰성과 내구성평가에 가속화와 관련된 다양한 시험방법들을 적용하여 평가를 활발히 진행 중이다(Furuya, 2008). 더불어 항공기 랜딩기어용 소재는 가볍고 초고강도의 특성이 요구되며 인성이 우수하여야 한다(Shin et al., 2000). 여기에 피로저항성을 향상시키기 위하여 쇼트피닝을 실시하고 있다. 쇼트피닝은 쇼트의 충격에 의해 압축잔류응력을 표면에 생성함으로써 표면을 경화시키고 이로 인해 피로강도를 향상시키는 표면처리법이다(Mano et al, 2006; Prevey and Carnrnett, 2002; Shin et al., 2000; Wang et al, 1998). 그러나 쇼트피닝 후 발생하는 수소취화를 억제하기 위하여 베이킹열처리를 실시해야 한다(Ananta Nagu et al, 2003; Deutsche Norm, 2016; Wang et al, 1998). 하지만 이 베이킹열처리는 쇼트피닝 처리에 의해 향상된 피로강도의 감소를 가져올 수 있다. 그럼에도 불구하고 항공기 유지보수, 수리 및 검사(MRO) 프로세스에서는 쇼트피닝 후 베이킹열처리를 실시하여 수소취화를 방지하도록 규정하고 있다(AMS 2430U)..

따라서 본 연구에서는 항공기 랜딩기어용 소재인 4340M 강을 이용하여 쇼트피닝을 실시하고 난 후 후열처리로서 베이킹열처리를 실시하였다. 이때 베이킹열처리에 의한 잔류응력의 변화를 살펴보고 베이킹열처리가 소재에 형성된 잔류응력에 어떤 영향을 미치고 있는지를 확인하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 항공기 랜딩기어용 소재인 4340M 강이다. 이 종류의 강은 저탄소 합금강으로서 Cr-Ni-Mo-V을 주성분으로 한다. Table 1에는 4340M 강의 화학성분을 나타낸다.

Fig. 1에는 모재에 행한 QT열처리 프로세스 (a) 및 베이킹열처리 프로세스 (b)를 함께 나타낸다. 먼저 4340M 강의 모재에

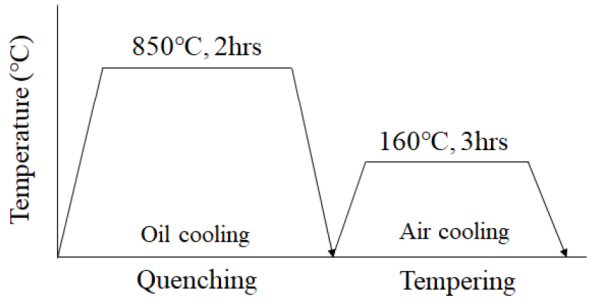
850℃에서 2시간 동안 퀜칭을 실시한 후 160℃에서 3시간 동안 템퍼링을 수행하였다.

이와 같이 퀜칭 및 템퍼링 처리된 시편에 쇼트피닝을 실시하였다. 쇼트피닝은 항공기 랜딩기어 수리공정에서 요구하는 표준규격을 적용하였다(AMS 2430U, 2010). 적용된 쇼트피닝 조건은 다음과 같다.

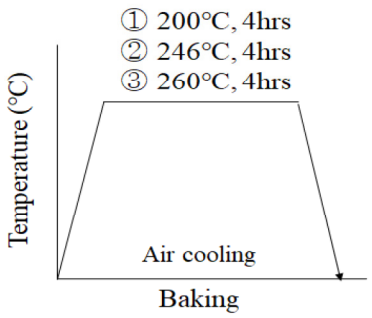
- Cast steel shot : ASH 230 with HRC 55-60
- Shot diameter : 0.7mm
- Nozzle diameter : 7.9mm
- Shot flow : 3kg/min
- Angle of impingement : 45-90 degree
- Air pressure : 3 bar
- Peening time : 2min/place
- Working distance : 50±5mm
- Arc height : 0.36-0.38mmA
- Coverage : 200%

**Table 1** Chemical composition of 4340M steel (wt%)

| C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.43 | 0.83 | 1.62 | 0.81 | 1.82 | 0.39 |
| V | N | Nb | P | S | Cu |
| 0.07 | 0.002 | 0.01 | 0.006 | 0.001 | 0.12 |
| B | Ti | Al | W | Co | Ca |
| 0.0002 | 0.006 | 0.07 | <0.05 | <0.005 | <0.001 |




(a) Quenching and tempering heat treatment




(b) Baking heat treatment

**Fig. 1** Heat treatment processes used in experiment

상기와 같이 쇼트피닝 처리를 하고 난 후 200, 246 및 260℃의 각각의 온도범위에서 4시간 동안 베이킹열처리를 실시하였다.

따라서, 본 연구에 적용된 시편의 종류는 모재열처리 시편, 쇼트피닝처리된 시편 및 베이킹 열처리 온도를 달리한 3종류의 시편 등 총 5종류의 시편을 제작하였다. 이들 조건에 따른 시편들을 이용하여 소재에 생성된 잔류응력의 변화를 비교하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 인장시험 및 피로시험

ASTM E8에 따라 게이지길이 50mm, 지름 12.5mm의 bar 형상으로 인장시편을 제작하고 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 최대하중 1,000kN의 UTM을 사용하여 크로스헤드 변위속도 3mm/min, 실온 대기 중에서 실시하였다. 인장시험으로부터 얻어진 기계적 특성치를 이용하여 피로시험의 응력에 적용하였다.

본 연구에서는 초음파 피로시험을 행하였다. 초음파 피로시험의 원리를 Fig. 2에 나타낸다. 20kHz 탄성진동파를 이용하여 최대변위가 게이지 길이 정 중앙부에 최대 스트레인이 걸리도록 하여 최대응력진폭이 적용되도록 하였다. ASTM E1876에 따라 동탄성계수 및 포아송비를 측정하고 측정된 동탄성계수 및 포아송비를 이용하여 피로시편을 설계 제작하였다. 이때 피로시험에 표면거칠기가 영향을 미치지 않도록 Ra 0.02㎛의 래핑가공으로 정밀연마하였다.

### 2.2.2 잔류응력 측정

5종류의 시편에 대하여 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력은 X-ray diffraction법을 이용하여 측정하였다. 잔류응력측정기는 micro-X360s(Pulstec, Japan)를, 전해연마기는 EP-3(Pulstec, Japan)를 각각 이용하였다. 잔류응력 측정은 JSNDI, EN15305, SAE HS784 규격을 따르며 해석은 COS법을 적용하였다. 잔류응력의 측정은 상기 피로시편의 그립부의 표면으로 부터 깊이 방향으로 400um까지 전해연마 하여 7 point를 측정하였다.

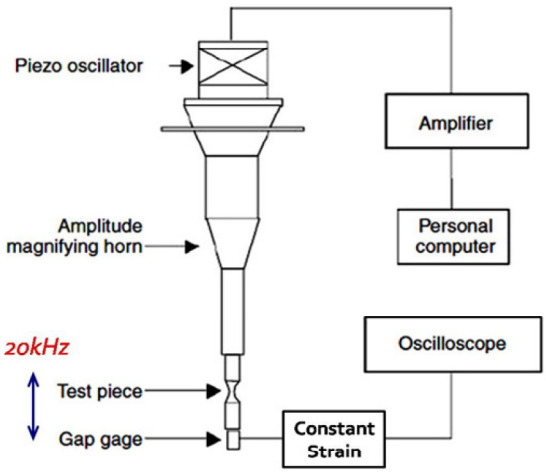



Fig. 2 Ultrasonic fatigue test

#### 2.2.3 경도 측정

준비된 피로시편을 잘라서 정밀연마한 다음 표면으로부터 깊이방향으로 마이크로 비커스경도를 측정하였다. 마이크로 경도는 MICROMET 3을 사용하였으며 HV 200g의 조건으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기계적 특성

인장시험을 통하여 기계적 특성치를 구한 결과는 다음과 같았다. 인장강도는 쇼트피닝의 경우가 약 2216MPa로서 가장 크게 나타났지만 항복강도의 경우는 오히려 베이킹열처리한 시편들의 경우에서 더 높게 나타났다. 특히 246℃로 베이킹열처리한 경우의 항복강도는 약 1632MPa로서 쇼트피닝처리한 경우의 항복강도보다도 약 290MPa정도 더 높게 나타났다. 이는 베이킹열처리에 의해 경도가 유지되는 베이크 경화 효과에 의한 것으로 판단된다(Deutsche Norm, 2016). 이 결과는 뒤에 언급되는 잔류응력의 분포와도 좋은 일치를 보여준다.

### 3.2 잔류응력 및 경도 분포

모재열처리재(STD), 쇼트피닝처리재(SP), 베이킹열처리재(SP-B200, SP-B246, SP-B260)의 5종류의 시편으로부터 잔류응력 분포를 살펴보았다. 잔류응력은 표면으로부터 깊이방향으로 전해연마를 통해 깊이별로 측정하였다.

잔류응력의 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 5종류의 시편 모두에서 표면에 압축잔류응력이 나타났고 깊이 약 400㎛ 근방에서 압축잔류응력이 거의 소실되었다. 이 결과는 Fig. 4에 나타낸 경도분포와 잘 일치하고 있다. 경도분포를 보면 깊이 약 400㎛에 도달하면 경도값이 거의 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있고, 압축잔류응력이 소실됨으로서 경도 역시 일정한 값을 나타내는 것으로 판단된다.

잔류응력의 경우 표면으로부터 깊이 약 100㎛까지는 쇼트피닝처리한 시편의 경우가 압축잔류응력이 가장 크게 나타났다. 그러나 경화깊이가 이보다 더 깊어질수록 오히려 쇼트피닝한 경우의 압축잔류응력보다는 베이킹열처리한 경우의 압축잔류응력이 전반적으로 더 크게 나타나고 있다. 먼저 쇼트피닝을 실시함에 따라 소재의 표면 및 근방에서는 쇼트피닝의 충격에 의해 압축잔류응력이 가장 크게 형성되었다. 쇼트피닝 처리 이후 베이킹열처리를 실시하게 되면 압축잔류응력이 다소 감소될 것으로 예상이 되었으나 오히려 246℃ 및 260℃로 베이킹열처리한 경우는 깊이가 약 100㎛에서부터 약 400㎛까지 깊어질수록 압축잔류응력의 감소가 쇼트피닝 처리한 경우 보다는 크지 않았다. 이는 베이킹열처리에 의해 잔류응력의 감소가 발생하여야 함에도 불구하고 압축잔류응력이 어느 정도 유지되고 있는 것이다. 이는 적용되는 소재에 개재물(inclusion)이 포함되어 있는 경우 쇼트피닝의 충격력이 개재물에 미치게 되면 개재물에 의한 응력집중이 발생하고 이것이 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력을 감소시키는 것으로 생각된다. 그러나 개재물에 의한 응력집중이 베이킹열처리를 통하여 오히려 응력완화의 효과를 가져오게 되어 압축잔류응력의 감소를 억제시켜 쇼트피닝에 의해 발생한 압축잔류응력을 어느 정도 유지하고 있는 것으로 경도 유지의 결과와도 좋은 일치를 보여준다. 결국 이와 같이 개재물을 포함하고 있는 경우에 있어서 베이킹열처리에 의한 압축잔류응력은 쇼트피닝 이후 베이킹열처리에 따른 압축잔류응력의 감소를 오히려 억제시키는 효과를 가져 오고 결국 이것은 피로강도 및 피로수명에도 영향을 미치게 된다. 특히 잔류응력 분포를 Fig. 4에 나타낸 경도분포와도 비교하여 보면 깊이가 약 200㎛ 보다 깊어지는 영역에서는 쇼트피닝 처리한 시편과 베이킹열처리한 시편과의 경도분포에는 큰 차이가 보이질 않고 경도가 유지되고 있는 것으로부터도 잘 설명이 될 수 있을 것이다(Nakagawa et al., 2016). 단 베이킹열처리에 의한 효과가 나타나기 위한 온도범위는 246℃ 및 260℃가 되어야 하고 200℃는 바람직하지 않다고 판단된다.

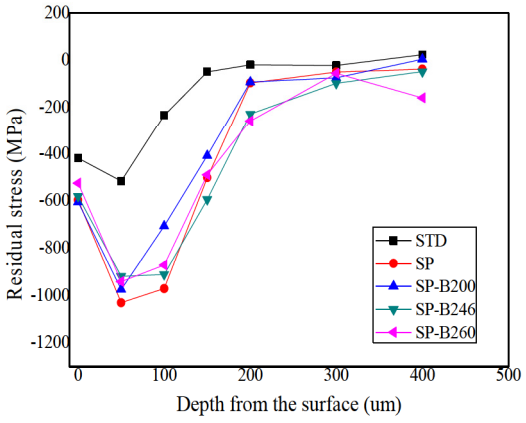



Fig. 3 Residual stress distribution according to depth

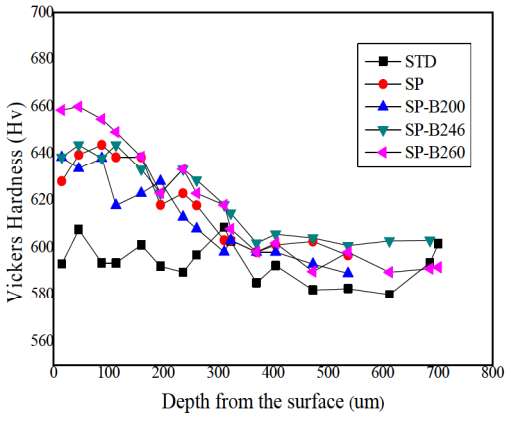



Fig. 4 Micro hardness distribution according to depth

### 3.3 피로강도 및 피로수명

Fig. 5는 5종류의 시편에 대한 S-N curve를 나타낸다. 고주기 피로(High cycle fatigue) 영역에서 5종류의 시편들에 대한 피로강도 및 피로수명을 비교해 보면 전반적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 반면 피로응력대가 낮은 초고주기 피로(Very high cycle fatigue)영역에서는 베이킹열처리한 시편들의 피로한도가 향상되고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 이유로 생각되며, 잔류응력의 결과와도 좋은 일치를 보여준다. 결국 쇼트피닝 후 실시하는 베이킹열처리는 개재물이 포함되어 있는 경우에는 오히려 베이킹열처리에 의해 압축잔류응력의 감소가 다소 억제되는 효과를 가져와 피로강도 및 피로수명의 개선에 효과를 가져 온 것으로 판단된다. 마찬가지로 S-N curve를 통한 피로한도를 비교하여 보았을 때 개재물이 포함되어 있는 경우에 베이킹열처리에 의한 효과는 246℃가 가장 바람직한 것으로 판단되며, 이 결과로부터 항공기 랜딩기어를 수리하는 공정(MRO)에서는 베이킹열처리를 246℃로 제한하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 항공기 랜딩기어용 소재인 4340M 강을 이용하여 쇼트피닝 처리를 하고 난 후 베이킹열처리를 통한 잔류응력의 분포를 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

개재물을 포함하고 있는 소재에 쇼트피닝을 실시하였을 때의 압축잔류응력보다 쇼트피닝 후 베이킹열처리에 의한 압축잔류응력이 더 크게 나타났다. 이는 경도 분포와도 좋은 일치를 보였다. 또한 246℃로 베이킹열처리한 경우에 있어서 피로한도가 저하하지 않고 오히려 개선되고 있는 것으로부터 베이킹열처리에 의한 압축잔류응력의 효과가 나타나고 있는 것으로 판단되었다. 이것으로부터 항공기 랜딩기어용 소재에 대한 수리공정에 있어서는 베이킹열처리 온도를 246℃로 제한하는 것이 가장 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

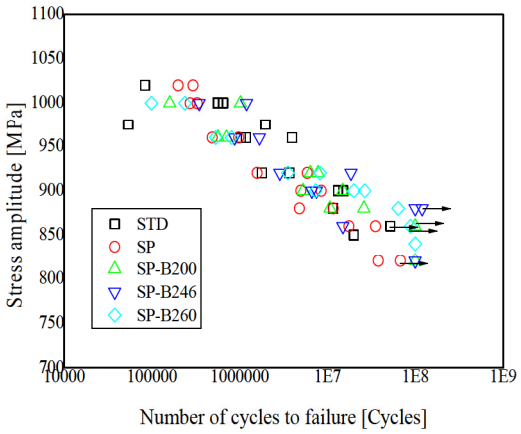



Fig. 6 S-N curve

## 후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(20ACTP-B147766-03).

## 참 고 문 헌

Alsumait, A., Li, Y. Weaser, M., Niji, K. Battel, G., Toal, R., Alvarrez, C. and Es-Said, O.S. (2019). “ A Comparison of the Fatigue Life of Shot-Peened 4340M Steel with 100, 200 and 300% Coverage”, Journal of Materials Engineering and ferformance, Vol. 28, pp 1780-1789.

Ananta Nagu, G., Amarnath and namboodhiri, T.K.G. (2003). “Effect of heat Treatments on the Hydrogen Embrittlement Susceptibility of API X-65 Grade Line-pipe Steel’, Bull. mater. Sci., Vol. 26, No. 4, pp 435-439.

Deutsche Norm, Steel-Determination of Yield Strength Increase by the Effect of Heat Treatment (Bake-Hardening-Index); English Version (DIN EN 10325:2006); Deutsches Institut für Normung: Berlin, Germany, 2016.

Furuya, Y. (2008). “ Specimcn size cffccts on gigacyclc fatigue properties of high-strength steel under ultrasonic fatigue testing”, Scripta Mater. Vol. 58, pp 1014-1017.

Mano, H., Kondo, S. and Matsumuro, A. (2006). “ Microstructured Surface layer Induced by Shot Peening and Its Effect on Fatigue Strength”, J. japan Inst. Metals, Vol. 70, No. 5, pp 415-419.

Nakagawa, A., Sakai, T., Harlow, G., Oguma, N., Nakamura, Y., Ueno, A., Kikuchi, A. and Sakaida, A. (2016). “A Probabilistic Model on Crack Initiation Modes of Metallic Materials in Very High Cycle Fatigue”, Procedia Structural Integrity 2, pp 1199-1206.

Prevey, P.S.. and Carnrnett, J.T. (2002). “ The effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress, Cold Work and fatigue in a Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel”, Proceedings International Conference on Shot Peening Garmisch-Partenkirchen, Germany, pp 16-20.

Shin, S.H., Ryu, J.H., Yun, Y.G. and Park, J.S. (2000). “Effect of Shot-Peening on the Fatigue Properties of 300M Steel”, Journal of Korean Metal and Materials, Vol. 38, No. 11, pp 1472-1477.

SAE International, Aerospace Material Specification, AMS 2430U (2010). Society of Automotive Engineers, United States.

Wang, S., Li, Y., Yao, M. and Wang, R. (1998). “ Compressive Residual Stress Introduced by Shot Peening”, J. Mater. Process. Technol., Vol. 73, pp 64-73.

# 선박용 연료전지의 내구성 향상을 위한 고담지 백금 촉매의 탄소 나노 코팅 연구

안치영* · 조성필* · 강희진* · 김영식*
*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

# A Study on Carbon Nano Coating of Highly-loaded Platinum Catalyst for Improving the Durability of Fuel Cells for Ship

Chi-Yeong Ahn*, Seongpil Cho*, and Hee Jin Kang*, Young-Shik Kim*

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea*

**KEY WORDS:** Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell 고분자 전해질 연료전지, Durability 내구성, Carbon Nano Shell 탄소 나노 껍질 , Surface Coating Technology 표면 코팅 기술, Highly-loaded Platinum Nano-catalvst 고담지 백금 나노 촉매

**ABSTRACT:** *In this paper, as one of the methods of prolonging the life of fuel cell electrodes, the nano-thick carbon shell was coated on the surface of the Platinum (Pt)-based catalyst. For carbon shell coating, polymeric material was stirred well with catalysts at room temperature and heat treatment was carried out in Ar atmosphere. Highly loaded Pt/C catalysts are typically applied to fuel cell applications such as ships or cars, which result in the agglomeration of adjacent metal particles during heat treatment for carbon coating. To prevent this, preheated carbon support was applied to the catalyst. After carbon coating, morphology was checked, and the mitigation of agglomeration was observed in highly-loaded Pt-based catalysts.*

## 1. 서 론

백금은 산소환원반응과 같은 전기화학반응들을 위한 연료전지 촉매로 널리 사용되고 있으며, 고유의 높은 반응 활성도 때문에 연료전지 연구에 적용되어 오고 있다 (Nørskov, 2004). 또한 나노스케일로의 백금 입자의 사이즈 감소와 높은 표면적을 가진 담지체로의 분산은 백금 촉매의 활용도를 크게 증대 시켰다 (Yu, 2007). 나아가, 촉매 활성도를 증가시키고, 백금과 전이금속의 합금으로 백금의 사용량을 감소시키는 연구들도 활발히 진행되고 있다 (Stamenkovic, 2007). 또한, 연료전지 구동 환경에서 낮은 전기적 저항 및 높은 내구성을 갖는 연료전지 촉매 담지체가 요구된다. 현재, Vulcan-XC72 또는 Ketjen Balck과 같은 표면적이 큰 상용 탄소 물질이 주로 사용되고 있다 (Antolini, 2009).

고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cells; PEMFCs)의 전기화학적 가혹 조건 때문에, 탄소 담지체에 분산된 금속 입자의 열화가 금속의 이동/분해와 탄소 부식을 통해 발생할 수 있으므로, 사용된 물질의 내구성에 관한 연구는 특히 중요하다. 따라서 Pt 나노구조물 제어, 합금, 탄소 담지체의 구조적/화학적 수정 등 다양한 전략을 바탕으로 이 분야에서 상당한 연구가 진행되어 왔다 (Wang, 2019).

최근 들어 백금 또는 백금 합금 촉매에 보호층을 도입하여 연료전지의 내구성을 강화하는 연구들이 진행되어 왔다 (6). 나아가 탄소 보호층에 질소를 도핑하여 산소 환원 반응 향상에 도움이 된 결과도 보고되었다 (7). 하지만, 촉매 표면에 탄소층을 도입했던 대부분의 연구들에서는 20 wt% 금속 나노입자 촉매를 적용하였다. 이 경우들에서는 금속 입자들의 전체 양이 적기 때문에 담지체에서의 금속 나노입자간 거리가 상대적으로 멀다. 그러므로 탄소 보호층을 도입하기 위한 고온 열처리 동안에 금속의 뭉침 현상이 거의 발생하지 않는다. 그러나 자동차 또는 선박과 같은 실제 연료전지 어플리케이션들에서는 스택의 부피 감소를 위해 고담지 촉매가 주로 사용된다. 이는, 금속 나노입자들 사이의 거리가 저담지 촉매에 비해 짧은 것을 의미하며, 가까운 거리의 금속 나노입자들이 고온 열처리 과정에서 빠르게 뭉칠 수 있음을 시사한다. 나아가, 탄소 보호층이 형성되지 못하는 낮은 온도에서도 인접한 금속 나노입자들이 뭉칠 수도 있다. 또한 기존 탄소 층이 도입된 촉매의 연구들은 반쪽 전지 (half-cell) 수준에서 진행이 되었거나, 단전지 (single-cell) 수준에서 연구되었더라도 산소 분위기에서 활성을 측정하거나 질소 분위기에서 내구성만을 확인하였다.

본 논문에서는 내구 실험 및 열처리 과정 중의 인접 금속 나노입자들의 뭉침 현상을 방지하기 위해, 탄소 기반의 보호층을 다른 종류의 탄소 담지체가 적용된 고담지 백금 및 백금 합금 촉매에 적용한 연구를 수행하였다. 탄소 보호층 도입을 위해 상온의 수용액 상태에서 질소가 도핑된 코팅이 가능한 도파민 기반의 전구체를 사용하였다. 준비된 촉매들은 막-전극 접합체의 cathode에 적용하였고, 실제 운전 조건과 유사한 공기 분위기에서 단전지의 전기화학 평가들을 진행하였다. 나아가 고담지 촉매의 표면에서 질소 도핑된 탄소 보호층의 존재에 의해 촉매의 내구성이 향상된 결과를 전기화학적, 물리적 실험 결과를 바탕

으로 확인하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 재료 및 실험

### 2.1 백금계 촉매들의 탄소 보호층 도입

상용 40 wt% Pt/C (HiSPEC® 4000, Alfa Aesar) 및 50 wt% $Pt_2Ni$/HC (RTCPN50, RTX)를 탄소 보호층 도입 촉매로 사용하였다. 합금 촉매의 경우 열처리된 탄소 (HC; heat-treated carbon)이며, 높은 결정성을 갖는다. 탄소 보호층 도입을 위한 전단계로 도파민층 코팅을 진행하였다. pH 8.5 완충용액을 준비한 후 dopamine hydrochloride (600mg, Sigma-Aldrich) 분산하였다. 그 후, 각 촉매를 준비된 도파민 용액이 들어 있는 비커에 첨가 후, 60분간 교반했다. 교반 후, 증류수와 에탄올에 세척하여 건조하였다. 건조 후, 600℃에서 2시간 동안 열처리를 진행하였고, 탄소 보호층이 도입된 촉매를 얻었다.

### 2.2 막-전극 접합체 (MEA) 제조

탄소층 도입 전/후의 촉매를 증류수, 이소프로필 알코올과 및 여러 10~40%의 이오노머 로딩양을 가지도록 분산액 (5 wt% Nafion dispersion, Sigma-Aldrich)을 혼합하여 촉매 잉크를 제조하였다. 스프레이 직접 분사 방법을 사용하여 촉매 잉크를 cathode 방면의 막 (Nafion 212, Dupont, USA)에 도포하였으며, 이 때, 전극 면적은 5 $cm^2$이다. anode 촉매 잉크는 모두 상용 40 wt% 및 30 wt% 이오노머의 로딩양을 가지도록 제조되었으며, cathode 와 동일한 방법으로 제작되었다. 촉매 로딩양은 두 전극 모두 0.2 $mg_{metal}$ $cm^{-2}$으로 동일하다.

### 2.3 연료전지 단전지 평가

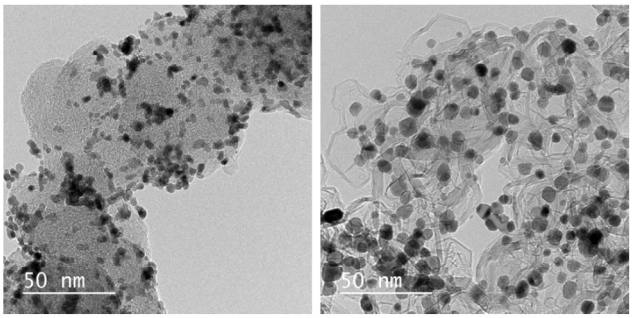
준비된 막-전극 접합체 (MEA; membrane electrode assembly)들을 단전지에 적용하였다. 분리판은 1 mm 의 깊이와 넓이가 적용된 단채널의 사형 유로를 가지고 있다. 기체 확산층 (JNT30-A3, JNTG, Korea)과 테플론 타입의 가스킷을 MEA의 양면에 위치시킨 형태로 단전지를 준비하였다. 70 ℃서 anode와 cathode에 각각 수소와 산소를 공급하여 MEA를 활성화하였고, 전기화학적 성능이 일정하게 관찰되는 시점에 활성화를 종료하였다. Cathode 공급기체를 공기(air)로 변경하여 전기화학적 성능평가를 수행하였다. 내구성 평가는 200 시간 동안의 로드 사이클링 (load cycling) 방법으로 진행하였다. 내구성 전/후의 전극의 전기화학적 활성 면적은 수소/질소 분위기에서 순환 전압법을 사용하여 측정 및 계산하였다.

### 2.4 투과전자현미경 측정

앞 서 기술된 두 상용 촉매와, 탄소 코팅층이 도입된 두 촉매에 대해서 내구성 평가 전/후의 투과전자현미경 (TEM; transmission electron microscope) (FEI TECNAI F20) 분석을 실시하였다. 모든 촉매들은 측정 진, 에탄올에 분산되었고 레이시 (lacey) 구리 그리드에 마이크로피펫을 사용하여 준비되었다. 나아가 모든 샘플은 200 kV조건에서 분석되었다.

## 3. 탄소 나노 코팅 전/후의 형태학적 분석

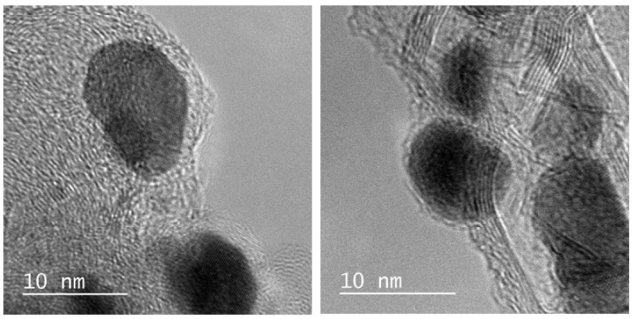
Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 상용 40 wt.% Pt/C 촉매는 비정형의 탄소 담지체에 분산되어 있었으며, 평균 입자 크기는 3.40 nm 였다. 이와는 대조적으로, 상용 50 wt.% $Pt_2Ni$/HC 촉매의 금속 평균 입자 크기는 8.21 nm 였다. (Fig. 1(b)) 또한 담지체의 경우 40 wt% Pt/C 촉매와는 다르게 결정성이 있는 형태가 관찰되었다. 이는 열처리에 의해 비정질의 탄소가 결정성 형태로 특성이 변한 것으로 판단된다.




(a) 40 wt% Pt/C (b) 50 wt% $Pt_2Ni$/HC

**Fig. 1** TEM images of highly-loaded (a) 40 wt.% Pt/C and (b) 50 wt% $Pt_2Ni$/HC catalysts before carbon nanoccoating (X130k)

Polydopamine 표면 코팅 후 600℃ 열처리를 통해 나노 단위의 두께를 가진 탄소 보호층이 촉매 표면에 형성되었으며, 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 20 wt.%의 금속 촉매가 담지된 결과에서는 약 0.5 nm의 얇은 탄소 보호 층이 금속 촉매의 표면에 형성되었지만 (Chung, 2015), 40 wt% Pt/C가 적용된 본 결과에서는 그보다 세배이상 두꺼운 1.5-2.3 nm 의 탄소 보호층이 형성된 것을 확인 할 수 있었다. (Fig. 2a)




(a) 40 wt% Pt/C (b) 50 wt% $Pt_2Ni$/HC

**Fig. 2** TEM images of highly-loaded (a) 40 wt.% Pt/C and (b) 50 wt% $Pt_2Ni$/HC catalysts after carbon nanoccoating (X410k)

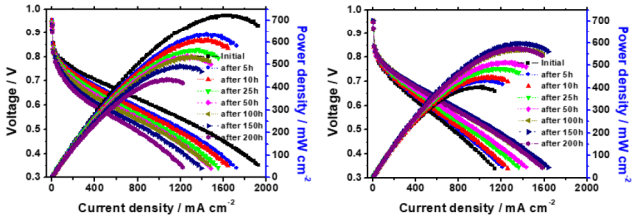
본 연구에서는 촉매에 40 wt% Pt 나노입자가 포함되어 있으므로, 기존 문헌에서 보고된 20% wt% Pt/C 촉매보다 22% 작은 체적을 가진다.. 따라서 동일한 양의 코팅 전구체를 더 작은 부피의 촉매에 적용했으므로 더 두꺼운 탄소 보호층을 형성한 것으로 판단된다. 또한 Pt 입자 크기는 5.52 ± 2.54 nm의 균일하지 않은 분포를 보였는데, 이는 인접한 Pt 나노입자 사

이의 거리가 20wt% Pt/C의 경우보다 짧기 때문에 열처리 과정에서 Pt 입자들의 뭉침현상 때문일 것으로 판단된다.

Fig. 2(b)는 $Pt_2Ni$/HC 촉매에 도입된 탄소 보호층을 보여준다. 이 경우 코팅 중 열처리 과정을 거쳤음에도 불구하고 금속 합금의 성장이 거의 관찰되지 않았다(8.81 ± 2.35 nm). 이는 열처리된 탄소의 π 사이트로부터 발생된 강화된 염기성(basicity)이 Pt와 탄소 담지체간의 상호작용을 강화했기 때문이다 (Coloma, 1995). 또한 높은 로딩양과 동일한 열처리 조건에도 불구하고 40wt% Pt/C촉매 경우에 비해 이 촉매에 대해 더 얇은 쉘(0.47 - 0.95 nm)이 형성되었다. 문헌(Sheng, 2008)에 따르면 열처리된 탄소 물질은 증류수에 분산되지 않았으며, 이는 탄소의 결정성이 증가하면서 소수성이 높아지기 때문일 가능성이 높다. 따라서 polydopamine 층이 수용액에서 중합되므로, 50wt.% $Pt_2Ni$/HC의 소수성 특성으로 인해 열처리 된 탄소 표면에 더 얇은 탄소 보호층 코팅이 되는 것으로 판단된다.

## 4. 전기화학적 내구성 평가

상용 촉매와 탄소 보호층이 도입된 촉매를 MEA의 캐소드에 적용하여 단전지 실험 조건에서 전기화학적 성능 평가 및 내구성 실험을 진행하였다. 40wt.% Pt/C, 탄소 보호층이 도입된 40 wt.% Pt/C, 50 wt.% $Pt_2Ni$/C 및 탄소 보호층이 도입된 $Pt_2Ni$/C가 적용된 MEA를 각각 MP (MEA with Pt/C), MPC, MPN, MPNC로 표기하였다. 내구성 실험은 OCV에서 0.35V 까지 전류를 지속적으로 증가시키는 로드사이클링 기법을 사용하였다. Fig. 3은 탄소 나노층 도입 전/후의 40 wt.% Pt/C 촉매를 200 시간동안 내구성 실험한 결과를 나타낸다.

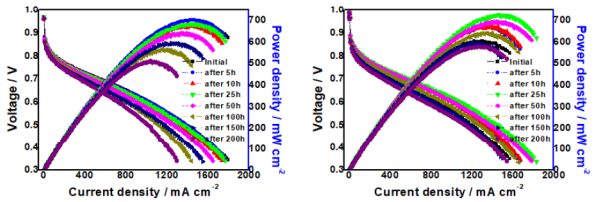



(a) MP (b)MPC

**Fig. 3** Electrochemical performance of (a) MP and (b) MPC before/after durability

Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이, MP의 전기화학적 성능은 내구성 실험 초기부터 지속적인 감소 경향을 나타냈으며, 200시간의 내구성 실험 후, 초기 성능 대비 60% 감소하였다. (0.6 V 전류밀도 기준) 반면, MPC의 경우 (fig. 3(b)), MP의 경우보다 초기 성능은 MP대비 50% 낮았다. 이는 탄소 보호층이 앞서 언급한 바와 같이 1.5-2.3 nm 두께로 촉매의 표면에 두껍게 형성되어, 캐소드 촉매 표면에 산소의 투과 및 확산을 일부 방해하기 때문이다. 그러나 150시간 까지 점진적인 성능 증가가 관찰되었으며, 내구성 평가 이후에도 높은 성능을 유지하는 것을 확인하였다. 이는 평가 초기에 MEA가 활성화 되었더라도, Pt/C 촉매의 표면을 덮고 있는 보호층이 가혹 조건의 내구성 실험에서 탈리 또는 제거되면서 촉매의 표면의 점진적인 노출이 일어나 점차 성능이 증가한 것으로 판단된다.

$Pt_2Ni$/HC 촉매가 적용된 MPN과 MPNC의 성능 및 내구성 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 많은 보고들에서 Pt기반의 이원합금 나노촉매가 적용된 결과에서 촉매 활성과 내구성이 증가하는 것을 밝혔다. 본 실험에서도 MPN의 경우(fig. 4(a)), MP에 비해 초기 성능이 0.6 V에서 소폭 높은 것으로 확인 되었다. 나아가, 200시간의 내구성 평가 이후에도 25.7%의 성능 감소만이 나타났다. 이는 비단 금속 나노합금 촉매에서 기인했을 뿐만 아니라 열처리된 탄소가 담지체로 사용되었기 때문에 높아진 결정성이 연료전지의 내구성 향상에 영향을 미친것으로 판단된다.(Zhao, 2013)




(a) MPN (b)MPNC

**Fig. 4** Electrochemical performance of (a) MPN and (b) MPNC before/after durability

MPC의 전기화학적 성능의 경향과 유사하게 MPNC도 200시간의 내구성 실험이 진행되는 동안 초기 25시간동안의 성능 증가가 관찰되었다 (fig. 4(b)). 그러나 MPC와는 달리 MPNC의 초기 성능은 MPN 초기성능의 11.2% 감소만을 나타냈다. 이는 0.47 - 0.95 nm 두께의 얇은 탄소 보호층으로 인해 캐소드의 산소가 MPC의 촉매보다 MPNC의 캐소드 촉매 표면에 잘 투과 및 확산하기 때문으로 판단된다.

따라서 탄소 보호층이 도입된 촉매 중에서도 합금 및 열처리된 담지체가 적용된 촉매에서 초기성능이 잘 발현되고 높은 내구성이 유지되는 것을 확인 할 수 있었으며, 높은 내구성을 요구하는 선박에 본 촉매가 적용되는 경우 이점이 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 고분자 전해질 연료 전지의 내구성을 향상시키기 위해 두 가지 유형의 탄소 담지체를 가지는 높은 로딩양의 백금 및 백금-니켈 합금 촉매의 표면에 polydopamine을 코팅하여 탄소 보호층을 도입 한 것을 보고하였으며 그 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 탄소 담지체의 표면 특성에 의해 탄소 보호층의 두께가 결정되며, 열처리된 탄소 담지체의 경우 높은 소수성(hydrophobicity)에 의해 충분히 얇은 두께의 탄소 보호층을 도입할 수 있었다.

(2) 촉매 표면에 탄소 보호층의 도입은 MEA 조건에서 전기화학적 초기 성능을 소폭 감소시키지만 내구성이 대폭 향상되는 결과를 낳았다.

(3) 탄소 보호층, Pt 합금, 열처리된 담지체의 적용은 전반적인 MEA 의 전기화학적 성능 향상을 가져오며, 내구성 향상에 기여하였다.

(4) 따라서 연료전지 촉매 설계시 탄소 담지체의 열처리 조건 및 금속 조성과 같은 매개 변수를 제어함으로써 활성 촉매의 내구성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업인 “전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개발” 과제(20200469-01, PMS4420)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Nørskov, J.K., Rossmeisl,J., Logadottir,A., Lindqvist,L., Kitchin, J.R., Bligaard, T. and Jónsson, H. (2004). “Origin of the overpotential for oxygen reduction at a fuel-cell cathode”, J. Phys. Chem. B., Vol 108, No 46, pp 17886-17892.

Yu, X. and Ye, S. (2007). “Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC: Part II: degradation mechanism and durability enhancement of carbon supported platinum catalyst”, J. Power Sources, Vol 172, No 11, pp 145-154.

Stamenkovic, V.R., Mun, B.S., Arenz, M., Mayrhofer, K.J.J., Lucas, C.A., Wang, G., Philip, N.R. and Markovic, N.M. (2007). “Trends in electrocatalysis on extended and nanoscale Pt-bimetallic alloy surfaces”, Nat. Mater., Vol 6, pp 241-247

Antolini, E. (2009) “Carbon supports for low-temperature fuel cell catalysts”, Appl. Catal. B. Environ., Vol 88, No 1-2, pp 1-24

Chung, D.Y., Jun, S.W., Yoon, G., Kwon, G.K., Shin, D.Y., Seo, P., Yoo, J.M., Shin, I.I., Chung, Y.-I.I., Kim, I.I., Mun, B.S., Lee, K.-S., Lee, N.-S., Yoo, S.J., Lim, D.-H., Kang, K., Sung, Y.-E., Hyeon, T. (2015) "Highly Durable and Active PtFe Nanocatalyst for Electrochemical Oxygen Reduction Reaction", J. Am. Chem. Soc., Vol 137, No 49, pp 15478-15485

Coloma F., Sepulvedaescribano A., Rodriguezreinoso F. (1995) “Heat-Treated Carbon-Blacks as Supports for Platinum Catalysts”, J. Catal. Vol 154, pp 299-305

Sheng Z.M., Wang J.N., (2008) “Thin-Walled Carbon Nanocages: Direct Growth, Characterization, and Applications” Adv Mater Vol 20, pp 1071-1075

Zhao X, Hayashi A., Noda Z., Kimijima K., Yagi I., Sasaki K. (2013) “Evaluation of change in nanostructure through the heat treatment of carbon materials and their durability for the start/stop operation of polymer electrolyte fuel cells” Electrochim. Acta Vol 97, pp. 33-41

# 근사최적화 기법을 이용한 플로트오버 설치 작업용 수동형 갑판 지지 프레임의 근사최적설계

박우창 · 송창용(목포대학교) · 이강수 · 성홍근(선박해양플랜트연구소)

최근 해양플랜트의 대형화 추세에 따라 수만톤 이상의 상부구조물을 안벽으로부터 목표 설치해역까지 안전하게 이동 및 설치할 수 있는 플로트오버(Float-over) 공법의 개발과 안전 설치를 위한 부가 구조물의 설계 기술이 개발되고 있다. 플로트오버 설치 중 상부구조물을 안전하게 지지하기 위한 부가 구조물인 갑판지지 프레임은 설치 및 이송 하중뿐만 아니라 다양한 해양환경 하중을 고려하여 설계 되어야 한다. 갑판지지 프레임은 구조설계 상의 안전성 확보와 함께 갑판지지 프레임이 탑재되는 상부구조물 설치 선박의 운동성능과 부력 확보를 위해 중량저감 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 20,000톤 규모 상부구조물용 플로트오버 공법 개발과 관련하여 수동형 갑판지지 프레임의 중량감소를 위한 근사최적화를 수행하였다. 수동형 갑판지지 프레임의 주요 부재의 치수를 3수준 설계인자로 고려하고 구조강도 평가 응력 및 중량을 응답치로 설정하여 직교배열설계 기반의 실험계획법을 수행하였다. 직교배열 실험결과를 이용하여 민감도 해석을 수행하고, 주요부재 별 응답치에 대한 정량적 영향도를 분석하였으며, 실험계획법 상의 설계행렬로부터 최소중량 설계안을 검토하였다. 또한 실험계획법 데이터를 이용한 메타모델을 생성하고, 메타모델을 이용한 중량감소 근사 최적화해석을 수행하였다. 근사 최적화를 통해 산출된 최적설계안은 실험계획법의 최송중량 설계안과 비교하여 최적해의 타당성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 “해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발(PMS 4260)” 과제의 연구결과 중 일부이며, 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학연 Collabo R&D사업(No.S2910737)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

# LNG 추진 선박용 극저온 파이프라인의 구조해석과 설계 민감도 평가

이동준 · 송창용 · 박신우 · 오민주(목포대학교)

전세계적인 기후변화에 대처하기 위해 국제적으로 해양환경규제가 강화되고 있고, 국제해사기구는 선박의 배출가스 통제구역을 확대하고 있다. 이에 따라 선박에서 배출되는 오염가스에 대한 규정을 충족하기 위해 선박연료는 기존 중연료유에서 황과 질소 함유량이 적은 LNG로 대체가 불가피한 상황이다. 최근 LNG 추진선박의 수요가 이와 같은 해양환경규제 강화에 따라 급증하고 있으며, LNG 추진선박의 기술력은 조선산업에서 가장 중요 기술분야 중 하나로 대두되었다. 본 연구에서는 LNG 추진선박의 연료공급 시스템에 적용되는 극저온 파이프라인의 구조해석과 실험계획법을 이용한 설계민감도 평가를 수행용하였다. 구조해석 및 민감도 평가는 LNG 추진선박의 저장탱크와 주기관을 연결하는 극저온 파이프라인을 대상으로 하였다. 극저온 파이프라인 구조해석은 파이프 설계 및 해석 전용 프로그램을 사용하였으며, 극저온 파이프 형상과 더불어 서포트 구조와 형식에 대한 설계 안전성을 검토하였다. 설계 민감도 평가를 위한 실험계획법에서는 파이프라인의 형상치수와 서포트 위치 및 개수를 설계인자로 고려하였고, 파이프 설계하중조건 별 응력과 중량을 응답치로 선정하였다. 실험계획행렬은 직교배열법을 사용하였고, 설계인자의 변동에 따른 응답치의 특성을 검토하였다. 본 연구를 통해 LNG 추진선박의 극저온 파이프라인 배치 설계에서 민감도 특성을 평가하였고, 응력제한조건을 만족하면서 응력과 중량을 최소화할 수 있는 설계조건을 탐색하였다.

후 기

본 연구는 2020년도 정부(산학통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0001968, 2020년 산업혁신인재성장지원사업)의 일부이며, 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학연 Collabo R&D사업(No.S2910737)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

# 기관실 보조탱크의 구조해석과 설계 민감도 평가

김훈관 · 박성근 · 문경환 · 송창용 (목포대학교)

선박의 기관실에는 각종 기관장비의 윤활이나 오염물질의 보관과 처리 등을 목적으로 다양한 형태의 보조탱크가 적용된다. 이중 Sewage collecting 탱크는 기관실 내에 오염물질을 관리하기 위해 설치되는 보조탱크로서 설계압력에 맞추어 구조적으로 강건하게 설계되어야 한다. 그러나 이러한 기관실 보조 탱크의 구조설계에 대한 선급의 규정이나 가이드가 미비하기 때문에 최소 중량 설계를 실현하기 위해서는 제조업체나 조선소 엔지니어의 경험에 의존할 수밖에 없다. 본 연구에서는 최대형 원유운반선의 기관실에 설치되는 Sewage collecting 탱크의 최소 중량 설계를 구현하기 위해 구조해석과 실험계획법을 이용한 설계 민감도 평가를 수행하였다. Sewage collecting 탱크의 구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램을 사용하여 수행하였으며, 탱크의 보강재와 더불어 두께치수에 대한 설계 안전성을 검토하였다. 설계 민감도 평가를 위한 실험계획법에서는 Sewage collecting 탱크의 보강재와 주부재의 둑께치수를 설계인자로 고려하였고, 설계하중조건 별 응력과 중량을 응답치로 선정하였다. 실험계획행렬은 직교배열법을 사용하였고, 설계인자의 변동에 따른 응답치의 특성을 검토하였다. 본 연구를 통해 Sewage collecting 탱크 구조 설계에 대한 민감도 특성을 평가하였고, 응력제한조건을 만족하면서 응력과 중량을 최소화할 수 있는 설계조건을 탐색하였다.

후 기

본 연구는 2020학년도 MNU혁신사업 연구과제 지원에 의하여 연구되었으며, 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학연 Collabo R&D사업(No.S2910737)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

# IMO TYPE-C LNG CARRIER 열분포 특성 연구

차인환* · 황안동** · 정준모**
*현대미포조선(주) 구조설계부
**인하대학교 선박 및 해양구조 엔지니어링 연구실

# A Study on thermal distribution of IMO TYPE-C LNG Carrier

In-Hwan Cha*, Anh-Dung Hoang** and Joon-Mo Choung**

*Hyundai Mipo Dockyard Co. Ltd., Ulsan, Korea
**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, InhaUniversity

**KEY WORDS: IMO** TPYE-C TANK, LNG 액화천연가스, Heat transfer, Thermal distribution, Boil-off rate, Cryogenic tank, Saddle

**ABSTRACT:** Recently, since the demand of LNG fuelled ship increasing, MR size of LNG carrier has been received many attention such as LNG bunkering vessel. Those kind of ship intend to choose IMO TYPE-C independent tank because of it's structural stability. Unlike Membrane Type LNG Cargo tank, special concerned on saddle support structural should be dealt when study about heat transfer of TPYE-C LNG Tank because of it's discontinuity. So, this study developed the in-house code for the calculation of compartment and material temperature by analytical method and prove itself by 2D CFD Code. Also, CFD Analysis of 3D Modeling has been progressed to find the effect of the Tank support which is consist of Wood and saddle structure.

## 1. 서 론

최근 IMO에서 발효된 환경규제로 인해 해운 및 조선산업에서는 LNG 연료 추진 선박이 각광 받고 있는 추세이다. LNG Fuel Tank는 보통 TYPE-C Tank형태로 On-deck상에 설치되거나 TYPE-B Tank로 선체 내부 Compartment에 설치되는 것이 일반적이다. 이렇듯 LNG 연료 추진 선박의 수요와 LNG 화물 운반선의 수요가 증가하면서 자연스럽게 중소형 LNG 운반선의 수요도 증가하였다. 작게는 7.5K에서 30K까지에 이르는 중소형 LNG 운반선은 현재까지 IMO에서 규정하는 TYPE-C 독립형 Tank를 적용하는 사례가 많다. TYPE-C Tank는 원통형의 구조로서 선체 내에서 공간 효율이 적다는 단점이 있지만 구조적 안정성을 보증하여 Secondary barrier가 필요 없다는 장점이 있어 그 실효성이 입증되었다.

그동안 많은 연구자들이 수행한 LNG 운반선의 열분포 및 온도 계산은 주로 Membrane type과 관련된 것이다. Membrane type LNG Tank는 보온재와 선체부재가 일체형으로 구성되어 있어 Hold내에 Tank를 제외한 Void Space가 있는 TYPE-C Tank와는 다소 차이가 있다. 특히, 원통형 Tank를 지지하고 있는 Saddle 구조는 부재의 연속성을 차단하고 있어 2D Section을 활용한 열분포 계산에 한계를 마주한다.

기존에 현업에서 활용하고 있는 Analytical Method는 종방향으로 열유입이 균일하게 일어난다고 가정하여 Section 단면을 통해 2D로 계산한다. 여기서 Wood와 steel로 구성된 Support구조가 각 선내 구획 온도 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 30K LNG Carrier에 Bilobe TYPE-C Tank를 적용하였고, IGC(International code for the construction and equipment of ships carrying liquified gases in bulk; IMO, 2017)에 따른 외부 온도 조건에서 다음과 같은 접근 방안으로 열해석 연구를 진행하였다.

(1) 2-D Analytical Method (In-house code)
(2) 2-D CFD Analysis (ANSYS Fluent 2D)
(3) 3-D CFD Analysis (ANSYS Fluent 3D)

접근 방안 (1)에서는 Fortran으로 개발한 In-house code를 통해 영평형 방정식을 기반으로 각 Compartment와 부재의 온도, 열유량 및 대류계수를 계산한다. 접근안 (2)는 ANSYS Fluent를 사용하여 (1)과 마찬가지로 2D Section에서 온도 분포를 구하고 그 결과를 (1)의 것과 비교 검증해 본다. 접근안 (3)에서는 (2)에서 Modeling한 2D Section을 3D로 extrude하고 saddle support를 추가 Modeling하여 각 선내 구획에 대한 saddle 구조의 열 영향을 평가한다.

본 3가지 방안을 통해 TYPE-C Tank LNG Carrier의 열분포 특성을 연구, 선체 부재에 알맞은 취성 강재를 적용할 수 있도록 하고 BOG 발생량을 예측 할 수 있도록 하였다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 TYPE-C Bilobe Tank 및 선체 형상

현대미포조선에서 건조한 30K LNG Carrier는 총 3개의 Tank로 구성되며 No.2,3 Tank는 Bilobe, No.1 Tank는 Conical Type이다. 선체 전장 길이는 180m 이고, 본 열분포 연구모델인 Bilobe Tank의 길이는 36m이다. 그 외 선체 및 Tank의 형상 및 dimension은 Fig.1과 같이 제시 되었다. 그 외 Saddle부 Insulation 및 Wood 형상은 Fig.2와 같이 형성되어 있으며, 이는 Fixed Cradle(선미부 위치함)를 나타낸다.

본 연구에서는 각 선체부재의 두께를 15mm로 지정하였고, Saddle 구조 및 해당부에 위치한 Double bottom floor와 web frame의 두께는 25mm로 반영하였다.

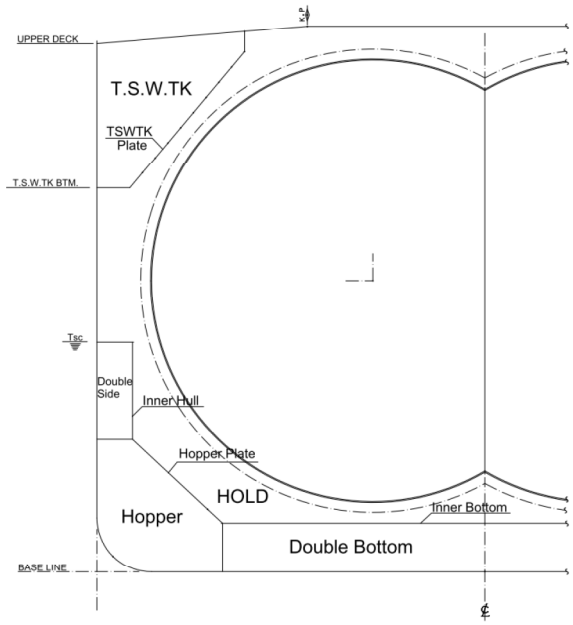



**Fig. 1** Dimension of Bilobe Tank & hull structure

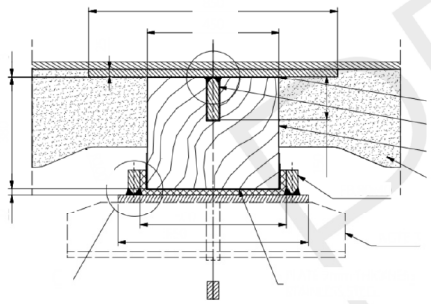


**Fig.** 2 Detail of Saddle support(include insulation and wood)

**Fig.** 2에서 보인바와 같이 Saddle부에 Tank와 Wood 및 Cradle face plate 사이는 각 mastic과 resin으로 채워져 있으나 전체 치수에 비해 매우 작으므로 본 연구에서는 고려하지 않기로 한다. Insulation 두께는 360mm로 Saddle부에서는 작업성을 위해 100 mm만큼 일부 감하였다.

### 2.2 물성값 설정

Tank와 보온재 및 선체 부재를 이루고 있는 Solid(Steel, Insulation, Plywood)는 Table. 1과 같이 제시하였다.

**Table. 1** Properties of solid member (Steel, Insulation, Wood)

| | Density $[kg/m^3]$ | Specific heat $[J/kg \cdot ℃]$ | Thermal conductivity $[W/m \cdot ℃]$ |
|---|---|---|---|
| Steel | 7850 | 464.73 | 60 |
| Plywood | 710 | 1088.57 | 0.17 |
| Insulation | 120 | 920.68 | 0.025 |

Table. 1에 제시된 물성들은 온도별 물성 변화량이 큰 영향을 미치지 않으므로 상수 값으로 제시하였다.

이에 반해 Fluid domain을 이루고 있는 공기와 해수는 온도별 물성 변화량이 크기 때문에 각 온도별 값들을 제시하여야 한다.

**Table.** 2 Properties of air at 1 atm pressure (Heat Transfer, YUNUS A. CENGEL)

| T_air [℃] | Density $[kg/m^3]$ | Specific heat $[J/kg \cdot ℃]$ | Thermal conductivity $[W/m \cdot ℃]$ | Kinematic Viscosity $[m^2/s]$ | Pr |
|---|---|---|---|---|---|
| -150 | 2.866 | 983 | 0.01171 | $3.013 \times 10^{-6}$ | 0.7246 |
| -100 | 2.038 | 966 | 0.01582 | $5.837 \times 10^{-6}$ | 0.7263 |
| -50 | 1.582 | 999 | 0.01979 | $9.319 \times 10^{-6}$ | 0.7440 |
| -20 | 1.394 | 1005 | 0.02211 | $1.169 \times 10^{-5}$ | 0.7408 |
| 0 | 1.292 | 1006 | 0.02364 | $1.338 \times 10^{-5}$ | 0.7362 |
| 10 | 1.246 | 1006 | 0.02439 | $1.426 \times 10^{-5}$ | 0.7336 |
| 20 | 1.204 | 1007 | 0.02514 | $1.516 \times 10^{-5}$ | 0.7309 |
| 40 | 1.127 | 1007 | 0.02662 | $1.702 \times 10^{-5}$ | 0.7255 |

**Table. 3** Properties of water at 1 atm pressure (Heat Transfer, YUNUS A. CENGEL)

| T_air [℃] | Density $[kg/m^3]$ | Specific heat $[J/kg \cdot ℃]$ | Thermal conductivity $[W/m \cdot ℃]$ | Kinematic Viscosity $[m^2/s]$ | Pr |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1025 | 4217 | 0.561 | $1.827 \times 10^{-4}$ | 13.5 |
| 5 | 999.9 | 4205 | 0.571 | $1.548 \times 10^{-4}$ | 11.2 |
| 20 | 998 | 4182 | 0.598 | $1.021 \times 10^{-4}$ | 7.01 |
| 40 | 992.1 | 4179 | 0.631 | $0.666 \times 10^{-4}$ | 4.32 |

Table.2 와 3에서 제시한 유체의 물성치를 통해 각 온도별 선형 보간법으로 구할 수 있다. 온도 변화가 큰 경우에는 해석 Tool을 사용할 시 Table화 하여 적용 가능하지만 본 연구에서는 온도 분포 범위의 중간 값으로 지정하여 계산하였다.

2.3 외부 온도 및 유속 조건

IGC Code에서 규정하는 외기 온도는 취성 강재 선택과 BOR 계산을 위한 조건으로 나뉜다. 취성 강재 검토를 위한 온도 분포는 외부 공기 온도 5℃, 해수 온도 0℃로 지정하며, 유속은 일어나지 않는다(자연대류)고 가정한다. BOR 계산을 위한 온도 분포는 외기온도 45℃, 해수 온도 32℃로 하며, 외부 강제 대류계수를 구하기 위해 선속 17.4knot(32.22km/h)를 적용한다. (본 연구는 IMO 취성강재 적용을 위한 온도 조건으로 한정한다.)

Tank 내에 LNG Cargo는 -163℃, 밀도 422.5$kg/m^3$, 열전도 계수 0.1841$[W/m \cdot ℃]$, 점성계수 0.0001172$[m^2/s]$, 비열 3480 $[J/kg \cdot ℃]$로 대류계수를 구하여 온도분포에 계산에 적용하였다.

## 3. 2D Analytical method

3.1 열저항 네트워크와 열평형 이론

열전달의 기본 메커니즘은 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation)로 나뉜다. 각 메커니즘은 열저항의 개념으로 합산하여 총 열전달 계수로 나타낼 수 있다.

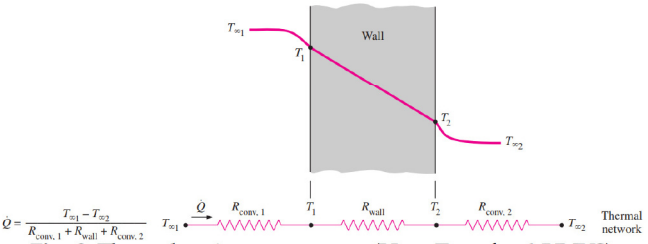



**Fig.** 3 Thermal resistance concept (Heat Transfer, YUNUS)

Fig.3에서 제시한 바와 같이 열유량은 온도 구배와 열저항의 식으로 구성되며, 합산 열저항은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$R_{total} = R_{conduction} + R_{convection} + R_{radiation}$$
$$\frac{L}{kA} + \frac{1}{h_{conv}A} + \frac{1}{h_{rad}A} \quad (℃/W) \qquad (1)$$

식 (1)에서 L은 전도체의 두께이고, k는 열전도도 값이다. $h_{conv}$과 $h_{rad}$는 각각 대류와 복사에 의한 열전달 계수이며, A는 열전달 매체의 단면적이다.

이와 같이 열저항 네트워크 개념을 열평형 이론에 적용하여 열분포 계산의 수치적 접근이 가능하다.

$$\Sigma Q_i = \frac{T_i - T_0}{R_{total,i}} = A U_i (T_i - T_0) = 0 \qquad (2)$$

식 (2)에서 Q는 열유량이고, R은 열저항, U는 열전달 계수이다. 이 때 열전달 계수는 열저항 값의 역수로 이는 병렬로 연결된 선기서항 값 계산과 접근 방법이 매우 유사하다.

위 식은 열유량의 총 합은 0이라는 점에서 에너지 보존 법칙과 연관 지어 생각할 수 있다.

3.2 자연대류 열전달 계수

대류에 의한 열전달에서 필수적인 개념으로 넛셀수(Nu: Nusselt number)가 있는데 이는 식 (3)에서 보인바와 같이 유체의 대류와 전도 열전달의 비율이다.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \text{(h:대류열전달 계수, k:유체의 열전도 계수)} \qquad (3)$$

또한 부력과 점성력의 상대적인 크기에 따라 결정되는 자연대류의 발생량은 레일리수($Ra_L$)가 중요한 인자로 작용한다.

$$Ra_L = Gr_L \cdot \Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{\alpha} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

$\beta$: 체적팽창계수 $[K^{-1}]$
$\nu$: 동점성계수 $[m^2/s]$
$\alpha$: 열 확산율 $[m^2/s]$
$T_s - T_\infty$: 판의 표면 온도와 유체 온도 차이 [℃]
$L$: 특성 길이 [m]
$g$: 중력 가속도 $[m/s^2]$ (4)

식 (4)에서 보인바와 같이 레일리수($Ra_L$)는 점성력에 대한 관성력의 비인 그라쇼프수($Gr_L$)와 점성도와 열확산도의 비인 프란틀수(Pr)로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 그동안 수많은 연구에서 사용되고 각 선급 guidance에도 제시된 경험식을 통해 자연대류계수 값을 구하였다.

*i)* Horizontal surface: $\theta = 0°$ and $T_s \le T_a$, or $\theta = 180°$ and $T_s \ge T_a$

$Nu = 0.27\, Ra_L^{1/4}$ for $10^5 < Ra_L < 10^{10}$

*ii)* Horizontal surface: $\theta = 0°$ and $T_s \ge T_a$, or $\theta = 180°$ and $T_s \le T_a$

$Nu = 0.54\, Ra_L^{1/4}$ for $10^4 < Ra_L < 10^7$

$Nu = 0.15\, Ra_L^{1/3}$ for $10^7 < Ra_L < 10^{11}$

*iii)* Vertical surface: $\theta = 90°$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/\Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

where the Prandtl number is defined as $Pr = \nu/\alpha$.

*iv)* Inclined surface: $30° < \theta < 90°$ and $T_s \le T_a$ or $90° < \theta < 180°$ and $T_s \le T_a$

$g' = g \sin\theta$

where $g'$ replaces $g$ for $Ra_L < 10^9$.

**Fig.** 4 Emperical formula for Natural convection coefficient (ABS Guidance, 2019)

Fig.4에서 제시된 식에서 $T_s$는 판의 표면온도이고, $T_a$는 유체의 온도이다. $\theta$는 판과 horizontal line이 이루고 있는 각도이다. 표면온도와 유체 온도의 위상에 따라 적용식이 다름을 알 수 있는데, 이는 저온 매체가 아래에 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 따라 대류량이 차이가 나기 때문이다.

### 3.3 강제대류 열전달 계수

유체의 유속이 발생할 경우 관성력과 점성력의 비인 레이놀즈수(Re)가 중요한 변수로 작용하는 강제대류가 일어난다. 이는 자연대류에서 그라쇼프수($Gr_L$)와 유사한 역할을 하며, 본 연구에서는 McAdams의 식을 적용하여 넛셀수(Nu)를 계산하였다.

$$Nu = 0.037 Re^{4/5} (\mathrm{Pr})^{1/3}$$
$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (5)$$

여기서 V는 유동의 평균속도$[m/s]$, L$[m]$은 특성길이로 hold구획 길이로 하며, $\nu$는 유체의 동점성계수$[m^2/s]$이다.

본 연구에서는 취성강재 적용을 위한 최저 온도분포를 대상으로 하여 강제대류는 별도 적용하지 않았다.

### 3.4 복사 열전달 계수

복사에 의한 열전달은 물체가 전자기파를 방출하는 원리로 전도와 대류에 의한 열전달에 비해 그 영향이 크지 않지만 마주보는 두 wall의 온도차가 크면 열전달 계수에 영향을 줄 수 있다. 복사 열전달 계수($h_{rad}$)는 다음과 같이 계산한다.

$$h_{rad} = \epsilon\sigma(T_o^2 + T_i^2)(T_o + T_i) \quad (6)$$

$T_o$: 외기 온도 (K)

$T_i$: 선내 구획 온도 (K)

$\epsilon$: emissivity factor (0.2 for steel)

$\sigma$: Stefan-Boltzmann constant,

$5.669 \times 10^{-8}\ [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

In-house code 개발에 식 (6)과 같이 복사 열전달 계수도 적용하여 현업에서 사용 시 고려되도록 하였지만 본 연구에서는 CFD를 통해 대류와 전도에 의한 열전달 결과를 검증하기 위해 복사 효과는 생략하였다.

### 3.5 Fin effect

선내 구획에 보강재는 판이 유체와 접하는 면적을 증가시켜 열전달 계수에 영향을 미친다. 보통 구획 내부로 설치된 선체 보강재는 자연대류계수에 factor로 곱해져 계산되는데, 이 factor는 fin efficiency와 보강재에 의한 판재의 면적비로 구성된다.

$$m = 1 + \eta \cdot \frac{A_{area\,of\,fin}}{A_{area\,of\,pannel}} \quad (7)$$

식 (7)에서 m은 자연대류 계수 값에 곱해지는 Fin effect factor이고, $\eta$는 보강재 내부에 열저항을 고려한 Fin efficiency이다. 개발 code에는 평균적인 선체 보강재 size를 고려하여 fin efficiency는 0.8로 지정하였다.

본 연구에서는 복사 열전달과 마찬가지로 선체 구획 내에 자연대류계수에 초점을 두어 내부재가 없는 no-fin 형태로 해석 및 계산을 진행하였다.

### 3.6 In-house Code

LNG Cargo와 외기 혹은 해수 영역 사이에 Multi-layer로 구성된 선체 내부의 온도를 구하기 위해서는 유입된 열로 인해 변경된 wall과 Compartment 온도차에 의한 대류계수를 반복적으로 계산해야 한다.

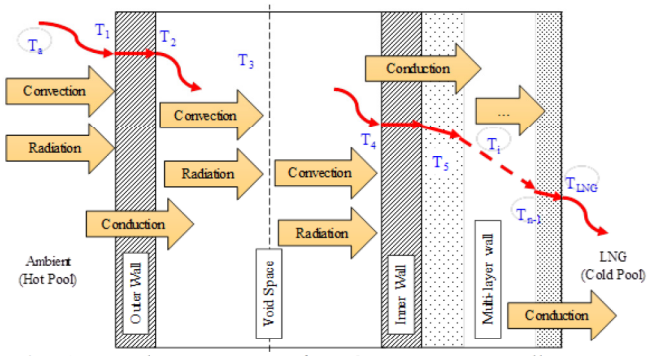



**Fig.** 5 Typical composition of LNG containment wall

Fig.5에서 보인바와 같이 열은 외부(higher temperature)에서 내부(lower temperature)로 유입된다. 열유동의 일방향성을 고려하여 선체 구획을 이산화 할 수 있다.

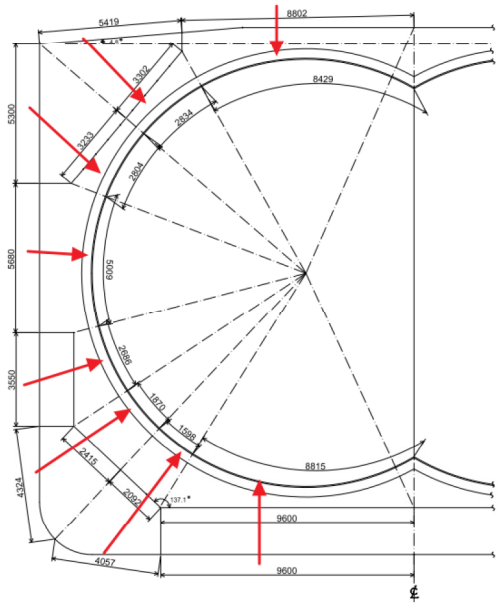


**Fig.** 6 discretized section for calculation

Fig.6에서 제시한 것과 같이 hull section을 총 8구획으로 나누어 one-dimensional heat transfer 알고리즘을 구현하였다.

Input data로 외기 조건과 Cargo의 물성치가 있고, 각 wall의 dimension과 property를 넣어야 한다. Solving parameter로 구획 내부에 initial temperature를 지정해야 하며, delta T(온도변화량)값을 설정하여 반복계산의 간격을 조정할 수 있다. 반복계산은 외부에서 유입된 열유량과 Tank내부에 Cargo로 유입된 열유량의 오차가 일정 Criteria 내로 들어오면 종료된다.

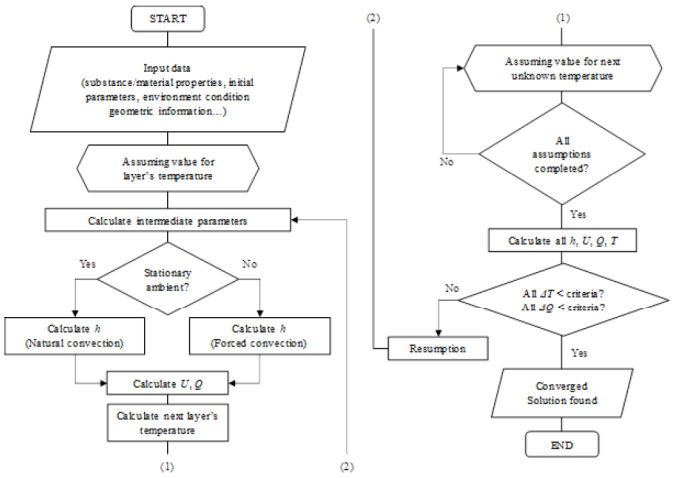



**Fig.** 7 Calculation algorithm

Fig.7에서 제시한 알고리즘은 열유동이 진행되는 동안 다음과 같이 행렬계산을 수행하도록 한다.

$$\begin{bmatrix} (A_1U_1 + A_2U_2) & -A_2U_2 & & \\ A_2U_2 & -(A_2U_2 + A_3U_3) & A_3U_3 & \\ & \cdots & & \\ & A_{n-1}U_{n-1} & -(A_{n-1}U_{n-1} + A_nU_n) & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \cdots \\ T_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1U_1T_a \\ 0 \\ \cdots \\ -A_nU_nT_{LNG} \end{bmatrix}$$

여기서 A는 단면적, U는 열전달 계수, T는 온도이다. 이러한 행렬식은 가우스 소거법을 통해 행렬의 해, 즉 T 값을 계산하고 이를 다음 step의 반복 계산에 적용한다.

## 4. 2-D CFD Analysis

4.1 수치해석(Numerical Method) 접근

열분포 계산의 수치해석은 지배방정식으로 뉴턴 유체의 질량 및 운동량 에너지 보존을 기본으로 한다. 선내 구획은 자연대류의 특징을 가장 잘 구현하는 부시네스크 가정을 토대로 하였다. 적용 Solver로는 범용적으로 쓰이는 ANSYS Fluent로 유한체적법(FVM)으로 액체의 유동이나 열의 흐름을 수치해석 하기위한 CFD code이다.

4.2 모델링

2D 해석을 위한 모델은 Analytical method와 동일하게 단면을 기준으로 한다. Insulation과 steel 부재들은 모두 shell로 모델링을 해야 한다. 특히 각 구획을 이루고 있는 boundary부재들을 Tool에서 지원하는 line tpye의 wall로 지정하여 해석하면 wall의 전도량만 고려되고 유체 영역과 대류현상이 반영되지 않아 잘못된 결과를 얻는다.
Upright 정상상태를 가정하고 half model에 symmerty 경계조건을 부여하였다.

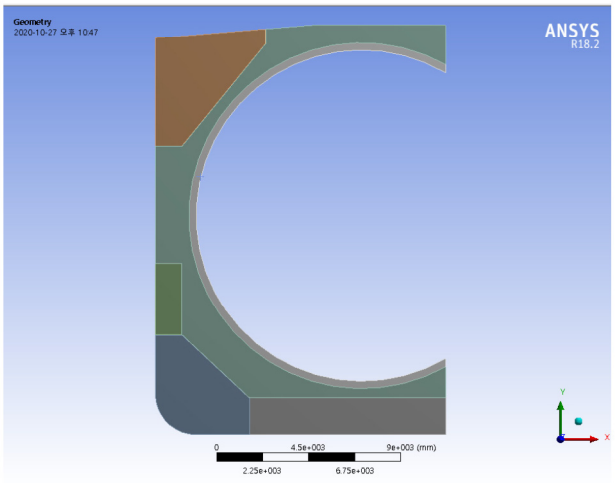



**Fig.** 8 2-D 해석 모델

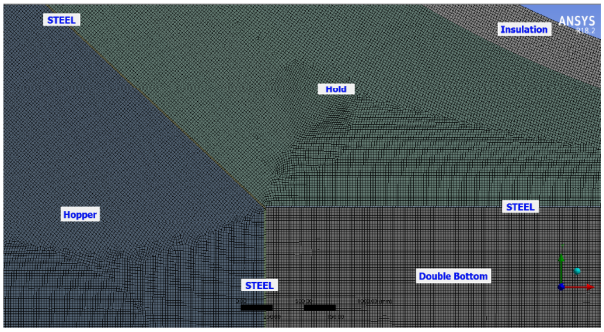



**Fig.** 9 Detail of solid member

Fig.9에서 보인바와 같이 선체 부재는 mesh size 20mm로 고정 정하고, 열교환이 활발히 진행되는 boundary layer 내에는 Quad mesh를 유지하였다.

Tank의 내부 Cargo와 external shell, upper deck는 별도 모델링 하지 않았는데, 해당 부위는 열유입이 일정한 경계조건이기 때문이다. 모델 Size의 최소화를 위해 경계 조건부는 In-house code에서 계산한 대류계수와 경계조건 온도를 직접 입력하였다.
해석은 Steady state, Iteration 1000 times로 지정하였다.

## 5. 3-D CFD Analysis

5.1 Saddle부 모델링

3D 해석을 위한 모델은 2D Model geometry에서 extrude한 것과 같다. 단 모델 중앙부에 saddle과 wood, 그리고 이에 연속한 선체 Trans부재(double bottom floor, web frame)를 모델에 추가 하였다.

특히, Fig.2에서 보인 support detail처럼 wood에 붙는 insulation deduction 형상까지 세밀하게 모델링 하였다.

모델의 종방향 범위는 20m이고 양 끝단에는 symmetry 경계조건을 부여하였다.

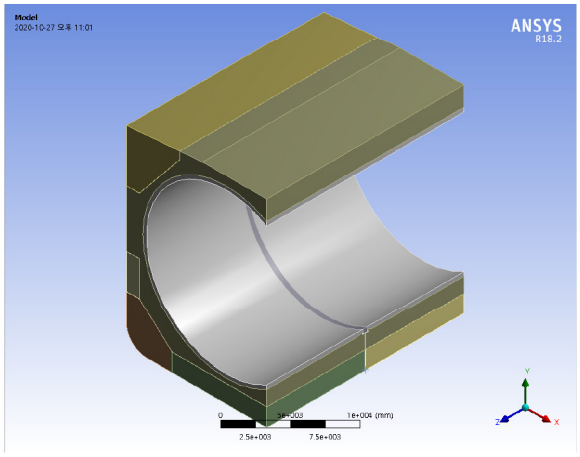



**Fig.** 10 3-D 해석 모델

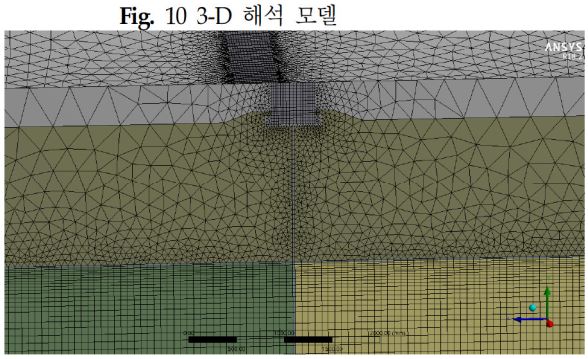


**Fig.** 11 Detail of support structure (saddle)

Fig. 10에서 보인바와 같이 3D 모델에서는 mesh skewness 기준치(0.9) 이하를 유지하기 위해 일부 곡면인 domain에 Tetra mesh 적용이 불가피 하였다. 두께가 각 15mm, 25mm 인 선체 부재는 Hex mesh(edge size 50mm)를 유지 하였다.

## 6. 결 과

### 6.1 2-D Analytical method

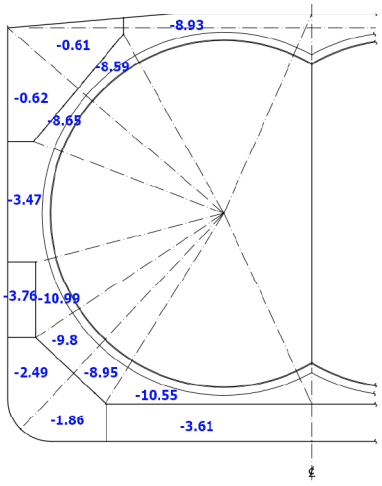



**Fig.** 12 Results of 2-D Analytical method

### 6.2 2-D CFD Analysis

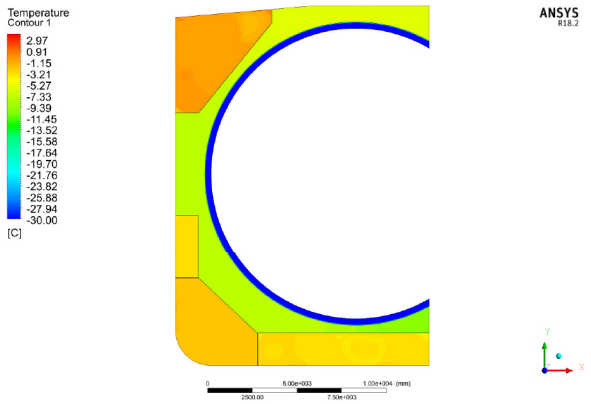



**Fig.** 13 Results of 2-D CFD Analysis (plot above -30℃)

### 6.2 3-D CFD Analysis

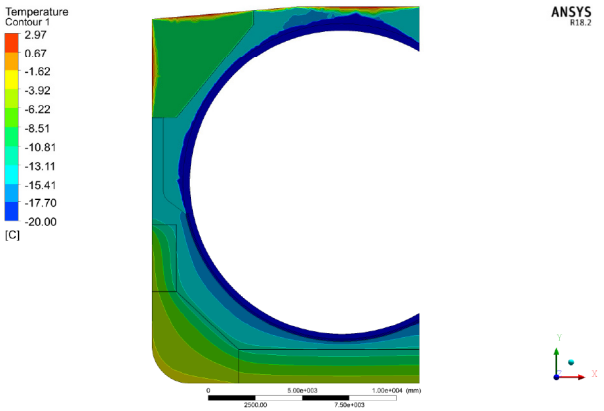



**Fig.** 14 Results of 3-D CFD Analysis saddle section (plot above -20℃)

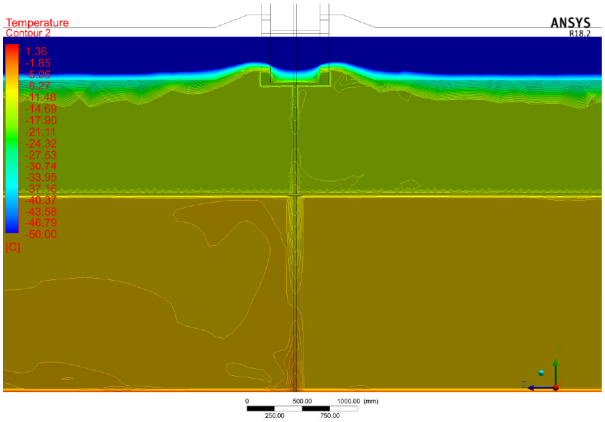



**Fig.** 15 Results of 3-D CFD Analysis 1000mm off Center Line Elevation (plot above -50℃)

6.3 결과 값 비교

**Table. 4** Averaged Temperature results of Compartments (℃)

| | Analytical Method | 2-D CFD Analysis | 3-D CFD Analysis |
|---|---|---|---|
| Hold | -8.49 | -7.5 | -15.02 |
| Double Bottom | -3.61 | -3.03 | -7.74 |
| Hopper | -2.18 | -1.94 | -5.52 |
| Double Side | -3.76 | -3.09 | -7.62 |
| TSWTK | -0.62 | -0.59 | -10.4 |

**Table. 5** Averaged Temperature results of Hull structure (℃)

| | Analytical Method | 2-D CFD Analysis | 3-D CFD Analysis |
|---|---|---|---|
| Inner Bottom | -7.09 | -5.97 | -12.48 |
| Hopper plate (slanted) | -5.77 | -4.84 | -12.58 |
| Inner Hull | -7.39 | -5.39 | -13.06 |
| TSWTK plate (slanted) | -4.61 | -3.84 | -12.62 |
| Saddle face plate | - | - | -17.7 (min -18.85) |
| Saddle web plate | - | - | -14.7 (min -18.29) |
| Double bottom web plate | - | - | -8.26 (min -13.07) |
| Hopper web plate | - | - | -6.41 (min -12.12) |
| Double side web plate | | | -9.38 (min -13.99) |

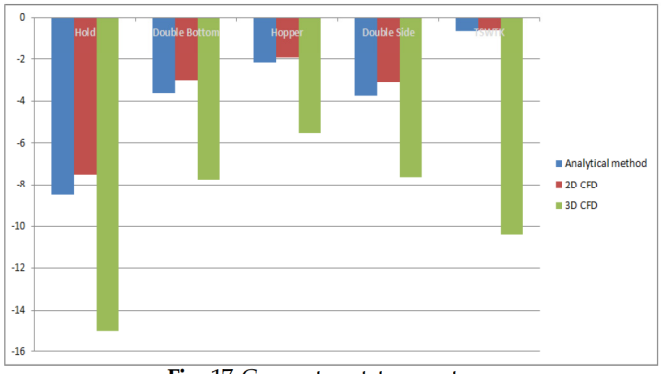



**Fig.** 17 Compartment temperature

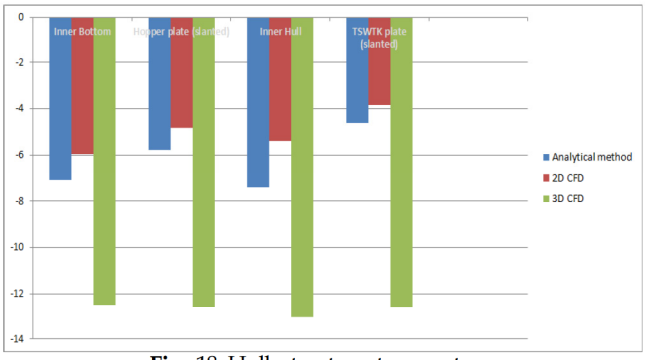



**Fig.** 18 Hull structure temperature

## 5. 결 론

본 연구를 통해 In-house code 개발을 완료하였고, 2-D CFD 해석을 통해 오차범위 1℃ 내외로 그 신뢰도를 검증하였다.

3-D 해석에서 hold내에 Support부 열 영향에 대해 다시 한 번 고찰 할 수 있었다. 결과에서 시사한 바와 같이 TYPE-C Tank는 2-D Analytical method에서 구한 선내 구획의 온도값과 대류계수를 3-D 해석 모델에 mapping 하여 진행 할 수 없다. 이는 Tank와 support 사이에 열유량이 각 compartment 온도와 상호 작용을 하기 때문이다.

고로 TPYE-C LNG Carrier의 열분포 계산은 Support를 고려한 3-D CFD 해석이 필요하겠다. 다만 본 연구에서 검증된 In-house code로 적당한 3-D모델 범위와 경계조건을 찾고 계산 시간을 절감 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

정현원, 김태현, 김석순, 심재우 (2017). “KC-1 Membrane LNG 탱크 단열시스템의 열해석에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제31권, 제2호, pp 91-102

허준호(1997) “멤브레인형 LNG선의 화물창 온도분포 해석”, 한국해양공학회지

ABS. 2019. Guidance Notes on Thermal Analysis of Vessels with Tanks for Liquefied Gas. American Bureau of Shipping.

IMO. 2016. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. International Maritime Organization

KR 2020. Guidance of Heat Transfer Analysis for Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk/Ships Using Liquefied Gases as Fuels. Korean Register.

Yunus A. Cengel. 2003. Heat Transfer; A Practical Approach Second Edition. New York: McGraw-Hill Higher Education.

ANSYS Fluent Theory Guide 2015

# Design Considerations of Deepwater Suction Pile for Taut/Semi-taut Mooring System

Junghwan You*, Bongkyun Choi*, Minjeong Lee*, Bongjae Kim* and Dongyeon Lee*

*Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Seongnam, Korea

KEY WORDS: Suction pile, Seabed trench, Offshore mooring foundation, Design procedure, Ring stiffener

ABSTRACT: *Suction pile has been chosen as the first option of deepwater foundation system to moor large floating structures due to increased vertical loads caused by taut or semi-taut mooring system and reliable and efficient performance during offshore installation in deepwater. Lately, discoveries of seabed trenches in the vicinity of suction piles at deepwater West Africa triggered the concern about the safety of the anchoring system. The industry has reasonably well established design procedures for suction pile under normal seafloor conditions; however, design methodologies for suction pile are not established for scenarios where anomalous soil loss has occurred by combination of the soft and low density characteristics of the deepwater soils and large mooring line motion. As a result, this requires more conservative pile design. In additions, suction pile attached inside ring stiffeners has occasionally installed after its first appearance to reduce pile weight due to the lack of heavy lift vessel. Unlike suction pile with thick skirt to avoid buckling during penetration, the penetration mechanisms when ring stiffeners involved had been not well understood. Recent studies on ring stiffened pile turned out the soil flow mechanism adjacent to ring stiffeners during pile embedment and this makes them more reliable option. This paper describes technical issues required to design deepwater suction pile such as seabed trench, pile geometry, installation performance, and cyclic loads. A case study on suction pile design for deepwater project is also addressed in the paper.*

## 1. Introduction

As oil and gas (O&G) development has moved towards deepwater, the application of (semi-)taut mooring system with suction anchor pile for station keeping of floating structures have become more common. The suction pile has to withstand mooring force generated by environmental loadings during the entire design life. In particular, semi-taut/taut mooring system requires the anchoring system to resist considerable vertical load components compared to catenary mooring. Indeed, soft deepsea clay makes suction pile the most viable option for deepwater mooring foundation.

Under normal deepsea clay, the O&G industry has reasonably well established design procedures for suction pile, which are carried out by interactive work of geotechnical, structural, and cathodic protection (CP) designs. The Geotechnical design includes determination of pile size and optimum padeye level able to resist mooring tensions and assessment on its penetration ability based on soil characteristics. With the selected pile size, structural design of suction pile verifies the structural integrity by Finite Element (FE) analysis and determines scantling size. For all phases from load-out at yard to on-site operation, the main and appurtenant structures of suction pile have to be met the structural design requirements for strength, buckling, and fatigue. CP design includes coating selection and anode design to protect suction pile from corrosion of pile steel during design life.

Recently, seabed trenching in nearby suction piles observed in deepwater areas offshore West Africa (Fig. 1), where the heave motion of floating structure induced by squall and swell dominates. Although it is believed that the main causes of trench formation are interaction of soft deepwater clay and large mooring line motion, actual formation of such trenches and their development with time are still unknown. This triggers wider and longer suction pile, as well as more expensive installation cost. Late studies on the penetration mechanism of ring stiffened suction pile, less weight than suction pile without ring stiffeners, provided the insight to mitigate the significant uncertainties during installation.

This paper discussed the main considerations for developing a reliable and economical suction pile design in cohesive soils and showed an example of recent suction pile design.

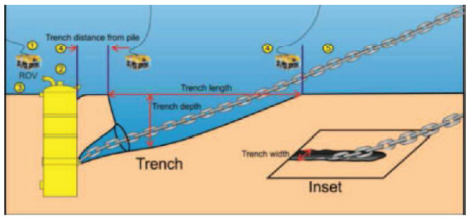



Fig. 1 Schematic of seabed trenching near suction pile (Bhattacharjeee et al., 2014)

## 2. General Design Procedure of Mooring Suction Pile

Suction pile design is implemented in cooperative work with geotechnical, structural, CP, and mooring engineers (Fig. 2). Industry practice for geotechnical suction pile design briefly includes determination of design loads and soil parameters, prediction of holding capacity, and assessment of installation.

Initially, the soil datum provided from site investigation are interpreted and evaluated. Soil parameters are then selected for pile design based on design requirements and engineer's judgement. Usually, the different loading cases at theoretical anchor point (TAP) on mudline are defined by mooring analysis considering dynamic effects expected at the field. In addition, a factor of safety (FoS) is determined for different sets of loads (i.e. intact/damaged).

With preliminary selected pile size (i.e. diameter, length, and padeye level, wall thickness etc.) based on design experiences, buried chain analysis is carried out to compute loading magnitudes and horizontal angles at padeye of suction pile. It is turned out that the final loads applied at padeye of pile are generally reduced due to the soil-chain friction effect.

Geotechnical engineers have used two of the main methods, the limit equilibrium method (LEM) and the 3D FE, to calculate the ultimate holding capacity of suction pile. Generally, accuracy of LEM depends on how close the assumed failure mechanisms are to the actual one. Thus, 2D mechanisms are often assumed for preliminary sizing of suction piles, with 3D effects being taken into account by way of equivalent side friction and/or empirical factors and effect of titling/heading tolerances occurring during pile installation. Suction pile analysis by 2D LEM is decoupled, in the sense that vertical and lateral capacities of suction pile are considered independent. Then, the elliptic interaction diagram with ultimate vertical and lateral capacities for site-specific soil profile, loading, and pile displacement conditions determines the ultimate holding capacity under inclined loading. The well-established FE analyses are then performed on the final pile dimension with the aim of cross-checking and verifying both methods.

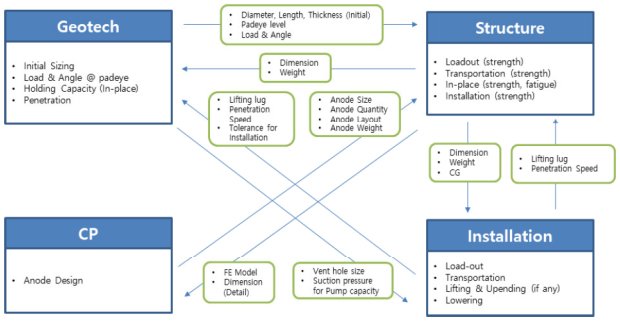



Fig. 2 Interactive frameworks of suction pile design

Installation analysis of suction pile in clay includes estimation of self-weight embedded depth after contacting on seabed and prediction of required/allowable under-pressures to install (or retrieve) suction pile considering penetration resistance of deepsea soils. Additionally, soil heave length and penetration rate should be assessed in suction pile design, since soil displaced by pile skirt causes internal soil heave and landing speed related with vent-hole sizing may occur significant disturbance in soil. An iterative work on geotechnical design is required to find acceptable FoS corresponding to failure mode under each loading case.

Based on the suction pile size and the design loads determined by geotechnical design, assessments on structural integrity are carried out for the following phases: load-out, transportation, lifting and lowering, penetration, and in-place. Under loading conditions for each phase (line tension, suction, geostatic load etc.), the stresses and strains calculated by FE analysis or evaluations according to applicable codes/standard should be within allowable limits.

The in-place analysis assesses the strength of the anchor pile components under extreme loads by using an integrated soil-structure FE model. In FE analysis, the inclined mooring loads at padeye and inside suction in pile are applied after constructing geostatic condition (Fig. 3). Mooring padeye should be locally evaluated under extreme loads with provided heading tolerance. In order to assess fatigue by dynamic mooring loads, the stress concentration factor (SCF) calculation for mooring unit load is carried out, and then mooring tension is converted to hot spot stresses for all of hot spot zones. The fatigue life multiplied by factor of 10 is calculated for each hot spot area.

During installation work, under-pressures act on the inside of suction pile and this may cause the buckling of pile skirt. As suction pressure increases with penetration depth, buckling assessments may be performed at several depth levels. Strength evaluations on lifting lugs should be also carried out for lifting, upending, and lowering step.

In order to control corrosion of suction pile, CP system using sacrificial anodes, protective coatings and corrosion allowance (CA) can be utilized. CP system with protective coatings is effective to protect the metallic surfaces of the suction pile and its appurtenance which are exposed to seawater.

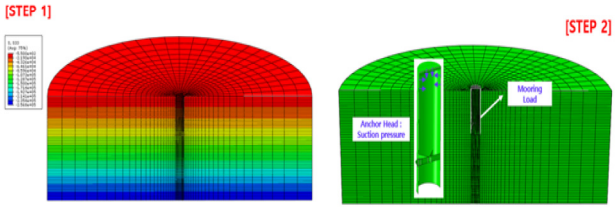



Fig. 3 FE analysis steps for global in-place analysis

The required current demand to achieve and maintain CP protective potential is affected by various seawater and sediment parameters: dissolved oxygen, sea currents, temperatures, marine growth, bacterial activity, salinity, sediment coarseness and so on. The design current densities considering those parameters are provided in the project specification or recommended practices. For the buried surfaces, external surface of skirt are only included in current drain calculations. The specific resistivity of seawater and sediments are used to compute the anode resistance, which determines the current output from an anode. The required mass and quantity of anodes can be calculated according to global standard/rule. The anode type shall be selected taking into account net anode mass and dimension to be installed and available space for location of anodes. The anode design contains anode type, dimension, chemical composition and electrochemical properties.

## 3. Technical Issues on Deepsea Suction Pile Design

### 3.1 Geotechnical design

It is recognized that seabed trenching in taut deepwater moorings can reach the padeye level of suction anchor due to combination phenomena of cyclic mooring line motion, very soft deepwater clay characteristics, and bottom current (Colliat et al., 2018). The reduction in holding capacity of the suction anchor due to trench formation in the vicinity of suction piles, is not straightforward to quantify; hence, it often requires advanced 3D FE analyses since the geometry of the trench introduces some 3D effects.

Recent studies (Arslan et al., 2015; Sassi et al., 2018) provide an insight on how to consider the trenching effect in suction pile design. In these studies, it was often assumed that the trench depth equals the depth of the padeye (zp) and that the trench bottom width (W) can extend up to the anchor diameter (D), as sketched in Fig 4. These papers show that reduction in holding capacity ranges from 20%~40% with FE models which are completely trenched to the depth of padeye of pile. Although application of safety factor of 1.4 seems to be conservative approach, it is acceptable method to validate the holding capacity of pile until industry practice on trenching effect is well-defined.

Additional concern for trench formation is about the reduction in reverse end bearing (REB) capacity. The REB is mobilized during an undrained loading condition and requires generation of negative excess pore pressure or passive suction. Shorten drainage path caused by trenching may dissipate the passive suction. Centrifuge test (Sassi et. al., 2018) and FE analysis (Arslan, 2015) demonstrates that REB is not significantly reduced for suction anchors in the presence of a trench to padeye level. In particular, REB was fully mobilized at a displacement of approximately 0.1D in vertical loading.

Soil set-up is the process whereby the soil, in the immediate proximity of the pile, regains its shear strength after being disturbed/remolded by the pile installation. The soil strength increases with time after installation through consolidation and thixotropy. For the holding capacity analyses a set-up factor corresponding to 60 days of set-up (i.e. pore pressure dissipation and thixotropy effects) in Gulf of Guinea soils, since installation is used according to Andersen and Jostad (2002). Randolph (2011) also shows that field data suggest that full set-up is generally achieved in Gulf of Mexico soils after about 100 days, with 50% improvement in capacity after installation.

Although ring stiffeners attached inside of pile with a space to withstand the buckling loads caused by suction pressure during pile penetration. Inside ring stiffeners reduce the total weight of suction pile and this lead installation cost reduction by selection of less expensive heavy lifting vessel and reduced wall thickness of pile. Zhao (2017) presents that the addition of these stiffeners has created significant uncertainties regarding the soil flow mechanisms, in particular the inner soil heave with the risk of potential penetration refusal prior to reaching the designed installation depth (or achieving the designed capacity to sustain operational loadings). Ring stiffened suction pile has an advantage of material saving; however, less penetration depth increase the required suction pressure. Besides, some installation companies have no track record on the ring stiffened pile and worry about the uncertainty of penetration mechanism.

After contacting on seabed, pile is penetrated by self-weight and then embedded to the target depth by suction pressure. Therefore, estimation of self-weight penetration depth and prediction of allowable/required suction pressures are required.

Displaced soil by skirt wall would be divided about half and half into inside and outside of pile during self-weight penetration. However, 100% of the displaced soil move into the pile skirt after starting suction pressure with transition zone about one diameter penetration (Andersen and Jostad, 2004).

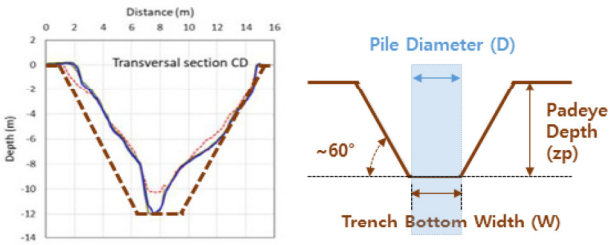



**Fig. 4** Idealization of observed trench geometries (Colliat et al., 2018).

This phenomena causes internal soil heave. Calculation of heave length includes seafloor slope, vertical tolerance, and displaced soil height by suction. If the inside ring stiffeners attached, they may generate additional soil heave as a trapped wedge of water is assumed just above each stiffener, shown in Fig 5. The estimated soil heave should consider the presence of internal stiffeners within the skirt compartment.

Additionally, penetration rate into the seabed is calculated for vent-hole sizing. Industrial practice requires at least 0.5 m/s of landing speed at mudline. If it is hard to meet the penetration rate, additional bottom holes are required.

A simplified way to quantitatively account for torsion due to out-of-plane mooring load is by estimating the soil stress due to the torsional moment, and combining this horizontal shear component with the axial component of shear due to uplift; the resultant shear stress should be within the limits.

With fully sealed conditions, typical uplift capacity of a suction pile will not exceed 50-60% of the horizontal capacity. Thus, vertical capacity becomes critical once the angle of loading exceeds about 30° above the horizontal, as is the case for taut moorings.

Investigations regarding to suction pile performance under cyclic and sustained loading have conducted and these have tended to show little degradation from cyclic loading and an ability to withstand at least 80% of the short term capacity over several months. In many projects, cyclic strength analyses for suction piles in highly plastic clay have concluded that the cyclic strength degradation is overcompensated by the strain rate effect in such a way that the cyclic shear strength at the end of the extreme event remains higher than the static shear strength. Therefore, the pile design is usually based on the static shear strength.

### 3.2 Structural design

Geometry and arrangement of sub-structures such as ring stiffeners, inside vertical stiffeners connected to padeye, and lifting lugs are selected by discussion with geotechnical, structural, and installation engineers.

The ring stiffeners attached to inside of suction pile withstands the buckling loads generated by suction pressure during penetration. Without ring stiffeners, thickness of pile skirt should be increased to resist the buckle loads. Thus, application of ring stiffeners (Fig. 5 & 6) depends on the total weight of suction pile and the crane capacity of installation vessel. Even though the suction pile with no ring stiffeners is relatively preferred due to easy manufacturing process and accumulated track records; however, attachment of ring stiffeners to inside of pile is one of attractive options to reduce weight of pile.

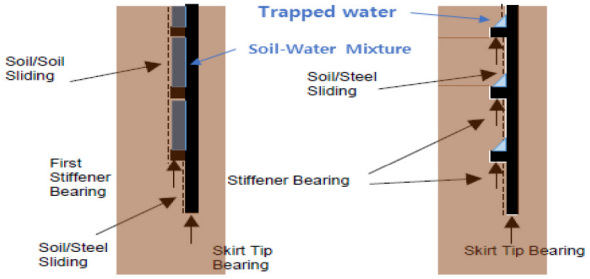



**Fig. 5** Possible water trap for penetration mechanisms (Erbrich and Hefer, 2002)

Inside vertical stiffener (Fig. 6) linked to padeye transfers the significant mooring load to pile skirt; thus the entire cylindrical structure behaves to support huge mooring tension. Usually, the inside main stiffener with one plate is commonly adopted because soil disturbance during penetration is less.

Suction pile is usually designed applicable for horizontal and vertical lifting and upending according to suction pile installation outline procedure. Several lifting trunnions at the top of pile and one lifting lug below padeye are attached to the external surface of suction pile.

Regarding global In-place analysis, FE model combined of linear elastic model (suction pile) and non-linear model (soil) is applied to reflect the interactive behavior of suction pile embedded into the soil. Extreme mooring tension is generally loaded at padeye for global in-place analysis; while 110% of MBL may be conservatively required for local padeye analysis since padeye damage may cause a disaster. Due to significant high load, the local stress levels near the pin hole of the padeye and the reinforced section of padeye connection are often over elastic range. For this case, the strength of padeye is evaluated through nonlinear analysis, and then the analysed plastic strain is normally limited to 5%.

Soil surrounding suction pile provides the increased buckling resistance as the suction pile penetrates deeper. This decreases the effective buckling length, whereas the higher suction pressure is required at more embedded depth. Thus, buckling evaluation may be performed for several penetration depths and buckling modes.

Fatigue damage for in-place condition is calculated by considering the mooring line cyclic loading for all sea-states. The strength analysis is used to determine the ratio between the applied mooring load and the stress at points of interest on the structure. This conversion between load and stress is possible because the FE analysis comprises linear elastic material and the deformations are too small to cause significant geometric non-linearities; thus leading to an almost linear relationship between the stress and the force. Using the load to stress ratio, the cyclic mooring load is converted into a stress.

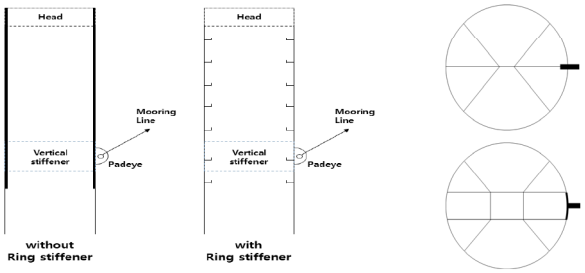



Fig. 6 Ring stiffeners (left) and vertical padeye stiffeners (right)

Given stress and number of cycles, the fatigue damage for each sea state is calculated based on the S-N curve and Miner rules. The S-N curves should be carefully selected based on material grade and fabrication method (i.e. forging/casting).

### 3.3 Cathodic protection design

CP current drain to the pile below mudline and electrically connected components (e.g. anchor chain), which do not need CP due to their own corrosion control measures (CA and/or protective coatings) should be considered during the design. All external surfaces where current drain is expected need to be included in the CP calculation with adequate current densities. If sulphate-reducing bacteria (SRB) activity is expected in the sediments and CP is necessary to mitigate this bacterial corrosion, protective potential for CP design is more negative representing anaerobic environments.

Development of seabed trench may increase the exposed area of pile side wall and it requires necessary to attach the additional anode to suction pile surface. Increased anodes quantity may cause the complicated anode layout on top of pile. If the installation plan includes pre-deployment of suction pile prior to commissioning and operation, additional exposed duration should be added to the CP design life.

## 4. Case Study: Suction Pile Design for the Bay of Bengal Deepwater Project

Bay of Bengal offshore project has been carried to develop oil field with large floater. This facility will operate during 25 years after installation. Taut mooring system was adopted and 9 suction piles will be deployed in about 950 m water depth.

At early stage of the project, suction pile design was internally performed for installation contract and additional design of suction pile was carried out to review the results submitted by sub-contractor. Unlike initial design condition, mooring loads were increased about 20% and ring stiffened pile was selected. In addition, open-trench effect led to bigger suction pile. Later, it turned out that no significant seabed trench was observed at adjacent field; however, the suction piles were conservatively designed including the effect of trench formation. The following design cases are described:

- Case Ⅰ - initial design, with ring, no trench
- Case Ⅱ - additional design, without ring, with trench
- Case Ⅲ - project design, with ring, with trench

Suction pile dimension and the factor of safety (FoS) for each case derived from geotechnical design are summarized in Table 1. The FoS means the ratio of holding capacity and design load and it should be larger than 1.0.

Initial suction pile sizing for Case Ⅰ was enough to hold the given design tension if no seabed trench occurs. Case Ⅱ and Ⅲ showed that the increased suction pile sizes to consider the reduction in holding capacity of suction pile due to open-trench were the same and both of them resulted in about 40% higher FoS according to industry practice. However, suction pile for Case Ⅱ was required less suction pressure than one for Case Ⅲ since it further penetrated by self-weight.

In structural study for Case Ⅰ, the suction pile was analyzed under the 100-year return period design load. According to API-RP-2SK, maximum loads and angle at anchor padeye were calculated as 7,970 kN and 40.5 deg, respectively. With mooring load, suction pressure of 353 kPa (at target depth) and geostatic pressure were also considered.

A detailed integrated geotechnical-structural 3D FE model of the suction pile with supporting soil was developed using ABAQUS software to analyze the pile under in-place conditions. The integrated model used shell elements to model the anchor plated elements (shell plate, padeye stiffeners and etc.), whereas some components of the pile structure, such as the thicker mooring padeye, were modeled using solid elements.

The soil domain was modeled using solid elements and extended 10D radially and 2L below the base of pile to minimize the boundary effect. The mesh density was varied throughout the model in such a way that areas of higher stress gradients and concentration have finer meshes.

The maximum von-Mises stresses from FEA were compared against the allowable stress (319.5 MPa) for global strength condition and maximum stresses checked within. The von-Mises stress distributions in the anchor pile and the padeye with its stiffener connections are shown in Fig. 7.

Table 1 Suction pile dimension and FoS for design cases

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|---|---|---|---|
| Diameter, D (m) | 5.5 | 6.0 | 6.0 |
| Total Length (m) | 20.5 | 23.5 | 23.5 |
| Embedded Length, L (m) | 19.0 | 22.0 | 22.0 |
| Wall Thickness (mm) | 30+ | 30+ | 20 |
| Total Weight (ton) | 110 | 125 | 95 |
| Factor of Safety | 1.05 | 1.40 | 1.39 |

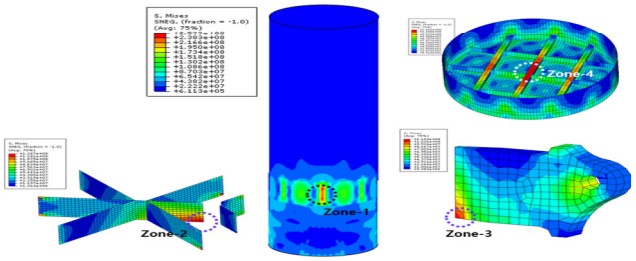
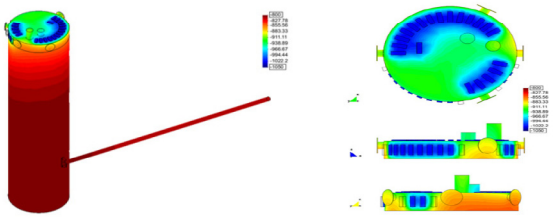



Fig. 7 Results of global in-place FE analysis



(a) Global (b) Top

Fig. 8 Contours of Protection Potential in Year 26

Suction piles are externally coated above the seafloor and 1 meter below mudline and fitted with a sacrificial anode CP system. CP design procedure and parameters required for the CP calculation are based on DNVGL-RP-B401.

For CP system to protect the suction pile, 34 Al-based flush mounted anodes with a net mass of 54 kg are proposed. For the tentative anode arrangement, 20 anodes are arranged on the top plates avoiding the required space for ROV docking and 14 anodes are arranged on the side of the pile.

To evaluate the performance of proposed CP system, CP modeling using BEASY software was performed at initial, mid-stage, and at the end of design life (year 26) for the tropical region. The results (Fig. 8) shows the currently designed CP system is able to produce potentials more negative than the protective criteria of -800 mV (Ag/AgCl seawater reference electrode) on all cathodic protected parts above mudline throughout the design life.

## 5. Summary and Conclusions

Design considerations for suction pile linked with (semi-)taut mooring system have been discussed. Like the case study mentioned above, a recent deepwater suction pile subjected to inclined forces includes the following design issues:

(1) Trench formation in the vicinity of suction pile causes the reduction in its holding capacity. Nevertheless, REB capacity is still mobilized under closed valve condition.

(2) If code/standard does not provide the specific design method considering seabed trenching, acceptable FoS derived from analysis on no-trench model should be greater than 1.2 (conservatively 1.4).

(3) Ring stiffeners may create uncertainties on prediction of self-penetration and required suction pressure. In particular, spacing and width of ring stiffeners should be carefully determined based on soil parameters.

(4) Structural integrities (strength, buckling, and fatigue) are mainly evaluated by FE analyses considering non-linear soil characteristics and pile-soil interaction.

(5) CP design is based directly on suggested code/standard; however, open-trenching phenomenon and pre-installation work may require more conservative anode design.

## References

Andersen, K.H. and Jostad, H.P. (2002). "Shear Strength along Outside of Suction Anchors in Clay after Installation", Proc. 12th ISOPE.

Andersen, K.H. and Jostad, H.P. (2004). "Shear Strength along Inside of Suction Anchor Skirt Wall in Clay", Proc. OTC paper no. 16844.

Arslan, H., Peterman, B.R., Wong, P.C. and Bhattacharjee, S. (2015). "Remaining capacity of the suction pile due to seabed trenching", Proc. 25th ISOPE.

Bhattacharjee, S., Majhi, S., Smith, D., and Garrity, R. (2014). "Serpentina FPSO Mooring Integrity Issues and System Replacement: Unique Fast Track Approach. Offshore Technology", Proc. OTC-2S449-MS.

Colliat, J.L. et al. (2018). "Foundation and development of seabed trenching from subsea inspection data of deepwater gulf of guinea moorings", OTC-29034-MS

Erbrich, C.T. and Hefer, P. (2002). "Installation of Laminaria suction piles - a case history", Proc. OTC 14240.

Randolph, M.F. and Gourvenec, S. (2011). Offshore Geotechnical Engineering, CRC Press, New York.

Sassi, K., Zehzouh, S., Blanc, M., Thorel, L., Cathie, D., Puech, A. and Colliat-Dangus, J.L. (2018). "Effect of seabed trenching on the holding capacity of suction anchors in soft deepwater Gulf of Guinea clays", Proc. OTC-28756-MS.

Zhao, Z., Zhou, M., Hu, Y., and Hossain, M.S. (2017) "Behavior of Soil Heave Insdie Stiffened Caissons being Installed in Clay", Canadian Geotech. J., Vol 55, No 6.

# 해양플랜트용 장비 모형제작을 통한 PM기법 적용 및 학습효과에 대한 연구

홍민종 · 백승주 · 김영훈 · 이대형 · 신정활 · 김병창(경남대학교)

# A study on the application of PM techniques and learning effects through the production of equipment for offshore plants

Min-Jong Hong · Seung-Ju Beak · Young-Hun Kim · Dae-Hyung Lee · Jung-Hwal Shin · Byung-Chang Kim(Kyungnam Univ.)

In general, projects for land and offshore plants have become larger, which takes a long time to complete construction, and the project cost is greatly increased. Accordingly, PM(Project Management) techniques such as WBS(Work Breakdown Structure) and RBS(Resource Breakdown Structure) etc, are more important in order to succeed as planned. In other words, PM techniques are very effective method in terms of cost, duration and risk management. Since the 2000s, Korea has won many offshore projects from overseas, but Korea has suffered a big loss in management due to lack of project management capabilities and design capabilities for large projects compared to competitors of overseas. As a result, Korea is increasingly interested in cultivating professional manpower with competency in project management techniques. In this study, as a way to understand the PM techniques, the PM techniques were applied to the construction of a heat exchanger models for offshore plants. With the design drawings of heat exchanger, the size of the model to be manufactured and the priority of bonding were discussed and decided on a process that can efficiently be performed. Through this process, the learning effect of understanding the PM technique was investigated.

KEY WORDS: PM(Project Manager) 프로젝트 매니저, offshore plants 해양플랜트, systematic management 체계적인 관리, design 설계, building 건조, WBS(Work Breakdown Structure) 작업 분할 구조도 , RBS(Resource Breakdown Structure) 자원 분할 구조도

# Dual Barge를 이용한 Spar 플로트오버를 수치해석

정성준*·곽현욱*·박병재**·이강수**
*선박해양플랜트연구소 심해공학연구센터
**선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부

# Dual Barge - Spar Floatover Mating Analysis

Sung-Jun Jung*, Hyun-Wook Kwak*, Byoung-Jae Park** and Kangsu Lee**

*Deep Ocean Engineering Research Center, KRISO, Pusan, Korea
**Offshore Plant Research Division, KRISO, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Float-over 플로트오버, DTV 데크운송바지, Topside 톱사이드, Spar 스파, Mating Analysis 메이팅 해석

해양플랜트 공사에 있어, 톱사이드를 설치하는 방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 크레인 선박을 통해 여러 조각의 톱사이드를 순차적으로 설치하는 방법과, 대형의 톱사이드 한번에 운송바지를 통해 얹는 플로트오버 방식이다. 크레인 선박을 이용한 리프팅 방식이 주로 사용되어 오던 방식이나, 여러 조각의 톱사이드를 다시 하나로 합쳐 제 기능을 하게 하는 HUC(Hookup and Commisioning) 단계의 작업과 비용이 더 필요하게 된다.

톱사이드가 대형화 될 경우에는, 여러 차례의 리프팅 및 해상 접합 작업 대신 플로트오버를 통해 한 번에 설치하는 것에 큰 장점이 생긴다.

선행 연구를 통해 자켓의 톱사이드 플로트오버 설치 메이팅 해석 (정성준 등, 2018), 반잠수식 생산설비의 톱사이드 플로트오버 설치 메이팅 해석 (권용주 등, 2019) 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 바지 두 척을 통해 하나의 톱사이드를 이동하고, 이를 Spar 구조물 위에 얹는 플로트오버 과정을 가상의 프로젝트에 적용하였다.

해석 소프트웨어는 플로트오버의 해상 운용 해석에 널리 사용되는 Ansys의 AQWA를 사용하였으며, Ansys에서 제공하는 GUI 시스템인 workbench 대신 script 기반으로 모든 과정을 모델링하고 해석을 수행하였다.

본 해석은 20,000톤 급의 초대형 톱사이드, 200m 길이급의 Spar, 배수량 35,000톤급의 DTV 두척이 한번에 상호작용하는 다물체 (4-body) 시뮬레이션이다. 이에 각 물체가 상호작용하는데 필요한 여러 가지 요소(LMU, DSU, Fender 등)를 적절히 설계하여 해석에 적용하였다.

0~100%의 하중 전달 과정에 대하여, 주어진 환경방향에 따라 최대 1.5m의 유의파고를 견딜 수 있음을 해석을 통해 확인하였다.

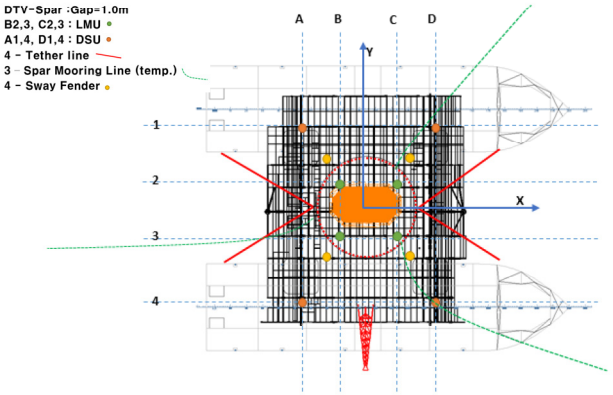



**Fig.** Interaction elements and arrangement for mating operation

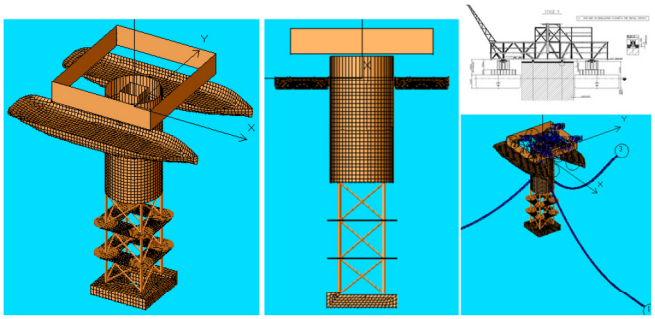


**Fig.** Numerical assessment for mating operation

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양장비개발 및 인프라구축사업 '해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발(PMS4260)'에 의해 수행되었습니다.

# DP 설치선을 이용한 반잠수식 해양구조물의 플로트오버 도킹작업에 관한 모형시험연구

권용주 · 송형도 · 원영욱 · 김현성 · 오영재 · 이지훈 · 김남우 · 곽현욱 · 이강수 (KRISO)

# A Model Test on Floatover Docking Operation of a Semi-submersible with a DP Deck Transportation Vessel

Yong-Ju Kwon · Hyung-Do Song · Younguk Won · Hyun-Sung Kim · Young Jae Oh · Ji-Hun Lee · NamWoo Kim · Hyun-Uk Kwak · Kangsu LEE (KRISO)

In this study, a series of model tests were carried out to evaluate the performance on the floatover docking operation of a semi-submersible with a DP Deck Transportation Vessel (DTV). The model tests were performed in the ocean engineering basin of Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO). DP system was installed in DTV for station keeping, consisted of 7 thrusters (4 Azimuth thrusters and 3 tunnel thrusters). This DP system was tested with POW, bollard pull tests. Also, interaction effects were found during thruster-hull and thruster-thruster interaction tests. Irregular wave tests were performed under several docking stages and 3 wave headings. The discussion is made on the effects of docking stage, wave heading, significant wave height(Hs) and seed variations. Two body interaction was considered between DTV and semi-submersible at each stage. At each stage, the fender reaction force was differentiated because of the relative position. The surge fender force was found in only a mating position. The responses were overall larger in long wave conditions on vessel motion, fender force, mooring tension and thrust. The responses were overall small including horizontal motion both DTV and semi-submersible during docking model test.

**KEY WORDS**: 플로트오버 Floatover DP 모형시험 DP Model test, 도킹작업 Docking Operation, 운송바지선 DTV, 반잠수식 해양구조물 Semi-submersible

후 기

본 연구는 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 “해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발(6/6)” 로 수행된 연구결과입니다 (PMS4260).

# Numerical Study on the Unified Seakeeping and Maneuvering Analysis of the Russian Trawler in Wind and Wave

Van Minh Nguyen*, Thi Thanh Diep Nguyen and Hyeon Kyu Yoon
*Changwon National University, Changwon, Korea*

KEY WORDS: Ship maneuvering in waves, Russian trawler, Unified model of Seakeeping and Maneuvering

**ABSTRACT:** *Maneuvering performance of a ship in the actual sea is very different from the one in calm water due to wave-induced motion. Enhancement of the ship maneuverability in wave at the design stage is an important way to ensure that the ship navigates safely. This paper focuses on the maneuvering prediction of the Russian trawler in wind and irregular wave. First, the unified seakeeping and maneuvering analysis of the Russian trawler is proposed. The hydrodynamic forces of the hull in calm water are estimated using the empirical formulas, which are based on the database of the several fishing vessels. The simulation of the standard maneuvering of the Russian trawler is conducted in the calm water and is checked using the International Maritime Organization (IMO) standards for ship maneuvering. Second, the unified model of the seakeeping and maneuvering which considers the effect of wind and waves is proposed. The wave forces which are estimated by the Three-dimensional panel program (ANSYS-AQWA) are used as a database when simulating the ship maneuvering in wind and irregular wave. The wind forces and moments acting on the Russian trawler are estimated using the empirical formulas, which are based on the database of the wind tunnel tests. Finally, the standard maneuvering of the Russian trawler is conducted in various directions of wind and irregular wave. The influence of wind and wave directions on drifting distance and drifting angle of the ship turning circle are discussed.*

## 1.Introduction

The maneuvering performance of a ship in actual sea is different from the one in calm water due to the wave-induced motion. It is crucial to account for the ship maneuverability in waves at the design stage. Previously, numerous researchers have investigated the ship maneuvering in waves. According to the ITTC's report (2011), there are four methods to predict the ship maneuvering in waves, which are experiment, two-time scale, unified theory and CFD (Computational Fluid Dynamics). Yasukawa (2006) proposed a method for estimating the hydrodynamic force components including added mass, wave damping and wave exciting forces. In their study, the basic motion equation was divided into two groups, that are high frequency induced motion problem and low frequency maneuvering problem. Yasukawa (2006, 2008) performed the free-running model test in regular waves using SR108 container ship. The experiment was conducted in various wave lengths in head sea and beam sea. Skejic and Faltinsen (2007, 2008) investigated the seakeeping and maneuvering analysis of two interacting ships based on two-time scale method. They focused on overtaking and replenishment maneuvers between two ships. Seo and Kim (2011) applied the linear and nonlinear ship motion analysis for analyzing ship maneuvering performance in the case of high amplitude waves. The maneuvering performance of the S-175 container ship was discussed with regard to wave slope. Also, the wave drift force is calculated using the direct pressure integration method. Skejic (2013) introduced the overview of maneuvering simulation of ships in a seaway in addition to the significant role of the unified maneuvering and seakeeping. Zhang et al. (2017) proposed the method for predicting the ship maneuvering of the S-175 container ship in regular waves. Wang and Wan (2018) presented a study on ship maneuvering in waves through a CFD solver called naoe-FOAM-SJTU. However, maneuverability of the trawler in wind and irregular wave has not yet investigated. This paper proposed the unified model of seakeeping and maneuvering for the prediction of the maneuverability of the Russian trawler in wind and wave. In this study, ANSYS-AQWA has been utilized to estimate the wave drift forces and moments. In addition, the wind forces and moments acting on the Russian trawler are estimated using the empirical formulas, which are based on the database of the wind tunnel tests. The standard maneuvering of the Russian trawler is conducted in calm water, wind and irregular wave and a discussion of the effect of operation scenario on turning trajectories is discussed.

## 2. Mathematical Formulation

### 2.1 Coordinate system

In order to predict ship maneuvering performance in wind and waves, two right-handed coordinate system are adopted, namely, an earth-fixed coordinate system $Ox_0y_0$ and a body-fixed

coordinate system $Oxy$ as shown in Fig. 1. The body-fixed coordinate system advances with ship's forward speed $U$ and rotates with a rotation speed $r$. In addition, $\delta$, $\psi$, $\mu$, $\beta$ and $\psi_A$ are rudder angle, heading angle, incident wave direction, drift angle and incident wave direction, respectively. The ship's position is expressed with respect to the earth-fixed coordinate system.

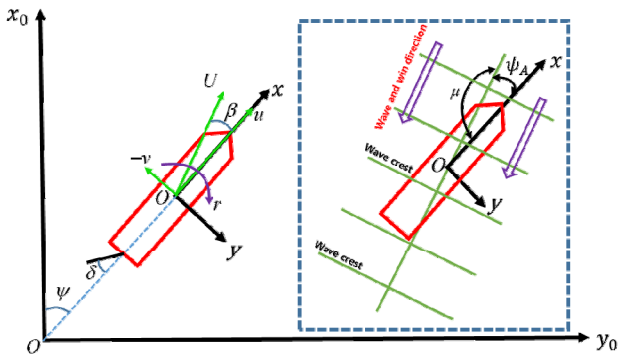



**Fig. 1** Maneuvering coordinate system in wave and wind

## 2.2 Equation of motion

In order to predict the ships' maneuverability, two types of hydrodynamic models are commonly used i.e. Abkowitz model and MMG (Maneuvering Modeling Group). In this study, MMG model for maneuvering motion in 3DOF was applied and is described as in Eq. (1). $m$ is the ship's mass and $x_G$ is the longitudinal position of ship's center of gravity. $u$ and $v$ are the component of the velocity in the x-axis and y-axis direction, respectively. $\dot{r}$ is the angular acceleration and $I_{zz}$ is the moment of inertia about z-axis. $X$ and $Y$ are the hydrodynamic forces and $N$ is the moment around the z-axis. The subscripts $H$, $P$, and $R$ denote the hydrodynamic forces due to the hull, propeller and rudder in calm water, respectively. The subscripts $W$ and $A$ denote the hydrodynamic forces induced by wave and wind, respectively.

$$\begin{aligned} m(\dot{u}-rv-x_G r^2) &= X_H+X_R+X_P+X_W+X_A \\ m(\dot{v}+ur+x_G\dot{r}) &= Y_H+Y_R+Y_W+Y_A \\ I_{zz}\dot{r}+mx_G(\dot{v}+ur) &= N_H+N_R+N_W+N_A \end{aligned} \quad (1)$$

## 2.3 Hull force

In this study, the mathematical model of hydrodynamic forces which was suggested by Yoshimura and Ma (2003) was used to predict the ship's maneuvering performance in calm water. They proposed the empirical formulas to predict the hydrodynamic derivatives based on the data base of hydrodynamic derivatives with several fishing vessels including recent European wide beam vessel. $X_H$, $Y_H$, and $N_H$ are modeled as a function of non-dimensional sway velocity and non-dimensional yaw rate using Eq. (2). The hydrodynamic derivatives of polynomials are estimated based on empirical formulas for fishing vessel suggested by Yoshimura and Ma (2003).

$$\begin{aligned} X_H &= -X_o+\frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2\left(X'_{vv}v'^2+X'_{rr}r'^2+X'_{vr}v'r'+X'_{vvvv}v'^4\right) \\ Y_H &= \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2\left(Y'_{v}v'+Y'_{r}r'+Y'_{vvv}v'^3+Y'_{vvr}v'^2r'+Y'_{vrr}v'r'^2+Y'_{rrr}r'^3\right) \\ N_H &= \frac{1}{2}\rho L_{pp}^2dU^2\left(N'_{v}v'+N'_{r}r'+N'_{vvv}v'^3+N'_{vvr}v'^2r'+N'_{vrr}v'r'^2+N_{rrr}r'^3\right) \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.4 Rudder force

Rudder force and moment can be estimated through the combination of the interaction factor and the rudder normal force using Eq. (3). $F_N$ represents the rudder normal force, $t_R$ represents the steering resistance deduction factor, and $a_H$ is the rudder force increase factor, representing the additional lateral force acting on ship via steering. $x_R$ is the longitudinal position of rudder, and $x_H$ is the longitudinal acting point of the additional lateral force component. The rudder normal force is expressed as in Eq. (4). $A_R$ represent the rudder area, $\Lambda$ represents the rudder aspect ratio, while, $v_R$, and $u_R$ are the lateral and longitudinal inflow velocity induced by propeller rotation to the rudder, respectively. $U_R$ represents the resultant inflow velocity to rudder and $f_\alpha$ represents the rudder lift gradient coefficient. $\eta$ denotes the ratio of the propeller diameter to the rudder span. $\kappa$ represents the interaction between propeller and rudder. $\epsilon$ represents a ration of wake fraction at rudder position to that of the propeller position. $\alpha_R$ denotes the effective inflow angle to a rudder. $\gamma_R$ is the flow straightening coefficient, $\beta_R$ represents the effective inflow angle to rudder in maneuvering motion. $w_P$ represents the wave coefficient at propeller position in maneuvering motion. $l'_R$ is treated as an experimental constant for expressing $v_R$ accurately. The interaction force coefficient $t_R$, $a_H$, $l'_R$, $\gamma_R$ and $\epsilon$ can be obtained from Yoshimura and Ma's empirical formulas for the fishing vessel.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)F_N\sin\delta \\ Y_R &= -(1+a_H)F_N\cos\delta \\ N_R &= -(x_R+a_H x_H)F_N\cos\delta \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_N = \frac{1}{2}\rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin\alpha_R \quad (4)$$

where, $f_\alpha = \dfrac{6.13\Lambda}{\Lambda+2.25}$, $U_R = \sqrt{u_R^2+v_R^2}$

$$\alpha_R = \delta-\tan^{-1}\left(\frac{v_R}{u_R}\right)\approx\delta-\frac{v_R}{u_R}$$

$v_R = U\gamma_R\beta_R$ and $\beta_R = \beta-l'_R$

$$u_R = \epsilon u(1-w_P)\sqrt{\eta\left\{1+\kappa\left(\sqrt{1+\frac{8K_T}{\pi J_P^2}}-1\right)\right\}^2+(1-\eta)}$$

### 2.4 Propeller force

The longitudinal force of the propeller $X_P$ can be estimated using Eq. (5). $t_P$, $\rho$ and $D_P$ are the thrust deduction factor, the water density, and the diameter of the propeller, respectively. The thrust deduction factor $t_P$ is assumed to be constant at any given propeller load for simplicity. $K_T$ is the thrust coefficient and can be expressed as the 3rd polynomial of propeller advance ratio $J_P$ using Eq. (6), $k_0$, $k_1$, $k_2$ and $k_3$ are coefficients representing $K_T$.

$$X_P(u,n) = (1-t_p)\,T \tag{5}$$

$$K_T(J_P) = k_0 + k_1 J_P + k_2 J_P^2 + k_3 J_P^3 \text{ and } J_P = \frac{u(1-w_P)}{n_P D_P} \tag{6}$$

where, $T = \rho n_P^2 D_P^4 K_T(J_P)$

### 2.5 Wave drift force and moment

The wave-induced steady forces in irregular waves can be estimated using Eq. (7). $\rho$, $H_{1/3}$ and $g$ denote the water density, the significant wave height and the gravity acceleration, respectively. $\overline{C}_{XW}$, $\overline{C}_{YW}$ and $\overline{C}_{NW}$ denote the average value of wave-induced steady force and moment coefficients in irregular waves estimated using Eq. (8). These coefficients are stored in files and used as databases when simulating the ship's maneuverability in irregular waves. $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ and $G(\theta)$ denote the wave spectrum and the wave direction distribution function, respectively. ITTC spectrum is used as the wave spectrum $S_{\zeta\zeta}$. The cosine-squared spreading function is used as the wave direction distribution function $G(\theta)$. $C_{XW}(\omega,\chi)$, $C_{YW}(\omega,\chi)$ and $C_{NW}(\omega,\chi)$ denote the wave-induced steady force and moment coefficient in regular waves. These coefficients can be expressed as a function of the wave direction $\mu$ and the wave frequency $\omega$.

$$X_W = \rho g H_{1/3}^2 L_{pp} \overline{C}_{XW}(T,\chi)$$
$$Y_W = \rho g H_{1/3}^2 L_{pp} \overline{C}_{YW}(T,\chi)$$
$$N_W = \rho g H_{1/3}^2 L_{pp}^2 \overline{C}_{NW}(T,\chi) \tag{7}$$

$$\overline{C}_{XW}(T,\chi) = 2\int_{-\pi}^{\pi} G(\theta)d\theta \int_0^{\infty} C_{XW}(\omega,\chi)\frac{S_{\zeta\zeta}(\omega)}{H_{1/3}^2}d\omega \tag{8}$$

$$\overline{C}_{YW}(T,\chi) = 2\int_{-\pi}^{\pi} G(\theta)d\theta \int_0^{\infty} C_{YW}(\omega,\chi)\frac{S_{\zeta\zeta}(\omega)}{H_{1/3}^2}d\omega$$

$$\overline{C}_{NW}(T,\chi) = 2\int_{-\pi}^{\pi} G(\theta)d\theta \int_0^{\infty} C_{NW}(\omega,\chi)\frac{S_{\zeta\zeta}(\omega)}{H_{1/3}^2}d\omega$$

### 2.6 Wind force and moments

The hydrodynamic forces due to wind can be obtained using the empirical formula of Kitamura et al. (2012), which based on wind tunnel test by Eq. (9). $L_{OA}$ is length overall of the ship, $A_F$ is frontal projected area, $A_L$ is lateral projected area, $C$ is distance from mid-ship to $A_L$ centroid. $H_C$ is height of $A_L$ centroid from the calm water level. $C_{LF}$, $C_{XLI}$, $C_{ALF}$, $C_{CF}$ and $C_{YLI}$ are coefficients of the multiple regression formulae. The hydrodynamic coefficients due to wind can be estimated using Eq. (10).

$$X_A = \frac{1}{2}\rho_A A_F U_A^2 C_X(\psi_A) \tag{9}$$

$$Y_A = \frac{1}{2}\rho_A A_L U_A^2 C_Y(\psi_A)$$

$$N_A = \frac{1}{2}\rho_A A_L L_{OA} U_A^2 C_N(\psi_A)$$

$$C_X(\psi_A) = C_{XLI}\left(\sin\psi_A - \frac{1}{2}\sin\psi_A\cos^2\psi_A\right)\sin\psi_A\cos\psi_A + C_{LF}\cos\psi_A + C_{ALF}\sin\psi_A\cos^3\psi_A \tag{10}$$

$$C_Y(\psi_A) = C_{YLI}\left(\cos\psi_A - \frac{1}{2}\sin^2\psi_A\cos\psi_A\right)\sin\psi_A\cos\psi_A + C_{CF}\sin^2\psi_A$$

$$C_N(\psi_A) = C_Y(\psi_A)L_N(\psi_A) = C_Y(\psi_A)\left[0.927\frac{C}{L_{OA}} - 0.149\left(\psi_A - \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

## 3. Numerical method

### 3.1 Simulation condition

In order to investigate the ship maneuverability of the Russian trawler, which is designed by DEAHEA Ship Design Corporation is selected as a case study as shown in Fig. 2. The principal dimensions of the Russian trawler are listed in Table 1.

**Table 1** Principal dimension of Russian trawler

| Item | Unit | Symbol | Value |
|---|---|---|---|
| Ship length | m | $L_{pp}$ | 32.45 |
| Breath | m | $B$ | 9.00 |
| Displacement | ton | $\triangle$ | 587 |
| Draft at bow | m | $d_f$ | 2.40 |
| Draft at stern | m | $d_a$ | 3.34 |
| Mean draft | m | $d$ | 3.00 |
| Effective mean | m | $d_{em}$ | 3.49 |
| Block coefficient (by $d_{em}$) | - | $Cb$ | 0.559 |

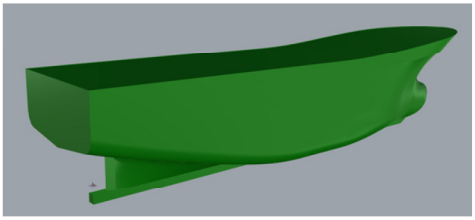


**Fig. 2** Geometry of the Russian trawler

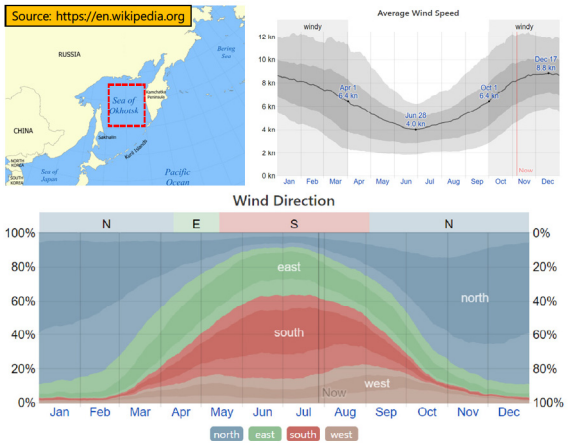



**Fig. 3** Operation scenario in Sea of Okhotsk (Weather Spark's website)

**Table 2** Operation scenario in Sea of Okhotsk

| Item | Apr-May | May-Sep | Sep-Apr |
|---|---|---|---|
| Wind direction | East wind (38%) | South wind (50%) | North wind (89%) |
| Average wind speed | 4 knots | | 6.4 knots |
| Maximum wind speed | 10 knots | 10 knots | 12 knots |

**Table 3** Hydrodynamic coefficients

| Hull coefficients | Value | Hull coefficients | Value |
|---|---|---|---|
| $X'_{vv}$ | -4.06E-02 | $Y'_{vvr}$ | 7.55E-02 |
| $X'_{rr}$ | -6.90E-03 | $Y'_{vrr}$ | -4.50E-01 |
| $X'_{vr}$ | -1.59E-01 | $N'_{v}$ | -1.35E-01 |
| $X'_{vvvv}$ | 3.87E-01 | $N'_{vvv}$ | -3.37E-01 |
| $Y'_{v}$ | -6.10E-01 | $N'_{r}$ | -6.99E-02 |
| $Y'_{vvv}$ | -1.36E+00 | $N'_{rrr}$ | -8.20E-03 |
| $Y'_{r}$ | 5.45E-02 | $N'_{vvr}$ | -4.62E-01 |
| $Y'_{rrr}$ | -1.75E-02 | $N'_{vrr}$ | -1.81E-02 |

The standard maneuvers of the trawler in calm water was conducted for the constant propeller revolution. The propeller revolution is selected to produce a speed of 12 knots when the trawler vessel moves forward in calm water. In addition, the simulation of turning circle are conducted in wind and irregular wave based on the operation scenarios in the Sea of Okhotsk. The maximum wind speed is selected for the simulation. In the Sea of Okhotsk, the average wind speed and the wind direction at 10 m above the ground is obtained based on the information on the Weather Spark's website. The wind speed and wind direction change dramatically and is dependent on the seasonal variation. Fig. 3 shows the wind speed and wind direction in Sea of Okhotsk. The comparison of wind speed and direction in the various seasons presented as in Table 2.

### 3.2 Hydrodynamic coefficients

The hydrodynamic coefficients of the trawler are estimated based on the Yoshimura and Ma's empirical formulas. The hydrodynamic coefficients of the trawler are listed as in Table 3. The interaction coefficients among hull, propeller, and rudder are also estimated based on the Yoshimura and Ma's empirical formulas as listed in Table 4.

**Table 4** Interaction coefficients

| Interaction coefficients | Value | Interaction coefficients | Value |
|---|---|---|---|
| $1-t_R$ | 0.853 | $\gamma_R$ | 0.458 |
| $a_H$ | 0.048 | $\epsilon$ | 0.995 |
| $x'_H$ | -0.450 | $\kappa$ | 0.428 |
| $l'_R$ | -0.936 | - | - |

### 3.3 Hydrodynamic forces due to wave

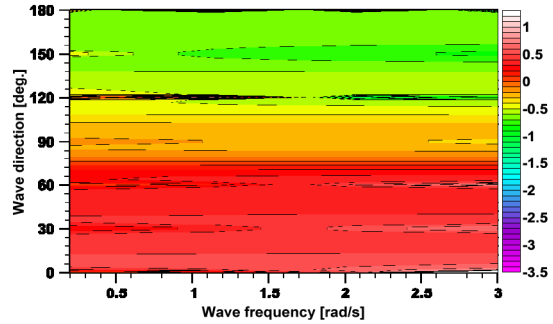
Fig. 4 shows the wave drift force and moment in various wave directions and wave frequencies. The trend of surge drift force has a similar tendency to the overall trend of surge drift force in the head sea. The maximum value of surge drift force occurs at low wave frequencies, where the wavelength is greater than the ship's length. The surge force drift decreases gradually with an increase in the wave frequency and wave direction, and almost disappears in following sea. The maximum value of the sway drift force occurs at low wave frequency and in oblique sea, especially at a wave direction of 120 degrees. The sway force decreases gradually as the wave frequency decreases and it almost disappears in the head sea and the following sea. When the wave directions are 180 degrees and 0 degrees, a small value of the sway drift force without a distinct peak value is observed. The maximum value of yaw drift moment occurs in oblique sea, especially at wave directions of 150 degrees and 60 degrees. The yaw drift moment increases significantly at low wave frequency, while it decreases gradually as the wave frequency increases, and it almost disappears in the head sea and the following sea.

### 3.4 Drifting distance and drifting angle

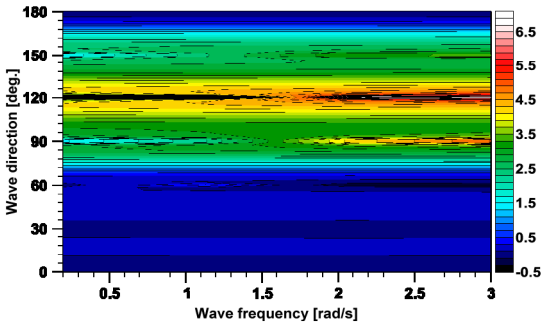
In order to analyze the turning trajectories in irregular wave and wind, the drifting distance and the drifting angle which are suggested by Kim et al. (2019) are discussed. The drifting distance $Ddr$ is the distance between lines which are perpendicular to the tangent to the turning trajectory. For example, $Ddr_{90-450}$ represents the magnitude of vector between two points which corresponds to the heading angle of 90 degrees and 450 degrees. The drifting angle $Adr$ is the angle between the ship's

approach direction in x direction and tangential line of the turning trajectory. For instance, $Adr_{90-450}$ represents the angle between the ship's approach direction in x direction and the tangential line of two points which corresponds to the heading angle of 90 degrees and 450 degrees. The relative drift angle $Rdr$ is the angle between the wave propagation direction and the drifting angle, which can be estimated using Eq. (11).

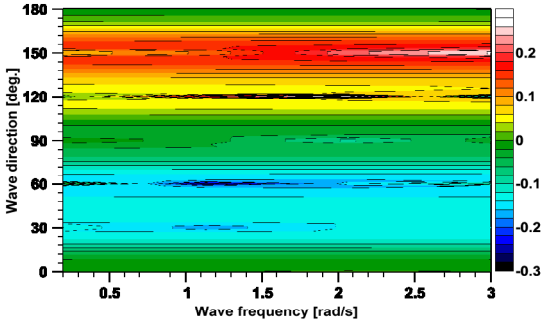
$$Rdr = sign(\delta)(\chi - Adr) \tag{11}$$




a) Surge drift force




b) Sway drift force



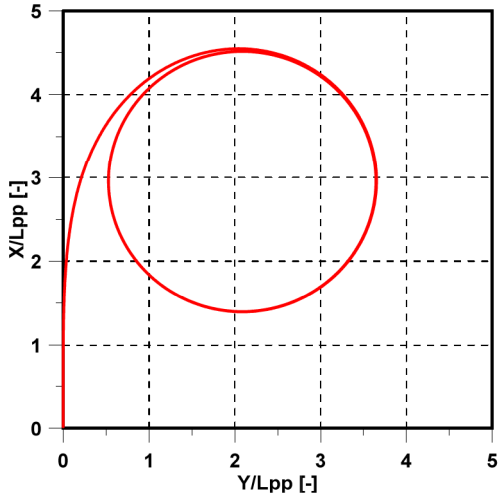

c) Yaw drift moment

**Fig. 4** Wave drift forces and moment

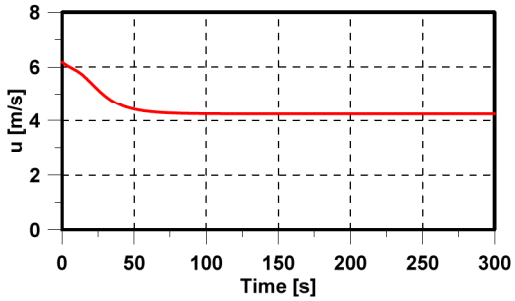
## 4. Result and discussion

### 4.1 Turning circle in calm water

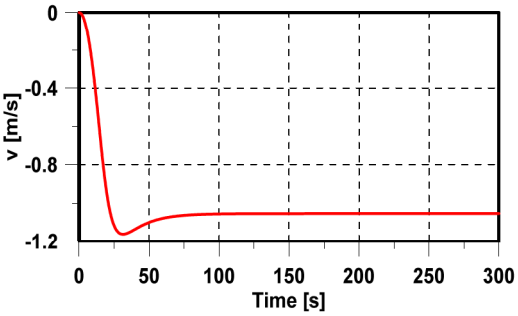
The predicted turning trajectories of the trawler in calm water is shown as in Fig. 5. The result of advance and tactical diameter of the trawler are compared to the one suggested by the IMO's standards for ship maneuverability as shown in Table 5. The increased resistance to turning and lateral motion is reflected in the ship's surge velocity and sway velocity in regards to its turning maneuvers as shown in Fig. 5.



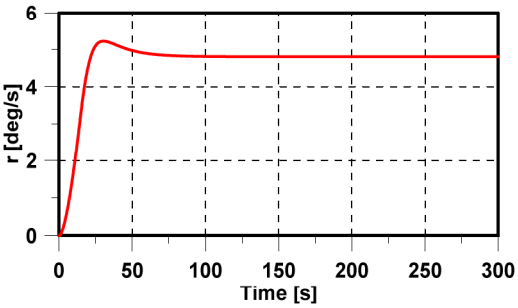

a) Ship trajectory




b) Surge velocity




c) Sway velocity

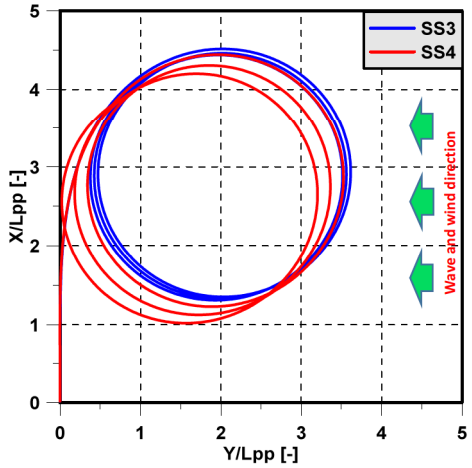



d) Yaw rate

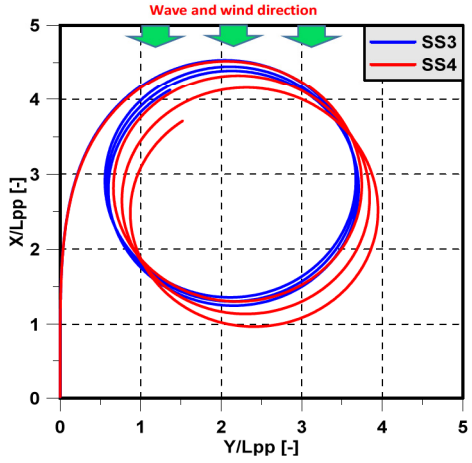
**Fig. 5** Turning circle in calm water

**Table 5** Maneuver parameter in turing circle in calm water

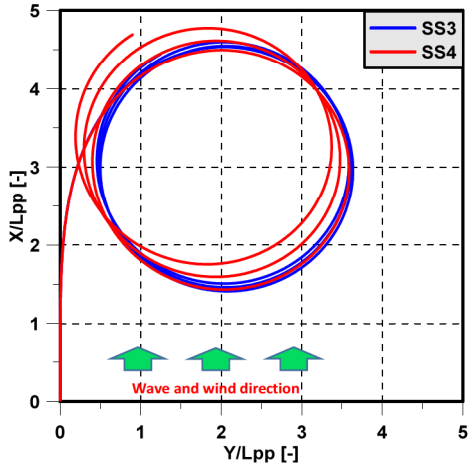
| Item | Trawler | IMO standard |
|---|---|---|
| Advance | 4.496 | 4.5 |
| Tactical diameter | 3.600 | 5.0 |




a) East wind




b) North wind

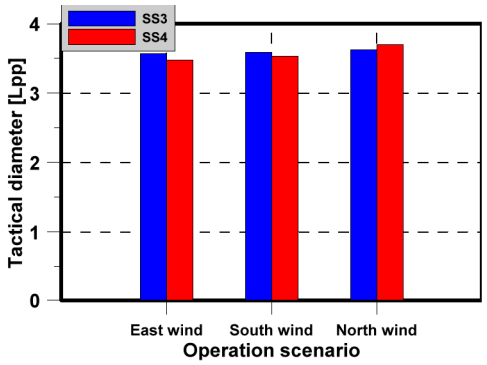



c) South wind

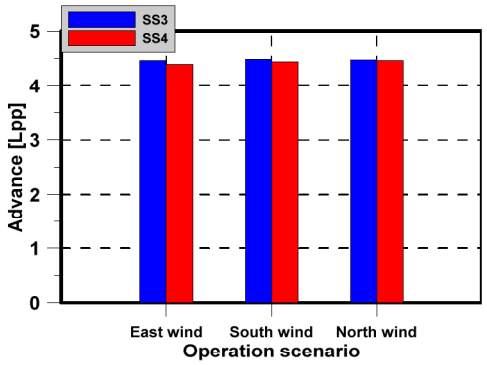
**Fig. 6** Turning circle in wind and irregular wave

### 4.3 Turning circle in wind and wave

In order to investigate the effect of the operation scenario, the turning circle of trawler is performed in wind and irregular wave. The wave direction is similar to the wind direction. Maximum wind speed is selected in this simulation. Fig. 6 shows the turning trajectories of the trawler in operation scenario for various wind directions. It can be seen that the wind direction and significant wave height has a dominant effect on the turning trajectories of the trawler. The advance and tactical diameter of the trawler changes slightly when the ship turns in wind and irregular waves as shown in Fig. 7. The wave and wind direction has the a slight effect on the advance and tactical diameter of the trawler. Fig. 8 shows the drifting distance and drifting direction for various wind directions. It can be seen that the North wind has the dominant influence on turning trajectory of the turning circle of the trawler. Especially, when the ship moves in the North wind, the value of the drifting distance is bigger than in the East wind and the South wind as shown in Fig. 8. The South wind has the smallest influence on the drifting distance. The drifting direction is almost parallel to the wind and the wave propagation direction.




a) Tactical diameter

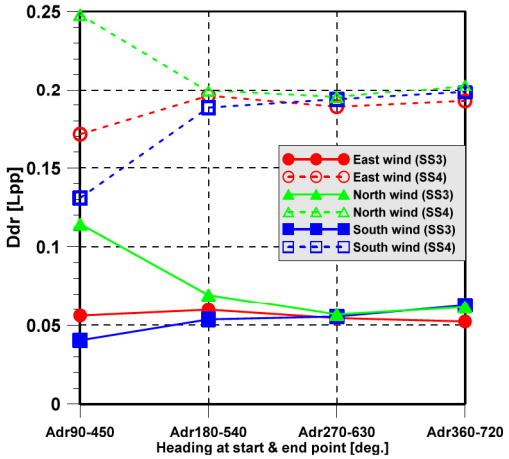



b) Advance

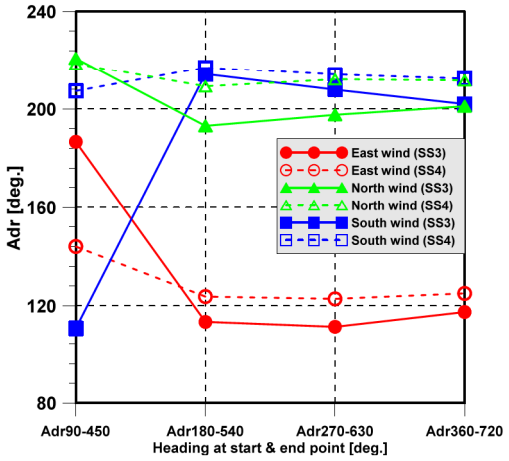
**Fig. 7** Maneuver parameters in wind and wave

Fig. 9 shows the maneuvering motion including the surge velocity, the sway velocity and the yaw rate in various wind directions and the significant wave height. It can be seen that the

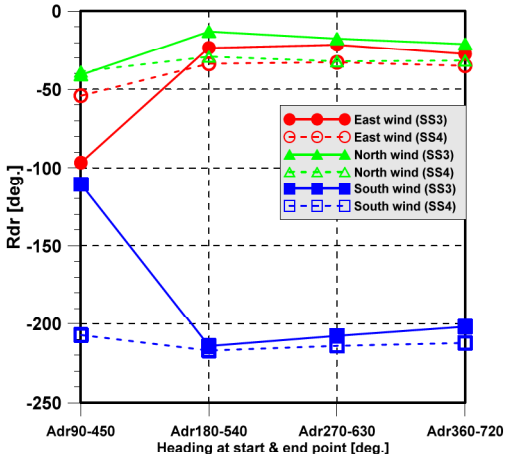
approach surge velocity in various wind directions are almost similar to the approach surge velocity in calm water, while the sway velocity and the yaw rate are largely oscillated in wind and irregular wave. In the North wind, the sway velocity and the yaw rate at SS4 (sea state 4) take a long time to obtain the constant value in the initial turning circle.




a) Drifting distance

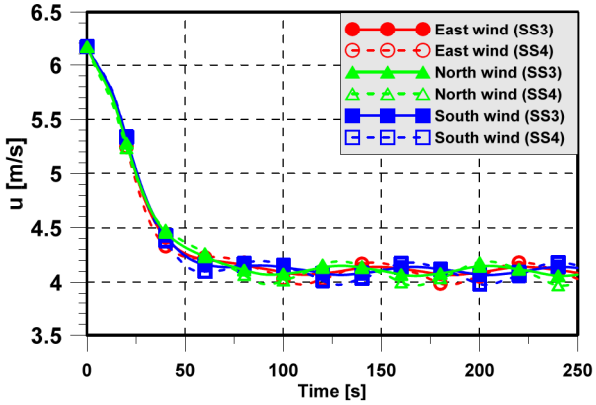



b) Drifting angle

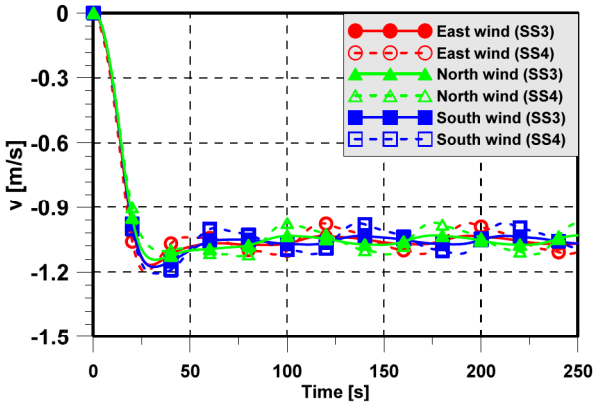



c) Relative drifting angle

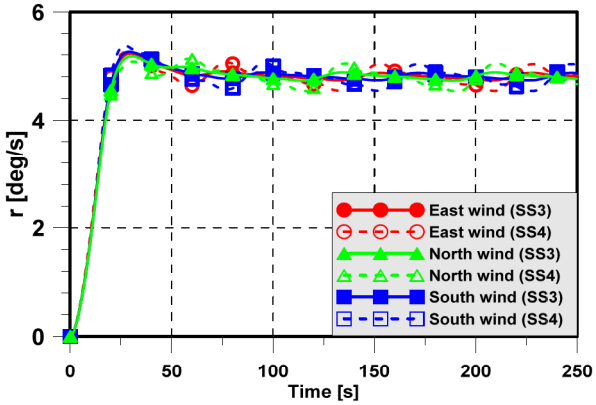
**Fig. 8** Drifting parameters of turning circle in wind and wave




a) Surge velocity




b) Sway velocity




c) Yaw rate

**Fig. 9** Comparison of maneuvering motion in wind and wave

Although the speed at the beginning of a turn is quite different due to wind direction, the histories of speed variations in various wind directions become similar during the steady turns as shown in Fig. 9. That is the reason why the drifting distance and the drift angle are quite different at initial turning circle, but theses value become similar after the second and third turning circles. From the results of the relative drifting angle which show the difference in angle between the propagation direction and the drifting angle, it can be concluded that the drifting direction is similar to the wind and wave propagation direction when the ship

gets to the second and third turning circles.

## 5. Conclusion

In this paper, the turning circle in calm water, wind and irregular wave of the trawler was simulated using the unified model of seakeeping and maneuvering. The concluding remarks are as follows:

The operation scenario of the trawler in the Sea of Okhotsk is analyzed. The hydrodynamic coefficients of the trawler are estimated using the empirical formulas which are based on the databases of several fishing vessels. The hydrodynamic forces due to wind and irregular waves are estimated for simulating ship maneuvering in wind and wave. The wave drift force and moment in irregular waves are estimated by applying the short-term prediction technique based on the wave drift force and moment coefficients in regular waves.

The standard maneuvers parameters in calm water are checked and satisfied with the criteria of IMO standard for the ship maneuverability. The North wind has the dominant effect on the advance and the tactical diameter as well as the turning trajectories of the trawler. The drifting distance and drifting angle become similar after the second and third turning circles although theses value are quite different at the beginning of the turn. The drifting direction is similar to the wind and wave propagation direction when the ship gets the second and third turning circles.

## Acknowledgement

This research was supported by the ‘Development of Autonomous Ship Technology (2019-2020, Development of autonomous system having intelligent navigation decision making function)’ funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (MOF, Korea).

## References

ITTC, (2011), Final report and recommendation to the 26th ITTC.

Yasukawa, H., (2006), Simulations of ship maneuvering in wave (1st report: turning motion), Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 127-136.

Kim, D.H., Yun, K.H., Park, J.Y., Yeo, D.J., and Kim, Y.G., (2019), Experiment investigation on turning trajectories of KVLCC2 tanker in regular waves, Ocean Engineering, pp. 197-206.

Skejic, R. and Faltinsen, O., (2007), A unified seakeeping ad maneuvering analysis of two interacting ships, Proceedings of ICHD, pp. 209-218.

Skejic, R. and Faltinsen, O., (2008), A unified seakeeping and maneuvering analysis of ships in regular waves, Journal of Marine Science and Technology, pp. 371-394.

Seo, M. G., Kim, Y. H., Kim and K. H., (2011), Effects on nonlinear ship motion on ship maneuvering in large amplitude waves, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 516-527.

Skejic, R., (2013), Ships Maneuvering Simulations in a Seaway – How close are we to reality?, Proceedings of International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models, pp. 91-101.

Wang, J. H. and Wan, D. C., (2018), CFD Investigations of Ship Maneuvering in Waves Using naoe-FOAM-SJTU Solver, Journal of Marine Science and Application, pp. 1-16.

Yasukawa, H., (2008), Simulations of ship maneuvering in waves (2nd report: ziz-zag and stopping maneuvers), Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, pp. 163-170.

Zhang, W., Zou Z. J. and Deng D. H, (2017), A study on prediction of ship maneuvering in regular waves, Ocean Engineering, pp. 367-381.

Yoshimura, Y. and Ma, N., “Maneuvering prediction of fishing vessels”, Proceeding of MARSIM’03 Conference, 1-11, 2003.

https://weatherspark.com

# 절단계류를 고려한 KRISO 표준 반잠수식 해양구조물 (KSEMI)의 내항성능 및 wave run-up 모형시험 평가

서민국·박병원· 김남우·김병완 ·김진하 (선박해양플랜트연구소)

본 연구는 KRISO 표준 반잠수식 해양구조물의 내항성능 및 wave run-up을 확인하기 위해서 절단계류를 포함한 모형시험을 수행하였다. KRISO 표준 반잠수식 해양구조물은 300m 수심에서 운용이 가능한 석유 시추선이며, 환경조건에 맞도록 계류선이 포함되어 설계된 구조물이다. 모형시험은 대전 해양공학수조에서 수행하였으며, 수조의 크기 및 재현환경의 조건을 고려하여 1/50 축적비를 적용하였다. 계류선은 수심 및 앵커 포인트의 위치를 해양공학수조에서 정확하게 모사할 수 없기 때문에 절단계류를 고려하였다. 절단계류 설계시 목표는 크게 두 가지이며, 계류선이 연결되었을 때 초기 장력이 같을 것, x, y방향으로의 pull out test시 복원력이 동일하게 나올 것이다. 이러한 조건을 만족하는 절단계류선을 설계, 제작하였으며, 이를 활용하여 모형시험을 수행하였다.
반잠수식 해양구조물에서 중요하게 살펴봐야 할 항목 중 하나는 선수의 wave run-up 및 수평방향 파랑 충격하중이다. 2015년 북해에서 운용 중이던 반잠수식 석유시추선의 horizontal wave impact에 의한 인명 사고 이후, DNV-GL OTG 13, 14이 발표되었으며 선수 측면에서의 wave run-up 및 수평방향 파랑 충격하중은 반잠수식 해양구조물에서 중요하게 확인해야 하는 항목이 되었다. 본 모형시험에서 이를 추정하기 위해서 survival condition의 홀수 조건 및 환경 조건을 선택하였으며, 선수 쪽에 다수의 상대파고계를 다수 설치하여 wave run-up을 계측하였다.

**Key words**: KRISO 표준 반잠수식 해양구조물, KSEMI, 절단계류, wave run-up

Acknowledgement

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서 주요사업으로 수행중인 “심해공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발 (PES3480)” 과제에 대한 연구결과의 일부입니다.

# 수증기 잠열을 이용한 수소 연료전지 추진 선박용 메탄올 수증기 개질 시스템의 엑서지 분석 및 연소기 최적 운전 방법에 대한 연구

조희주* · 최정호*
*동아대학교 조선해양플랜트공학과

# An Study on the Exergy Analysis of the Methanol Steam Reforming System Using Latent Heat of Steam for Hydrogen Fuel Cell Propulsion Ship and Optimal Operation Method of the Burner

Hee-Joo Cho*, Jungho Choi*
*Dept. of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University, Busan, Korea*

**KEY WORDS:** Hydrogen fuel cell propulsion, Methanol steam reforming, Latent heat, Exergy analysis, Multi-stage burner, Optimization

**ABSTRACT:** *As IMO's carbon dioxide regulations have been strengthened from 2050, various methods are emerging to cope with them. Among the various methods, the hydrogen fuel cell propulsion can be a good methods to meet the regulation. Therefore, this study modeled methanol steam reforming system using latent heat and optimized the system through exergy analysis.*

## 1. 서 론

지난 2018년 4월 MEPC(Marine environment protection committee) 72차 회의에서 2050년까지 국제 해운분야 연간 GHG(Greenhouse gas)배출량을 2008년 대비 약 50% 이상 감축하도록 협의하였다(Joung et al., 2020; IMO 2019). 이러한 GHG 규제를 만족시키기 위한 대응 방안으로는 선박 에너지 이용 효율 개선, 선속/운항 최적화, 대체 연료 사용 등이 있다. 이때, 연료전지 추진은 본 규제를 만족하기 위한 좋은 방안이 될 수 있다(Van et al., 2016). 수소 연료전지는 디젤 엔진에 비해 NOx, SOx 및 PM, CO2 배출이 적다는 장점이 있어 위와 같은 환경 규제를 극복할 수 있는 좋은 대안으로 떠오르고 있다(Rho et al., 2019).

Rivard et al.(2019) 에 따르면 수소는 총 10가지 방법으로 (Compressed, Liquid, Cold/cryo compressed, MOF, Carbon nanostructure, Metal hydrides, Metal borohydrides, Kubas-type, LOHC, Chemeical)으로 저장될 수 있다. 이 중 액체 수소 저장은 중량 및 체적 대비 에너지 밀도가 높고 대기압에서 저장할 수 있다는 장점이 있지만 끓는점이 -252.88℃로 극저온이라는 단점이 있다.

이러한 수소 저장 한계를 극복하기 위한 방법으로는 탄화수소를 개질하여 수소를 생산하는 방법이 있다. 수소를 생산하기 위한 탄화수소의 종류로는 디젤 (Ming et al., 2002; Boon et al., 2011), 가솔린 (Ming et al., 2002; Moon et al., 2001), 에탄올 (Ehteshami and Chan, 2014; Klouz et al., 2002), 메탄올 (Ehteshami and Chan, 2014; Ishihara et al., 2004) 등이 있다. 이 중 메탄올은 다른 연료에 비해 개질 온도가 약 200~350℃로 낮아 개질하기 쉽고, 탄소 대비 수소 비율이 1:4로 높아 많은 양의 수소를 생산할 수 있다는 장점이 있으며 끓는점이 65℃로 상압, 상온에서 액체 상태로 저장이 가능하다(Sa et al., 2009; Herdem et al., 2015). 메탄올을 개질하는 방법으로는 수증기 개질 (SR, Steam Reforming), 부분산화 개질 (POx, Partial oxidation reforming), 자열 개질 (ATR, Autothermal reforming) 등이 있다 (Dagle, 2007). 이 중 수증기 개질은 다른 개질 방법에 비해 상대적으로 고순도의 수소를 생산할 수 있기 때문에 수소 생산 공정에서 많이 이용된다(Faungnawakij et al., 2006). 이러한 장점으로 인해 메탄올 수증기 개질에 관한 연구는 많이 진행되고 있다. Ozcan and Akin(2019)은 메탄올 수증기 개질 공정의 최적화를 위해 Aspen Plus와 RSM (Response surface methodology)를 이용해 공정 최적화를 진행하였다. 그 결과 개질 온도가 246℃이고, 개질 압력이 1atm, SCR이 5.6일 때 메탄올 전환율과 수소 수율이 가장 높고 일산화탄소 수율이 가장 낮은 최적 운전점을 도출했다. Jung et.al.(2020)은 수중무기체계 공기불요추진 (AIP, Air independent propulsion) 시스템에 개질형 연료전지를 적용하기 위해 디젤, 가솔린, 에탄올, 메탄올 연료 개질 시스템을 비교하고 분석하였다. 그 결과 메탄올 연료 개질 시스템이 가장 적은 공간을 차지하고, $CO_2$ 발생량이 가장 적은 것을 알 수 있었다. 또한 SCR 1.5, 개질 온도 260~270℃에서 개질 효율 77.8%로 가장 높음을 보였다. 위의 선행 연구들은 대부분 공정변수에 따른 전환율, 개질 효율, $H_2$ 수율 등 개질기에 초점을 맞춰 연구를 진행하였다. 그러나 개질기 전체 플랜트에 대한 연구도 필요하다. 또한 대부분 연료전지 스택 후단의 잔여 $H_2$를 연소시켜

열을 회수하여 개질기 흡열 반응에 필요한 열량을 제공하는 직접 가열 방식을 채택하고 있다. 직접 가열 방식은 구성이 단순하다는 장점이 있지만 불균일한 개질기 온도 분포를 야기할 수 있다는 단점이 있다. 특히 발전용 연료전지와는 달리 부하 변동이 잦은 선박용 연료전지에서는 이러한 온도 구배가 더 커질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수증기 잠열을 이용한 간접 가열 방식 메탄올 수증기 개질 플랜트의 시스템 엑서지 분석을 진행하고, 최적의 연소기 운전 방법을 제안한다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 메탄올 수증기 개질기 시스템 구성

본 연구에서 사용된 메탄올 수증기 개질 시스템은 믹서(Mixer), 예열기(Pre-heater), 기화기(Evaporator), 개질기(Reformer), 열교환기(HEX), $H_2$ Filter, 연소기(Burner), 수소 쿨러(Hydrogen cooler)로 구성된다. 메탄올 수증기 개질 시스템의 BFD(Block flow diagram)은 아래 Fig. 1에 도시하였다.

메탄올과 물은 믹서에서 혼합되고 예열기에서 연소 가스와의 열교환으로 1차 기화된 후 기화기에서 스팀과의 열교환으로 완전 기화된다. 완전 기화된 메탄올-물 혼합물은 개질기에서 다량의 수소를 포함하는 개질 가스로 전환된다. 이후 HEX-1에서 $H_2$ Filter의 작동 온도 조건까지 개질 가스를 가열한 뒤 $H_2$ Filter에서 Product와 Byproduct로 분리된다. Byproduct는 연소기로 들어가 산화제와 반응하여 연소 가스를 생성한다. 생성된 연소 가스는 먼저 개질 가스를 $H_2$ Filter의 작동 온도까지 높이기 위해 사용되고, 메탄올-물 혼합물의 예열에 사용된다. 이후 연소 가스는 HEX-2에서 냉각된다. 연소기로부터 발생된 연소열은 열교환기를 통해 물을 스팀으로 변환하는 데 사용된다. 발생된 스팀은 먼저 메탄올-물 혼합물을 완전 기화시키고, 남은 잠열을 이용하여 개질기 흡열 반응에 필요한 열을 일정하게 제공한 후 HEX-3에서 냉각된다. Product는 수소 쿨러에서 Cooling water와의 열교환에 의해 냉각된다.

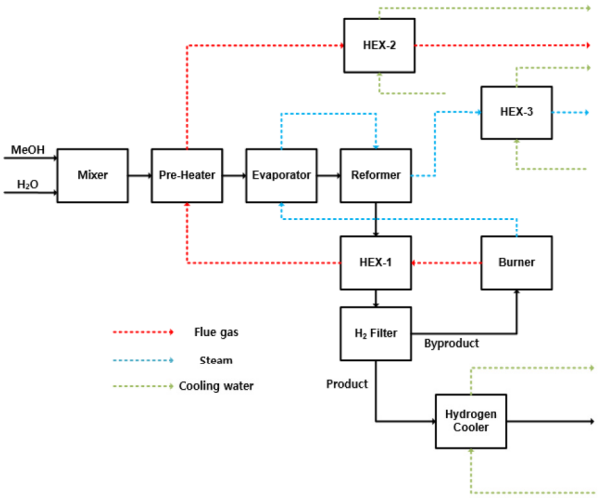



**Fig. 1** Block flow diagram of methanol steam reforming system using latent heat.

### 2.2 개질기 모델링

메탄올 수증기 개질 반응은 메탄올 수증기 개질(MSR, Methanol steam reforming) 반응이라고 하는 하나의 전반응과 메탄올 분해(MD, Methanol decomposition) 반응, 수성가스전환(WGS, Water gas shift) 반응이라고 하는 2개의 부반응에 의해 진행된다(Sa et al., 2010).

$$MSR: CH_3OH + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 3H_2 \quad (1)$$

$$MD: CH_3OH \leftrightarrow CO + H_2 \quad (2)$$

$$WGS: CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

위의 식 (1)을 보면 알 수 있듯이 메탄올 수증기 개질 반응은 흡열 반응이다. 즉, 개질 반응이 정상적으로 이뤄지기 위해서는 지속적이고 안정적인 열원이 필요한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개질기 흡열 반응에 필요한 열원을 안정적으로 공급하기 위해 수증기의 잠열을 이용한다. 개질기 모델은 Gibbs 자유에너지를 최소화하는 방법으로 반응 평형을 계산하는 Gibbs reactor를 적용하였다(Chen et al., 2018).

### 2.3 $H_2$ Filter 모델링

$H_2$ Filter 모델은 팔라듐 필터를 참고하여 모델링 하였다. 팔라듐은 수소와 불순물이 포함된 가스에서 수소를 선택적으로 분리할 수 있는 대표적인 금속으로 99.9999% 이상의 고순도 수소를 만들 수 있다(Sa et.al., 2010). 팔라듐 필터는 입구 온도가 300℃ 이하면 금속 그리드 손상으로 인해 분리 성능이 저하될 위험이 있어 입구 온도를 450℃ 로 가정하고 분리 효율은 아래 식(4)에 따라 85% 로 가정하였다.

$$\eta_{H_2\,Filter} = \frac{H_2(mole/s)\,after\,filter}{H_2(mole/s)\,after\,steam\,reformer} \quad (4)$$

### 2.4 연소기 모델링

연소기 모델 역시 개질기 모델과 동일하게 Gibbs reactor를 이용하여 모델링하였다. Fig. 2와 같이 촉매 연소기와 열교환기를 기본 단위로 하여 총 6단으로 구성하였다. 연소 반응에 필요한 산화제는 공기로 설정하였으며 질소(79%), 산소(21%)로 가정하였다. 연소 온도는 촉매연소기의 열적 내구성을 고려하여 750℃ 로 설정하였고, 주입되는 공기 유량에 의해 제어되도록 하였다. 마지막 6단 연소기에서는 연소 후 반응물이 최종적으로 CO와 $H_2O$만 배출되도록 완전 연소시켰다. 이때, 완전 연소 시 연소 가스의 온도가 750℃ 이상 올라가는 것을 방지하기 위해 과잉 공기를 주입하여 연소기 후단 온도를 750℃ 로 제어하였다. 연소열에 의해 가열된 연소 가스는 열교환기에서 $H_2O$와의 열교환을 통해 스팀을 생성한다. 생성된 스팀은 기화기 및 개질기 흡열 반응에 필요한 열량을 제공한다(Ji et al., 2019). 이때, 스팀은 잠열 구간 내에서 운전되어야 하므로 기화기에서 필요한 열량과 개질기 흡열 반응에 필요한 열량을 이용하여 스팀 유량이 계산된다. 아래 식 (5)에 요구 스팀 유량의 계산식을 도시하였다.

$$\dot{m}_{steam} = \frac{Q_{MSR\,required} - Q_{Evaporator\,required}}{H_2O\,H_{Burner\,inlet} - H_2O\,H_{Burner\,outlet}} \quad (5)$$

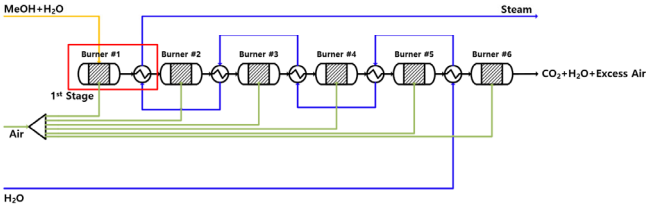



**Fig. 2** Configuration of burner.

## 3. 프로세스 시뮬레이션 및 운전 조건

본 연구에서는 메탄올 수증기 개질 시스템의 모델링을 위하여 상용 공정 모사 프로그램인 Aspen HYSYS V11(Aspen Technology, Inc.: Bedford, MA, USA)를 사용하였다. 모델링에 사용된 상태방정식(EOS, Equation of state)은 탄화수소 및 수소에 적합한 PR(Peng Robinson)이다. 아래 Fig. 3은 Aspen HYSYS V11을 이용해 메탄올 수증기 개질 시스템을 구현한 모습이다.

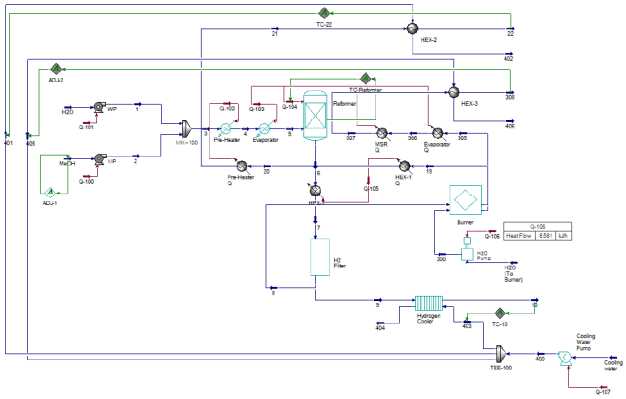


**Fig. 3** Process simulation of methanol steam reforming system.

메탄올 수증기 개질 시스템의 운전 조건 및 가정은 아래 Table 1에 도시하였다.

**Table 2** Operation condition & assumption

| Equipment | Operation condition | Assumption |
|---|---|---|
| Reformer | ・Temperature: 270℃<br>・Pressure: 5bara<br>・SCR: 1.5 | ・균질개질기<br>・Gibbs reator |
| $H_2$ Filter | ・Temperature: 450℃ | ・분리 효율: 85% |
| Burner | ・Temperature: 750℃<br>・Air flow rate: 연소기 후단 온도가 750℃가 되도록 유량 조절 | ・HEX shell & tube dP: 10kPa<br>・Gibbs reactor |
| Hydrogen Cooler | ・Product Temperature: 45℃ | ・LMTD: 100℃<br>・HEX shell & tube dP: 10kPa |
| HEX-2, HEX-3 | = | ・Min approach: 5℃<br>・HEX shell & tube dP: 10kPa |

## 4. 시스템 엑서지 분석

### 4.1 엑서지 이론

엑서지는 기준이 되는 환경과 상호작용하면서 이 환경과 평형 상태에 도달할 때 스트림으로부터 얻을 수 있는 유용한 에너지의 최대량으로 아래 식 (13)과 같이 정의된다(Tsatsaronis, 2007; Choi, 2018).

$$E_x = \dot{m}e_x = \dot{m}[(h-h_0) - T_0(s-s_0)] \quad (13)$$

여기서 h와 s는 각각 특정 엔탈피와 엔트로피이며 아래 첨자 0은 기준 환경 조건(25℃, 1atm)을 의미한다.

아래 Table 3은 각 단위장비 별 엑서지 파괴를 계산하는 식이다. 이때, 개질기 및 연소기의 비가역성은 펌프나 열교환기와는 달리 주로 화학적 반응에 지배되게 된다. 따라서 개질기 및 연소기의 엑서지 파괴는 화학적 엑서지($E_{x,Chem}$)와 물리적 엑서지($E_{x,Phys}$)의 합으로 표현된다. 아래 Table 4에는 본 연구에서 사용한 각 물질의 조성 별 화학적 엑서지($e_x^{Chem}$)를 나타내었다(Szargut et al., 1988).

**Table 3** Equation of exergy destruction of the equipments.

| Equipment | Exergy destruction |
|---|---|
| Pump, Compressor | $E_x = E_{x,in} + W_{in} - E_{x,out}$ |
| Heat Exchanger | $E_x = \sum(E_{x,in} - E_{x,out})_{hot} + \sum(E_{x,in} - E_{x,out})_{cold}$ |
| Reformer, Burner | $E_x = \sum(E_{x,in} - E_{x,out})_{Chem} + \sum(E_{x,in} - E_{x,out})_{Phys}$ |
| Heater | $E_x = E_{x,in} + Q_{in} - E_{x,out}$ |
| Cooler | $E_x = E_{x,in} - Q_{out} - E_{x,out}$ |

**Table 4** Standard molar chemical exergy of selected substances.

| Substance | Formula | Molar chemical exergy [kJ/kgmole] |
|---|---|---|
| Methanol | $CH_3OH(g)$ | 722,300 |
| Water | $H_2O(g)$ | 9,500 |
| Hydrogen | $H_2(g)$ | 236,100 |
| Carbon dioxide | $CO_2(g)$ | 19,870 |
| Carbon monoxide | $CO(g)$ | 275,100 |
| Nitrogen | $N_2(g)$ | 720 |
| Oxygen | $O_2(g)$ | 3,970 |

### 4.2 시스템 엑서지 분석 결과

시스템 엑서지 분석을 위해 SCR 1.5, 개질 압력 5bara, 개질 온도 270℃일 때로 고정하고 연구를 진행하였다.

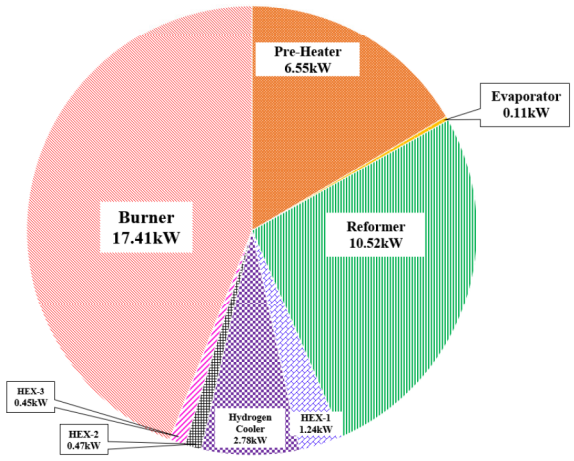



**Fig. 4** Exergy destruction of methanol steam reforming system. (Execess air)

위의 Fig. 4는 메탄올 수증기 개질 시스템의 엑서지 파괴 분포를 나타낸 것이다. 전체 엑서지 파괴는 39.53kW이며, 이 중 연소기가 17.41kW로 가장 엑서지 파괴가 크고 개질기(10.52kW), 예열기(6.55kW), 수소 쿨러(2.78kW), HEX-1(1.24kW), HEX-3(0.45kW), 기화기(0.11kW) 순으로 나타났다. 즉, 연소기에서 시스템 비가역성이 가장 큰 것을 알 수 있다.

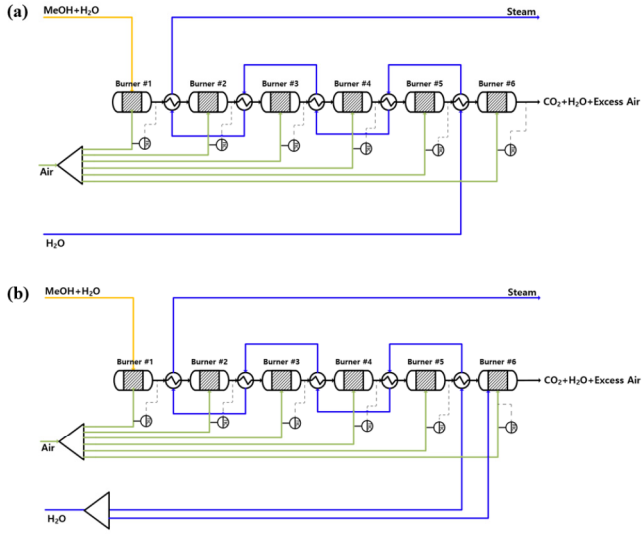



**Fig. 5** Comparison of burner temperature control methods. (a) Excess air, (b)Additional water.

연소기의 엑서지 파괴를 감소시키기 위해 위의 Fig. 6과 같이 두 가지 연소기 온도 제어 방법에 따른 엑서지 파괴를 계산하고 비교하였다. Fig. 6 (a)는 완전 연소 시 Burner #6의 후단 온도가 750℃가 되도록 과잉 공기를 주입하여 온도를 제어하는 방법이고, (b)는 Burner #6으로 주입되는 반응물이 완전 연소하는데 필요한 만큼 공기 유량을 제어하여 주입하고, 연소기 후단 온도는 750℃가 되도록 물을 주입하여 온도를 제어하는 방법이다. 즉, 상대적으로 비열이 큰 물을 같이 연소시켜 연소기 후단의 온도가 과하게 상승하는 것을 방지하였다.

**Table 5** Comparison of air compressor power, $H_2O$ pump power, $O_2$ flow rate as a function of burner temperature control methods.

| | Excess air | Additional water |
|---|---|---|
| Air compressor power [kW] | 7.08 | 2.93 |
| $H_2O$ pump power [kW] | 0.0011 | 0.0015 |
| Air flow rate [kg/h] | 109.10 | 45.15 |

위의 Table 5는 Burner #6의 후단 온도를 과잉 공기로 제어했을 때와 추가적인 물을 주입하여 제어했을 때의 컴프레서 동력, $H_2O$ Pump 동력, 공기 주입 유량을 비교한 것이다. 물을 주입하여 Burner #6의 후단 온도를 제어하면 공기 주입 유량이 약 59% 줄어들어 컴프레서 동력이 약 59% 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 물을 추가적으로 주입함으로써 $H_2O$ pump의 동력이 약 26% 증가하였으나 펌프의 소요 동력은 컴프레서에 비해 매우 작으므로 물을 이용하여 온도를 제어하는 것이 시스템 동력 감소 입장에서는 훨씬 큰 효과를 볼 수 있는 것을 알 수 있다.

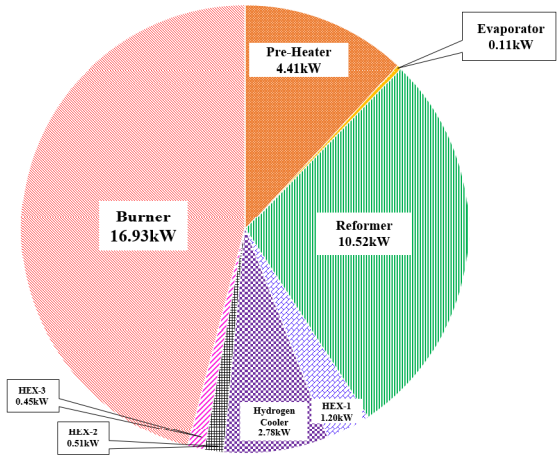



**Fig. 6** Exergy destruction of methanol steam reforming system. (Additional water)

위의 Fig. 6은 Burner #6의 후단 온도를 물로 제어했을 때 메탄올 수증기 개질 시스템의 엑서지 파괴 분포를 나타낸 것이다. 전체 엑서지 파괴는 36.92kW로 과잉 공기를 이용하여 온도를 제어할 때보다 전체 엑서지 파괴가 약 6.6% 감소하였다. 연소기의 엑서지 파괴가 16.93kW로 가장 크고 개질기(10.52kW), 예열기(4.41kW), 수소 쿨러(2.78kW), HEX-1(1.20kW), HEX-2(0.51kW), HEX-3(0.45kW), 기화기(0.11kW) 순으로 나타났다.

즉, 연소기 후단 온도를 물로 제어함으로써 시스템 동력 및 엑서지 파괴를 줄일 수 있었다. 따라서 과잉 공기를 주입하여 온도를 제어하는 방법보다 물을 추가로 주입하여 Burner #6의

온도를 제어하는 것이 훨씬 바람직한 것을 알 수 있다.

## 5. 연소기 최적 운전 방법

연소기의 온도를 제어하기 위한 물 주입 방법으로는 아래 Fig. 7과 같이 총 세 가지 방법으로 분류할 수 있다. Fig. 7 (a)는 Burner #6에 추가적인 물을 주입함으로써 Burner #6 연소기 후단 온도를 750℃로 제어하는 방법이며, (b)는 Burner #1에 추가적인 물을 주입함으로써 Burner #6 연소기 후단 온도를 750℃로 제어하는 방법, (c)는 Burner #1~#6까지 균일하게 물을 분배하여 주입함으로써 Burner #6 연소기 후단 온도를 750℃로 제어하는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 세 가지 물 주입 방법에 따른 공기, 물 주입량 분석 및 엑서지 분석을 통해 최적의 연소기 온도 제어 방법을 제안한다.

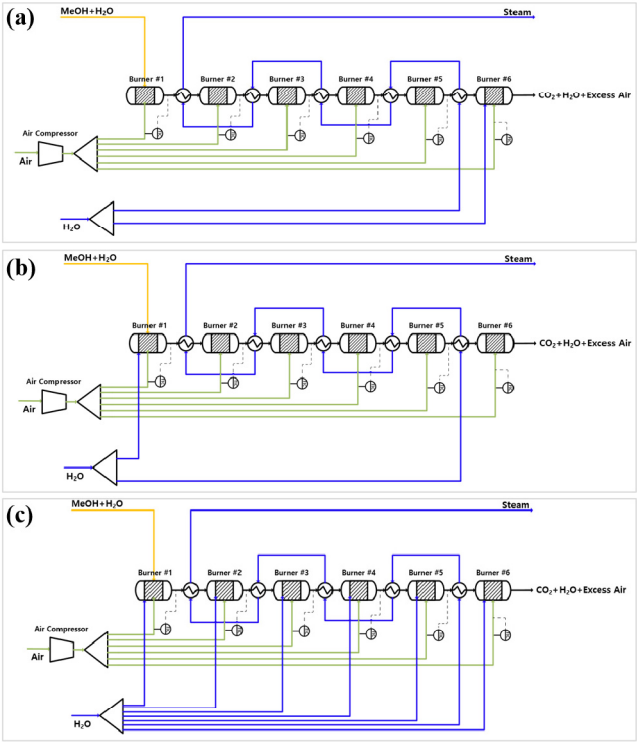



**Fig. 7** Comparison of burner temperature control method as a function of water injection methods. (a)Burner #6 injection, (b)Burner #1 injection, (c)Burner #1~#6 injection.

### 5.1 공기 및 물 소모량 분석

연소기 물 주입 방법에 따른 산소 및 물 주입량 분석을 위해 SCR 1.5, 개질 압력 5bara, 개질 온도 270℃일 때를 기준으로 연구를 진행하였다.

아래 Table 6는 연소기 물 주입 방법에 따른 공기 및 물 소모량을 비교한 것이다. 반응물의 조성 및 유량이 변하지 않아 반응물을 완전 연소시키는데 필요한 공기의 유량과 온도 제어에 소모되는 물의 유량이 물 주입 방법에 따라 변하지 않는 것을 알 수 있다.

그러나 아래의 Fig. 8과 같이 물 주입 방법에 따라 각 연소기에 주입되는 공기 유량이 다른 것을 알 수 있다. Burner #6에 물을 주입하여 Burner #6 연소기 후단 온도를 750℃로 제어하는 방법은 Burner #6에서 공기 주입량이 15.7kg/h로 가장 많았고 Burner #1에는 약 10.5kg/h, 나머지 Burner #2~#5에는 약 4.7kg/h의 공기가 주입된다. Burner #1에 물을 주입하여 Burner #6 연소기 후단을 750℃로 제어하는 방법은 Burner #1에 약 20.9kg/h의 공기가 주입되고 나머지 Burner #2~#6에는 약 4.9kg/h의 공기가 주입된다. 마지막으로 Burner #1~#6에 균일하게 물을 주입하여 Burner #6 연소기 후단을 750℃로 제어하는 방법은 Burner #1에 약 12.8kg/h의 공기가 주입되고 나머지 Burner #2~#6에는 약 6.6kg/h의 공기가 주입된다.

**Table 6** Comparison of air and $H_2O$ flow rate as a function of water injection methods.

| | Burner #6 | Burner #1 | Burner #1~#6 |
|---|---|---|---|
| Air flow rate [kg/h] | 45.15 | 45.15 | 45.15 |
| $H_2O$ flow rate [kg/h] | 12.76 | 12.76 | 12.76 |

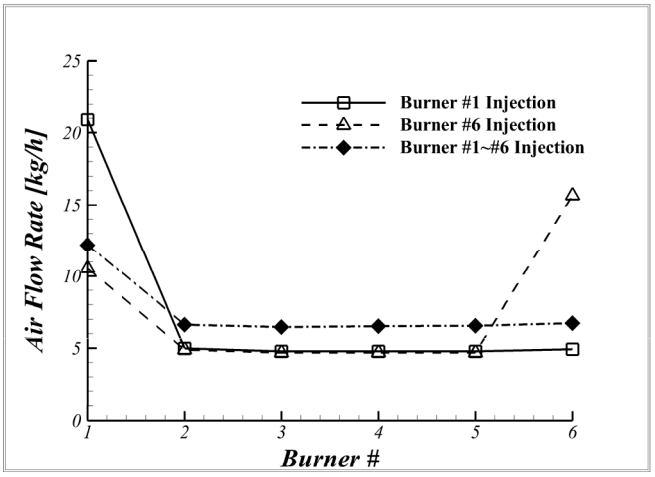



**Fig. 8** Coparison of air flow rate for each burner as a function of water injection methods.

### 5.2 연소기 물 주입 방법에 따른 엑서지 분석

최적의 연소기 온도 제어 방법을 도출하기 위해 물 주입 방법에 따른 연소기 및 전체 시스템 엑서지 분석을 아래 Table 7에 정의된 케이스에 따라 수행하였다.

**Table 7** Case description.

| Case # | Case description |
|---|---|
| Case 1 | Burner #1 injection |
| Case 2 | Burner #6 injection |
| Case 3 | Burner #1~#6 injection |

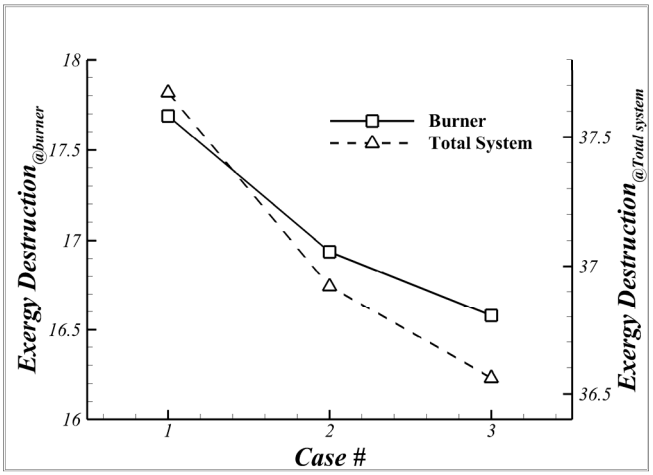



**Fig. 9** Coparison of exergy description by water injection methods.

위의 Fig. 9는 각 케이스 별 물 주입 방법에 따른 연소기와 전체 시스템의 엑서지 파괴를 나타낸 것이다. Case 1에서 엑서지 파괴가 약 17.69kW로 가장 크고, Case 3에서 엑서지 파괴가 약 16.58kW로 가장 낮았다. 전체 시스템의 엑서지 파괴도 연소기의 엑서지 파괴와 마찬가지로 Case 1일 때 약 37.67kW로 가장 크고, Case 3에서 에서지 파괴가 약 36.56kW로 가장 낮았다. 즉, 연소기의 온도 제어를 위해 물을 각 연소기에 분배하여 주입하면 전단에 주입하는 것보다 약 7%의 연소기 엑서지 파괴 감소 효과를 볼 수 있고, 전체 시스템 엑서지 파괴 역시 약 3% 정도 감소하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 수소 연료전지 추진 선박에 메탄올 수증기 개질 시스템을 적용하기 위해 엑서지 분석을 통한 연소기 최적 온도 제어 방법에 대해 분석하였다.

(1) 최적 운전점에서의 전체 시스템 엑서지 분석을 진행하였고, 이 중 연소기의 엑서지 파괴가 17.41kW로 가장 비가역성이 큰 것을 확인하였다.

(2) Burner #6 연소기 후단 온도를 750℃로 제어하기 위해 물을 이용하면 과잉 공기로 온도를 제어할 때보다 약 6.6%의 전체 시스템 엑서지 파괴 감소 효과를 볼 수 있었다.

(3) Burner #6 연소기 후단 온도를 750℃로 제어하기 위해 세 가지 물 주입 방법에 따른 시스템 엑서지 분석을 진행하였고, 그 결과 각 연소기에 물을 분배하여 주입하면 전단에 주입하는 것 보다 약 7%의 연소기 엑서지 파괴 감소 효과를 볼 수 있고 전체 시스템 엑서지 파괴 역시 약 3% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 대우조선해양(주)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Joung, T.H., Kang, S.G., Lee, J.K., Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing greenhouse gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050, Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, Vol 4, No 1, pp 1-7.

Initial IMO strategy on the reduction of GHG emissions from ship. resolution MEPC. Available online: http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/default.aspx (accessed on 30 December 2019).

Van Biert, L., Godievac, M., Visser, K., Aravind, P.V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications, Journal of Power Sources, Vol. 327, pp.345-364.

Rho, G., Kim, H., Jeon, H., Yoon, K. (2019). Fuel consumption and $CO_2$ emission reductions of ships powered by a fuel-cell-based hybrid power source, Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 7, No 7, pp 1-24.

Rivard, E., Trudeau, M., Zaghib, K. (2019). Hydrogen storage mobility: A review. Material, Vol. 12, No12, pp 1-22.

Ming, Q., Healey, T., Allen, L., Irving, P. (2002). Steam reforming of hydrocarbon fuels, Catalysis Today, Vol. 77, No 1-2, pp 51-64.

Boon, J., Dijk, E., Munch, S., Brink, R. (2011). Steam reforming of commercial ultra-low sulphur diesel, Journal of Power Sources, Vol. 196, No 14, pp 5928-5935.

Moon, D.J., Sreekumar, K., Lee, S.D. (2001). Studies on gasoline fuel processor system for fuel-cell powered vehicles application. Applied Catalysis A: General, Vol. 215, No 1-2, pp 1-9.

Ehteshami, S.M.M., Chan, S.H. (2014). Techno-economic study of hydrogen production via steam reforming of methanol, ethanol, and diesel, Energy Technology & Policy, Vol. 1, No 1, pp 15-22.

Klouz, V., Fierro, V., Denton, P., Katz, H., Lisse, J.P., Bouvot-Mauduit, S., Mirodatos, C. (2002). Ethanol reforming for hydrogen prodction in a hybrid electric vehicle: process optimisation, Journal of Power Sources, Vol. 150, No 1, pp 26-34.

Ishihara, A., Mitsushima, S., Kmiya, N., Ota, K. (2004). Exergy analysis of polymer electrolyte fuel cell systems using methanol, Journal of Power Sources, Vol. 126, No 1-2, pp 34-40.

Sa, S., Silva, H., Sousa, J.M., Mendes, A. (2009). Hydrogen production by methanol steam reforming in a

membrane reactor: palladium vs carbon molecular sieve membranes, Journal of Membrane Science, Vol. 339, No 1-2, pp 160-170.

Herdem, M.S., Farhad, S., Hamdullahpur, F. (2015). Modeling and parametric study of methanol reformate gas-fueled HT-PEMFC system for portable power generation applications, Energy Conversion and Management, Vol. 101, pp 19-29.

Daglc, R.A., Holladay, J.D. (2007). Methanol steam reforming for hydrogen prouction, Chemical Review, Vol 107, pp 3992-4021.

Faungnawakij, K., Kikuchi, R., Eguchi, K. (2006). Thermodynamic evaluation of methanol steam reforming for hydrogen production, Journal of Power Sources, Vol. 161, No 1, pp 87-94.

Ozcan, O., Akin, A.N. (2019). Thermodynamic analysis of methanol steam reforming to produce hydrogen for HT-PEMFC: An optimization study, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No 27, pp 141147-14126.

Jung, S.K., Cha, W.S., Park, Y.I., Kim, S.H., Choi, J. (2020). Conceptual design development of a fuel-reforming system for fuel cells in underwater vehicles, energies, Vol. 13, No 8, pp 1-15.

Sa, S., Silva, H., Brandao, L., Sousa, J.M., Mendes, A. (2010). Catalysts for methanol steam reforming – A review, Applied Catalysis B: Environmental, Vol. 99, No 1-2, pp 43-57.

Cheon, U., Ahn, K., Shin, H. (2018). Study on the characteristics of methanol steam reformer using latent heat of steam, Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No 1, pp 19-24.

Ji, H., Baik, K., Yang, S., Jung, S.K. (2019). Start-up strategy of multi-stage burner for methnaol fuel reforming plant, Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No 3, pp 201-208.

Tsatsaronis, G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, Energy, Vol. 32, No 4, pp 249-253.

Choi, J. (2018). Development of partial liquefaction system for liquefied natural gas carrier application using exergy analysis, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 10, No 5, pp 609-616.

Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R. (1988). Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical process, Hemisphere, New York.

# FPSO용 플레어팁 성능 실증시험 및 분석

이승열* · 정효석*
*부산대학교 선박해양플랜트기술연구원

# Performance Evaluation and Analysis of Flare Tip by Verification Experiment

Seung-Yul Lee* and Hyo-Seok Jung*

*The Korea Ship and Offshore Research Institute, KOSORI, Hadong, Korea

KEY WORDS: Flare tip 플레어팁, Flare stack 플레어 스택, FPSO 부유식 생산 저장 하역 설비, Heat radiation 열복사, Noise level 소음 레벨,

ABSTRACT: *The flare tip, which is one of the core equipment of the flare system, is installed on the top of the flare stack to burn the discharged gas, and the radiant heat and noise that may affect the facilities and workers around the flare stack due to the emitted heat should be considered. A combustion demonstration test was performed on the domestic prototype of the flare tip, and the performance of the flare tip was evaluated by performing a comparative analysis with numerical values obtained through the simulation.*

## 1. 서 론

플레어 시스템(Flare system)은 육상 및 해양플랜트의 화학 공정에서 배출되는 유독성의 위험물질(가연성 가스, 인화성 물질, 독성물질 등)을 안전하게 소각 처리하여 신속히 배출시키기 위한 장치로 석유화학 플랜트의 비정상 상태의 위험으로부터 보호하기위한 대단히 중요한 안전설비 중의 하나이다.

플레어 시스템은 플레어팁(Flare Tip), 점화장치(Ignition), 플레어 타워, 녹아웃드럼(Knock-out Drum), 씰드럼(Seal Drum), 각종 밸프 및 파열판(Rupture disk), 가스 배출 배관 및 플레어 재설치 장치 등으로 구성된다(KOSHA GUIDE, 2012).

플레어 시스템의 핵심 장비 중의 하나인 플레어 팁은 플레어스택 최상부에 설치되어 토출되는 가스를 연소시켜 주는 장치로 불꽃을 항상 유지해야 하며, 플레어 팁에서 나오는 발화온도를 유지하고 플레어 팁 부근에 항상 연소한 수 있도록 전기적 스파크를 발생시켜준다.

플레어 팁의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 배출되는 가스의 안전한 연소이며, 이 과정에서 방출되는 열에 의한 플레어 스택 주변의 설비 및 작업자에게 영향을 끼칠 수 있는 복사열 및 소음 등은 필히 고려되어야 할 사항이다.

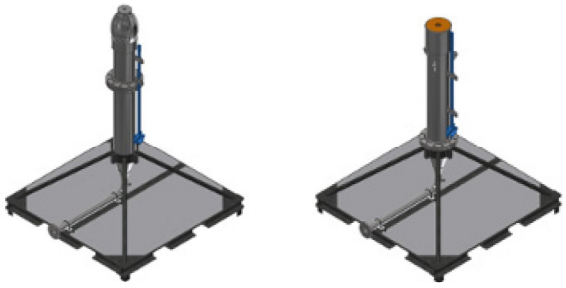
플레어 시스템에 포함되어 있는 플레어 팁의 경우에는 국내에서 유사 기술에 대한 연구가 일부 진행되고 있으나 아직 미숙한 단계이며, 특히 설계 및 제작된 시제품에 대한 실증 시험을 통한 성능 검증에 어려움이 존재하는 상황이다.

이 논문에서는 플레어 시스템의 핵심 장비 중의 하나인 플레어 팁의 국산 시제품에 대한 연소 실증 시험을 실시하였으며, 시뮬레이션을 통해 얻어진 수치해석 값과의 비교 분석을 수행하여 플레어 팁의 성능 평가를 수행하였다.

## 2. 플레어 팁

### 2.1 플레어 팁 모델

본 연구에서는 해상의 FPSO에 탑재되는 중형급(100 MMSCFD, Million Standard Cubic Feet Per Day) 플레어 시스템의 핵심장비 중의 하나인 플레어 팁의 성능평가를 시행하였다. 실증시험에 사용된 플레어 팁은 방출속도가 1Mach 이상의 고압으로 복사열과 소음을 최소화하고 높은 출력이 가능한 Sonic type 플레어 팁과, 방출속도가 0.8Mach의 Sub-sonic type 2종류의 모델을 사용하였다. 팁의 사이는 모두 8인치로 동일하다.



(a) 8 “ HP Flare tip (Sonic) (b) 8 “ LP Flare tip (Sub-sonic)

**Fig. 1** Two types of flare tip nozzle models

### 2.2 Thermal Radiation 범위

플레어 팁의 Thermal Radiation 범위는 API 521 code Sec.6.4.에 따라 다음의 식과 같이 계산되어 질 수 있으며,

$$D = \sqrt{\frac{\tau \cdot F \cdot Q}{4\pi \cdot K}} \quad (1)$$

여기서, $D$는 영향을 받을 수 있는 최소거리, $\tau$는 대기에 전달되는 복사열의 비율, $F$는 방출되는 열의 비율, $Q$는 낮은 발열량에 따른 열방출량, $K$는 복사열 강도를 의미한다.

플레어 팁의 방출 용량에 따른 허용 Thermal radiation 범위에 따른 작업자의 허용노출 시간은 API 521 code에 규정된 복사열 강도에 따르며 Table 1의 기준으로 설계 되어져야 한다.

플레어 팁의 허용 복사열은 플레어스택의 바로 아래 지표면에서 최대 4.73kW/m$^2$ 를 유지할 수 있게 한다(Jung et al., 2009).

### 2.3 Noise Level

플레어 팁의 Noise level은 API 521 code에서 제시한 다음의 식으로 값으로 구할 수 있으며, Noise level에 대한 제한은 NORSOK S-002상에 표기되어 있는 130dB로 규정하고 있다.

$$L_{30(100)} = L \mid 10\lg(0.5\, q_m \cdot c^2) \quad (2)$$

여기서, $L_{30(100)}$는 방출되는 지점으로 부터의 30m에서의 음압 레벨, $q_m$는 밸프를 통한 방출량, $c$는 밸브에서 나오는 가스의 음속을 의미한다.

### 2.4 Smokeless

플레어 스택의 정량적인 연소효율을 판단하기 위하여 매연 농도를 측정하였다. 매연 농도는 대기오염 공정시험 기준인 링겔만 비탁표(Ringelmann chart)를 이용하여 측정하였으며, 매연 농도는 2도 이상의 매연을 2시간에 5분을 초과해 배출을 금하고 있다. 링겔만 표준 농도표는 매연의 농도를 0~5도까지 6종으로 분류하며, 각 단계의 매연 농도는 0, 20, 40, 60, 80, 100%로 규정하고 있다.

## 3. 플레어 팁 연소실증 시험 및 시뮬레이션

### 3.1 연소실증 시험

플레어 팁에서 방출되는 가연성 가스의 연소로 인한 화염은 Jet fire를 형성하며, 플레어 팁의 연소시험을 위해서는 Jet fire 테스트 시험설비와 같은 대용량의 연소 가스 방출(초당 0.3kg 이상)이 요구된다.

플레어 팁의 연소시험을 실시하기 위해 기존의 Jet fire 테스트 시험설비의 가스 공급 라인을 수정하여 적용하였다. 플레어 팁 연소에 필요한 사용 연료는 LPG를 이용하였으며, 플레어 노즐을 통해 방출되는 연소가스의 양은 0.3kg/s로 테스트 시간 내에 일정하게 유지되었다. 8인치 직경의 HP(High pressure) 및 LP(Low pressure) 타입의 플레어 팁 노즐이 위치한 곳을 중심으로 반경 3.5m, 7.5m 내에 온도 측정을 위한 열전대(K-type thermocouple) 및 복사열 측정을 위한 Heat flux meter(50 kW/m$^2$)가 설치되었다. 또한, 소음 레벨 측정을 위해 반경 10~25m 내에 5m 간격으로 소음 측정기를 설치하였다.

플레어 스택 주변의 작업 환경(특히, 해양 구조물인 FPSO) 반경 내의 온도 및 복사열의 변화를 유추하기 위해, Fig. 1과 같이 플랫폼 구조물을 설치하고 그 구조물의 주위에 열전대 및 복사열 측정 장치를 설치하여 진행되었다.

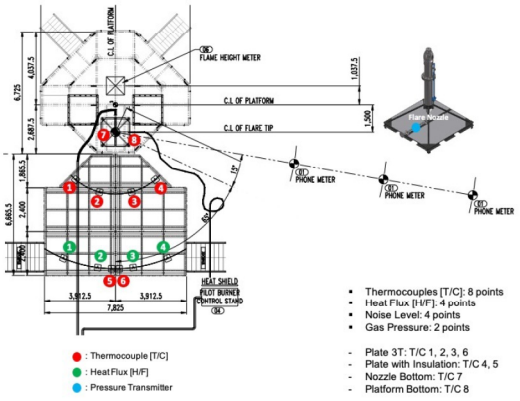
### 3.2 시뮬레이션

플레어 팁의 연소에 관한 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 영국의 “Softbits Consultants” 사의 FLARESIM V4.0을 사용하였다. FLARESIM은 플레이 시뮬레이션 및 설계에 관한 응용 프로그램으로서 해양 플랫폼, 석유화학 플랜트의 플레어 시스템에서 생성된 복사열 및 소음을 모델링하고 플레어 스택의 범위 내에 노출된 표면 온도를 예측할 수 있다.

**Table 1** Recommended design thermal radiation for personnel(API RP 521, 2014)

| Permissible design level $K$ kW/m$^2$ (Btu/hr · ft$^2$) | Conditions |
|---|---|
| 9.46 (3000) | Maximum radiant heat intensity at any location where urgent emergency action by personnel is required. When personnel enter or work in an area with the potential for radiant heat intensity greater than 6.31 kW/m$^2$ (2000 Btu/hr · ft$^2$), radiation shielding and/or special protective apparel (e.g. a fire approach suit) should be considered.<br>Safety Precaution - It is important to recognize that personnel with appropriate clothing[a] cannot tolerate thermal radiation at 9.46 kW/m$^2$ (3000 Btu/hr · ft$^2$) for more than a few seconds. |
| 6.31 (2000) | Maximum radiant heat intensity in areas where emergency actions lasting up to 30 s can be required by personnel without shielding but with appropriate clothing.[a] |
| 4.73 (1500) | Maximum radiant heat intensity in areas where emergency actions lasting 2 min to 3 min can be required by personnel without shielding but with appropriate clothing.[a] |
| 1.58 (500) | Maximum radiant heat intensity at any location where personnel with appropriate clothing a can be continuously exposed. |

[a] Appropriate clothing consists of hard hat, long-sleeved shirts with cuffs buttoned, work gloves, long-legged pants, and work shoes, Appropriate clothing minimizes direct skin exposure to thermal dadiation.




(a) Test layout of combustion test for flare tip



(b) Combustion testing of flare tip

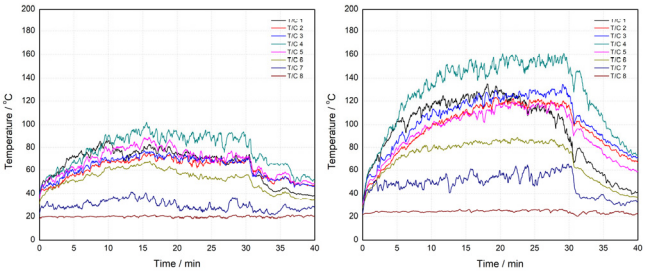
**Fig. 2** Test layout with location of sensors and fire testing of flare tip

## 4. 실증시험 결과 및 분석

### 4.1 온도 및 복사열

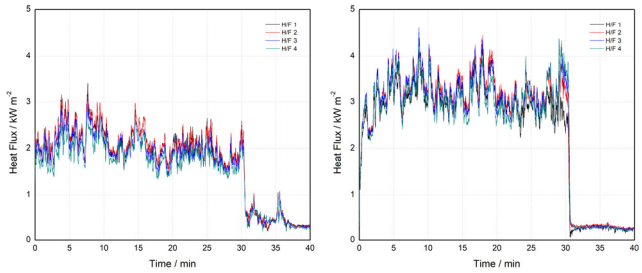
플레어 팁에서 방출되는 LPG 연소로 인한 화염은 Fig. 2의 (b)와 같이 Jet fire를 형성하였으며, 화염의 크기는 대략 8~10m를 형성하였다. 플레어 팁을 중심으로 반경 3.5~7.5m 내에 위치한 온도 측정용 열전대에 전달된 화염의 복사열에 의해 온도가 상승하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 두 가지 타입(HP, LP) 모두 연소 시 반경 내의 열전대 온도변화는 모두 대략 10분 내외로 완만한 기울기를 보이다가 10분 이후에는 온도의 변화가 크지 않음을 보여주었다. Fig 3에서 볼 수 있듯이 HP 타입에 비해 LP 타입의 플레어 팁이 온도 변화 폭이 크며 높은 온도를 나타내는 것은 화염의 형상 및 크기와 상관관계를 보이는 것으로 사료된다. LP 타입의 플레어 팁의 경우 화염의 형상이 HP 타입에 비해 넓게 퍼지며 분출되는 가스의 속도가 느려 바람의 영향 또한 많이 받게 된다. 화염의 크기에 따른 단위 면적당 전달되는 복사열의 강도가 달라지며, 이러한 이유로 인해 LP 타입의 플레어 팁의 경우 HP 타입에 비해 복사열의 크기가 크다고 볼 수 있다. 이는 Fig. 4에서 나타내는 Thermal radiation 측정치에도 같은 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다.

복사열 측정치의 경우 HP 및 LP 모든 타입의 플레어 팁에서




(a) 8 “ HP Flare tip Nozzle (b) 8 “ LP Flare tip Nozzle

**Fig. 3** Measured temperature histories at various locations around a flare




(a) 8 “ HP Flare tip Nozzle (b) 8 “ LP Flare tip Nozzle

**Fig. 4** Measured heat radiation histories at various locations around a flare

의 최대 값이 4.73 kW/m$^2$ 이하로 측정되었으며, 이 값은 Table 1의 API 521 code에 규정된 복사열 강도에 적합하다.

### 4.2 소음

플레어 팁 주변의 거리에 다른 소음레벨의 측정 결과 값을 Fig. 5에 나타내었다. 소음 측정은 플레어 팁으로부터 10m, 15m, 20m, 25m의 5m 등 간격으로 네 곳을 측정하였으며, 플레어 연소 시험 전 측정 된 배경 소음 값으로 보정한 결과이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 소음레벨은 플레어 팁에서 가장 가까운 10m 거리에서 최대 값이 측정되었으며 거리가 멀어짐에 따라 소음 레벨도 감소하는 경향을 알 수 있다. 플레어 팁의 타입에 따른 소음레벨 측정 값의 차이는 크게 나타나지는 않지만 LP 타입이 HP 타입에 비해 약간 높은 측면을 보였다. 이는 앞서 온도 및 복사열의 결과에 미치는 화염의 형상 및 바람의 영향에 의한 결과로 보인다.

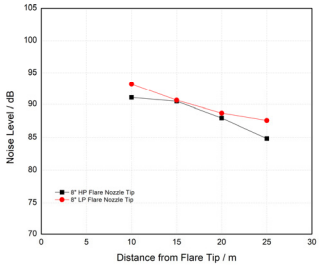



**Fig. 5** Measured noise level at various locations around a flare

### 4.3 매연

플레어 스택에서 방출되는 LPG의 완전연소를 판단하기 위하여 링겔만 비탁표를 플레어 스택의 높이 3배의 거리에 위치시키고 관찰자가 1분 간격으로 매연 농도를 측정하였다.

Table 2에서 알 수 있듯이, 동일한 유량의 가스를 연소시킴에도 불구하고 플레어 팁의 종류에 따른 매연의 농도가 다르게 나타났으며, HP 타입의 플레어 팁의 경우 LP 타입에 비해 매연 농도가 확연하게 적음을 알 수 있다. HP 타입의 플레어 팁이 LP 타입에 비해 가스의 연소효율이 높음을 보여 준다.

**Table 2** Smoke density of flare stack calculated on the basis of Ringelmann smoke observations record

| | SUMMARY | | Average Ringelmann Number | | Average smoke density % |
|---|---|---|---|---|---|
| 8 " HP type | Total of Ringelmann Numbers / Total number of observations | 2 / 30 | = 0.07 | x 20 | = 1.4 |
| 8 " LP type | Total of Ringelmann Numbers / Total number of observations | 13 / 30 | = 0.43 | x 20 | = 8.6 |

### 4.4 시뮬레이션 결과 값과의 비교 분석

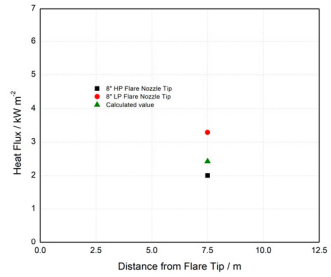
Fig. 6는 FLARESIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과 값과 상기에서 기술한 실증 시험에서 얻어진 데이터와의 비교를 위해 나타낸 그래프이다. FLARESIM을 이용한 시뮬레이션 해석 결과 값에서는 플레어 팁을 통하여 방출되는 가스의 값이 동일할 경우 플레어 팁의 직경에 따른 차이가 없이 결과 값(복사열, 소음)이 일정하게 도출되었다. 비교 분석을 위한 실증 시험의 결과 값은 측정값의 평균(10~25분 내의 평균값, 데이터의 증감 폭이 적은 안정된 구간)으로 나타내었다.

Fig. 6(a)의 그래프를 보면 알 수 있듯이, Thermal radiation의 경우 HP type의 플레어 팁이 시뮬레이션을 통한 해석 결과 값에 보다 근접하게 나타났다. 소음레벨에 대한 시뮬레이션 결과 값은 실증 시험을 통한 결과 값 보다 대체적으로 높게 나타났으나 그 경향성은 비슷하게 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 결과 통해 시뮬레이션의 해석 결과 값은 동일한 조건의 시험 모델에 있어 보다 보수적인 결과가 도출된 것으로 보이며, 세부 조건(플레어 팁의 직경, 화염의 크기)에 따른 결과를 산출하기에는 어려움이 따르는 것으로 보인다.

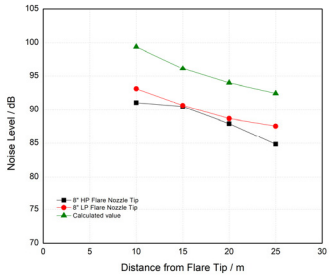
## 5. 결 론

본 연구에서는 플레어 시스템의 핵심 장비 중의 하나인 플레어 팁의 국산 시제품에 대한 연소 실증 시험을 실시하였으며, 시뮬레이션을 통한 해석 결과 값과의 비교 분석을 통해 플레어 팁의 성능 평가를 다각도로 들여다 볼 수 있는 기회가 되었다고 판단된다. 본 연구를 통하여 플레어 팁의 성능 평가에 대한 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 플레어 팁의 연소시험 및 수치해석과의 비교 분석 결과,




(a) Heat radiation




(b) Noise level

**Fig. 6** Comparison of simulation results of FLARESIM with experimental data

개발된 제품은 API 521 code에 규정된 복사열의 기준을 만족하였다.

(2) 플레어 팁의 실증 시험에 있어 가장 중요한 인자로 바람에 의한 화염의 영향을 들 수 있으며, 플레어 팁의 성능 평가에 미치는 바람의 영향에 대해 추가적인 실증 및 이론적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원의 "산업기술혁신사업"으로 수행되었습니다. (과제번호 10077495, "중형급(100MMSCFD) FPSO용 Flare System Package 개발", 2017)

## 참 고 문 헌

KOSHA GUIDE (2012) "플레어시스템의 공정설계에 관한 기술지침", 한국산업안전공단, D-36-2014.

API Recommended practice 521 Sixth edition, (2014) "Guide for Pressure-Relieving and Depressing System, *American Petrleum Institute*"

Jung, S.Y., Lee, H.S., Yang, J.M. and Ko, J.K. (2009) "Quantitive Analysis of Thermal Radiation and Decrease Combustibility", Jouranl of the Korean Institute of Gas, Vol 14, No 1, pp 37-41.

# CO2-CH4 대량 해저 수송을 위한 Multi-Fluid 수학적 모델링 개발

김진우* · 허철* · 김우식**
*한국해양대학교
**한국가스공사

# Development of Multi-Fluid Mathematical Modeling for Mass Transportation of CO2-CH4

Jin-Woo Kim*, Cheol Huh* and Woo-Sik Kim**

*Korea Maritime and Ocean University/Busan/Korea
**KOGAS/Daegu/Korea

**KEY WORDS:** Numerical method 수치해석적 방법, Multi-Fluid 다상유동, Steady-state 정상상태, transient-state 비정상상태, subsea transport 해저수송, Control volume 검사체적

**ABSTRACT:** *This study was conducted to develop a mathematical modeling technology for multi-fluid submarine transport for large-capacity carbon dioxide and natural gas combined transport. The complex two-phase flow model was able to reduce the model's unknowns through reasonable assumptions. Basically, the governing equation of the flow was established through the conservation equation based on the control volume, and the mass, momentum, and energy conservation equations of each phase were constructed and modeled. The constitutive equation was determined through analysis of the $CO_2$ -$CH_4$ flow pattern. A calculation algorithm was established to obtain a numerical solution through the Runge-Kutta method applied to the steady-state and the transient-state as the boundary condition with the steady state through the Method of Characteristic. Simulation conditions were set in order to check the process of changing variables over time according to the changing patterns of the boundary conditions. It is believed that some of the mathematical modeling techniques for the basic design of $CO_2$ -$CH_4$ submarine pipeline transport were obtained by comparing and calculating the $CO_2$ -$CH_4$ steady-state and transient-state behaviors in the subsea transport system with the benchmark code.*

## 1. 서 론

유체역학의 원리를 기반으로 구축 및 계산된 가스 콘덴세이트 파이프라인 모델은 다양한 작동 조건에서 변수를 시뮬레이션할 수 있다. 결과적으로 파이프라인 설계 및 안전 운영 측면에서 매우 중요하다. 대용량의 이산화탄소 및 천연가스 복합 수송을 위한 Multi-Fluid 해저 수송의 수학적 모델링 기술을 개발하고자 본 연구를 진행했다.

## 2. 모델링 및 계산방법

### 2.1 지배방정식

Two-Fluid model은 각의 상에 대해 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식으로 구성하며 총 6개의 미분방정식이 생성된다. 또한 방정식과 관련된 매개변수로 인해 그 복잡성이 더해진다. 합리적 가정은 모델의 미지수를 줄이는데 도움을 줄 수 있다. 파이프라인을 유동방향과 일치하는 1차원으로, 파이프라인의 각 포인트에서 열역학적 평형을 이루고 있다고 가정했다. 비정상상태에서는 파이프라인이 단열 등온상태라고 가정했다. CO2-CH4는 액체와 기체 사이에 명확한 계면을 갖고 있는 층류라고 할 수 있고, 구성 방정식은 앞서 설명한 유동 패턴에 의해 결정할 수 있다.

### 2.2 정상상태

정상상태는 지배방정식의 변수들의 시간에 따른 변화는 무시할 수 있다. 6개의 미분방정식을 통해 연립 미분방정식을 구할 수 있고 온도, 압력, 각 상의 속도를 미지수로 하는 비 보존 형식으로 모델링 할 수 있다.

정상상태 계산을 위해 파이프라인을 각 구간의 경사를 고려한 블록으로 나누고, 입구의 경계조건을 설정한다. 각 블록에 대해 구축한 모델을 적용하고 수치해석적 방법을 통해 미지수를 계산한다. 그리고 계산 값을 다음 블록의 경계조건으로 설정해 마지막 블록까지 반복한다.

### 2.3 비정상상태

정상상태와는 다르게 비정상상태는 시간에 따른 매개변수 변화를 고려해야 된다. 지배방정식을 통해 연립 비선형 편미분 방정식을 구할 수 있고, Implicit difference method를 통해 모델을 계산할 수 있다.

비정상상태도 블록으로 나누고 여기서 정상상태와 차이점은 블록마다 시간이 고려된다는 것이다. 앞서 설명한 정상상태 계산을 경계조건으로 설정하고, 시간경과에 따른 유체의 거동을 계산한다.

## 3. 시뮬레이션

해저 파이프라인을 이용하여 수송되는 Multi-Fluid는 CO2 dominant case와 CH4 dominant case 두 가지로 정상상태, 비정상상태에 적용했다. CH4 dominant case의 입구조건은 압력 11Mpa, 온도 300K, 유량 29kg/s로 설정했고 CO2 dominant case의 입구조건은 압력 12.5Mpa, 온도 300K, 유량 29kg/s로 설정하여 시뮬레이션했다. 모형시험에 사용된 유체의 조성은 Table 1, Table 2와 같다.

정상상태 유동의 압력강하는 비선형적인 반면 액상의 모양은 거의 압력강하의 선형이라고 볼 수 있다. 상유동의 온도강하 곡선은 초반에 급격히 변화하고 이후 유사한 증가를 보이는 것을 확인할 수 있다. 유체와 주변 온도 차이가 상대적으로 크기 때문에 전반부의 온도강하 구배가 후반부보다 크다. 비정상상태 시뮬레이션에서 300초 시점의 압력은 정상상태와 유사한 거동을 보인다. 이후 시간 경과에 따라 상대적으로 급격한 압력 강하를 보이는데, 반대 방향 유동은 입구의 압력이 파이프라인의 다른 섹션보다 낮기 때문에 발생한다. 그러나 새로운 정상 상태가 구축되면 정상상태에 유사한 경향을 갖게 된다.

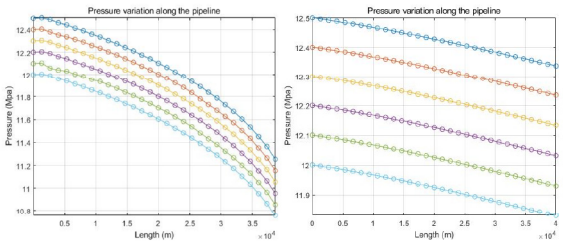
본 연구를 통해 개발한 모델의 시뮬레이션 결과를 Benchmark code와 비교분석했다.

**Table 1** Composition of CH4 dominant case fluid

| Component | Fraction | Component | Fraction |
|---|---|---|---|
| Methane | 0.9520 | n-hexane | 0.0001 |
| Ethane | 0.025 | n-heptane | 0.00005 |
| Propane | 0.002 | n-octane | 0.00005 |
| n-butane | 0.0003 | $CO_2$ | 0.0072 |
| n-pentane | 0.0003 | $N_2$ | 0.013 |

**Table 2** Composition of CO2 dominant case fluid

| Component | Fraction | Component | Fraction |
|---|---|---|---|
| Methane | 0.05 | n-hexane | 0 |
| Ethane | 0.05 | n-heptane | 0 |
| Propane | 0 | n-octane | 0 |
| n-butane | 0 | $CO_2$ | 0.9 |
| n-pentane | 0 | $N_2$ | 0 |




(a) Modeling (b) Aspen HYSYS

**Fig. 1** Pressure variation along the pipeline (CO2 dominant case)

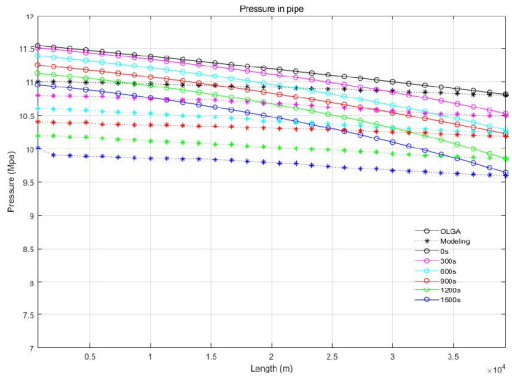



**Fig. 2** Pressure variation along the pipeline (CO2 dominant case) (OLGA2017, Modeling)

## 4. 결 론

결과적으로 본 연구에서 제안한 모델과 해결방법이 Multi-Fluid 해저 수송을 위한 파이프라인의 정상 및 과도상태의 유동을 시뮬레이션 할 수 있음을 보여준다. 압력, 온도, 기상 및 액상의 속도를 계산하고 분석했다. 정상 상태와 비정상상태의 차이점에 대해 언구했다. 하지만 본 언구에서 구축한 모델의 한정된 적용범위 확장을 위해서 향후 연구에서 좀 더 개선이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

Li, C. J. (2008). Natural Gas Transmission by Pipeline, Petroleum Industry Press, ISBN 978-7502166700, Beijing, China

M. A. Adewumi. & Leksono Mucharam. (1990). Compostional Multiphase Hydrodynamic Modeling of Gas/Gas-condensate Dispersed Flow. SPE Production Engineering, Vol.5, No.(2), pp.85-90 ISSN 0885-9221

P. Potocnik. (2010). Natural Gas, Sciyo, ISBN 978-953-307-112-1, Rijeka, Crotla.

S. Mokhatab; William A. Poe&James G. Speight. (2006).Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, Gulf Professional Publishing, ISBN 978-0750677769

S. Mokahatab.(2009). Explicit Method Predicts Temperature and Pressure Profiles of Gascondensate Pipelines . Energy Sources, Part A. 2009(29): 781-789.

# 선박 연료 및 기관 출력이 Onboard Carbon Capture에 미치는 영향 분석

채운형*·허철*·정동호**
*한국해양대학교 해양과학기술융합학과
**선박해양플랜트연구소

# Ship Fuel and Engine Power Impact Analysis on Onboard Carbon Capture Process

Woon-Hyeong Chae*, Cheol Huh* and Dong-Ho Jung**

*Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea
**Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

**KEY WORDS:** Onboard carbon capture 선내 탄소 포집, Carbon capture rate 탄소 포집율, Exhaust gas 배기 가스

**ABSTRACT:** *As of 2012, the Shipping Industry's carbon emissions accounted for 3.1 percent of the global annual carbon emissions, to solving this problem, International Maritime Organization implemented carbon emission regulation. Using low carbon fuel or clean energy(Electricity, Hydrogen) can reduce carbon emission. However, that requires major modifications to the ship and the logistics of fuel distribution, So presents Onboard Carbon Capture that can use on the standard post combustion Ship Engine.*
*Carbon capture rate is effected by Ship's exhaust gas characteristic(temperature, pressure, composition etc) and this exhaust gas is effected by Ship engine's characteristics and fuels. So this study investigated about several engines and fuels(LNG, Diesel) and Aspen HYSYS V.11 was used to simulate those processes*

## 1. 서 론

해운업에서 발생하는 탄소 배출량은 2012년 기준으로 938,000,000ton으로 전 세계 연간 탄소 배출량의 3.1%를 차지하며 이에 따라 선박의 탄소 배출 억제 정책을 실시하고 있으며, 규제를 충족하기 위해서는 전기 에너지, 저탄소 연료 및 수소와 같은 청정에너지를 사용하는 방법이 있으나 이 방법은 기존의 선박에 적용하기 위해서는 상당한 개조가 요구되며 이를 보완하고자 선박 내 탄소 포집 설비(Onboard carbon capture)를 갖춰 기존 선박에 큰 개조 없이 배기가스로 인한 탄소 배출량을 줄일 수 있다.

이산화탄소 포집 작업은 선박 배기가스의 온도, 압력 그리고 조성의 영향을 받으며 배기가스는 사용 연료와 엔진의 특성의 영향을 받는다. 본 연구는 사용 선박 연료별 다양한 선박 엔진의 출력에 따른 배기가스의 온돈, 압력 그리고 조성을 이용하여 Onboard carbon capture의 결과를 시뮬레이션을 하여 분석하는 것이다.

## 2. 모델링

### 2.1 대표 선박 엔진 선정

선내 탄소 포집(Onboard carbon capture)의 평가를 위해 대표 선박 엔진으로 Wärtsilä 34DF 혼소 연료 엔진들을 선정하였다.(van den Akker, 2017)

LNG와 Diesel을 모두 연료로 사용할 수 있기 때문에 연료와 출력에 따른 선박 배기가스의 특성과 조성 파악 및 탄소 포집 연구에 용이하다.

엔진은 Aspen HYSYS V.11을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, Wärtsilä Work book(Wärtsilä product guide,2016)과 사전 연구(van den Akker, 2017)에서 온도, 연료 소모량 등을 참고하였다. (Table 1)

Table 1. Wärtsilä 34DF 3000 kW Engine property

| Load(%) | Fuel Consumption [kg/h] | Engine output [kW] |
|---|---|---|
| 100 | 446.6 | 3000 |
| 85 | 393 | 2550 |
| 75 | 356.8 | 2250 |
| 50 | 259.1 | 1500 |

### 2.2 Engine Modeling

사전 연구에서의 엔진을 Wärtsilä 34DF Product Guide을 참고하여 HYSYS를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

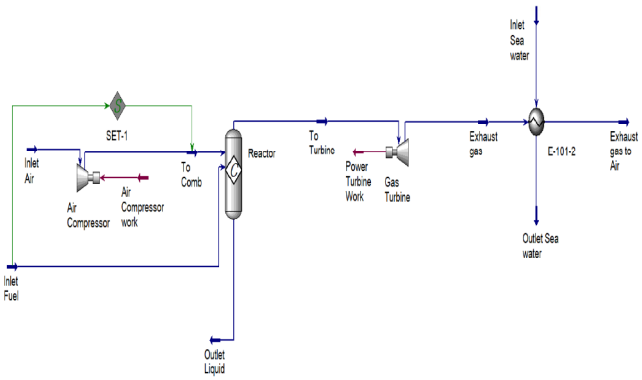



Fig. 1 Model flowsheet of the marine engine in Aspen HYSYS (Luo,2017)

Table 2. Exhaust gas property Wärtsilä 6L34DF 3000kW

| Load [%] | Temperature [℃] | Flow rate [kg/h] | $CO_2$ mass flow rate [kg/h] |
|---|---|---|---|
| 100 | 354 | 17006 | 1218 |
| 85 | 362 | 14403 | 1071 |
| 75 | 373 | 14396 | 973 |
| 50 | 404 | 10439 | 706 |

### 2.3 Carbon capture cycle Modeling

Fig. 1의 엔진으로부터의 배기가스의 온도, 유량, 조성을 MEA Solvent 기반의 Fig. 2 Carbon capture process와 연동하여 이산화탄소 포집 및 포집율을 계산한다.

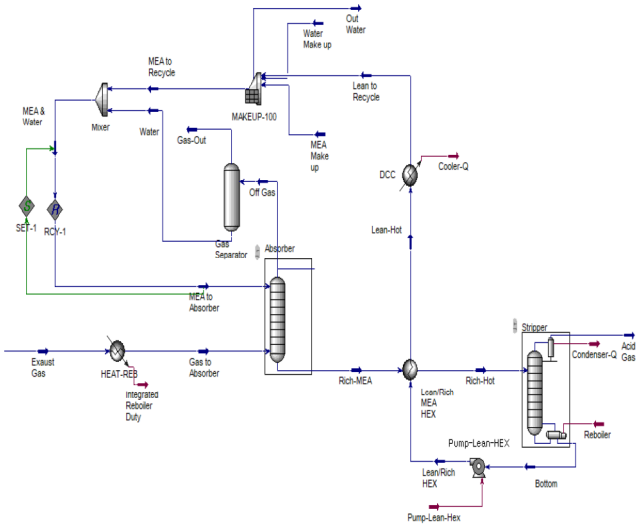



Fig. 2 Model flowsheet of the Carbon capture cycle in Aspen HYSYS

Absorber column에서의 배기가스 내의 이산화탄소 흡착을 위해 30 wt% MEA 수용액을 사용하였으며, MEA보다 상대적으로 더 효율적인 Solvent들이 있으나 가장 보편적이며 MEA를 사용한 사전 연구가 다수 있어 본 연구에서도 MEA를 사용하였음.
(van den Akker, 2017),(TNO,2019)
Stripper Column에서 MEA과 이산화탄소 간의 분리를 위해 Re-boiler의 열량이 필요하며 이는 선박 배기가스의 폐열(Table. 2)을 이용한다.

## 3. 결 론

본 연구는 선박 연료 및 기관 출력이 Onboard Carbon Capture에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

(1) 연료별 배기가스의 조성 중 특히 이산화탄소의 유량과 농도가 본 연구에서 다룰 가장 핵심 성분이며, 실제로 LNG와 Diesel의 배기가스의 이산화탄소의 유량과 농도는 크게 다르다.

(2) 엔진의 출력별 배기가스 특성 중 온도는 Stripper column에서의 MEA와 이산화탄소의 분리를 위한 Re-boiler Duty로 사용되며, Re-boiler Duty에 따라 포집 가능한 이산화탄소의 유량과 포집율을 결정한다.

## 후 기

본 연구는 한국해양대학교와 선박해양플랜트 연구소와 협력으로 수행된 연구 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

J.T.Van Den Akker(2017). “Carbon Capture Onboard LNG Fueled Vessels”
Juliana Monteiro and Maartje Feenstra(2019). “Ship based carbon capture onboard of diesel or LNg fuelled ships”
Meihong Wang and Xiaobo Luo(2017). “Study of solvent based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation”

# LNG 저장 탱크 타입 별 선박 운영 주기를 이용한 greenhouse gas emission 분석 연구

박은영*·최정호*
*동아대학교

# A Study of the GHG Analysis Considering Ship Operational Philosophy with Various Storage Tank Type

Eun-Young Park*, Jung-ho Choi*

*Dept. of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University, Busan, Korea*

KEY WORDS: LNG Bunkering, BOG, LNG, Methane slip, Methane emission, GHG, GHG Emission

ABSTRACT:
*To satisfy IMO regulations, the shipping industry replaces existing oil-based fuels with LNG. There is a growing trend of ship owners who want an LNG fuel propulsion system as a representative clean fuel, and LNG bunkering is a necessary procedure for fuel propulsion ships using LNG fuel. However, LNG is evaporated and released into the atmosphere for reasons such as BOG Handling and Pipe Purging, and LNG, whose main ingredient is methane, acts as a strong greenhouse gas. This reduces the environmental benefits of LNG, called clean fuel. When LNG Bunkering, it applies Venting, Reliquefaction as a BOG treatment method for each LNG tank type to analyze carbon dioxide and methane emissions that offset potential climate benefits. Driving simulation is done through Hysys Dynamic and presents CO2 emission generated during bunkering. CO2 emission was analyzed according to the LNG TANK type and BOG treatment method. Considering the method of processing BOG along with METHANE EMISSION that occurs in each bunkering procedure, this presents uncertainty about clean fuel.*

## 1. 서 론

국제 해양기구(IMO)는 해양환경 보호위원회 총회는 2050년까지 선박의 온실가스 배출량을 2008년의 50%로 감축하기로 결정하며, 그 이후에는 파리 기후협약 온도 목표에 따라 CO2배출량을 완전히 단계적으로 줄이는 과정을 계속한다[1,2]. 규제가 강화됨에 따라 해운 업계는 선박 배출량을 줄이기 위한 접근법을 적극적으로 검토하고 있다. 접근방식 중 하나로는 기존의 석유기반 연료를 LNG로 대체하는 것이다. LNG로 전환하면 잠재적으로 NOx배출량을 크게 줄이며, 황이 포함되어 있지 않으므로 SOx 배출이 없다[3,4]. LNG를 연료로 사용하면 CO2배출량을 15~20% 줄일 수 있다[5]. 이에 청정에너지라고 할 수 있는 LNG 연료 추신 시스템을 원하는 선주들이 증가하고 있는 추세이다. 점점 더 많은 수의 LNG 연료 추진 선박에 LNG 연료를 공급하기 위해서 안전하고 효율적인 LNG 벙커링 인프라를 구축해야 한다. LNG 벙커링 방법은 LNG 화물을 적재하는 것과 유사한 방식으로 LNG Terminal에서 Receiving ship으로 LNG를 이송하는 것으로, LNG를 연료로 사용하는 선박의 경우 LNG 벙커링은 필요한 과정이다[6]. LNG 벙커링은 기술적으로 트럭 대 선박(TTS), 선박 대 선박(STS), 부두 대 선박(PTS) 등의 방법으로 분류할 수 있다.

벙커링 선박의 크기와 용량은 이동거리, 다중 화물 기능 요구사항, 예상 거래량 및 수신하는 선박의 특성에 크게 좌우된다. 이뿐만 아니라 LNG 연료추진선의 경우 또한 선박의 엔진의 종류와 상용출력, 단위 에너지 당 연료 소모율, 선박 설계속도, 선박 항속거리등을 고려하여 연료탱크를 산정하게 된다. 일반적으로 LNG벙커링 선박의 용량은 1,000~10,000m3이다. LNG 연료선에 적용되는 연료 탱크는 IMO Independent type A형, B형, C형으로 구분된다[7].

IMO Independent type A형과 B형의 경우 탱크 내부 압력이 제한적이어서 BOG 발생에 따른 별도의 추가적인 처리 장치가 요구된다. Type C 가압 탱크는 LNG추진선에 사용되며 이 탱크의 장점은 최대 9bar의 압력에서 작동할 수 있다. 이로 인해 이 압력에 도달하기 전에 얼마 동안 가스가 탱크에 일정 시간 동안 축적될 수 있다[8]. 압력용기 형상의 Type C 가압 탱크는 압력탱크 기준으로 설계되었으며, 높은 탱크 내부 압력에 의하여 별도의 BOG 처리를 위한 부가 장치가 필요하지 않다. 이와 같이

Tank type에 따라 설계압력과 운전압력 영역대가 다르기 때문에BOG 처리 방법은 배출가스에 영향을 미칠 것이다. BOG를 처리하면서 발생하는 배출가스뿐만 아니라 LNG를 이송하는 절차에서도 발생하게 된다. Bunkering 중 발생하는 가연성 LNG 방출로 인한 오염 및 폭발 위험 또한 고려해야할 문제 중 하나이다[9]. 특히 우려되는 것은 CH4이다. (1) 연료 생산, 저장, 운송 및 급유과정 중 메탄 누출 (2) 메탄 슬립 또는 선박 작동중에 방출되는 연소되지 않은 메탄 배출 문제가 있다[3]. 가스 메탄의 경우 대기로 방출돼서 온실효과를 증가시킨다는 것을 의미한다. 지구온난화지수(GWP)란 온실가스가 지구온난화에 미치는 정도를 수치화한 것으로, 온실 기체가 대기 중에 방출된 후 특정 기간 동안 그 기체의 적외선 흡수 능력을 이산화탄소와 비교하여 산출한 것으로, 온실가스의 종류와 방출 기간에 따라 다르다. LNG 선의 모든 화물 작업은 메탄을 대기로 최소화하며 수행해야 한다. 누출 가능성은 다음과 같다[10].

(1) gassing-up process of cargo tanks due to mix the inert gas with methane vapor
(2) cooling process of cargo tanks with the use of liquefaction
(3) loading and unloading operations with a necessity of connecting and disconnecting the pipelines, the problems of exchanging the liquid and vapor among the vessel and terminal
(4) the liquefaction system in work during loading and ballast voyage
(5) cargo connection rupture, pipeline fracture or cargo spillage
(6) LNG bunkering operations
(7) misfire in dual-fuel or LNG engine

그 결과, 천연가스 공급망 전체에 걸친 메탄 배출과 선박 엔진 배기가스의 메탄 슬립은 천연가스의 GHG 배출 효과로 기존 액체연료 선박의 GHG 배출량을 초과할 수 있을 정도다[11]. 즉, LNG가 제공할 수 있는 청정 연소 이점을 줄이는 것이다[12]. 현존하는 연구는 천연가스 채굴부터의 메탄 발생량 혹은 다른 연료와의 비교를 통한 환경오염물질을 지표로 나타내었다. 특히 대기 배출 분석을 참조하여 수명주기 평가가 개발되었으며 에너지, 경제, 및 환경 측면에 대한 자세한 분석을 하였다. 그러나, 현재 목표는 선박 소유자 및 운영자에게 가능성을 판단하도록 요구하는 것이다. 환경적인 관점에서 선박 연료로 액화천연가스(LNG)를 채택하는 것이 배출 규정을 준수하기 위한 실용적인 솔루션인지 판단을 해줄 지표가 필요하다.

여러 연구에서는 기존의 디젤 연료에 관한 LNG 기반 기술 채택과 관련된 환경 편익 분석을 다루었다. 특히 대기 배출 분석을 참조하여 수명주기 평가가 개발되었으며 에너지, 경제 및 환경 측면에 대한 자세한 분석을 하였다. Amir Sharafian et.al(2019)는 Life Cycle Assessment를 사용하여 국내 및 수입 액화천연가스 (LNG) 및 중유(HFO)의 해양 배출을 비교하였다[11]. Jasmin Cooper et.al(2019)는 천연가스, 디젤, 바이오 디젤 등이 기후변화, 토지 및 대기 질, 자원 고갈에 미치는 영향에 대해 수명주기 평가를 통하여 분석하였다[13]. Paul Jonathan Barnett(2010)는 LNG의 액화, 운송 및 재기화 동안의 환경 영향을 평가하였다. 온실가스 배출량을 이산화탄소를 나타내는 지표로 정량화하며 공정 및 기술 개선을 위한 권장사항을 제시하였다[14]. PAULINA JARAMILLO et al.(2007) 온실가스(GHG), SOx 및 NOx의 수명주기 배출량을 NG/LNG/SNG (Synthetic Natural Gas) 및 석탄과 비교하여 나타냈다[15]. 또한, Dynamic Simulation을 활용하여 LNG Bunkering을 모사하여 동적 연구가 수행되었다. Yude Shao et.al(2019)는 최적의 STS LNG 벙커링 시간을 찾고 BOG 생성 최소화에 초점을 맞추는 동적 시뮬레이션을 진행하였다[16]. Biao Sun et.al(2017)은 LNG 선박 간 벙커링과 관련된 중대한 위험의 특징을 파악하여 잠재적 위험 영역을 분석 및 완화 방법을 조사하였다[17]. FAN Hongjun(2017)은 LNG STS 절차에서 loading/ unloading을 동시에 수행할 때 배관 시스템의 고장 빈도 분석 및 결과를 기반으로 4개의 LNG 누출 시나리오를 지정하여 위험 구역을 선정하였다[18]. Amir Sharafian(2019)은 유조선 트럭에서 LNG 급유소로 LNG 하역 시 사용되는 방법과 메탄 배출에 대한 기여를 조사한 모델을 활용하여 LNG offloading에서 수집한 실험 데이터와 수치 결과를 비교 생성하였다[19]. 또한 많은 연구자들은 각 LNG TANK TYPE에 대하여 여러 연구를 진행하였다. Zakaria, M. S.,et. Al(2012)는 Ansys fluent를 사용하여 LNG 선박을 시뮬레이션하고 LNG TANK의 BOG 생성을 추정하였다[20-22]. QS Chen et al.(2004)는 열역학 및 열전달 이론을 사용하여 LNG 저장 탱크의 열전달 모델을 확립하고, 탱크의 압력 및 온도 변화와 LNG 저장 탱크의 증발속도를 계산하여 탱크의 압력 변화를 나타내었다[23]. Kim, H.,et. al.(2005)은 LNG 저장 탱크의 오작동으로 인한 다량의 LNG 또는 증기가 배출되는 경우를 포함하여 멤브레인형 LNG 저장 탱크와 관련된 위험을 식별하고 평하기 위해 정량적 위험 평가로서 Fault Tree Analysis 방법으로 위험 분석을 진행하였다[24]. Wu, S.et al.(2020)은 신형 (PUF) 단열재를 사용하는 새로운 독립 B형 CCS 모의탱크와 극저온 테스트 플랫폼을 설계 및 제작하여 탱크의 온도 분포 및 증발속도와 유체의 2상 유동 및 상변화 열전달 특성을 종합적으로 연구하기 위해 3D 동적 CFD 모델을 구축하였다[25]. 초기 연구의 경우 LNG 생산부터 사용까지 전 주기에 대해 초점이 맞춰 있으며, 여러 연료를 비교하는 연구가 대부분이다.

본 연구에서는 LNG 저장탱크 타입 별에 대하여 각각의 BOG Handling Method를 적용시켜 발생하는 GHG(Greenhouse Gas) emission 뿐만 아니라 LNG연료추진선의 운영 주기를 통한 GHG emission을 통합하여 선박 운영 주기 CO2 emission을 제시한다.

## 2. Bunkering Modelling

### 2.1 Bunkering Tank and Receiving Tank

탱크 타입에 따른 BOG 발생량과 BOG handling method에 따른 GHG emission을 알아보기 위하여 탱크 타입을 다음 Table.1과 같이 선택했다. Table.1에 나타내었듯이 IMO Type C 압력 탱

크는 선박 및 Truck에 설치되는 Bunkering용으로 LNG 탱크의 부피는 4538m3로 가정한다. LNG 운반선과 달리 LNG 연료선은 LNG만 연료로 포함하므로 선박의 LNG 탱크 용량 (일반적으로 1000~10000m3)은 다른 용도에 비해 훨씬 작으며, 본 논문의 Receiving tank의 크기는 1000$m^3$로 가정한다[26]. 다양한 용량의 지상 기반 멤브레인 저장 탱크가 많이 존재한다. TGZ(Technigas)사에 의하여10x100,000m3가 한국 평택에 있는 한국가스공사를 위해 지어졌다. Membrane Tank의 크기는 한국가스공사 Tank Size를 참조하여 100,000m3로 가정한다[27]. 벙커링을 시작하기 전 Bunkering Tank와 Receiving Tank의 수위는 각각 90%, 20% 채워져 있으며, 각 탱크의 초기 압력은 2barg와 5.8barg이다.

**Table 1.** Tank type and size for the LNG of Bunkering and Receiving tank. [16,27.29-30]

| | Bunkering | | Receiving | |
|---|---|---|---|---|
| Tank Type | Type C | Membrane | Type C | Membrane |
| Tank Size [$m^3$] | 4,538 | 100,000 | 1,000 | |

액화천연가스 (LNG)는 약 -160℃의 극저온 액체로, Insulation tank에 저장된다. 주로 메탄 (약 90%)으로 구성되어 있지만 에탄, 프로판, 부탄과 같은 더 적은 양의 중질 탄화수소와 일부 미량의 질소 (1% 미만) 도 포함한다. 주변 공기에서 저장 탱크로의 열 흐름과 저장된 액화 천연 가스의 조성 변화는 증발 과정에 영향을 미친다. LNG 탱크의 부피는 일정하게 유지되고 저장된 LNG는 동일한 압력과 온도에서 평형상태에 있다. LNG 탱크에서 방출되는 액체의 물리적 특성은 액체 상태와 동일하며, 이때의 압력은 탱크의 수두압이 반영된다. 열전달 계수는 증기 및 액체 단계에서 일정하다[28]. 모델링에 사용된 유체 속성 데이터는 Table.2에 나타내었다[31].

**Table 2.** Composition of LNG[28].

| Component | Mole Fraction |
|---|---|
| Methane (C1) | 0.940 |
| Ethane (C2) | 0.047 |
| Propane (C3) | 0.008 |
| Butane (C4) | 0.002 |
| Nitrogen (N2) | 0.003 |

### 2.2 Pipe Line System and Flow Rate

일반적인 Loading/Unloading system 저장탱크로 LNG를 이송하는 파이프라인, 펌프 등으로 구성된다. 파이프라인은 LNG 전달을 위해 Bunkering Tank 및 Receiving Tank를 연결한다. LNG는 Pipeline을 지나면서 주변 열 및 난류 흐름, 마찰 등에서 발생하는 열을 흡수한다. 흡수된 열은 BOG를 발생시키며, 파이프라인의 길이와 펌프의 동력에 따라 달라진다. 발생하는 BOG를 고려하며, Pipeline의 주요 직경 및 길이는 Table.3과 같다[32]. LNG의 경우 벙커링하는 시간이 길어지고, 저장된 곳에서 다른 저장된 곳으로 옮겨지는 횟수가 늘어가면 BOG 발생량이 늘어난다. 본 연구에서는 Tank Type 별 LNG Bunkering 시간을 1시간으로 가정한다.

**Table 3.** Specifications of LNG Filling and Vapour Return Pipelines[19]

| | LNG Filling PipeLine | Vapour Return PipeLine |
|---|---|---|
| Diameter | 200 | 100 |
| Equivalent length | 29 | 25 |
| Overall heat transfer coefficient of pipe, | 0.0215 | 35.0 |
| Initial wall Temperature | 25 | |

### 2.3 BOG Handling Method

모든 선박은 선박이 항해할 때 사용될 LNG를 저장하기 위해 여러 개의 LNG 저장 탱크를 탑재한다. LNG는 하역 및 저장 중에 저장 탱크와 극저온 파이프라인에서 열을 흡수하기 때문에 LNG에서 Vapour가 지속적으로 발생한다. 이 Vapour를 BOG(Boil Off Gas)라고 한다. 발생한 BOG로 인하여 내부의 압력이 증가하고 이는 안전 문제를 일으킨다[33].

Normal Operation 뿐만 아니라 LNG Unloading 모드에서도 많은 양의 BOG가 생성된다. 사실 Unloading 과정 뿐만이 아닌 Dry docking 중 Gassing up 과정에서도 메탄은 불활성 가스와 혼합되어 대기로 방출된다. 이 과도한 것을 처리하기 위해 적절한 방식으로 소화해야 한다[34]. BOG를 처리하는 기존의 간단한 방법은 대기로 배출 및 태우는 것이다. 또는BOG 재액화 공정으로 제거하게 된다. 이와 같은 프로세스 중 하나로 BOG를 제거해야 한다. 그러나 이 처리 방법에도 각각의 문제가 존재한다. 재액화의 경우 넓은 공간과 초기 투자가 필요하여 일부 선주들은 설치 여부를 고려하게 된다[35]. 태울 경우에는 환경에 직접적인 영향을 미치고, 독성 가스를 생성 뿐만 아니라, 소음과 함께 많은 양의 CO2가 대기로 방출된다[36]. Venting의 경우 LNG 체인에서 주요 온실가스 공급원으로 메탄의 배출이 일어나게 된다.[37]. 메탄은 온실가스이며 이산화탄소보다 몇 배의 강력한 지구온난화의 주요 원인이다. 이렇기 때문에, 증발 가스의 배출이 중요하게 고려된다[38]. 그러나 현재 연구의 경우 메탄 배출량 측정에 대한 데이터는 희박하다. LNG의 메탄 배출량에 대한 측정 데이터는 거의 없으며, 배출량이 저평가 될 가능성이 높다. 이는 학계와 산업계 모두에게 주요 우선순위가 되어야 한다[39].

본 연구에서는 Receiving과 Bunkering의 탱크 타입에 따라 적절한 BOG Handling Method를 선정하였으며, Table.4에 나타내었다. IMO Type C tank의 경우 적용 대상이 Truck인지 Ship인지 경우에 따라 BOG를 Venting 할 것인지, 혹은 재액화 시스템을 사용하여 재액화시킬것인지 구분지어 생각한다.

## 3. Simulation

이 연구에서는Tank Type에 따른 LNG Bunkering 및 Operating 동적 시뮬레이션을 수행하는 데 Aspen Hysys 11.0을 사용했으며, LNG 공정의 광범위한 압력 및 온도 조건에서 정확한 Peng-Robinson(PR) 상태방정식을 사용한다. 공정 모델링 및 열역학 분석과 관련하여 LNG를 포함한 다양한 탄화수소의 열역학적 특성을 상대적으로 정확하게 예측할 수 있는 Peng-Robinson Equation of State를 다음 식 equation (1)-(5) 과 같이 적용했다[40, 41].

$$P=\frac{RT}{Vm-b}-\frac{a\bullet\alpha}{Vm(Vm+b)+b(Vm-b)} \quad (1)$$

$$a=0.45724\frac{R^2T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b=0.07780\frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$\alpha=[1+k(1-T_r^{0.5})] \quad (4)$$

$$k=0.37464+1.54226\omega-0.26992\omega^2 \quad (5)$$

## 4. Results and Discussion

### 4.1 IMO Type C tank to IMO Type C tank (Pump)

동적 시뮬레이션 사용된 LNG 벙커링 모델은 IMO TYPE C TANK 2개 (Bunkering, Receiving)와 LNG 이송 펌프, LNG 벙커링 파이프라인(LNG 호스 포함)으로 구성되어있다. Bunkering Tank에서 Receiving Tank로 LNG를 이송하기 위해서는 Receiving Tank의 압력을 감압시켜야 한다. Type C tank to Type C tank가 Truck to Ship에 적용될 경우 BOG를 Venting하며, Ship to Ship에 적용될 경우 재액화공정을 활용하여 재액화시킨다. BOG 초기 Venting 유량은 24,000kg/h로 진행된다. Figure.1은 Receiving Tank의 감압 시간에 따른 Venting BOG량과 Receiving Tank Pressure의 변화를 보여준다. 초기 압력인 5.8barg에서 2barg까지 감압 되며 그때의 BOG는 Vent Mast를 통하여 대기로 배출된다. Venting되는 BOG 량과 Receiving Tank Pressure의 경우 시간이 흐름에 따라 감소하는 경향을 보이며, 그 변화는 점차 줄어든다. 이때의 감압시간 은 약 1시간이 소요된다.

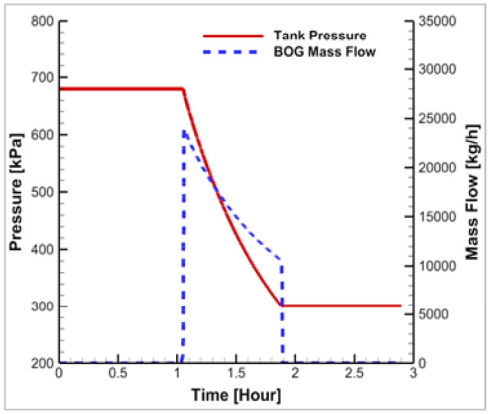



Fig. 1

Receiving Tank BOG discharge flow rate tank pressure over time Receiving Tank Pressure

Figure.2는 Receiving Tank에서 Venting으로 인한 감압 시 유출되는 BOG의 composition 별 mass flow를 시간에 따라 나타내었다. Receiving Tank에서 나오는 BOG의 주성분은 메탄이며, 탄화수소 성분과 불활성 물질이 N2로 구성되어있음을 확인할 수 있다. Receiving Tank에서 나오는 Composition 중 가장 많이 함유하고 있는 Methane의 배출량이 가장 많음을 보인다.

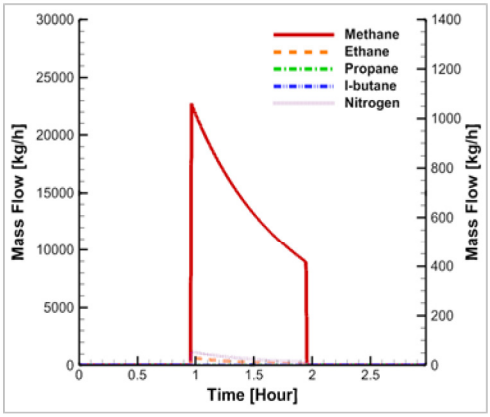



Fig. 2

Flow rate by Receiving Tank BOG Composition over time

Table.4의 경우 Receiving tank LNG loading을 위한 감압 과정에 해당하는 5.8barg에서 2barg로 감압될 시 나오는 BOG의 각 성분에 대하여 Mass를 나타내었다. Depressurizing은 약 1시간이 소요되며, BOG의 주성분에 해당하는 Methane의 방출량이 가장 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

**Table 4.**BOG Composition 별 Venting 방출량

| | Methane | Ethane | Propane | Butane |
|---|---|---|---|---|
| Venting BOG mass (kg) | 51946.7 | 87.9 | 1.6 | 0.07 |

## 5. 결 론

본 연구에서 LNG 탱크 타입에 따른 CO2 발생량을 얻기 위하여 각 TANK TYPE과 BOG HANDLING METHOD를 변화한 결과를 통하여 분석을 진행하였다. LNG 연료추진선을 사용 시 해당 사용 전력 및 엔진의 METHANE SLIP에 대해서 각 COMPOSITION 별 발생량을 동적 모델링을 이용하여 도출하였다. 해석에서 탱크 타입 2가지와 HANDLING METHOD 3가지를 고려하였다. TANK TYPE 및 BOG HANDLING METHOD의 변화에 따른 파라메트릭 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구결과에서는 GHG 가스로 지정된 Methane만을 이용하여 CO2 발생량을 도출하였다. C계열에 해당하는 에탄의 경우 온실가스로는 분류는 되지만 메탄 대비 발생량과 잔존 수명 때문에 연구대상에서 제외하는 경우가 많다. 그러나 에탄의 경우 대기 중 메탄으로의 전화에 기인하면서 지구온난화 잠재력을 높이기 때문에 제외되어서는 안되며, 추가 연구가 필요할 것으로 보인다

(2) 추후의 연구에서 본 동적 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 선사의 입장에서 LNG TANK TYPE 및 BOG HADNLING 방안을 실제 선박에 적용하기 위한 경제성 평가 등의 연구가 진행될 수 있을것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌


Spoof-Tuomi, K., & Niemi, S. (2020). Environmental and economic evaluation of fuel choices for short sea shipping.

Lim, T. W., & Choi, Y. S. (2020). Thermal design and performance evaluation of a shell-and-tube heat exchanger using LNG cold energy in LNG fuelled ship. Applied Thermal Engineering, 171, 115120.

Corbett, J. J., Thomson, H., & Winebrake, J. J. (2015). Methane emissions from natural gas bunkering operations in the marine sector: A total fuel cycle approach. University of Delaware, US Department of Transport.

Unseki, T. (2013). Environmentally superior LNG-Fueled vessels. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 50(2), 37-43.

Calderón, M., Illing, D., & Veiga, J. (2016). Facilities for bunkering of liquefied natural gas in ports. Transportation research procedia, 14, 2431-2440.

Jeong, B., Lee, B. S., Zhou, P., & Ha, S. M. (2017). Evaluation of safety exclusion zone for LNG bunkering station on LNG-fuelled ships. Journal of Marine Engineering & Technology, 16(3), 121-144.

Kim, T. W., Kim, S. K., Park, S. B., & Lee, J. M. (2018). Design of independent type-B LNG fuel tank: Comparative study between finite element analysis and international guidance. Advances in Materials Science and Engineering, 2018.

BATTISTELLI, A. (2015). Boil off gas handling on LNG fuelled vessels with high pressure gas injected engines

Park, S., Jeong, B., Yoon, J. Y., & Paik, J. K. (2018). A study on factors affecting the safety zone in ship-to-ship LNG bunkering. Ships and Offshore Structures, 13(sup1), 312-321.

Herdzik, J. (2018). Methane Slip During Cargo Operations on LNG Carriers and LNG-Fueled Vessels. New Trends in Production Engineering, 1(1), 293-299.

Sharafian, A., Blomerus, P., & Mérida, W. (2019). Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential. Energy Policy, 131, 332-346.

Sakmar, S. L. (2010, September). The globalization and environmental sustainability of LNG: Is LNG a fuel for the 21st century?. In World Energy Congress (pp. 12-16).

Cooper, J., Hawkes, A., & Balcombe, P. (2019). Life cycle environmental impacts of natural gas drivetrains used in UK road freighting and impacts to UK emission targets. Science of The Total Environment, 674, 482-493.

Barnett, P. J. (2010). Life Cycle Assessment (LCA) of Liquefied Natural Gas (LNG) and its environmental impact as a low carbon energy source.

Jaramillo, P., Griffin, W. M., & Matthews, H. S. (2007). Comparative life-cycle air emissions of coal, domestic natural gas, LNG, and SNG for electricity generation. Environmental science & technology, 41(17), 6290-6296.

Shao, Y., Lee, Y., & Kang, H. (2019). Dynamic Optimization of Boil-Off Gas Generation for Different Time Limits in Liquid Natural Gas Bunkering. Energies, 12(6), 1130.

Sun, B., Guo, K., & Pareek, V. K. (2017). Hazardous consequence dynamic simulation of LNG spill on water for ship-to-ship bunkering. Process Safety and Environmental Protection, 107, 402-413.

Fan, H., Cheng, K., & Wu, S. (2017). CFD-based simulation of LNG release during bunkering and cargo loading/unloading simultaneous operations of a containership. Journal of Shipping and Ocean Engineering, 7, 51-58.

Sharafian, A., Blomerus, P., & Mérida, W. (2019). Liquefied natural gas tanker truck-to-tank transfer for on-road transportation. Applied Thermal Engineering, 162, 114313.

Zakaria, M. S., Osman, K., & Musa, M. (2012). Boil-off gas formation inside large scale liquefied natural gas (lng) tank based on specific parameters. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 229, pp. 690-694). Trans Tech Publications Ltd.

Zakaria, M. S., Osman, K., Saadun, M. N. A., Manaf, M. Z. A.,

& Mohd Hanafi, M. H. (2013). Computational simulation of boil-off gas formation inside liquefied natural gas tank using evaporation model in ANSYS fluent. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 393, pp. 839-844). Trans Tech Publications Ltd.

Zakaria, M. S., Osman, K., Yusof, A. A., Hanafi, M. H. M., Saadun, M. N. A., & Manaf, M. Z. A. (2014). Parametric analysis on boil-off gas rate inside liquefied natural gas storage tank. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 6, 845-853.

Chen, Q. S., Wegrzyn, J., & Prasad, V. (2004). Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas (LNG) cryogenic tanks. Cryogenics, 44(10), 701-709.

Kim, H., Koh, J. S., Kim, Y., & Theofanous, T. G. (2005). Risk assessment of membrane type LNG storage tanks in Korea-based on fault tree analysis. Korean Journal of Chemical Engineering, 22(1), 1-8.

Wu, S., Ju, Y., Lin, J., & Fu, Y. (2020). Numerical simulation and experiment verification of the static boil-off rate and temperature field for a new independent type B liquefied natural gas ship mock up tank. Applied Thermal Engineering, 115265.

Kwak, D. H., Heo, J. H., Park, S. H., Seo, S. J., & Kim, J. K. (2018). Energy-efficient design and optimization of boil-off gas (BOG) re-liquefaction process for liquefied natural gas (LNG)-fuelled ship. Energy, 148, 915-929.

Grieve, P., & Saint-Rémy-lès-Chevreuse, F. (2012). GST, a new generation of LNG membrane-type land storage tank (pp. 1-17). Working paper

Lee, S., Seo, S., & Chang, D. (2015). Fire risk comparison of fuel gas supply systems for LNG fuelled ships. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 27, 1788-1795.

Lee, J., Jo, C., Chang, D., & Chung, H. (2018). New methodology for estimating the minimum design vapor pressure of prismatic pressure vessel for on-ship application. Ocean Engineering, 158, 367-377.

IACS, LNG bunkering guidelines. IACS Rec. No. 142, (2016).

Hubert, A., Dembele, S., Denissenko, P., & Wen, J. (2019). Predicting Liquefied Natural Gas (LNG) rollovers using Computational Fluid Dynamics. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 62, 103922.

Dobrota, Đ., Lalić, B., & Komar, I. (2013). Problem of boil-off in LNG supply chain. Transactions on maritime science, 2(02), 91-100.

Park, C., Song, K., Lee, S., Lim, Y., & Han, C. (2012). Retrofit design of a boil-off gas handling process in liquefied natural gas receiving terminals. Energy, 44(1), 69-78

Kim, K., Park, K., Roh, G., & Chun, K. (2019). Case Study on Boil-Off Gas (BOG) Minimization for LNG Bunkering Vessel Using Energy Storage System (ESS). Journal of Marine Science and Engineering, 7(5), 130.

Parametric analysis on boil-off gas rate inside liquefied natural gas storage tank. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 6, 845-853.

Al-Quwaitai, A., & Krishnan, P. K. (2016). Study and Design of Flare Reduction Initiative in the Region: A Case Study of Gas Flaring Reduction at Oman Liquefied Natural Gas Company. Current Journal of Applied Science and Technology, 1-7.

Sedlaczek, R. (2008). Boil-Off in Large and Small Scale LNG Chains. MS Pet Eng Dep Pet Eng Appl Geophys Nor Univ Sci Technol Trondheim.

Gunnarsson, L., & Helander, E. (2015). How to handle boil-off gases from LNG trucks.

Speirs, J., Balcombe, P., Blomerus, P., Stettler, M., Brandon, N., & Hawkes, A. (2017). Can natural gas reduce emissions from transport. Heavy goods vehicles and shipping.

Soave, G. (1972). Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. Chemical engineering science, 27(6), 1197-1203.

Stryjek, R., & Vera, J. H. (1986). PRSV: An improved Peng—Robinson equation of state for pure compounds and mixtures. The canadian journal of chemical engineering, 64(2), 323-333.

Dobrota, Đ., Lalić, B., & Komar, I. (2013). Problem of boil-off in LNG supply chain. Transactions on maritime science, 2(02), 91-100.

Al-Breiki, M., & Bicer, Y. Investigating the Effects of Boil-off Gas on Liquefied Energy Carriers During Land Storage and Ocean Transportation.

Lowell, D., Wang, H., & Lutsey, N. (2013). Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping. The International Council on Clean Transportation.

Shi, X., & Che, D. (2009). A combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy. Energy conversion and management, 50(3), 567-575.

Im, S., Mostafa, A., Shin, S. R., & Kim, D. H. (2020). Combination of H2SO4-acidification and temperature-decrease for eco-friendly storage of pig slurry. Journal of Hazardous Materials, 123063.

Maucieri, C., Borin, M., & Barbera, A. C. (2014). Role of C3 plant species on carbon dioxide and methane emissions in Mediterranean constructed wetland. Ital. J. Agron, 9(3), 120-126.

Bhatia, A., Jain, N., & Pathak, H. (2013). Methane and nitrous

oxide emissions from Indian rice paddies, agricultural soils and crop residue burning. Greenhouse Gases: Science and Technology, 3(3), 196-211.

Kumar, M., Rattan, G., & Prasad, R. (2015). Catalytic abatement of methane emission from CNG vehicles: an overview. Canadian Chemical Transactions, 3(4), 381-409.

Hodnebrog, Ø., Dalsøren, S. B., & Myhre, G. (2018). Lifetimes, direct and indirect radiative forcing, and global warming potentials of ethane (C2H6), propane (C3H8), and butane (C4H10). Atmospheric Science Letters, 19(2), e804.

# 고립파 월파에 관한 실험적/수치적 해석에 관한 고찰

이우동 · 최선용 · 허동수(경상대학교)

일반적으로 월파를 제어할 목적으로 호안 전면에 소파제가 많이 설치된다. 주기성을 가진 풍파, 너울의 월파 저감에는 소파제가 상당히 효과적이다. 지진 · 폭풍해일과 같은 장주기파에 있어서 호안 전면 소파제의 월파 저감효과에 대해서는 알려진 것이 많지 않다.

본 연구에서는 호안 전면의 소파제 유무에 따른 지진해일의 월파특성을 분석하기 위해 수리/수치모형실험을 수행하였다. 실험과 수치해석에서 지진해일을 대신하여 수리특성이 유사한 고립파를 적용하였다. 수리모형실험결과, 호안 전면에 소파제가 설치된 경우가 그렇지 않은 경우보다 월파량이 증가하는 경향을 나타내었다. 수치모형실험에서도 실험에서와 동일한 결과를 나타내었다. 그뿐 아니라, 실험수조에서 측정한 월파량, 반사율, 시간파형을 잘 재현하였다. 수치모형실험결과, 소파제 위에서 고립파의 쇄파는 발생하지 않았고, 도리어 소파제가 없는 경우보다 수위가 더욱 상승하는 경향을 파동/유동장 해석결과로부터 확인할 수 있었다. 이 영향으로 소파제가 설치된 호안의 고립파 월파량이 설치되지 않은 호안보다 더 많이 발생하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2018R1C1B6007461).

# 서리 생성 메커니즘 분석 및 실용성 연구

이성우 · 최성웅(경상대학교)

대부분의 에너지자원을 수입하고 있는 우리나라에서는 석탄과 유류의 에너지 자원의 경우 연소 시 아황산가스와 같은 공해 물질을 발생시키는 문제가 있고 원자력 에너지 같은 경우 안전성의 문제가 제기되고 있다. 반면 천연가스의 경우 무공해 에너지자원으로 활용성 및 수요가 점점 증대하고 있다. 천연가스의 경우 운송효율을 높이기 위해 약 -162도의 액체 상태로 수입하기 때문에 수요자에게 공급하기 위해서는 기체 상태로 기화시켜야 하고 이를 위한 주요 장비 중 하나가 기화기이다. 기화기는 고온의 열원을 이용하여 LNG 같은 극저온 액체를 기화하기 위한 장치인데 그 중 대표적인 기화기로 대기식 기화기(AAV, Ambient Air Vaporizer)를 들 수 있다. 대기식 기화기는 주변 공기를 열매체로 활용하는 기화기의 하나로서 대기 중의 공기를 직접 열 교환하여 친환경적이고 연료를 사용하는 연소식 기화기(SMV, Submerged Combustion Vaporizer)와 비교해서 운영비가 저렴하다. 그러나 장시간 사용 시 운무와 결빙 현상으로 서리가 생겨 열교환기의 성능이 저하되는 점을 단점으로 들 수 있다. 본 연구에서는 극저온 LNG를 활용하는 설비에서 사용되는 대기식 기화기에 대한 서리 생성 메커니즘을 수치 해석 프로그램을 이용하여 분석하였고 대기식 기화기 운전에서 중요한 변수인 대기 습도, 온도, 풍속 기화기 성능의 영향성 평가를 수행하였다. 관련 연구를 통해서 기화기 성능을 높이고 활용할 수 있는 방안에 대해 모색하였다.

# 연성해석을 통한 지진해일에 의한 표류물 거동모의에 관한 고찰

이우동 · 황태건 · 허동수(경상대학교)

지진해일에 의한 표류물의 거동을 모의하기 위해서는 물체의 유출-표류-충돌 해석까지 가능한 수치모델이 요구된다. 본 연구에서는 유체-구조 상호작용해석을 통해 표류물에 의한 충돌력까지 계산할 수 있는 LS-DYNA를 이용한다. 하지만 충돌력 해석에 특화된 LS-DYNA에서 지진해일의 전파, 변형까지 모의하는 것은 계산능력을 벗어난다. 이것을 보완하기 위해서는 지진해일의 수리현상을 높은 정확도로 모의할 수 있는 수치모델과의 연성해석이 필요하다.

본 연구에서는 지진해일에 의한 표류물 거동모의를 위해 수치파동수조(NWT; Numerical Wave Tank)와 LS-DYNA의 연성해석방법을 제안하였다. 기존 실험결과와의 비교 · 검증을 통해 NWT와 LS-DYNA의 유효성 및 타당성을 확인하였다. 그리고 지진해일에 의한 컨테이너의 유출과 표류, 크레인과의 충돌에 관한 연성해석을 수행하였다. 지진해일의 규모에 따른 충격파압/력, 컨테이너의 유출과 표류특성, 컨테이너와 크레인의 충돌력을 분석하였다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2018R1C1B6007461).

# Swash 대역에서의 유속 측정을 위한 STIV의 적용성 검토

김연중 · 윤종성(인제대학교) · 정재훈(HTI 코리아)

최근 이상기후로 인한 태풍, 국지성 집중호우 등 지금까지 경험하지 못한 자연재해가 빈번히 발생하고 있으며, 아직 우리는 이러한 자연재해에 대해 초동대응을 민첩하게 조치해야 인명 및 재산피해를 최소화할 수 있을 것이다. 그러기 위해서는 많은 재해가 발생하기 전 발생하는 전조현상을 발견하는 것이 매우 중요한 과제 중 하나일 것이다. 이러한 전조현상을 감지하기 위해 많은 방재데이터의 확보를 위해 수많은 연구자에 의해 관측 기술 및 해석 기법의 고도화를 위한 연구가 진행되었으며 하천, 해양과 연안에서 발생하는 흐름에 대한 역학적 특성과 유동 및 표사이동의 과정 등을 이해하기 위해서는 시공간에 따른 유속변화에 대한 정보가 매우 중요하다. 따라서 흐름 특성을 파악하기 위해 지속적으로 유속 및 유량을 측정하는 기술이 개발되었다.

본 연구에서는 swash zone에서 연안표사 및 변화하는 흐름 특성을 파악하는 데 필요한 매개변수인 유속 측정을 목적으로 STIV(Space time image velocimetry)를 이용하여 유속 측정의 가능성 검토를 목적으로 한다. 유속 측정을 위해 상시 분석이 가능한 비접촉식 STIV 시스템을 개발하여 모델의 검증을 수행하였으며, 영상분석으로 얻은 표면유속을 평균유속으로 환산 방법의 정밀도 향상을 위해 인공지능과 접목하여 촬영한 영상을 학습하여 일정한 평균 유속값을 산정하였다. 개발한 시스템은 CCTV영상, 드론영상, 야간영상 및 휴대폰 영상 등 일반적으로 손쉽게 촬영이 가능한 영상에 대해서도 신속하게 표면유속 및 속도 측정이 가능하며, runrush 및 backwash의 유속을 산정하였다.

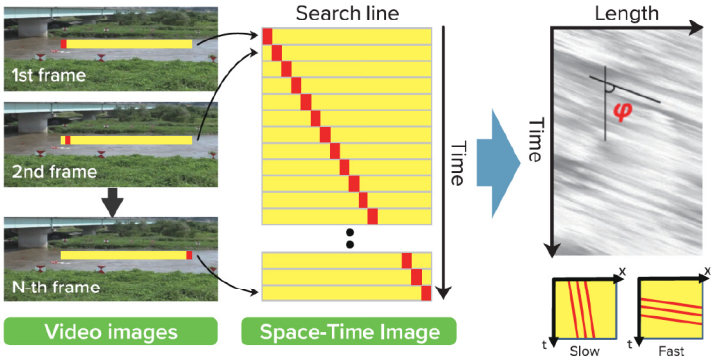



Fig. 1 STIV measurement procedure

## 후 기

본 연구는 2018년 해양수산부(과제번호 20180404) 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

# 오픈 소스 기반 중규모 해양모델 개발

정세민 · 손보훈 (조선대학교)

지속 가능한(sustainable) 해양이용의 실현을 목표로, 자원 · 에너지 · 식량생산 등의 해양이용기술의 환경영향 평가 및 해양 및 연안 지역의 생태계 보전 · 재생 · 이용에 관한 기술과 시책에 관한 다양한 연구가 전세계적으로 실시되고 있다. 조류발전, 해상풍력발전, 해류발전, 염도차 발전, 온도차 발전 등의 해양 신재생에너지 분야는 물론 밀도류확산장치(density current generator), 인공구조물을 사용한 용승류(upwelling) 발생 등을 통한 해양 자양화(nourishment), 특수 재료 및 구조물을 이용한 CO2흡착 등 여러 분야에서 해양을 이용하는 방법들이 지속적으로 연구되어 실현되고 있다. 반면, 물동량 증가에 따라 해양사고의 발생빈도 및 피해규모 또한 동반하여 상승하고 있으며, 최근 한반도 부근의 지진발생 횟수가 증가하고 있어 이에 대한 대비책 및 해양이용시 위험도 평가(risk assessment)에 기반한 공적 수용성(Public acceptance) 확보가 필요하다. 이를 위해서는 인공구조물의 설치 및 해양사고 등의 인류의 활동이 해양환경에 어떤 영향을 주는지 예측 · 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는, 해안 및 근해역내 유동을 재현하고, 온도, 염분, 이산화탄소 등 각종 물리량의 용해, 대류 및 확산 과정을 예측하여, 해양이용 (인공구조물 설치, 각종 사고발생 등)시의 해양환경에의 영향을 평가할 수 있는 다목적, 하이브리드 (다중 스케일) 해양수치모델 구축의 첫 단계로 개발된 오픈 소스 C++ 라이브러리인 OpenFOAM을 기반의 중규모 해양모델을 소개한다.

OpenFOAM을 기반으로 한 해양관련 모델은 수치조파수조(Numerical Wave Tank, NWT) 내의 파랑에 의한 선박 및 부유체의 유체 및 운동성능을 추정하기 위한 솔버(Ex. SNUFOAM, 한국)등과 연안공학, 해양플랜트공학, 수력공학 등에 사용가능한 IHFOAM이 있으나, 주 목적, 기능 및 방법이 본 연구의 해양수치모델과 상이하다. 개발 모델은 O($10^2$ km) 까지의 수평 영역을 가지는 만(Bay), 해안(Coastal area)를 기본 대상으로 하며, 정수압근사(hydrostatic approximation)을 적용하여 연직방향 속도 계산의 간략화를 통해 계산의 고속화를 도모하였다. 해양유동 재현을 위해 무반사 조건을 포함한 개방 경계(Open boundary) 조건을 개발하였으며, 온도, 염분 등에 관한 대류 확산 현상을 해석할 수 있도록 하였다.

## 후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2020R1A2C1008849).

# 1:20 경사면에서 쓰나미 파형에 따른 처오름 특성에 관한 고찰

이우동 · 허동수(경상대학교)

쓰나미의 수리특성을 분석하기 위해 조파수로 또는 수치파동수로에서 주로 이용하는 고립파는 실제보다 상당히 좁은 것으로 알려져 있다. 그러므로 고립파를 이용하여 쓰나미의 수리특성을 해석할 경우, 과소평가될 우려가 매우 크다.

본 연구에서는 2011년 동일본 대지진에 의해 발생한 쓰나미가 관측된 NOWPHAS(Nationwide Ocean Wave Information Network for Ports and Harbours)자료를 직접 분석하였다. 쓰나미 내습시에 직접 영향권에 놓었던 동북지방에 설치된 GPS 부이 6개소, 파고계 4개소의 시간파형과 고립파형으리 비교/검토하였다. 6개의 GPS 부이와 4개의 파고에서 측정된 쓰나미 파형은 고립파보다 평균 8배, 17배를 각각 나타내었다. 이로써 실제 쓰나미 파형이 고립파보다 상당히 넓게 분포함을 알 수 있다. 다양한 파형분포의 TLSW(Tsunami-Like Solitary Wave)를 생성할 수 있는 수치파동수조를 이용하여 처오름 특성을 분석하였다. 일정 이상에서는 처오름 높이 증가세가 둔화되나, TLSW 파형이 넓을수록 처오름 높이가 증가하는 뚜렷한 경향을 나타내었다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1C1B6007461).

# Large-scale Physical Experiment of Overland Flow Effects on Built Environment defended by Seawall and Submerged breakwater

Hai Van Dang · Dayeon Lee · Eunju Lee · Sungwon Shin(Hanyang University)

A large-scale physical experiment scaled 1/20 was conducted at Oregon State University's directional wave basin to investigate the overland flows induced by regular and random waves on a constructed environment representing an idealized coastal city. The physical experiment was proceeded with varying three configurations of countermeasures including the presence of only seawall (SW), only submerged breakwater (SB) and both (SBSW), and changing wave conditions with different significant wave heights to measure wave hydrodynamics and forces, pressures. While a seawall was spaced in the location between shoreline and building rows, submerged breakwater was placed at offshore. First results indicated that presence of countermeasures reduce overland flows impacting coastal communities. Forces with 2% of exceedance and ensemble averaged forces were considered for analysis in random and regular wave cases respectively. Presence of only seawall configuration shows the most effective performance in reducing force-induced overland flows, measured in the first building row; while forces measured in SB configuration dramatically decrease by maximum of 42% - 84% when propagating through building rows, compared to forces in first building rows. There is little difference between 2 configuration of only SW and both SBSW case. This findings and dataset shown here may be useful for city planners and coastal engineers for further research in resilient near-coast structure design.

KEY WORDS: Large-scale physical experiment, Seawall, Submerged breakwater, Random and Regular overland flow

# 해빈보호를 위한 강성식생 공법의 적용성 검토

허동수 · 이정흠 · 정연명(경상대학교)

연안 침식은 우리나라에서 쉽사리 해결되지 못하고 있는 사회적 문제이다. 이것에 대응하기 위해 이안제, 잠제 등과 같은 경성공법을 주로 이용되어왔다. 그러나 경성공법에 의한 긍정적인 효과도 있지만, 부정적인 효과가 나타나는 것 또한 간과할 수 없는 사실이다. 이에 최근에는 유연하게 연침침식을 제어할 수 있는 연성공법과 경성공법이 병행되는 복합공법의 적용이 증가하는 추세이다. 특히, 친자연적인 식생공법에 대한 관심이 대두되면서 식생의 파랑 및 표사제어 효과에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 강성식생의 제원 및 배치가 해빈침식에 미치는 영향을 조사하기 위해 2차원 수리모형실험을 수행하였다. 식생 밀도, 폭, 열 배치에 관한 실험조건을 고려하였으며, 입사파는 평상파, 폭풍파를 각각 적용하였다. 그 결과, 식생 밀도와 폭이 증가할수록 해빈의 모래이동량이 현저하게 감소하여 해빈변형이 크게 발생하지 않았다. 그리고 1열 식생보다 2열 식생이 해빈침식 저감에 더 효과적인 것을 확인하였다.

# The development of the Earthquake - Tsunami Relationship Analysis: Case Study of Potential Tsunami Impacts on Korea

Hai Van Dang · Eunju Lee · Jichang Kim · Sungwon Shin(Hanyang University)

South Korea is located in the west of the Circum-Pacific Seismic belt (Ring of Fire), in which there are numerous extreme tsunami-induced earthquakes occurred, making Korea vulnerable to these catastrophic events' effects. Thus, tsunami evaluation through potential sources is of paramount importance for tsunami influences' alleviation and evacuation purposes. To understand the tsunami threats on Korea, a seismic-tsunami relationship (STR) was developed to visualize the possibility of tsunami hazards on targeted areas in Korea. "Cornel Multi-grid Coupled Tsunami Model " (COMCOT) was applied in calculating of Green Function of each unit tsunami to figure out maximum wave heights which were arranged as impact intensity analysis (IIA) distribution. The corresponding seismic moment magnitudes (Mw) according to "Source-Scale Relationship " were used to replace the above results of maximum wave heights with equivalent intensity for indicating the relationship of earthquake moment and tsunami. Based on the STR map, tsunami threats on specified areas can be quickly predicted. Several different locations of potential tsunami hazards in the seismic belt were selected to estimate the maximum wave heights measured at Ulleung island generated by these tsunami sources. The preliminary results show that compared to the targeted wave height of 1m set up at Ulleung island, the maximum wave heights calculated in this area have a little difference of under 2%. Moreover, scenario analysis and STR map applied for the Hokkaido Earthquake 1993 and Nihonkai-Chubu Earthquake 1983 generated tsunami indicated consistent results. 

KEY WORDS: Seismic–Tsunami relationship (STR) map, COMCOT simulation, 1993 Hokkdaido Earthquake, 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake.

# 현장조사 자료를 이용한 표사계 내의 모래총량 분석기법

남정민 · 김진훈 · 장성열 · 이형석 · 김인호(강원대학교)

최근 강원도 동해안에서는 고파랑에 의한 침식이 가중되고 있으며, 특히 2020년에는 고파랑 빈도수가 크게 증가 함에따라 해변침식이 진행되어 강원도 동해안 대부분 해변에서 침식이 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 강원도 삼척시 한재밑해변 ~ 맹방해변까지 연구대상지로 선정하였다. 해당표사계의 경우 현재 삼척화력발전소를 짓기 위해 야적장 건설 및 공사를 진행하고 있는 지역으로, 최근 고파랑에 의한 침식이 가중되고 있는 지역이다. 공사를 진행함에 있어 침식방지대책과 연계하여 해변 보호목적과 동시에 진행하여 피해를 최소화 시켜야하나 현재 공사는 침식방지대책없이 진행되고 있는 실정이다. 문제는 이 뿐만 아니라, 2014년 1월부터 2020년 07월까지 해양수산부(2014~2016) 및 강원대학교(2017~2019) 파랑자료를 확인한 결과, 2020년 파랑이 01월부터 07월까지 평균파랑 대비 각각 26%, 20%, 18%, 26%, 26%, 2%, 44%로 나타나 관측기간 중 가장 크게 나타났다. 이에 강원대학교에서는 연안침식실태조사를 통하여 수심조사 결과로 표사계 내의 모래총량을 계산하여 모래이동을 확인하였다. 강원대학교에서 정밀구간으로 조사한 시점인 2017년 03월부터 2020년 08월까지 총 29회의 자료를 이용하여 상맹방(A), 하맹방(B), 맹방(C), 덕산(D) 해변의 육상부터 EL(-)16m 까지 경계를 나누어 체적을 각각 구하였고 각 지점마다 평균체적을 구하여 백분율로 분석하였다. 그 결과, 상맹방(A)구역에서는 최대 3%증가 최소 4%감소 평균 0.2%증감, 하맹방(B)구역에서는 최대 3%증가 최소5%감소 평균 1%증감, 맹방(C)구역에서는 최대4%증가 최소3%감소 평균 0.4%증감, 덕산(D)구역에서는 최대6%증가 최소4%감소 평균0.8% 증감으로 분석되었다. 해당 해변은 침식방지대책이 없는 시점에서 공사를 진행하여 해변의 해빈폭이 감소하고 이로인해 해변침식 경향이 나타나고 있으나, 모래총량개념으로 구역별 체적으로 분석하면 해변의 모래는 외해로 빠져나가 호형사주(Crescentics bar)를 이루고 있으며 이는 침식방지대책이 없는 상황과, 2020년 너울성고파랑 내습이 평균 23% 증가함에 따른 결과로 분석되었다.

# 종합 표사수지 분석을 위한 하이브리드 하구사주 붕괴 및 생성 모델

우정운·김연중·김태우·윤종성(인제대학교)

동해안에서의 연안침식 문제가 점차 심각하게 진행됨에 따라 사회적 문제로 크게 대두되고 있다. 하지만 토사이동의 매커니즘이 매우 복잡하여 종합적인 표사수지 분석과 연안침식의 정확한 원인 규명이 어렵다. 연안침식의 강도를 직관적으로 판단할 수 있는 요소는 크게 해안선 변화와 하구사주의 상태 두 가지가 있다. 연안에서의 종합적인 표사수지 예측을 위해서는 파랑에 의한 표사수지의 변화뿐만 아니라, 하천으로부터 유출되는 토사량 및 홍수파에 의해 발생하는 하구사주의 붕괴 및 생성에 따른 표사수지를 고려해야 한다. 하지만, 국내 연구 동향은 너울성 파랑 및 폭풍해일 내습과 같은 이벤트성 단기 예측에 집중되어있다. 하천을 고려한 하구사주의 붕괴와 회복 과정에 대한 장기 예측 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 하천유량에 따른 하상변동량을 계산하는 붕괴모델과 고파랑 빈도해석을 통한 사주회복 모델을 결합하여 종합적인 표사수지의 정량적인 분석을 목적으로 한다. 검토대상 지역인 강원도 맹방해수욕장의 지형측량 자료를 이용해 하구의 지형자료를 구축하고, NOAA에서 제공하는 파랑 데이터 분석을 통해 산술적 파랑 빈도해석을 실시하여 대표파랑 및 적용시간을 설정하였다. 또한, 장기간의 관측치와의 비교하여 모델의 적용성을 평가한다.

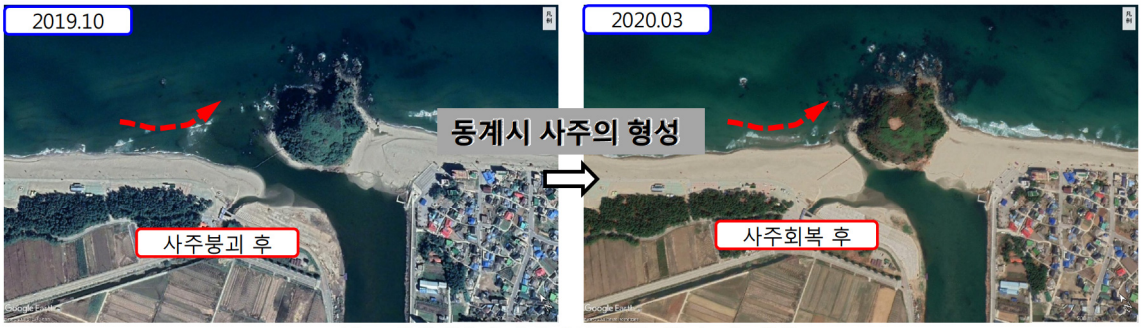



Fig. 맹방해수욕장에서의 사주 붕괴 및 생성

## 후 기

본 연구는 2018년 해양수산부(과제번호 20180404) 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

# 선박 및 해양플랜트 구조물의 성능기반 내화설계를 위한 열-구조 연성해석에 관한 연구

기민석 · 박범진 · 이강수 · 박병재(선박해양플랜트연구소)

선박 및 해양플랜트 구조물의 화재 및 폭발 사고의 피해를 줄이기 위하여 실계 단계에서부터 해양플랜트 구조물의 내화성능을 검증하는 성능기반 내화설계에 대한 필요성이 증가하고 있다. 기존의 화재 안전 설계법은 하중과 구조물을 이상화하여 단순화된 방법을 적용하고 있는데 이는 사용하기 쉽고 빠르지만 실제적인 구조 응답을 계산하기에는 한계가 있다. 따라서 화재 하중을 받는 구조물의 보다 정확한 구조응답을 예측하기 위하여 발생 가능한 화재 시나리오에 대한 구조물의 열-구조 연성해석이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 선박 및 해양플랜트 구조물의 구조 부재로 사용되는 H형강을 대상으로 1.8MW급 버너 화재시나리오의 열-구조 연성해석을 수행하였다. 화재에 의한 가스온도분포 및 특성을 얻기 위한 화재시뮬레이션은 FDS를 사용하였으며 이 결과를 바탕으로 한 구조물의 열전달해석 및 비선형 구조응답 해석은 Ansys를 사용하였다. 마지막으로 본 연구를 통해 수행한 열-구조 연성 해석 결과의 정확도 검증을 위하여 가스 온도, 부재 온도, 변위 결과를 실험 결과와 비교하였다.

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 주요사업으로 수행중인 “불확실성을 고려한 유탄성 기반 해양구조물 구조손상도평가 핵심기술 개발(1/5)[PES3490]”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

# 반응 표면 분석법을 이용한 파형 웨브 조립보의 구조 거동 고찰

박성주* · 정준모** · 김국현*
*동명대학교 조선해양공학부
**인하대학교 조선해양공학과

# Structural Behavior of Corrugated Web Beam using Response Surface Analysis

Sung-Ju Park*, Joonmo Choung** and Kookhyun Kim*
*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea
**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**KEY WORDS:** Corrugated web beam 파형 단면 보, Collapse strength 붕괴 강도, Parametric modeling 파라메트릭 모델링, Response surface analysis 반응 표면 분석법

**ABSTRACT:** *The use of corrugated web beam has recently been increasing due to thin web and stability against shear strength compared with the built-up beam. This paper investigates a collapse strength of the corrugated web beam with a parametric sensitivity study on the web girder design parameters; wave height, wave length, and web thickness. The finite element analysis of each model was performed to evaluate the collapse strength of the corrugated web beam under a linear distributed load on the connection line between the top flange and sinusoidal corrugated web. The slenderness ratio of the finite element model was determined from the AISC Code. The ultimate load capacity was identified using numerical reaction force and mid-span deformation. The response surface plot showed the graphical illustration of the relationship between design parameters and collapse strength. The collapse strength increases as the web wave height to web length ratio and web thickness increases.*

## 1. 서 론



**Fig. 1** Photo of corrugated web beam
(출처: https://www.zebau.com/)

두 개의 수평재 플랜지(flange)와 수직재인 웨브(web)로 구성된 H-형강은 주로 기둥, 보, 기타 구조물로서 조선, 건설, 토목 등 많은 산업 분야에서 적용되어 왔다. 최근 H-형강의 웨브가 주름진 형태의 파형 단면 보는 전단 하중에 강한 특성을 가지고 경량성을 확보할 수 있는 장점으로 사용 빈도가 높아지고 있다 (Fig. 1 참고). 주름 단면 보(corrugated web beam)는 정현파형(sinusoidal wave)과 제형(trapezoidal wave)으로 가공할 수 있으며, 주름 방향으로의 변형의 유연성 확보 및 판의 전단 강성을 주름으로 인해 향상 시킬 수 있다(Shon et al., 2012; Hassanein and Kharoob, 2013; Kim, 2014; Leblouba and Tabsh, 2020). Fig. 2에는 파형 단면 보의 기하학적 형상을 나타내었다. 플랜지 치수는 두께($t_f$)와 폭($b_f$)에 의하여 결정되며, 주름 웨브의 파고($a_3$), 파장($2w$), 호장($2s$), 두께($t_w$), 웨브 높이($h_w$)에 의하여 주름 웨브의 치수가 결정된다.

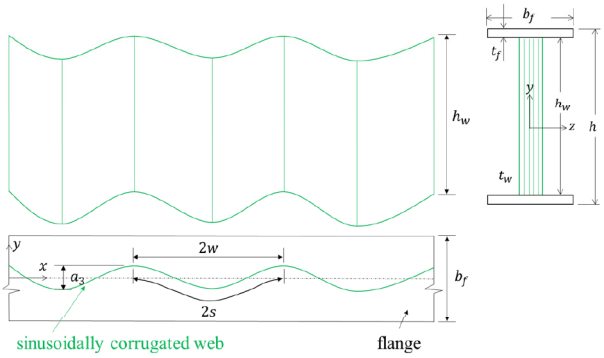



**Fig. 2** Geometry of sinusoidal wave corrugated web beam

본 연구에서는 파형 단면 보의 웨브 두께($t_w$), 주름 파고($a_3$) 및 주름 파장($2w$)의 치수를 변경하며, 수치해석 기반 보의 하중지지 능력, 즉 붕괴 강도를 평가하였다.

**Table 1** Case of parametric modeling (unit: mm)

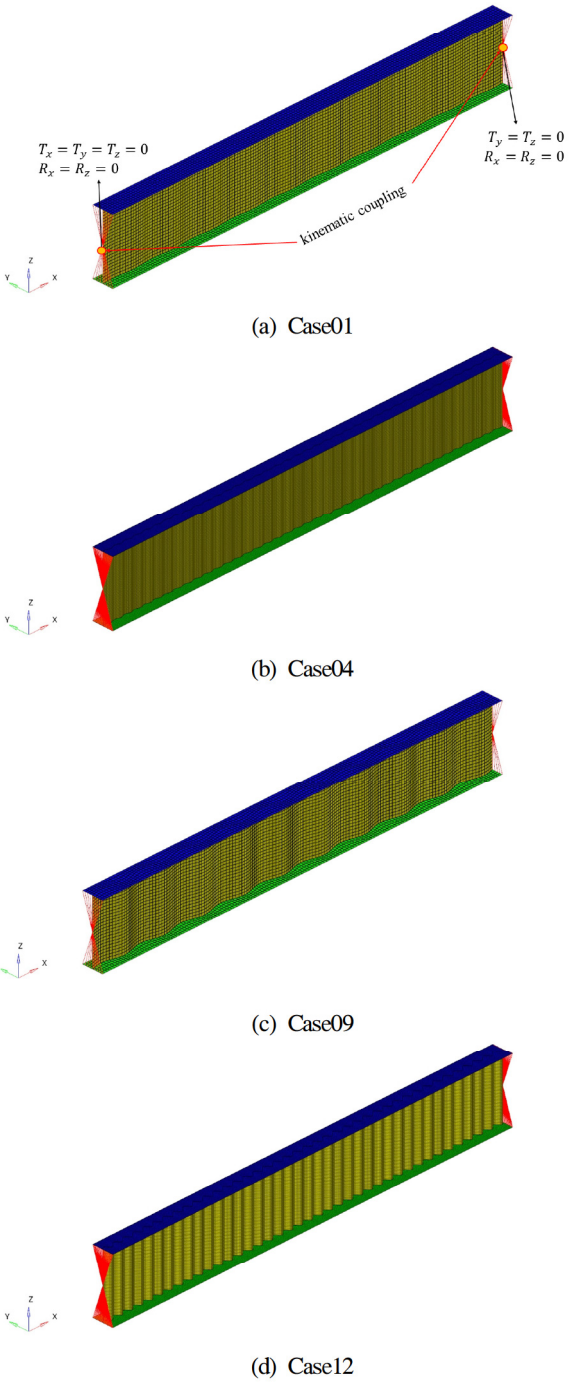
| $t_w$ | $l/2w$ | 10.0 | 15.0 | 20.0 | 40.0 |
|---|---|---|---|---|---|
| | $2w$ | 600.0 | 400.0 | 300.0 | 150.0 |
| 2.0 | 20.0 | Case01 | Case02 | Case03 | Case04 |
| | 40.0 | Case05 | Case06 | Case07 | Case08 |
| | 60.0 | Case09 | Case10 | Case11 | Case12 |
| 3.0 | 20.0 | Case13 | Case14 | Case15 | Case16 |
| | 40.0 | Case17 | Case18 | Case19 | Case20 |
| | 60.0 | Case21 | Case22 | Case23 | Case24 |
| 4.0 | 20.0 | Case25 | Case26 | Case27 | Case28 |
| | 40.0 | Case29 | Case30 | Case31 | Case32 |
| | 60.0 | Case33 | Case34 | Case35 | Case36 |

## 2. 수치해석

### 2.1 유한 요소 해석 모델

Table 1에는 총 32개의 수치해석 케이스가 정리되어 있다. 해석 대상 주름 단면 보의 두께($t_w$)는 2.0mm, 3.0mm 및 4.0mm이다. 주름 파고($a_3$)는 20.0 - 40.0mm까지 20.0mm 간격이며, 주름 파장($2w$)은 150.0 - 600.0mm 범위에서 파의 개수($l/2w$)가 10개($2w$=600.0mm), 15개($2w$=400.0mm), 20개($2w$=300.0mm), 40개($2w$=150.0mm) 되도록 하였다. 플랜지 두께($t_f$)와 폭($b_f$)은 각각 28.0mm와 300.0mm로 고정하여 모델링하였다. 해석 대상 보의 길이는 AISC(AISC, 2016)에 제시된 기둥 좌굴의 세장비 검토를 통해 비탄성 횡 비틀림 좌굴 한계 길이(inelastic lateral torsional buckling) 이하가 되도록 하였다. 계산된 횡 비틀림 좌굴 한계 길이는 9.0m이며, 수치해석 모델의 길이는 6.0m이다. 파형 단면 보의 경계 조건은 양단 단순 지지인 경우만 고려하였다. 수치해석 모델의 경계 조건을 부여하기 위하여 양단 도심을 참조 절점으로 하여 양단 평면에 위치한 절점을 6자유도 종속하였다. 따라서 참조 절점의 변위와 양단 경계면 변위가 일치한다. 양단 단순 지지를 위하여 플랜지 하부에만 경계 조건을 부여한다면 하부에 국부 하중이 가해지 경계 조건부만 붕괴하는 현상이 발생하기 때문에 이와 같은 경계 조건은 바람직하지 않다. 한 파장($2w$)에 요소 16개 배치되도록 하였으며, 요소 종류는 4절점 감차 적분 셸 요소(S4R)를 사용하였다.

파형 단면 보의 유한요소 해석을 통해 붕괴 강도를 도출하였다. 가공 경화를 고려하지 않는다면 항복 강도의 증가가 전체적인 붕괴 강도의 선형적 증가를 유발할 수밖에 없다. 그러나 붕괴 시 소성 변형률의 발달이 매우 미소한 것을 감안하면, 가공 경화는 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 항복($f_y$)를 235MPa로 고정하여 진행하였다.




(a) Case01

(b) Case04

(c) Case09

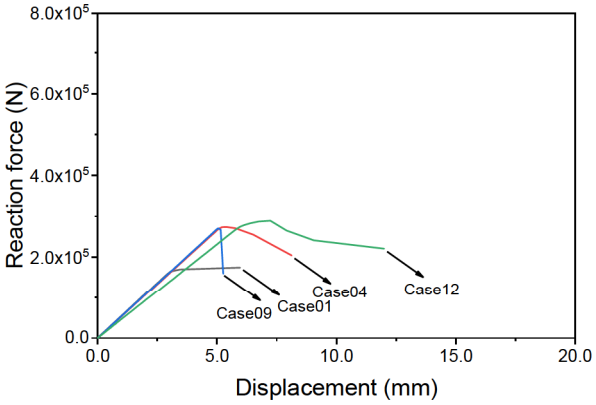
(d) Case12

**Fig. 3** Finite element models of the corrugated web beam

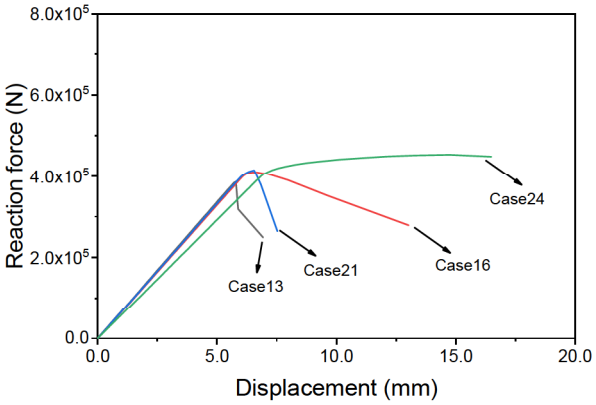
## 3. 수치해석 결과

### 3.1 비선형 유한 요소 해석

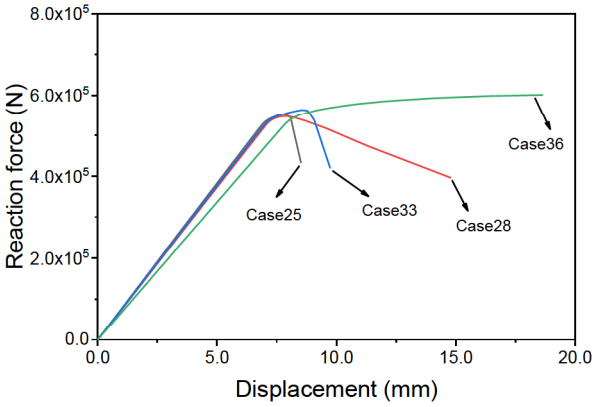
웨브 형상 변화에 따른 붕괴 강도의 관계를 분석하기 위해 파라메트릭 수치해석을 수행 하였다. 유한 요소 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램 Abaqus/Explicit(2014)를 이용해 수행되었다. 수치해석 결과로 보의 mid-span 위치에서 처짐과 끝단 지지점에서 반력을 도출하였다 (그림 3(a) 참고). 처짐-반력 곡




(a) $t_w$=2.0mm




(b) $t_w$=3.0mm



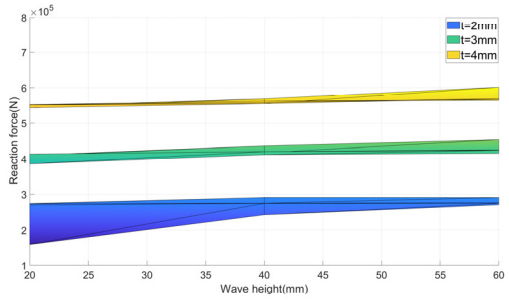

(c) $t_w$=4.0mm

**Fig. 4** The comparison of reaction force-displacement curves

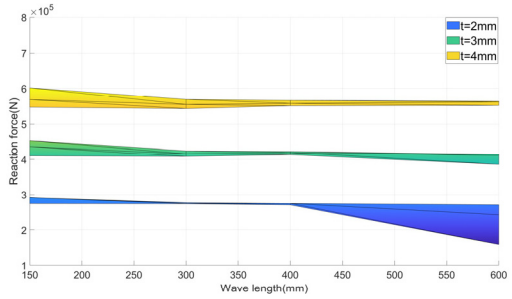
선에서 최대 반력을 구조물의 하중지지 능력으로 정의하였다.

### 3.2 반응 표면 분석

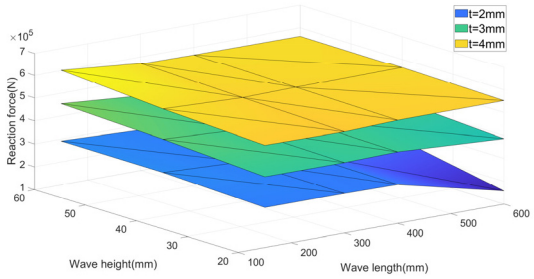
Fig. 5에는 파형 웨브 두께별 반응 표면을 나타내었다. 두께가 증가하면서 붕괴 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 두께에서 웨브 파고가 증가하고, 파장이 짧아짐에 따라서 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 웨브 두께 2mm에서 H-형강에 가까운 파고 20.0mm 파장 600.0mm의 경우 하중 지지능




(a) $a_3$ - reaction force plane view




(b) $2w$ - reaction force plane view




(c) ISO view

**Fig. 5** The response surface according to reaction force and web deign parameters

력이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 파형 웨브 빔의 비선형 FEA에서 얻은 반력을 주름 웨브의 질량으로 나눈 값이 나타나 있다. 주름 웨브의 두께가 증가하면 절대 강도는 증가하지만, 단위 질량당 강도는 상대적으로 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

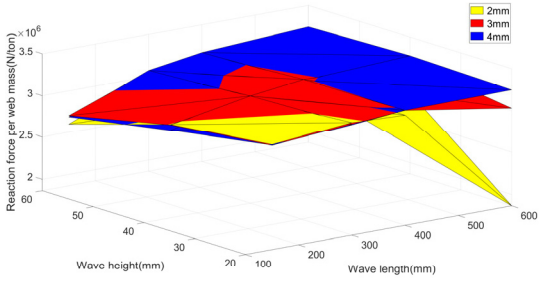



**Fig. 6** The response surface according to the reaction force per mass of web and web design parameters

## 4. 결 론

본 연구는 파형 단면 보의 형상 파라메타에 따른 붕괴 강도 비교에 대한 수치해석 연구를 수행하였다. 설계 변수는 주름 웨브의 두께, 파장 및 파고이다. 최종적으로 파형 주름 웨브 보의 형상의 주름이 파장이 증가하고, 파고가 비교적 작은 상태에서 가장 좋은 강도를 도출할 수 있었다.

## 후 기

본 성과물은 부산광역시의 대학혁신연구단지조성사업 중 “동명대학교 대학혁신연구단지조성사업” 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

AISC. (2016). Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction

Hassanein, M.F. and Kharoob, O.F. (2013). “Behavior of bridge girders with corrugated webs: (I) Real boundary condition at the juncture of the web and flanges”, Engineering Structures, Vol 57, pp. 554-564.

Kim, Y.W. (2014). “Static Analysis of Trapezoidal Corrugated Plates under Uniformly Distributed Load”, The Korean Society For Power System Engineering, Vol 18, No 1, pp. 99-105.

Leblouba, M. and Tabsh, S.W. (2020). “Reliability-based shear design of corrugated web steel beams for AISC 360 specification and CSA-S16 standard”, Engineering Structures, Vol 215, pp. 110617.

Shon, S.D., Yoo, M.N. and Jae, S. (2012). “Characteristics of Cross-section of Sinusoidal Corrugated Web Girder in Accordance with Minimum Weight Design”, Architectureal Institute of Korea, Vol 28, No 10, pp. 73-80.

# 유한요소 해석과 포텐셜 이론에 기반한 쇄빙선의 빙저항 추정에 관한 연구

한동화 · 정준모 · 황안둥 · 팜티큔마이(인하대학교)

# A Study on Estimation of Ice Resistance of Icebreaker based on Finite Element Analysis and Potential Theory

Donghwa Han · Joonmo Choung · Anhdung Hoang · Pham Thiquynhmai(인하대학교)

The many methods used to predict the ice resistance of a ship have their advantages and disadvantages. For example, the analysis time is very short when using an empirical formula, but it may not be sufficiently accurate for any ship and ice environmental conditions. Other numerical techniques require high computing costs to increase accuracy. This paper proposes a new simulation technique that combines a finite element method and a user-subroutine to control the force acting on ice in real-time. Because it does not model the fluid, it can predict the ice resistance faster and more accurately than other simulation techniques. How the buoyancy and drag forces are generated on ice in real-time is explained using a user-defined load subroutine. Simulations were performed according to the element size of single ice to select the most efficient model, and the drag coefficients were selected based on the total resistance derived from computational fluid dynamics (CFD) simulations. The simulations showed that the total resistance of the simulation with the calculated average drag coefficient was similar to the CFD result. For further verification, a towing test was performed on an icebreaker. The simulation results showed a significant difference from the towing test result. Intentionally increasing the drag coefficients to increase the contact time between the ship and the ice resulted in a similar overall resistance to that of the towing test. To analyze the motion of single ice, the positional flow theory was calculated using the Cummins equation. As a result, the differences occurred due to the effects of the added mass and memory effects.

KEY WORDS: Ice resistance 빙 저항, Potential theoty 포텐셜 이론, User-subroutie 사용자 서브루틴, Drag-force 항력, Buoyancy 부력

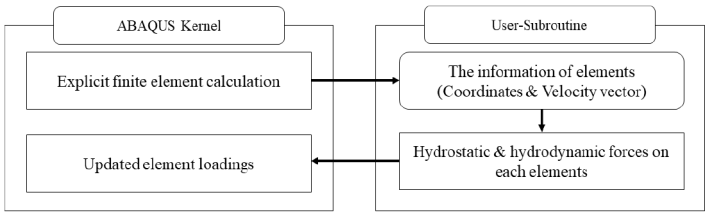



Fig. 1 Real-time load control process

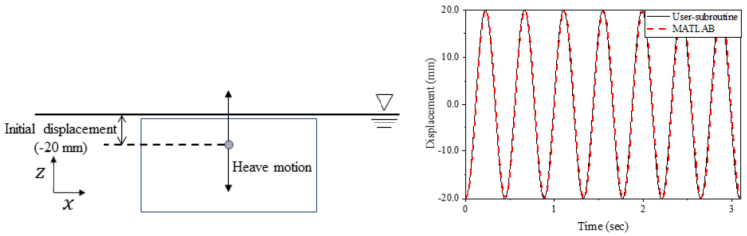



Fig. 2 Comparison of the results by Potential and Abaqus

**ACKNOWLEDGEMENT**

This work was supported by industrial material core technology program “Development of steel application technologies against ice-induced crashworthiness and arctic temperature high toughness“ funded by MOTIE/KEIT and Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through Industrial Facilities & Infrastructure(Desalination) Research Program, funded by Korea Ministry of Environment(MOE)(146836).

# Ice Load Monitoring System의 적용현황 및 주요 선급 지침에 대한 비교 분석

김근곤 · 유기연 · 박현진 · 이탁기(경상대학교)

# Application of Ice Load Monitoring System and Comparison of Classification Guidelines

Geun-Gon Kim · Ki-Yeon Yu · Hyun-Jin Park · Tak-Ki Lee(Gyeongsang National University)

최근 지구온난화로 인해 극지방의  해빙이 녹아 극지 항로의 개발이 가속화되고 있다. 극지 항로가 개발되면, 빙해역을 운항하는 쇄빙선과 내빙선의 건조가 활발해질 것이며, 이에 따라 극지 항로 운항에 유용한 여러 계측 시스템 중 Ice Load Monitoring (ILM) System의 연구개발이 필요할 것이다. 빙해역을 운항하는 선박에는 ILM System 장착이 권고되고 있다.

ILM System은 선박이 빙해역을 운항하는 중 해방과 접촉 또는 충돌했을 때 선체에 빙하중이 작용하여 미치는 영향을 실시간으로 제공하여, 선박과 해빙의 상호작용에서 발생할 수 있는 구조적인 손상을 최소화하는 조치를 취할 수 있게 개발된 계측/감지 시스템이다.

ILM System은 가속도 및 변형률 센서를 기반으로 하는 시스템으로, 쇄빙선이나 내빙선이 빙해역을 운항할 때 선체에 빙하중이 작용하는 Ice Belt Zone에 3축 또는 1축 Strain Gauge를 부착하여 선체 구조의 변형률에 대한 데이터를 기반으로 선체에 작용하는 빙하중 정보를 얻는다. ILM System은 해빙과 충돌 시 다양한 데이디를 수집하게 되며 이 데이디를 Post Processing 과정을 거쳐 선박에 유용한 정보로 가공하게 된다. 이런 일련의 과정에 의해서 쌓여진 정보는 추후 쇄빙선이나 내빙선의 선체 구조에 해빙에 의한 강도계산시 유용한 정보가 될 것이라 판단한다.

본 발표에서는 ILM System의 실선 장착 실적 및 개발현황을 분석하였다. 또한, 여러 주요 선급들의 지침들에 대한 비교/분석을 수행하여 향후 연구개발 방향을 설정하는데 도움이 되도록 하였다.

**KEY WORDS**: Ice load monitoring system 빙하중 계측 시스템, Usage status of actual ship 실선 탑재현황, Classification Guideline 선급지침

# 충돌 진자 장비를 이용한 빙충돌 실험 및 빙-구조 상호작용 분석 기초 연구

장호상* · 황세윤* · 이장현*
*인하대학교 조선해양공학과

# Analysis for ice impact experiment and ice-structure interaction using pendulum equipment

Ho-Sang Jang*, Se-Yun Hwang*, and Jang-Hyun Lee*

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University, Incheon, Korea

KEY WORDS: Ice Impact 빙충돌, Extreme environment 극한환경, Impact pendulum 충돌 진자, Ice material 얼음 물성, Ice-Structure interaction 빙-구조 상호작용

**ABSTRACT:** *The purpose of this study is to analyze the dynamic material properties while ice impact tests for the dynamic properties of arctic steel and ice loads impacting ships or offshore structures operating in polar regions. Structural damage of offshore structures are mainly caused by the interaction between ice and the structure. In this study, a impact pendulum was designed to verify the dynamic constitutive equation of an arctic steel subjected to ice impact. The ice impact test is not an actual ship-to-ice collision, but an small scale impact test to investigate the dynamic deformation properties of the ice and steel. In future work, FEA will be used to verify the response of the structure and the pressure due to an ice collision.*

## 1. 서 론

극지 운항 선박이나 해양구조물의 설계에서 빙하중은 가장 중요하게 고려되는 요소이다. 빙판 또는 빙괴와 구조물의 충돌 과정에서 발생하는 충돌 압력에 의해 강재의 변형이나 손상을 유발한다. 따라서 본 연구에서는 빙충돌에 의한 빙-구조 상호작용 특성을 확인하기 위한 실험을 목적으로 빙충돌 진자 장비를 제작하고, 추후 충돌 거동을 유한요소해석으로 모사하여 동적 재료특성 모델의 타당성을 검증하고자 한다. 현재까지 알려진 빙 충돌 실험 방법으로는 Charpy 충격 시험 방법(Itagaki, K., & Sabourin, R. L., 1980), 수직 낙하 충격 시험, 발사체 충격 시험 방법(Arakawa, M. et al., 1995) 등이 있으나 모두 대상 시편을 고정 시킨 단방향(Uni-Direction)으로 재료 특성을 시험 방법으로 수행해왔다. 그리고 양방향 충돌을 고려하는 충동 방식은 진자식 실험장비(Clarke, G. S., 2012)가 있으며, 최대 충돌 속도는 10~11knots 로 파악되었다. 실제 빙충돌 상대 속도는 10~12knots 내외이며, 본 연구에서 제작 설계한 장비도 최대 10~11knots 속도로 충돌이 가능하도록 제작하였다. 그리고 제작한 실험 장비를 통해 목표 속도에 도달하는지 성능을 검증하고 충돌 속도에 따른 압력분포도 계측하였다. 추후 로드셀과 변형률 게이지를 부착할 것이다. 이를 토대로 빙-구조 상호작용을 분석하여 얻은 변형 및 빙충돌 압력, 변형율 등을 모사하기 위한 유한요소해석 연구를 진행할 예정이다.

## 2. 빙충격 진자 실험 장비 제작

본 연구에서는 빙충격 실험을 진행하기 위해서 장비를 제작하였다. 강재 물성 실험을 위한 충돌 실험하는 방법으로는 Charpy 충격 시험 방법, 수직 낙하 충격 시험, 발사체 충격 시험 방법 등이 있으나 모두 대상 시편을 고정 시킨 단방향(Uni-Direction)으로 재료 특성을 시험 방법으로 수행해왔다. 또한, 진자식 충격 시험 방법(Clarke. G et al., 2012) 의 실험 사례가 존재한다.

Table 1 Specification of ice impact pendulum equipment

| research | Impact type | size of target specimen |
|---|---|---|
| Itagaki, K., & Sabourin, R. L., 1980 | Charpy | 1cmX1cmX5.5cm (ASTM Standard) |
| Arakawa, M. et al., 1995 | projectile | 3.6cm, 4.5cm, 5.6cm (diameter and height) |
| Kim. H et al., 2003 | projectile | diameter=200mm t=1.2mm |
| A. Combescure et al., 2011 | projectile | 304.8mmX304.8mm t=1.22, 1.42, 1.83, 1.91, 2.44, 2.62 mm |
| Clarke. G et al., 2012 | pendulum | 706mmX365mm (t=0.25, 0.5 0.75 inch) |

Table. 1은 조사된 빙시편을 대상으로 충격 실험 사례와 사용된 시편의 크기 및 시험 방법을 정리한 것이다. 본 연구에서는 빙충돌 실험을 진행하기 위해서 장비를 제작하였다. 기존 극한환경용 고인성 재료 개발을 위한 충돌 특성을 실험하는 방법으로는 Charpy 충격시험 방법, 낙하 충격 시험 등이 있으나 모두 단방향(Uni-Direction)으로 재료 특성을 시험 방법으로 수행해왔다. 본 연구에서는 단반향 뿐만 아니라 양방향(Bi-Direction) 충돌을 고려하기 위해서 진자형식의 충돌 장비를 설계 및 제작하였다. 충돌 진자 장비는 현재 조사된 바로는 해외에서 1건, 국내에서는 전무한 것으로 조사되었다.

### 2.1 빙충격 진자 실험 장비 개념설계

빙 충격 진자 장비를 제작하기 위해서 해외에서 운용중인 장비를 참고하여 제작하였다. 본 연구에서는 단방향 충돌뿐만 아니라 양방향 충돌 특성을 파악하기 위한 실험 장비를 구축하였다. 목표 충돌 속도($V$)와 장비의 크기를 결정하는 진자 팔 길이를 정의하였다. 먼저 식(1)은 위치에너지와 운동에너지의 상관관계와 에너지 보존 법칙을 통해 높이와 속도의 상관관계를 정의하였다. 그리고 식(2)와 식(3)은 진자의 기하학적 특징을 이용하여 팔 길이($l$)와 속도($V$)의 관계를 정의하였다. 또한 진자를 들어 올렸을 때 높이와 인양 각도에 따른 관계식도 정리하였다.

$$h = V_{Max}^2 / 2g \tag{1}$$

$$V_{\max} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl(1-\cos\theta)} \tag{2}$$

$$l = h/(1-\cos\theta) \tag{3}$$

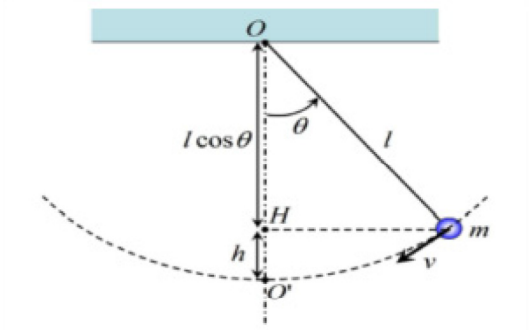



**Fig. 1** Definition of velocity for impact pendulum

### 2.2 빙충격 진자 실험 장비 제원

빙충격 진자 장비 프레임의 크기는 공간적 제약을 감안하여 5m×2m×2.3m 결정하였으며, 전체 중량은 약 3톤으로 추정된다. Fig. 3는 위 설계안으로 제작된 실제 충돌 장비의 도면이며 장비의 스펙은 Table. 2에 정리하였다.



**Fig. 2** ICE impact pendulum equipment

**Table 2** Specification of ice impact pendulum equipment

| Specification | Value |
|---|---|
| Dimensions of frame (Length×Width×Height) | 5×2×2.3 [m] |
| Equipment weight | 약 3 [ton] |
| Pendulum weight | 100 [kg] |
| Arm length | 1.2 [m] |
| Maximum release angle | 45 [degree] |
| Maximum release height | 0.6 [m] |
| Maximum velocity | 2.58 [m/s] (5.01 [knots]) |

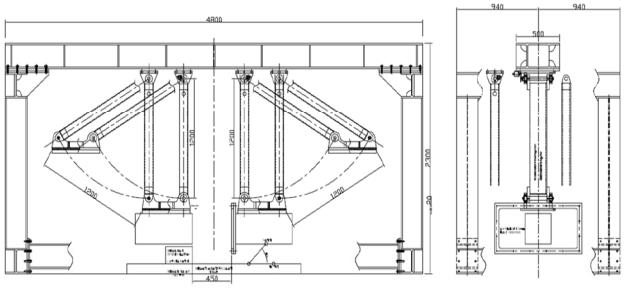


**Fig. 3** Drawing for ICE impact pendulum equipment

진자 팔 길이($l$)는 1.2m, 최대 인양 높이($h$)는 1.35m(최대 인양 각도: 48 degree)로 제작하였다. 최대로 인양했을 때 진자의 속도는 약 2.83 m/s (5.5 knots)로 계산되며, 양 쪽 진사 충격 상대속도는 약 5.63 m/s (11 knots)가 된다. 또한 제작 후 목표 속도에 도달하는지 확인하기 위해서 성능검증 실험을 실시하였다.

### 2.4 빙충격 진자 ICE 시편

본 실험을 수행하기 위해서 장비의 크기나 공간적 제약을 감안하여 ICE 시편의 크기는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 반지름이 100~150mm으로 결정하였으며 이는 Young ICE의 최대두께 및 1년생빙의 최소두께에 해당한다.

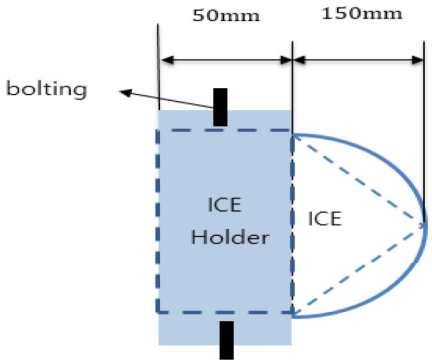



Fig. 4 The shape of ICE

충돌면의 형상은 반구형(hemisphere)으로 선택하였으며, 현재 사용할 ICE의 물성은 증류된 담수를 사용하였다. ICE시편을 제작 및 충돌 면의 형상을 가공하기 위해서 Bruneau et al (2011). 의 연구를 참고하였다.

### 2.3 빙충격 진자 판재 시편

빙충격 진자 실험시 부착할 시편의 형상은 Fig. 5에 제시하였다. 판재시편은 ICE 시편의 직경이 300mm임을 감안했을 때 변형의 형상을 확인하기 위해 폭을 최대 1m로 정의하였다. 실험장비 구조물과 간섭을 피하기 위해 500mm×1,000mm이로 결정하였다. 판의 변형량을 고려하여 판재 시편의 양 끝단만 고정하여 결속 시킨다.

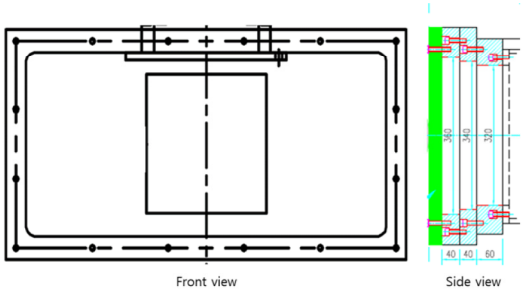



Fig. 5 The shape of Plate specimen

## 3. 빙충격 진자 충격 실험

본 연구에서 빙-구조 상호작용을 분석하기 위해서 충돌 실험을 수행하고 충돌 속도를 계측하였다. 실험은 3차례 진행되었으며, 각 실험 별 목표 충돌 속도는 5, 7, 10knots로 설정하였으며 각 실험의 목표속도는 Table 3에 정리하였다. 빙충돌 실험 시 목표 속도에 도달했는지 확인하기 위해서 각 진자의 속도를 계측하였다. Fig. 6는 각 실험별 진자의 속도를 계측한 결과이다. Table 4에 각 실험별 계측된 진자의 속도를 정리하였다.

Table 3 The target of impact velocity as ice impact test

| | Test 1 | Test 2 | Test 3 |
|---|---|---|---|
| 충돌 속도 | 2.57 m/s<br>5 knots | 3.6 m/s<br>7 knots | 5.14 m/s<br>10 knots |

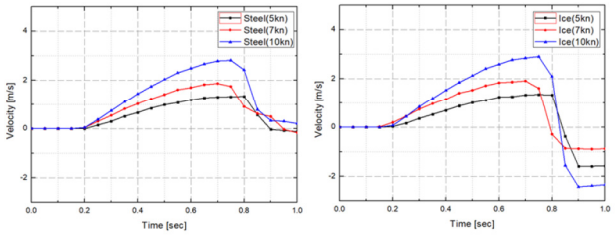



Fig. 6 Impact velocity of steel(left) and ice(right)

Table 4 The result of impact velocity as ice impact test

| 충돌 속도 | Test 1 | Test 2 | Test 3 |
|---|---|---|---|
| Steel | 1.31 m/s<br>2.55knots | 1.85 m/s<br>3.6knots | 2.62 m/s<br>5.09knots |
| Ice | 1.32 m/s<br>2.56knots | 1.86 m/s<br>2.61knots | 2.61 m/s<br>5.07knots |
| 상대 충돌 속도 | 2.63 m/s<br>5.11knots | 3.71 m/s<br>7.21knots | 5.23 m/s<br>10.16knots |

또한, 빙-구조 상호작용을 분석하기 위해 계측한 데이터는 압력분포로써, 구조물에 가하는 최대 압력 및 등가 하중을 산정할 수 있다. Fig. 8은 각 실험별 빙시편이 판재 시편에 가한 압력 분포이며 Table 5에 실험 별 작용한 압력과 등가하중을 정리하였다. 현재 적용한 압력 계측용 필름뿐만 아니라 추후 변형률과 로드셀을 부착하여 계측 결과를 보완할 예정이다.

Table 5 The result of impact velocity as ice impact test

| | Test 1 | Test 2 | Test 3 |
|---|---|---|---|
| 최대 압력 | 91 $MPa$ | 100 $MPa$ | 98.2 $MPa$ |
| 평균 압력 | 52 $MPa$ | 43 $MPa$ | 51.4 $MPa$ |
| 압력 영역 | 0.003 $m^2$ | 0.004 $m^2$ | 0.0034 $m^2$ |
| 등가 하중 | 109.6 $kN$ | 167.6 $kN$ | 176.9 $kN$ |

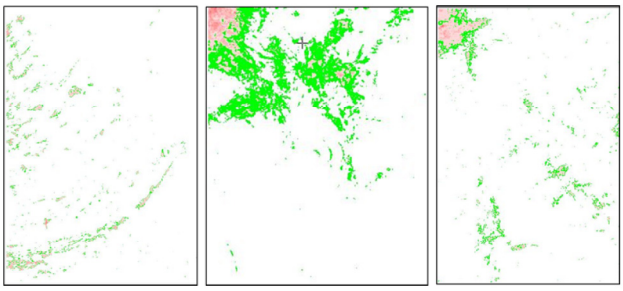


Fig. 8 The distribution of pressure as impact test

Fig. 9은 충돌 후 빙시편의 형상이다. 좌측부터 5, 7, 10knots로 충돌하여 부서진 형상을 보였다. 특히나 10knots 실험에서의 빙시편은 기존 형상을 알 수 없을 만큼 파손이 발생하였다. 추후 연구를 통해 빙시편이 구조물에 가하는 하중 등을 분석하여 빙하중 분석을 수행할 예정이다.



Fig. 9 The shape of ice specimen after impact test

## 4. 결 론

본 연구는 빙충돌 실험 장비 설계 결과를 소개하였다. 빙시편을 부착하여 판재 시편과 충돌 실험을 수행하고 실험 결과 제시하였다. 충돌 속도를 검증하기 위해서 각속도를 계측하여 충돌 속도를 확인하였으며 충돌 시 속도는 설계속도와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 압력 계측용 필름을 부착하여 판재 시편에 가해지는 하중을 산정하였다. 추후 변형률 게이지와 로드셀을 부착하여 빙-구조 상호작용을 분석하기 위한 결과를 보완할 것이며, 추후 연구를 통해 빙충격 실험을 통해 강재의 충격 특성과 거동을 파악하여 빙충격 시뮬레이션 모델에 모사하여 검증할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 산업통산자원부 산업소재핵심기술개발사업 “극한환경용 ICE 내충돌, 고인성 해양플랜트 강재 및 적용 기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

Arakawa, M., Maeno, N., Higa, M., Iijima, Y. I., & Kato, M. (1995). Ejection velocity of ice impact fragments. Icarus, 118(2), 341-354.

Clarke, G. S. (2012). Ice collision experiments with a pendulum impact apparatus (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).

Combescure, A., Chuzel-Marmot, Y., & Fabis, J. (2011). Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice, International Journal of Solids and Structures, 48(20), 2779-2790.

Itagaki, K. (1980). Fracture behavior of ice in Charpy impact testing, Vol. 80, No. 13. The Laboratory.

KAZUO NOZAWA (2010). 빙해공학, 문운당

Kim, H., Welch, D. A., & Kedward, K. T. (2003). Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels. Composites Part A: applied science and manufacturing, 34(1), 25-41.

# 전선구조해석을 위한 하중생성 소프트웨어 소개

전기영* · 변석호* · 이정렬*
*한국선급 연구본부

# Introduction of Load Generation Software for Golobal Structural Analysis of Ship

JEON Giyoung*, BYUN Seokho* and LEE Jeongyoul*

*Korean Register, Busan, Korea

**KEY WORDS:** 직접구조해석, 선체운동, 파랑하중, VTK

**ABSTRACT:** *한국선급은 90년대 초반부터 직접구조해석과 관련된 절차와 소프트웨어를 개발해 왔으며 3D 패널 방법에 의한 선체운동 및 파랑하중 계산 코드(KR3D)와 계산된 하중을 구조모델에 적용할 수 있는 하중변환 소프트웨어(LoadGen3D)을 보유하고 있다. 최근 KR3D코드 및 LoadGen3D는 대대적인 업그레이드가 진행되어 사용자 편의성 및 여러 가지 기능을 추가 개발하였다. KR3D코드는 작업 병렬화를 적용하여 계산 속도를 향상시켰으며, 파고계산 기능을 추가하였다. LoadGen3D는 기존 force maping기능과 추가적으로 pressure mapping과 weakly nonlinear mapping 기능을 추가하였다. KR3D 및 장기응답 코드를 내장하고 있는 Lomos3D 소프트웨어는 LoadGen3D와 통합하여 SeaTrust-ISTAS라는 통합 UI 소프트웨어를 개발하였으며 SeaTrust-ISTAS에는 VTK(Visualiztion Tool Kit)라이브러리를 사용하여 전선모델과 유체모델뿐만 아니라 계산된 파고 및 파랑하중을 가시화하는 기능을 추가하였다.*

## 1. 서 론

선체운동 및 파랑하중 계산 코드인 KR3D는 1998년 처음 개발된 이후로 여러 검증을 통해 그 우수성을 국내외에 임증한 바 있다(홍도천, 1998). 3D 패널법을 적용한 KR3D는 기존의 2D 스트립 방법을 대체하고 2000년 초부터 현재까지 수많은 엔지니어링 프로젝트에 사용되어 왔다. KR3D에서 유체모델로부터 계산된 선체운동과 파랑하중은 구조모델에 적절히 분산되어야 하는데 이를 자동으로 계산해주는 소프트웨어가 LoadGen3D(송강현, 2003)이다. LoadGen3D는 접수면에 파랑하중을 만들고 액체화물, 컨테이너와 같이 특수한 화물에 적합한 하중분산을 고려하여 하중을 생성한다. 여기서 파랑하중과 운동가속도(관성력)를 적절히 전선 구조모델에 적용해야 불평형력이 작아 구조해석의 신뢰성을 확보하는 것이 관건인데, LoadGen3D는 그 정확도가 매우 우수하다.

Lomos3D는 KR3D코드 해석을 위한 전처리 및 후처리 소프트웨어이며 LoadGen3D와 별도로 구동된다. 선형이론을 사용하는 KR3D로부터 계산된 선체거더하중과 운동의 RAO(Response Amplitude Operators)는 파랑빈도분포표에 적용되어 장기응답을 계산하고 그에 상응하는 설계파고를 유도할 수 있는데, 이러한 과정을 Lomos3D에서 수행이 가능하다.




Fig. 1 The concept map of software

소프트웨어 사용 절차에 따른 흐름도는 조금 복잡한데, 운동해석을 위한 중량모델과 하중생성을 위한 중량모델이 동일하며 계산된 선체운동과 파랑하중은 다시 LoadGen3D에 입력되어야 하기 때문이다. 또한 UI 기반 소프트웨어가 아니라 text기반 해석 툴이기 때문에 계산과정에서 발생하는 메시지나 체크파일 등이 무수히 생성된다.

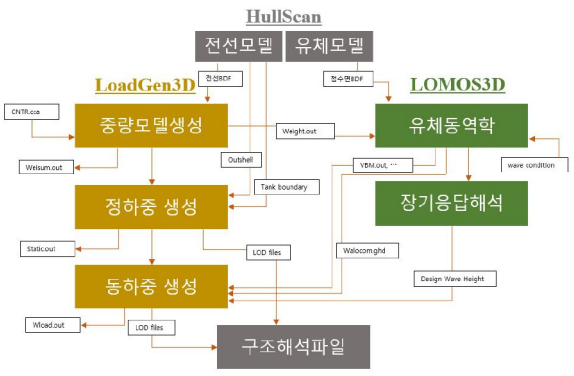



Fig. 2 Flow chart of software(before upgrade)

복잡한 과정에서 발생하는 사용자에러를 줄이고 소프트웨어의 편의성을 높이기 위해 Lomos3D와 LoadGen3D를 통합하고 UI 구성을 새롭게 하였다. 중간에 발생되는 파일을 최소화 하고, 기존에  중복하여 입력하였던 기본 데이터를 통합하여 사용자가 입력하는 데이터를 최소화하였다. KR3D는 C++로 변환하여 통합 UI에 내장시켰으며 작업병렬화(parallelization) 및 복소수 클래스 최적화 등을 통해 연산속도를 2배 이상 향상시켰다.

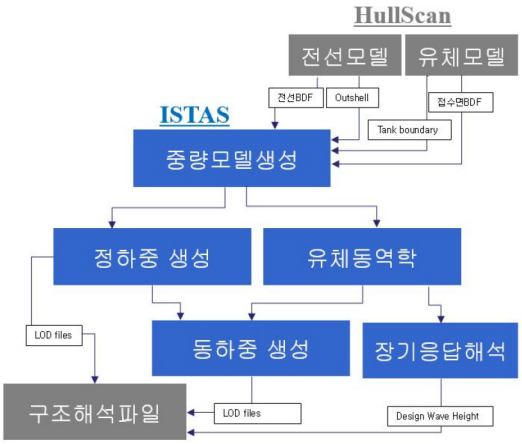
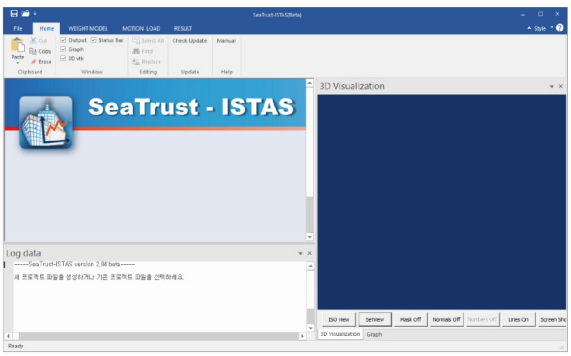



Fig. 3 Flow chart of software(after upgrade)

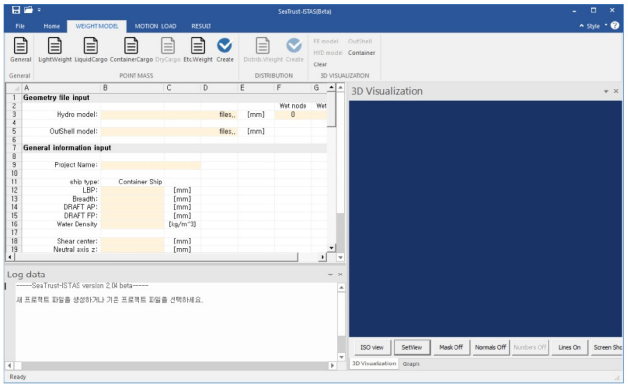
## 2. GUI 업그레이드

### 2.1 통합 프로그램 구성

통합프로그램은 얼핏 복잡할 수도 있으나, 계산 수행 절차에따라 순서대로 버튼 및 탭을 나열하여 사용자가 직관적으로 다음 단계를 예상하고 수행 할 수 있도록 하였다. 모든 입력은 그리드타입(엑셀타입)으로 구성하여 엑셀과 복사/붙여넣기가 가능하도록 하였다. 각각의 입력데이터 뒤에는 단위를 명시하여 입력단위 오류를 방지할 수 있도록 하였다. 또한 다음 순서에 해당하는 버튼만 활성화되고 이미 실행된 작업에 해당하는 버튼은 비활성화되도록 하였다.




(a) Home window



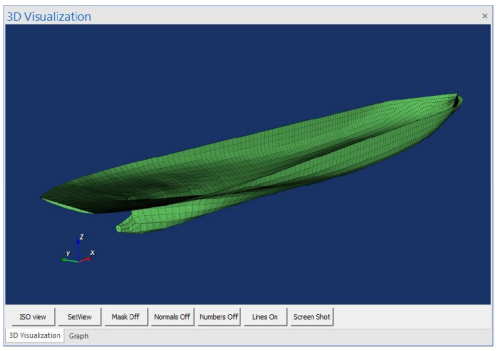

(b) Weight data input window

Fig. 4 Basic window of software

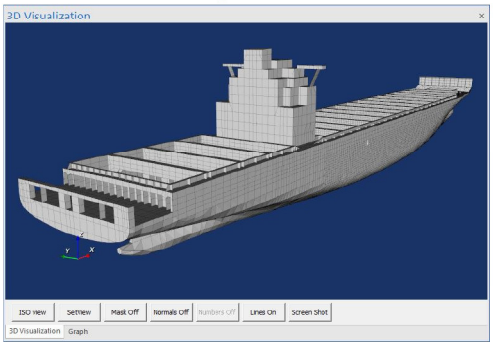
### 2.2 VTK를 이용한 가시화

#### 2.2.1 모델 가시화

3차원 가시화 오픈소스 라이브러리인 VTK(Visualization Toolkit)를 적용하여 전선구조모델, 유체모델을 각각 가시화 할수 있게 하였으며, 전선모델의 경우 shell 요소만 가시화 하고 유체모델의 경우 계산에 필요한 반폭모델을 불러들여 나머지 반폭을 자동으로 생성하여 가시화 한다.




(a) Hydro-model




(b) Structural model

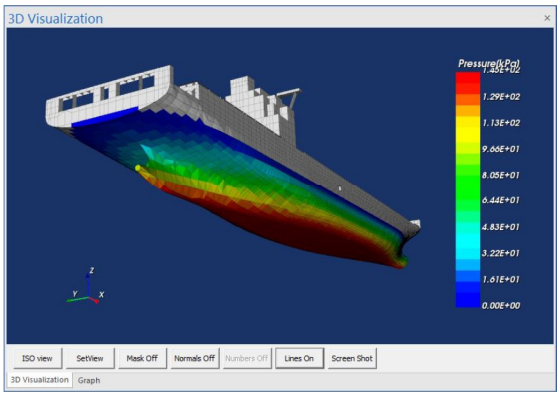
Fig. 5 Visualization of model

중량모델을 생성하기 위해 사용자는 화물/연료/발라스트

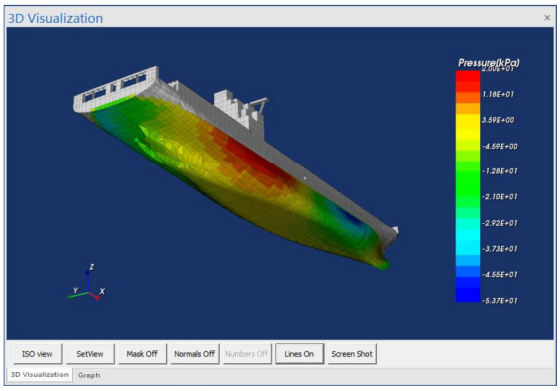
/경하중량 등을 입력해야 하며 경하중량을 제외하고 각각 가시화가 가능하다. 먼저 컨테이너의 경우 입력데이터를 바탕으로 hold/deck에 박스형태로 가시화하였으며 나머지 화물(액체화물/건화물)은 정적하중을 계산하고 화물창 안에 작용하는 압력을 컨투어로 가시화 하였다.

2.2.2 정수압 및 동수압 가시화

입력된 선수 및 선미 흘수와 유체 밀도로부터 정수압 계산이 가능하며 이를 전선모델 접수면에 가시화 하였다. 정수압 계산의 기준은 FE요소 중심을 고려하였으며, 동수압의 경우에는 유체동역학 해석(KR3D 사용)으로부터 계산된 압력을 구조모델에 매핑하였다.




(a) Static pressure




(b) Dynamic pressure

Fig. 6 Visualization of external pressure

2.2.3 파고 가시화

KR3D코드는 최근 선체운동, 파랑하중 계산과 동시에 입력받은 정수면 위치에서의 파고를 출력하는 기능을 추가 개발하였다. 계산된 파고는 자동으로 SeaTrust-ISTAS에서 읽어들여 가시화 및 시뮬레이션이 가능하다.

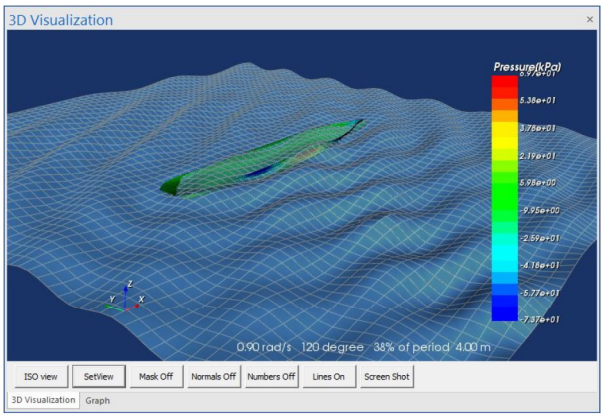
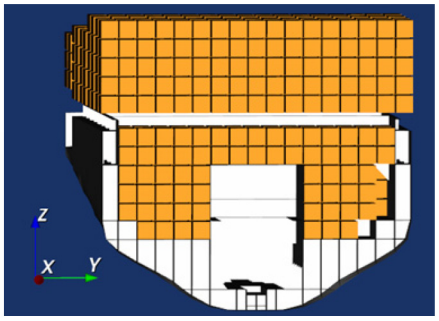



Fig. 7 Visualization of wave elevation

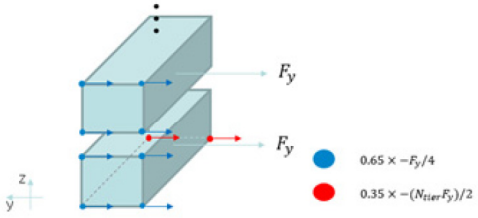
## 3. 화물별 하중생성 기능 강화

### 3.1 컨테이너

On deck 및 In hold에 작용하는 컨테이너 중량 및 관성에 의한 하중을 좀더 상세히 정의 할 수 있도록 하였다. 먼저 on deck 컨테이너에 의한 하중은 해치코밍에 하중을 전달하는데 사용자가 노드를 지정할 수 있으며, 지정하지 않으면 line load로 자동으로 정의한다. In hold 컨테이너의 경우 엔진룸 근처의 적층 구조도 반영이 되며 횡방향 하중의 경우 선급 규칙 14편에 정의된 하중 분담률을 적용하였다(한국선급,2020)




(a) Visualization of container




(b) Load distribution of container in hold

Fig. 8 Arrangement of container and load distribution

### 3.2 액체화물

액체화물의 경우 각 탱크의 무게중심에서의 가속도 $(a_x, a_y, a_z)$와 기준점(refernece point;$x_0, y_0, z_0$)을 고려하여 탱크 내부 압력이 계산된다(IACS, 2020). 액체화물의 밀도와 무게중심은 사용자 입력이며 가속도는 선체운동 계산 결과로부터 얻는다.

$$p = \rho_c(a_x(x_0 - x) + a_y(y_0 - y) + a_z(z_0 - z)) \quad (1)$$

추가적으로 roll, pitch의 가속도로 인한 관성모멘트를 inner bottom에 가해준다.

### 3.3 건화물

건화물의 경우 각 화물창의 무게중심에서의 가속도와 기준점을 고려하여 내부 압력 또는 shear force가 계산된다(IACS, 2020). 액체화물과 다르게 수평방향 가속도에 의한 압력은 25%만 고려하고 나머지는 바닥에 shear force로 적용한다. 수직방향 가속도에 의한 압력은 pancl anglc을 고려한 계수($K_c$)를 적용하여 나타낸다.

$$p = \rho_{eff}(0.25a_x(x_0 - x) + 0.25a_y(y_0 - y) + K_c a_z(z_0 - z)) \quad (2)$$

건화물 또한 추가적으로 roll, pitch의 가속도로 인한 관성모멘트를 inner bottom에 가해준다.

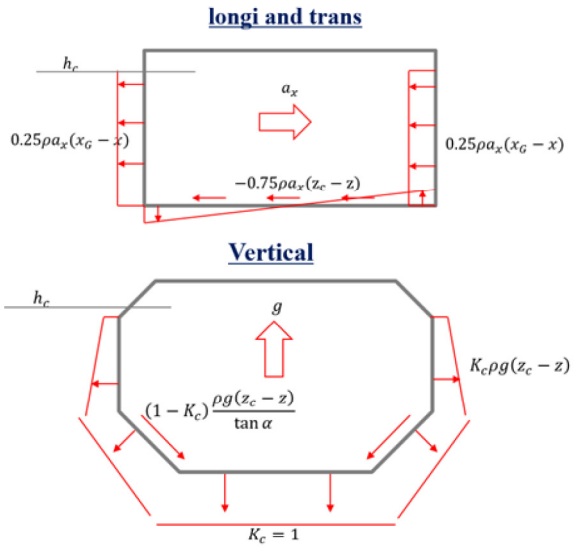



Fig. 9 Pressure and shear force due to dry bulk cargo

## 4. 파랑하중 매핑 기능 강화

유체동역학코드에서 계산된 유체모델의 패널 압력을 구조모델 접수면 요소에 적절히 분산하는 과정을 파랑하중 매핑이라 한다. 기존 Linear force mapping에 추가로 linear pressure mapping과 nonlinear pressure mapping 기능을 추가 개발하여 사용자가 선택적으로 적용 가능하도록 하였다.

### 4.1 Linear force mapping

2002년 LoadGen3D 개발 당시 적용한 이론으로 아래와 같은 절차로 하중변환을 수행한다.

- 유체모델의 각 패널에 상응하는 전선모델의 노드를 각각 저장한다.
- 유체모델의 각 패널에서의 압력은 패널의 normal을 고려하여 하중(force) 벡터로 변환된다.
- 변환된 하중은 상응되는 노드에 동일하게 분산된다.

이 방법은 유체모델에서 계산된 파랑하중과 구조모델에 매핑된 하중의 오차가 거의 없다.

### 4.2 Linear pressure mapping

구조모델의 각 접수면 요소에서 가장 가까운 유체모델의 패널을 찾아서 그 압력을 매핑한다. 하중(force)으로 변환하여 매핑하는 것보다 단순한 절차로 가능하며 접수면 압력을 가시화 하는데도 훨씬 용이하다. 아래 그림은 force mapping과 pressure mapping 후에 거더하중을을 비교하였으며, 두 방법 모두 유체동역학(KR3D) 계산 결과와 잘 일치하는 것을 보여준다.

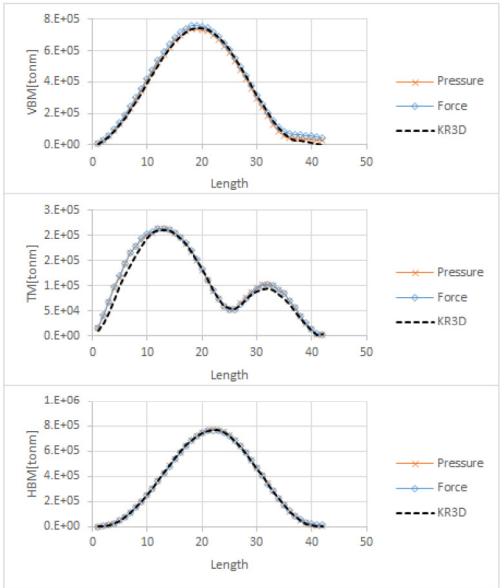



Fig. 10 Comparison of girder load on pressure and force mapping

### 4.3 Nonlinear pressure mapping

선형 매핑은 정수면 이하 접수면에서 계산된 파랑압력을 매핑하며 실제 파고에 의해 변하는 접수면은 무시한다. 이를 보완하기 위해 비선형 매핑(Nonlinear(Weakly-nonlinear) mapping(analysis))을 적용해 실제 접수면을 고

려하여 파랑압력을 매핑 할 수 있다(송강현, 2010).

비선형 매핑은 정압과 동압을 합을 고려하고 매핑한다. 먼저 정수면 이하에서 정압과 동압의 합이 영압(대기압)이 되는 지점을 파고로 가정하고 그 이하의 압력을 모두 영압으로 가정한다. 정수면 상부에서는 선형 베르누이 법칙을 적용하여 파고 이하의 압력을 고려한다.

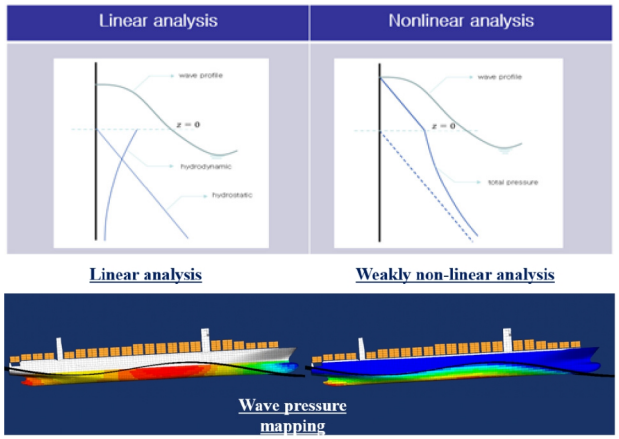



Fig. 11 Comparison of linear and nonlinear mapping

2015년 발효된 UR S11A(IACS Unified Requirement)에서는 기하학 비선형성이 큰 컨테이너선에 대해 이러한 비선형 효과를 고려한 하중식(VBM, VSF)을 개발하였다. 호깅(hogging)에 대해서는 큰 차이가 없지만 선수 및 선미 형상에 따라 새깅(sagging)에 대해서는 큰 차이가 발생한다. 그림 12에서 linear mapping보다 nonlinear mapping 결과의 VBM이 UR S11A와 비교적 근사한 것을 확인 할 수 있다.

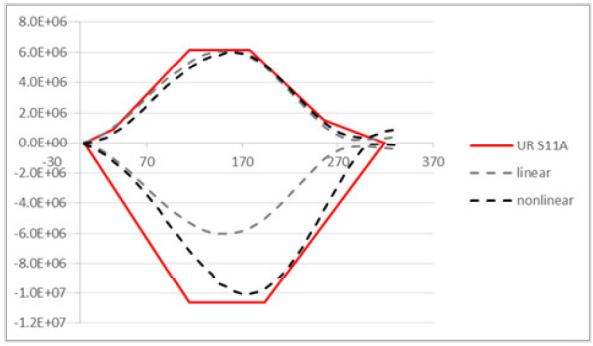



Fig. 12 Comparison of Vertical bending moment on linear, nonlinear and UR S11A

## 5. 결 론

LoadGen3D와 Lomos3D는 2000년대 초에 개발되어 현재까지 수많은 검증과 실 프로젝트에 사용되면서 축적된 노하우와 엔지니어링 기술이 집약된 소프트웨어이다. 하지만 복잡한 구성과 사용법은 익숙한 사용자가 아니면 쉽게 업무를 진행하기 어려웠던 것이 사실이다. 최근 업데이트는 통합 GUI를 구성(SeaTrust-ISTAS)함으로써 사용자편의성을 향상시켰으며 VTK를 이용한 3D 가시화를 통해 사용자의 엔지니어링 이해도를 높이는데 크기 기여할 것으로 기대한다. 또한 처음으로 적용된 기술을 문서화(이론매뉴얼)함으로써 향후 유지보수 및 기술개발에 도움이 될 것으로 판단한다.

## 후 기

본 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(20008632)으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

송강현, 하태범 (2003). “3D 하중푼포 프로그램 개발”, 한국선급 내부 보고서

송강현, 하태범 (2010). “Structural Safety Assessment based on 3D Nonlinear Wave Loads”, The 11th International Symposimum on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS 2010

한국선급, (2020). “제 14편 컨테이너선 구조규칙”

홍도천 (1998). “선박의 속도를 고려한 3차원 파랑하중 프로그램 개발””, 한국선급 내부 보고서

IACS, (2020). “Common Strucutral Rulse for Bulk Carriers and Oil Tankers”

# 모델 축소 기법을 활용한 용접 잔류 응력 해석

신한섭· 박준범 · 부승환(한국해양대학교)

The phenomenon in welding are transient thermo-mechanical in nature. therefore, in order to simulate the welding phenomenon, the thermal-elastic-plastic FE analysis in transient state should be performed that require huge computation time. In this paper, a reduced model is constructed using the automated static condensation (ASC) method, a methodology for performing welding analysis using the reduced model is presented. In the ASC method, the algebraic multilevel substructuring procedure is applied to the matrices obtained by the finite element theory, and the matrices are divided into two parts : the target part containing the non-linear region and the omitted part of the remaining elastic linear region. Then, the omitted part from the initial condition is modified to compensate for the effects of time and temperature changes, and reduced to the target part. After model reduction process, the re-analysis method using the reduced model is applied to solve the nonlinearity of welding analysis. The key idea of how to efficiently predict weld residual stress was briefly introduced, and the plate butt welding process was performed using the reduced model and the full model to verify its performance in terms of solution accuracy and computational efficiency.

# 반복동적응축기법을 이용한 주파수 및 과도 응답 해석

고도현 · 박준범 · 부승환(한국해양대학교)

In this paper, an effective frequency response and transient analysis of a structure is performed through an Iterative Improved Reduced System(IIRS) method. The large-scale structures generally have many degrees of freedom(DOFs), it takes a lot of computational cost to calculate inverse matrix, eigenvalue problem, especially frequency response and transient analysis. In order to effectively perform dynamic analysis, the model reduction method can be used. By using an approximation matrix with reduced degrees of freedom, the computational complexity can be reduce and an approximation to the original model can be calculated. The reduced model is constructed through the IIRS method that repeatedly updating transformation matrix to enhance the accuracy of approximated matrix. The iterative formulation of the reduced model is represented simply with small submatrix operations to avoid huge computational cost induced by the iterative procedure resulting from the very large global transformation matrix. To verify the accuracy and efficiency of proposed method, we compare the numerical results of FE models without model reduction with reduced FE model based on IIRS methods.

# 이방성 보의 모달특성을 이용한 재료 물성치 산정

김국현* · 박성주*
*동명대학교 조선해양공학부

# Estimating Material Property based on Modal Characteristic of Anisotropic Beam

Kookhyun Kim*, Sung-Ju Park*

*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan Korea

**KEY WORDS:** Anisotropic flat plate 이방성 평판, Modal characteristic 모달특성, Genetic algorithm, 유전알고리즘, Material property 재료물성치

**ABSTRACT:** *Anisotropic plate such as FRP(fiber-glass reinforced plastic) and CRP(carbon fiber reinforced plastic) has been widely used for structural members of ships. It is not easy to correctly estimate the material properties of the anisotropic flat plate due to undefined uncertainties in the manufacturing stage. This study implemented an algorithm for estimating material property of anisotropic beam, which is based on a discrete genetic algorithm as an optimization scheme and uses a cost function of some low-order modal frequencies. Material properties of a simple beam model were estimated by applying the natural frequencies from a modal test result to this algorithm.*

## 1. 서 론

FRP(fiber-glass reinforced plastic), CRP(carbon fiber reinforced plastic) 등 이방성 재료로 만들어진 평판은 선박 또는 각종 의장재의 재료로 널리 사용되고 있다. 이방성 평판의 재료물성치는 구조해석 등의 기초자료로 사용되지만, 이들 재료의 제작공법과 제조환경 특성상 정확한 재료물성치 도출은 쉽지 않다.

본 연구에서는 이방성 평판에 대한 모달시험에서 비교적 쉽게 구할 수 있는 저차 모드주파수를 이용해 대상 평판의 재료물성치를 역산하기 위한 알고리즘을 구현하였다. 이를 위해 고전적으로 그 쓰임새가 많은 유전알고리즘을 최적화 기법으로 채택하였다. 최적화 문제에서 사용되는 비용함수는 대상평판의 저차 모드주파수의 조합으로 구성하였다. 비용함수에 사용되는 모드주파수는 MSC NASTRAN의 이방성 재료의 모달해석 기능을 이용해 구하였다. 유전알고리즘 기반의 최적화 과정은 MATLAB을 이용해 구현하였다.

## 2. 최적화 기법 기반 재료물성치 추정

Fig. 1은 유전알고리즘을 이용한 이방성 보에 대한 재료물성치 추정 절차를 도시한 것이다. 본 연구에서는 탄성계수 $E_{11}$, $E_{22}$와 전단계수 $G_{12}$, $G_{13}$, $G_{23}$ 등을 최적화 대상 인자로 사용하였다.

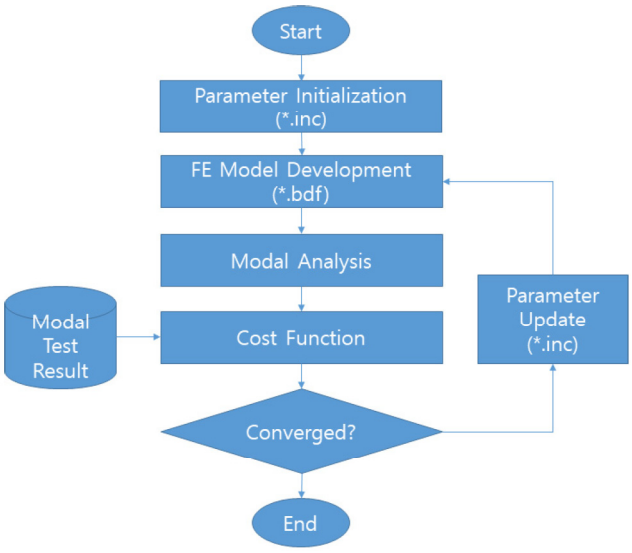



Fig. 1 Material property estimation procedure

## 3. 이방성 보 모델

Fig. 2는 유한요소 해석에 사용되는 재료물성치 추정 대상 이방성 보 모델을 나타낸 것이며, 그 길이는 600mm이며, 폭은

40mm, 두께는 7.25mm이다. 재료의 포아송 비 $\nu_{12}$는 0.28, 밀도는 1590kg/m3다.



Fig. 2 Finite element model of anisotropic beam

## 4. 유전알고리즘

이방성 보 모델에 대한 재료물성치 추정을 위해 이산유전알고리즘(discrete genetic algorithm)이 적용되었다. 최적화 대상 인자인 탄성계수 $E_{11}$, $E_{22}$와 전단계수 $G_{12}$, $G_{13}$, $G_{23}$ 등은 2진수로 변환하여 사용하였다. Table 1은 유전알고리즘에 사용된 인자들을 정리한 것이다.

Table 1 Discrete genetic algorithm parameters

| Parameter Name | Value |
|---|---|
| Number of population | 40 |
| Probability of Crossover | 0.9 |
| Probability of Mutation | 0.1 |
| convergence criteria | 1E-5 |
| Maximum number of interation | 50 |

비용함수 $J$는 식 (1)과 같이 모달시험 결과와 유한요소해석 결과의 고유진동수별 상대제곱오차에 가중치를 고려하여 정의하였다(Zahari1 et al. 2016).

$$J = \sum_{i=1}^{n} W_i \left( \frac{f_i^{fem} - f_i^{exp}}{f_i^{exp}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, $f_i^{fem}$와 $f_i^{exp}$는 유한요소해석과 시험에 의해 도출된 $i$번째 고유진동수를 의미한다. $W_i$는 $i$번째 고유진동수에 대한 가중치이며, 본 연구에서는 공히 1을 적용하였다. $n$는 최적화과정에 사용되는 고유진동수의 개수이다. 대상 보 모델의 고유진동수 $f_i^e$는 모달 시험을 통해 획득하였다.

## 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 최적화 과정에서의 반복 차수별 비용함수값을 도시한 것이다. 25차에서 최종값으로 수렴한 것으로 판단된다. Table 2는 대상 이방성 보 모델에 대한 모달시험을 통해 산정한 고유진동수와 본 연구에서 추정한 고유진동수를 비교하여 정리한 것이다. 실험 결과와 추정결과는 높은 부합성을 보인다. 이 때 최적화 대상 인자인 이방성 보의 재료물성치에 대한 최종 추정값은 Table 3에 정리한 바와 같다.

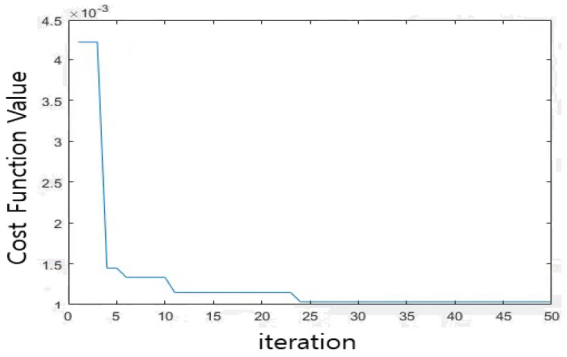



Fig. 3 Cost function value change by iterations

Table 2 Modal frequencies of the anisotropic beam

| Order | Natural Frequency(Hz) | | Remark |
|---|---|---|---|
| | Experiment | Numerical | |
| 1 | 49.13 | 50.27 | vertical bending(1st) |
| 2 | 255.75 | 255.00 | twisting(1st) |
| 3 | 270.38 | 269.49 | lateral bending(1st) |
| 4 | 320.50 | 313.51 | vertical bending(2nd) |

Table 3 Estimated final values of optimization parameter

| Optimization parameter | | Final value($N/m^2$) |
|---|---|---|
| Elastic Modulus | $E_{11}$ | 3.218E+11 |
| | $E_{22}$ | 2.457E+09 |
| Shear Modulus | $G_{12}$ | 3.992E+09 |
| | $G_{13}$ | 7.149E+09 |
| | $G_{23}$ | 6.161E+09 |

## 5. 결 론

본 논문에서는 이방성 보의 저차 고유진동수를 이용한 재료물성치 추정 알고리즘을 구현하였다. 최적화 기법으로는 유전알고리즘을 적용하였다. 고유진동수 계산은 MSC NASTRAN을 하용하였으며, 전체 알고리즘은 MATLAB을 이용해 구현하였다. 보 모델에 대한 고유진동수 추정결과는 실험결과 대비 높은 부합성을 보였다. 향후 다양한 크기와 형상을 갖는 이방성 평판의 적용성에 대한 추가 연구가 요구된다.

## 참고문헌

Zahari, S.N., Zakaria, A.A.R., Sani, M.S.M. and Zaman., I. "A review on model updating of joint structure for dynamic analysis", MATEC Web of Conferences 74, 00023 (2016)

# 함정 RCS와 전술선회직경을 고려한 대함미사일 대응 디코이 효과도 시뮬레이션

김국현*
*동명대학교 조선해양공학부

# Decoy Effectiveness Simulation against Anti-ship Missile Considering RCS and Tactical Diameter of Warship

Kookhyun Kim*

*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan Korea

**KEY WORDS:** Decoy effectivenes 디코이 효과도, Radar cross section 레이더반사단면적, Tactical Diameter 전술선회직경, Anti-ship missile 대함미사일, Discrete state model 이산 상태모델

**ABSTRACT:** *Decoy effectiveness is one of the key performance in terms of survivability assessment of warship. A simulation program is implemented for decoy effectiveness analysis based on the discrete state model in MATLAB/Simulink. This paper introduces to the program including key parameters as inputs, the user interface for input parameters and trajectory display for missile, decoy, and ship. Some examples were presented for investigating applicability of the program.*

## 1. 서 론

함정의 생존성은 함정 설계 및 운용에 대한 핵심인자이며, 피격성, 취약성, 회복성 등으로 구분하여 관리한다. 이 중에서 피격성은 대함미사일, 어뢰 등 함정에 직접적인 타격을 줄 수 있는 위협세력에 의해 피격을 당할 확률을 의미한다. 대함미사일은 함정 설계 시 고려하는 주요위협세력에 해당하며, 이들에 의한 피격 여부는 대함미사일에 장착되는 탐지센서와 함정 자체의 신호수준에 의존한다. 특히, 대함미사일에 장착되는 레이더는 대표적인 탐지센서 중 하나이며, 함정 RCS(radar cross section) 특성에 따라 그 성능이 결정될 수 있다. 한편, 함정에는 대함미사일에 대한 피격 확률을 낮추기 위해 다양한 대응체계를 운용한다. 디코이는 함정이 대함미사일과 교전상태가 된 경우, 대함미사일의 탐지성능을 저하시키고 궁극적으로는 피격을 회피하기 위해 장착된다.

대함미사일에 대응하는 디코이의 효과도는 대함미사일 자체의 운동특성과 탐지센서성능뿐 아니라 함정의 대응특성 및 전장의 환경에 따라 크게 변화할 수 있다. 함정 RCS와 전술선회직경, 디코이 RCS 수준과 전개방향, 전장에서의 풍향과 풍속 등이 주요 영향인자에 해당한다.

본 연구에서는 함정 RCS와 전술선회직경, 풍속 및 풍향 등에 따른 대함미사일 대응 디코이 효과도 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다. 이를 이용해 임의 함 대 대함미사일 교전상황을 가정하여 디코이 효과도를 산정하고 고찰하였다.

## 2. 디코이 효과도 시뮬레이션 프로그램

디코이 효과도 산정을 위해 함에 탑재되는 디코이 시스템의 성능, 대함미사일의 운동특성 및 레이더 성능, 풍향, 풍속 등의 전장 환경, 함속, 전술회전직경 등의 함성능을 포함한 함운용 지침 등을 종합적으로 고려하였다(Fig. 1).

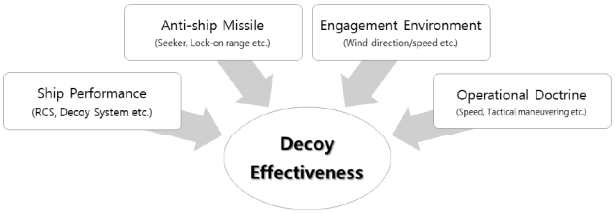



Fig. 1 Decoy effectiveness parameter

디코이 효과도 시뮬레이션 프로그램은 이산 상태모델(discrete state model)(Swee, 2000)을 기반으로 MATLAB/Simulink에서 구현되었다. 프로그램은 함정 RCS와 함속, 전술선회직경 등의 거동 특성에 관한 Ship block과 대함미사일의 함정 추적 알고리즘을 포함하는 Guide block, 디코이 RCS 및 발사방향, 거리, 풍속, 풍향 등의 운용 알고리즘을 포함하는 Decoy block, 대함미사일의 운동특성을 포함하는 Missil block 등으로 구성되어 있다. 이때, 디코이의 RCS는 무지향성(omni-directional characteristic)을 가정해 1개의 값으로 입력하는 반면, 함정의 RCS는 지향성을 가정해 방위각별 RCS값으로 입력한다. Fig. 3은 구현된 프로그램

의 입력창과 대함미사일과 함정, 디코이 등에 대한 궤적을 도시하는 출력창을 보인 것이다.

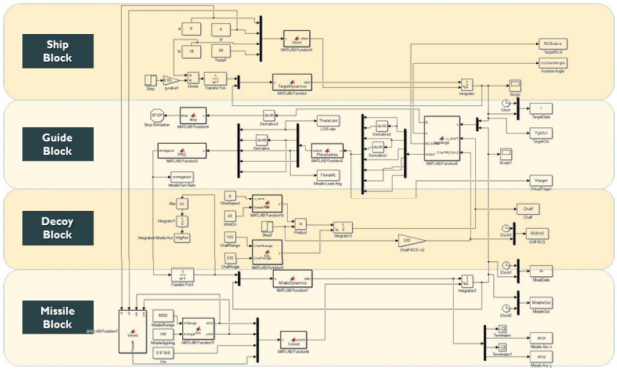
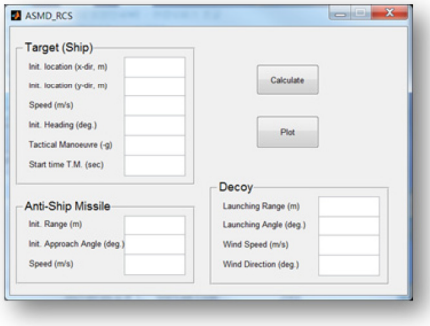
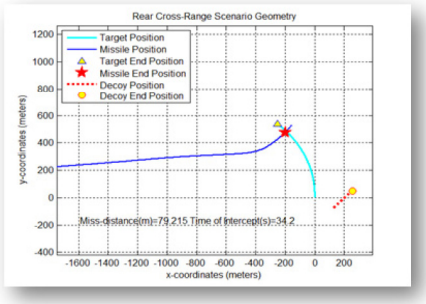



Fig. 2 MATLAB program for decoy effectiveness simulation




(a) Input user interface




(b) Trajectory viewer

Fig. 3 User interface of decoy effectiveness simulation program

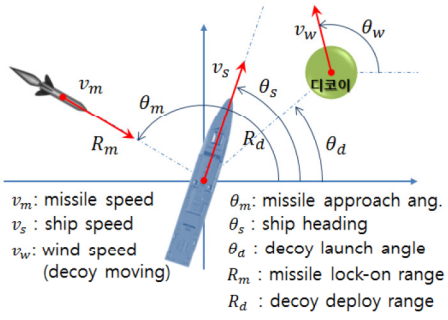



Fig. 4 Engagement scenario and input parameters

Table 1 Input parameters

| Name | Parameters |
|---|---|
| Anti-ship missile | • Weight, diameter<br>• Speed, altitude<br>• Lock-on distance, approach angle |
| Ship | • Length, intial speed & direction<br>• RCS (azimuth angle vs. RCS)<br>• Tactical maneuvering (turning acceleration & direction) |
| Decoy | • RCS (omni-direction)<br>• Devoloping distance / direction<br>• Wind speed / direction |

## 3. 교전 시나리오 정의 및 변수

디코이 효과도 분석에서 사용되는 변수는 Fig. 4와 Table 1에 정리한 바와 같다.

## 4. 디코이 효과도 산정 예

Fig. 5는 몇가지 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 예시한 것이다. 이로 부터 시나리오에 따라 피격여부를 판정할 수 있다. 이는 몬테카를로 시뮬레이션 등의 통계학적 도구의 데이터베이스가 되며, 궁극적으로는 디코이 효과도 분석에 활용될 수 있을 참고로, 피격여부는 함정 위치로부터 대함미사일까지의 최소거리를 기준으로 판정한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 함정 RCS와 전술선회직경, 풍속 및 풍향 등을 고려한 디코이 효과도 분석을 위해 대함미사일 대 함정의 교전 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다. 본 논문에서는 개발된 프로그램의 구성과 입력/출력에 관한 내용을 정리하였으며, 다양한 디코이 효과도 분석 사례를 소개하였다.

## 후기

이 논문은 2019학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2019A020)

## 참고문헌

Swee J. CS. “Missile terminal guidance and control aginst evasive targets”, Naval Postgraduate School, Master’s Thesis (2000)

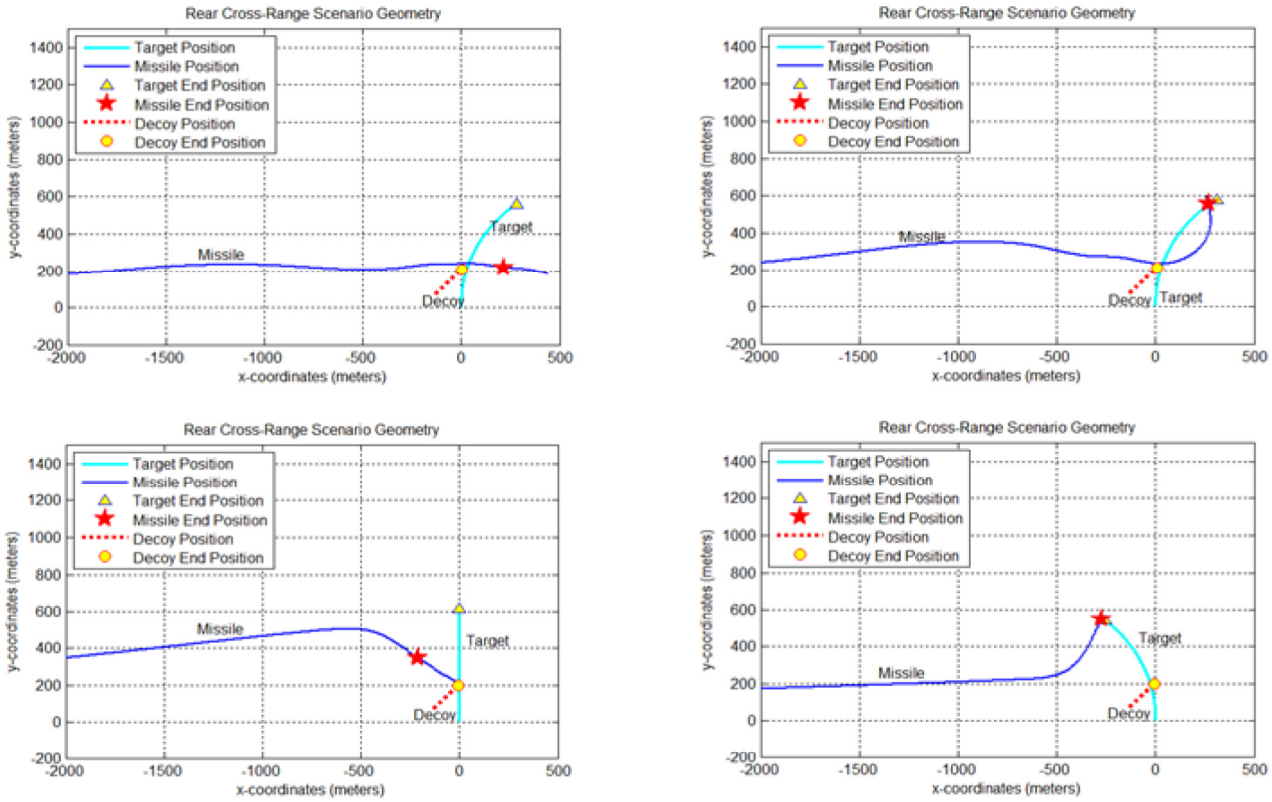



Fig. 5 Examples of trajectories in various engagement scenario

# 선박 배관 Auto-Routing을 위한 커리큘럼 학습 적용 방안 연구

김영수· 이경호·이정민 ·한영수(인하대학교)

배관 설계는 선박 설계 과정에서 다양한 제약 조건을 바탕으로 전문가들의 노하우에 의존하여 이루어지고 있다. 최근에는 경로 탐색에 주로 사용되는 알고리즘인 A*, Dijkstra 및 강화학습을 통한 배관 Routing에 대한 연구들이 진행되었다. 하지만, 경로 탐색 알고리즘은 노드 개수의 증가에 따라 경로 탐색에 많은 시간이 소요되며, 강화학습 또한 시작 점과 끝 점, 장애물 위치 등의 환경적 요인에 따라 재학습이 필요하여 새로운 경로 탐색을 위해 많은 시간이 소요되어 다양한 설계 환경을 고려하는 데 한계가 있다. 따라서, 이러한 한계를 보완하기 위하여 본 연구에서는 낮은 난이도의 학습 환경부터 점차적으로 학습 난이도를 높이는 커리큘럼 학습을 도입하고자 하였으며, 다양한 환경의 학습을 통해 본 연구에서 제안한 커리큘럼학습의 적용가능성을 확인 하였다.

# HVAC 장비 최적화 설계를 통한 순수전기추진의 폐열의 에너지 재활용 설계

김규범* · 김영식†
*선박 · 해양플랜트연구소 친환경연료추진연구센터
†선박 · 해양플랜트연구소 친환경연료추진연구센터

# Energy recovery of waste heat of a fully electrified car ferry design through HVAC equipment optimum design

Gyu-Bum Kim*, Young-Shik Kim†
*†Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejon, Korea

**KEY WORDS:** Fully electrified car 차도선 , Waste heat recovery 폐열회수 , Low-temperature hvac 저온 공조, Absorption chiller흡수식 칠러 ,Heat radiator 방열

**ABSTRACT:** *The fully Electrified-Car Ferry, which will eventually replace traditional car ferries, is the key subject in order to diminish the fossil-fuel emissions. The heat induced by electric motor operation is just released in the water, while there are several needs of heat. in this study, we developed two methodologies to utilize the present waste heat by electric motor. Two developed methodologies are categorized as the low-temperature waste heat and the hot waste heat. Consequently, the first design can recover 11.28% of waste heat at service speed and the latter one can recover 29.4% of waste heat in two scenarios.*

## 1. 서 론

### 1.1 친환경 선박의 전기추진 차도선 선박

현재 기존 화석연료를 사용하는 선박으로 부터의 SOx, NOx, 미세먼지 등 환경오염의 심각성이 부각되고 있는 상태이다. 이러한 환경오염을 피하고자 현재 대형 전동기를 사용한 전기추진선박의 건조를 하려고 여러 나라에서 연구 중이다. 국내에서는 차도선 최초로 전기추진 선박으로 교체하여 연안해운의 환경오염을 방지하는 계획을 세웠고 현재는 발주를 위해서 연구단계가 활발하다.

### 1.2 전기추진 차도선의 대용량모터에 발생하는 폐열

국내에는 전체의 연안선의 차도선을 전기추진 선박으로 교체를 해나갈 예정이며 현재 목포에만 72개의 차도선이 존재한다. 이 전기추진 차도선이 국내에서 활동하는 동안 에너지원을 공급 받아야한다. 에너지원은 이동식 배터리로 육상에서 충전하여 선박에 장착하여 운항하는 시스템이다. 배터리는 추진모터에 동력원을 공급하여 유효전력으로 쓰인다. 그러나 모든 에너지가 유효전력으로 쓰이는 것이 아니다. 일부는 손실로 작용한다. 여기서 대부분의 손실은 모터에서 발생하는 열손실로 배터리의 전력을 소비한다. 전기 추진선박의 폐열을 다시 사용한다면 에너지 효율이 높아지고 환경오염방지에 도움이 될 수 있다.

### 1.3 기존선박의 폐열회수에 이용 연구

기존의 대형 디젤엔진엔진으로 구동을 하는 디젤엔진의 선박에서도 나오는 폐열을 이용하는 연구가 활발하였다. 대표적인 활용사례가 배기가스를 이용한 유기랭킨사이클 활용 연구 사례이다. 엔진은 연소폭발로 이루어지기 때문에 배기가스가 발생한다. 버려지는 배기가스는 많은 양의 에너지를 가지고 있기 때문에 유기랭킨사이클로 폐열을 회수하여 발전을 한다. 본 연구는 순수전기 추진 선박으로 배기가스가 발생하지 않으나 모터의 냉각후 버려지는 폐열을 활용하는 연구로 기존 연구와 차별이 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 전기추진 차도선의 폐열량 분석

#### 2.1.1 전기추진 차도선의 주요사항

국내의 시험개발 중인 순수 전기추진 차도선은 4명의 선원과 승객 120명에 차량 20대, 배터리 차량 2대를 싣는 선박으로 설계가 진행 중이다. 개념 설계를 잡고 현재 주추진의 구동은 500kw급 2대를 탑재하여 주 추진 사용 시 시간당 1000kwh를 사용할 예정이다. 에너지 동력원은 949kwh급 배터리가 2대로 총 1898kwh을 장착을 할 예정이다. 주 추진이외에 거주구역이나 기타 전력원을 사용하는 부분을 Hotel부하라고 한다. 건축물로 따진다면 설비에 들어가는 전력을 보면 될 것이다.

전력사용량의 총합은 주추진부하와 Hotel 부하를 합한 값이다. 총 부하는 배터리에서 에너지원으로 사용한다. 차도선은 120명 정도가 여객으로 승선하며 4명의 선원이 근무를 한다. Fig 1.차도선 개념도에 상부 측에 위치한 여객전용 공간은 한 공간에 학교의 교실보다도 많은 인원이 있어서 열부하가 많고 또한 해양에 햇빛으로 외판 철판을 통하여 많은 열이 통하므로 냉방에 필요한 부하가 크므로 Hotel 부하 중 대부분이 HVAC부하가 차지한다.




Fig 1. [전기 추진 차도선 개념도]

2.1.2 전기추진 차도선의 폐열량

전기추진 차도선에 주추진부하와 Hotel부하가 가 있으며 폐열은 주추진의 전동기를 냉각하는 데에 발생을 한다. 전동기에 발생하는 열량은 해수를 이용하여 냉각하는 방식으로 전동기를 보호한다. 전동기의 효율에 따라 발생하는 열량은 달라진다. 전동기의 온도상승을 막기 위해서 발생하는 열량을 해수로 전부 배출한다고 한다면 1000kw 부하를 기준으로 95%효율의 전동기를 사용한다면 50kw의 폐열이 발생한다. 하지만 선박은 항상 Full load로 운항을 하는 것이 아닌 경제속도를 내면서 최적의 운항을 하여야한다. 최고 속도는 12knot 이지만 경제 스피드는 10knot로 선정한다면 Procon을 이용하여 추진마력을 예측하면 513kw의 부하가 발생하여 운항 시에는 약 25kw의 폐열이 발생한다.

2.2 전기추진 차도선 폐열 재활용 사이클

2.2.1 전기추진차도선의 저온상태의 폐열

전지추진 차도선의 모터에서 나오는 폐열은 파이프라인 상에 유량을 조절을 하여 출구의 온도를 조정할 수 있다.

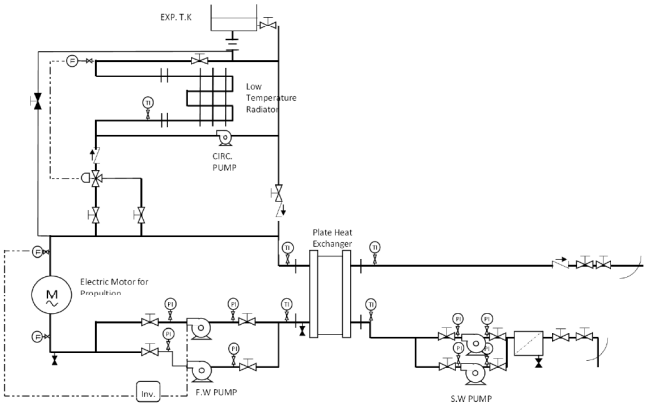



Fig 2. [라디에이터 이용 선박 기관 P&ID]

유량의 제어는 Fig2.에서와 같이 모터의 출구의 온도를 감지하여 인버터를 통하여 펌프의 회전수 제어로 유량을 제어한다. 이 방법은 동력의 감소하는 이점이 있다. 모터의 출구온도가 75도로 조정을 하고 운전을 한다면 3Way-valve를 거치어 라디에이터에 공급하는 온도는 75도로 저온 방열로 여객구역에 공급이 된다.

| | Model | Depth | Heigh | Centre Distance | Length | EN422 △50K |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (c)mm | (b)mm | (a) mm | (d) mm | W/el. |
| B4 | 350/100 | 97 | 407 | 350 | 80 | 89,9 |
| B3 | 500/100 | 97 | 557 | 500 | 80 | 114,9 |
| B3 | 600/100 | 97 | 657 | 600 | 80 | 132,2 |
| B3 | 700/100 | 97 | 757 | 700 | 80 | 149,5 |
| B3 | 800/100 | 97 | 857 | 800 | 80 | 165,0 |

Table 1. [상용 저온 라디에이터]

Table 1.의 파이프라인의 제품 Model 800으로 선정하고 최고 사용 온도는 75도를 기준으로 한다면 라디에이터 1개당 0.165kw의 폐열을 회수 할 수 있다 각 벽면에 부착을 한다면 20개정도의 제품을 설치하여 3.3kw의 폐열을 회수 할 수 있다. 그러나 순환수펌프가 추가로 설치되는 단점이 있는데 이 펌프의 소비 전력량을 고려하여야 한다.

2) 보일러 부속기기 선정

가) 순환펌프

(1) 설계조건

o 공급온도 : 60℃

o 환수온도 : 50℃

(2) 유량

$$G(lpm) = \frac{Q}{r \times Cp \times \Delta t \times 60}$$

Q : 보일러 용량(Kcal/hr) r : 비중량(Kg/ℓ)

Cp: 정압비열(Kcal/kg.℃) Δt: 공급환수 온도차 (℃)

(3) 양정(H)

o 각 구간별 마찰손실수두를 직관 및 부속류의 상당장 별로 집계한 총손실 저항으로 산출

o 안전율 : 15%

o 장비 및 기기에 대한 마찰손실수두 적용

- Header(세대내) : 1mAq
- Boiler(가스보일러)

| 보일러용량 | 13,000이하 | 16,000이하 | 20,000이하 | 30,000이하 |
|---|---|---|---|---|
| 마찰손실수두 (mAq/기) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |

- 방열기 : 1mAq/개
- 온도조절밸브(세대내) : 3mAq/개

(4) 동력

$$KW = \frac{Q \times H}{102 \times 60 \times E(\%)} \times 1.2$$

Q : 유량(lpm)

H : 양정(m)

E : 펌프효율(%)

Fig 3. [ 건축기계설비 설계기준 참조]

우선 공급환수의 온도차가 필요하고 또한 보일러 용량 또한 필요하다 보일러 용량은 20개의 라디에이터에 필요한 열로 본다면 3.3kw을 kcal/hr로 산정한다면 47023.2kcal/hr 가 된다. 공급환수는 유럽의 EN442를 따르면 공급 75도에 출구 65도, 온도 차이는 10도시이다. 유량을 구하면 18.75lpm이며 양정은 120으로 잡는다. 펌프 효율은 KSB 7501에 76.5%로 적용한다면 펌프 동력은 0.48kw가 계산이 된다. 정미 폐열 회수는 펌프동력을 뺀 2.82kw이다. 경제속도로 운항 시 11.28%의 열을 회수한다.

### 2.2.2 전기추진 차도선의 고온상태의 폐열

전기추진 차도선의 모터가 고온 열에 충분히 견딜 수 있다면 모터 냉각수의 온도를 90.5도까지 상승시켜 흡착식 냉온수기를 운전할 수 있다. Fig 5. 아래는 개념도이다. 흡착식 칠러는 한쪽은 가열을 할수 있는 고온 측과 다른 측은 냉각을 할 수 있는 냉각 부분을 필요로 한다. 가열부분은 모터에서 냉각을 하고 온도가 상승한 폐열을 이용한다. 냉각 부분은 해수 펌프에서 이송한 냉각수를 사용하여 냉각을 한다.

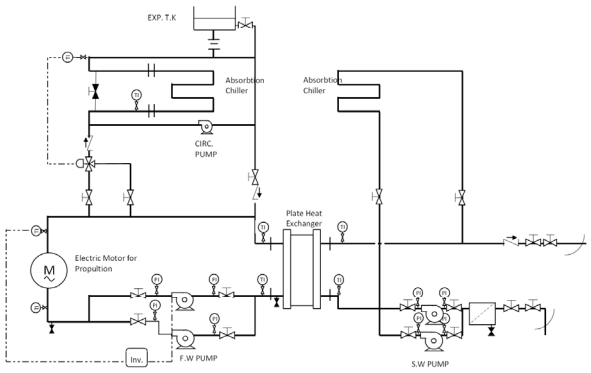
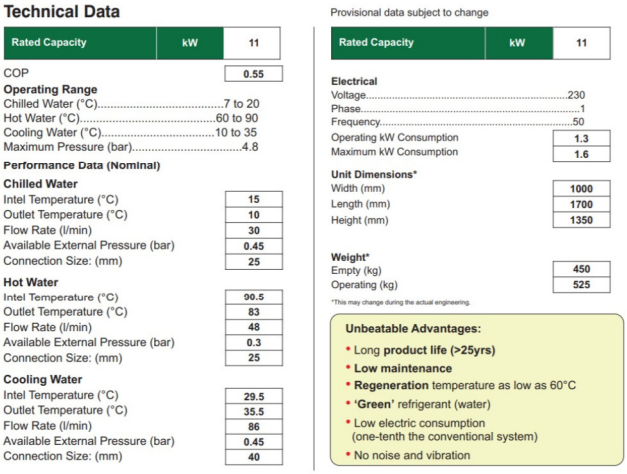



Fig 5. [흡착식 이용 선박 기관 P&ID]



**Technical Data**

| Rated Capacity | kW | 11 |
|---|---|---|
| COP | | 0.55 |
| **Operating Range** | | |
| Chilled Water (°C) | | 7 to 20 |
| Hot Water (°C) | | 60 to 90 |
| Cooling Water (°C) | | 10 to 35 |
| Maximum Pressure (bar) | | 4.8 |
| **Performance Data (Nominal)** | | |
| **Chilled Water** | | |
| Intel Temperature (°C) | | 15 |
| Outlet Temperature (°C) | | 10 |
| Flow Rate (l/min) | | 30 |
| Available External Pressure (bar) | | 0.45 |
| Connection Size: (mm) | | 25 |
| **Hot Water** | | |
| Intel Temperature (°C) | | 90.5 |
| Outlet Temperature (°C) | | 83 |
| Flow Rate (l/min) | | 48 |
| Available External Pressure (bar) | | 0.3 |
| Connection Size: (mm) | | 25 |
| **Cooling Water** | | |
| Intel Temperature (°C) | | 29.5 |
| Outlet Temperature (°C) | | 35.5 |
| Flow Rate (l/min) | | 86 |
| Available External Pressure (bar) | | 0.45 |
| Connection Size: (mm) | | 40 |

Provisional data subject to change

| Rated Capacity | kW | 11 |
|---|---|---|
| **Electrical** | | |
| Voltage | | 230 |
| Phase | | 1 |
| Frequency | | 50 |
| Operating kW Consumption | | 1.3 |
| Maximum kW Consumption | | 1.6 |
| **Unit Dimensions*** | | |
| Width (mm) | | 1000 |
| Length (mm) | | 1700 |
| Height (mm) | | 1350 |
| **Weight*** | | |
| Empty (kg) | | 450 |
| Operating (kg) | | 525 |

*This may change during the actual engineering.

**Unbeatable Advantages:**

- Long **product life (>25yrs)**
- **Low maintenance**
- **Regeneration** temperature as low as 60°C
- **'Green'** refrigerant (water)
- Low electric consumption (one-tenth the conventional system)
- No noise and vibration

Fig 6. [흡착식 칠러 데이터 카탈로그]

흡착식 사용시에 모터에서 나오는 고온수의 양이 충분한지 확인을 하여야한다. 펌프의 회전수를 조정한다면 유량이 충분할 것으로 판단되며 기타 보조기계들은 펌프는 유량 48lpm을 기준으로 순환수 펌프는 1.23kw, 흡착식 구동 전력은 1.6kw, 냉수 펌프는 0.76kw로 정미 회수열은 7.41kw이다. 결론적으로 경제속도 운항시 29.4%폐열을 회수하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 선박에 버려지는 폐열을 냉난방에 활용하는 방안을 고안하였다. 선박의 냉각수의 온도에 따라서 저온회수식과 고온회수식을 설계하고 열해석을 하였다.

선박 전동기 폐열을 HVAC에 활용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1)전기추진선박을 경제속도로 운항한다는 가정시에 폐열 회수식 설계를 한 결과 저온폐열 회수식은 폐열의 11.28%를 회수하였다.

2)전기추진선박을 경제속도로 운항한다는 가정시에 폐열 회수식 설계를 한 결과 고온폐열 회수식은 폐열의 29.4%를 회수하였다.

전기추진 여객선에 버려지는 폐열이 HVAC열원으로 사용 할 수 있어 전력 소모량을 줄일 수 있는 기대효과를 준다.

## 후 기

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 “전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개발” 과제(20200469-01, PMS4420)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

대한설비공학회 (2010), “건축기계설비 설계기준”, pp 152, pp 153, pp 170-171

이호생, 정동호, 홍석원, 김현주 (2011), 한국해양공학학회지 제 25권 제1호, pp 80-84

오철, 송영욱 (2012).“선박폐열을 이용한 해수 온도차 발전 시뮬레이션”, 대한설비공학회 2012 하계학술발표대회 논문집 pp 042-048.

Bryair, “Bryair adsorption Chiller catalogue”

Pipe life (2020), “pipelife trade product Catalogue 2020“, pp 42

# 딥러닝을 활용한 무인수중선의 동적 위치 제어

진한솔* · Huang Jiafeng* · 이지형* · 최형식**
*한국해양대학교 기계공학과
**한국해양대학교 기계공학과

# Dynamic positioning control of unmanned underwater vehicles using deep learning

Han-Sol Jin*, Huang Jiafeng*, Ji-Hyeong Lee* and Hyeung-Sik Choi**
*Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea
**Professor, Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Unmanned Underwater Vehicle, Remotely operated underwater vehicle, Autonomy, Field test

**ABSTRACT:** *Underwater Acoustic, laser sensors for distance measurement are usually expensive. In particular, the acoustic sensor lacks real-time capability. Therefore, this paper introduce dynamic position control to maintaining a constant distance from the target object by using a camera with low cost and real-time capability. After acquiring an image with a camera, an object shape trained in advance is recognized through deep learning algorithm, and the relative position between the object and camera is calculated through a method based on focal point. In order to check the control performance, hovering control was first performed using AHRS(Attitude & Heading Reference System) sensor data. Good performance of the studied algorithm is confirmed through an experiment. The dynamic position control algorithm was developed and its good performance was verified through the experiment.*

## 1. 서 론

해양의 많은 에너지 자원들을 활용하기 위해 최근에는 인공섬과 구조물 등의 해양 공간 활용이 증대되고 있다. 이를 유지 보수 할 수 있는 장비와 운용법의 필요성이 증대되고 있고, 이에 무인잠수정이 활용되고 있다. 무인수중선의 작업은 일반적으로 사람의 운용에 크게 의존한다. 이러한 작업에서 운용의 자율화를 높이게 되면 잠재적인 비용을 줄이고 안정성을 높일 수 있다. (Schjolberg et al, 2016)

무인수중선의 자율 운행에서 상대물체의 탐지에 널리 사용되는 센서는 음향센서와 카메라이다. 이중에서 대체로 음향센서가 상대위치를 계측하는 방법으로서 선호되어왔다. (Chen et al, 2017),(Cho et al, 2015) 하지만 높은 비용과 실시간성의 부족한 단점이 있다. 최근에는 통신 시스템의 발달과 카메라 시스템의 발전으로 수중에서의 카메라를 활용한 물체탐지와 단거리 항법의 연구가 되고 있다.(Schjolberg et al, 2019)

본 논문에서는 무인수중선에 싱글보드컴퓨터와 USB카메라를 활용하여 객체 탐지 시스템을 구축하는 연구내용을 소개한다. 객체 탐지 시스템에서는 실시간 객체 탐지성이 우수한 YOLOv2를 기반으로 모델을 학습시켜 사용하였다. 카메라 영상을 취득한 후 딥러닝을 통하여 미리 알고 있는 객체를 인식하고, 상대적인 거리를 측정하기 위해 Focal length를 이용한 방식으로 상대위치를 파악한다. 이를 바탕으로 동적 위치 제어 알고리즘을 제안하고 이를 검증하는 실험을 하였다.

## 2. 객체 탐지 알고리즘

### 2.1 YOLOv2

현재 자율 주행, 보행자 검출 등 객체의 실시간 탐지에 관한 수요가 증가함으로서 이와 관련된 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 객체탐지는 컴퓨터 비전과 이미지 처리에 관련된 컴퓨터 기술로서, 어떤 물체인지 분류(Classification) 하는 것과 물체가 어디에 위치하는지(Localization)를 파악하는 것이다. 그 중 YOLOv2는 2017에 발표된 객체 탐지 알고리즘으로서 학습 안정화와 높은 정확성을 가지는 실시간 객체 탐지 알고리즘이다. (Redmon and Farhadi, 2017) YOLOv2에서는 배치 정규화를 활용하여 기존에 사용하던 Dropout layer는 사용하지 않고 앵커박스 개념을 도입하여 안정적인 학습을 가능하게 하는 알고리즘이다.

본 연구에서는 윈도우 기반의 싱글보드컴퓨터를 활용하고 MATLAB에서 YOLOv2를 구현한다. 내장그래픽 카드를 활용한 가속화(CUDA)를 사용할 수 없는 싱글보드컴퓨터이기 때문에 CPU를 활용한 매트랩 코드 가속화(MEX)를 이용하여 연산속도를 높였다.

학습에 사용된 객체는 노란색의 가로·세로 50 cm의 별모양으로 제작하였고 Fig. 1과 같다. 실제 실험환경과 유사한 환경에서 동영상을 다각도와 다양한 조건에서 촬영하여 데이터 세트를 제작하였고 라벨링 작업을 하였다. 학습에 사용된 데이터는 총 2,759개이다.



**Fig. 1** Target object shape

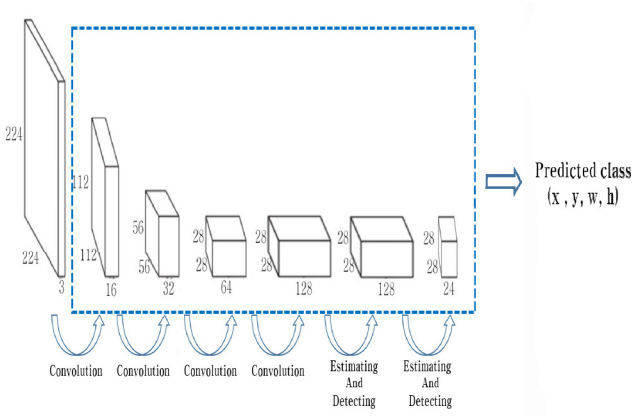



**Fig. 2** Diagram of layer configuration

객체를 식별하게 되면 Matlab에서 싱글보드컴퓨터로 Bounding box정보를 제공해준다. YOLOv2에서의 Bounding box는 box의 좌상단 pixels의 위치와 가로폭과 세로폭 정보를 제공해준다. 이를 이용하여 객체의 상대적 위치를 인식할 수 있고 이 정보를 이용하여 카메라로 거리측정이 가능하다.

### 2.2 레이어 구성

레이어의 구성은 Fig. 2 와 같이 구성하였다. Convolution, Batch Normalization, ReLU, Maxpool 순서의 레이어들을 4번 반복하여 구성하여 준다. 다음과 같이 적용하면 224 pixels, 3 채널의 초기 이미지가 28 pixels, 128 채널의 특징 추출 이미지가 된다. 그런 다음 YOLOv2 객체 검출 레이어를 사용하여 Bounding box를 검출하여 준다. 학습 옵션은 확률적 경사하강법, 초기 학습률, 미니 배치사이즈, 최대 반복횟수를 설정하였다.

## 3. 무인수중선 제어 시스템

본 연구에서는 실험에 사용되는 무인수중선의 제어 시스템을 구성하였다. 무인수중선의 동적 위치 제어를 위하여 매뉴얼 컨트롤과 호버링 컨트롤을 선행하여 무인수중선의 객체 탐사 기능을 구현한다. 구성한 무인수중선의 제어 시스템은 Fig. 3와 같다.

육상의 운용콘솔 프로그램은 C#을 사용하여 GUI기반의 운용을 가능하게 한다. 무인수중선에서 가지고 있는 AHRS(Attitude & Heading Reference System)센서값, Depth 센서값, 카메라 영상을 육상에서도 확인 가능하게 하였고 제어 명령은 패킷의 형태로 무인수중선에 전달된다. 이때 50 m의 테더 케이블을 통해서 전달하기 때문에 PoE(Power over Ethernet)통신을 사용한다.

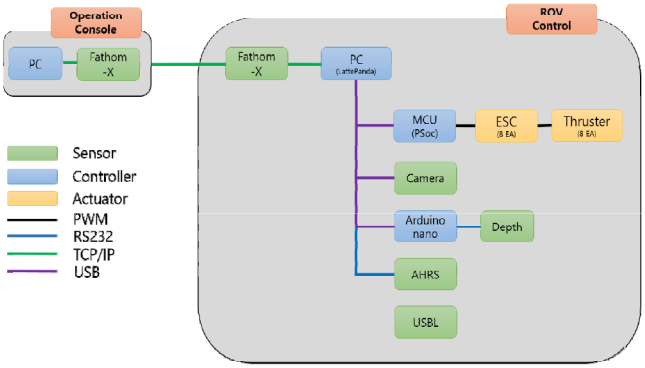



**Fig. 3** Diagram of ROV control system

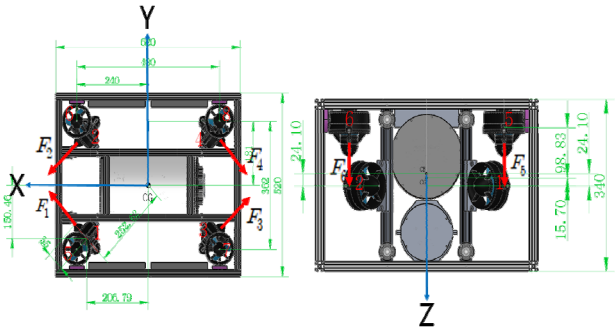



**Fig. 4** Distance between center of gravity and thruster

### 3.1 추진기 배열 구조

추진기의 배열에 따른 6축 무인수중선입출력 관계식을 다음과 같이 나타내었다. 무인수중선의 추진기 배치와 무게 중심에 따라 제어입력에 따른 추력이 달라지므로, $x,y,z$ 축에 관한 병진운동과 회전운동에 대한 일반화된 식을 다음과 같이 나타내었다. 여기서 $\tau$는 추진기 배치에 따른 제어 추진력, $T(\alpha)$는 추진기의 배치에 따른 행렬, $F$는 추력, $u$는 제어입력이다.

$$\tau = T(\alpha)u = T(\alpha)F \tag{1}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.707 & 0.707 & -0.707 & -0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.707 & -0.707 & 0.707 & -0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0.07 & 0.07 & -0.07 & 0.07 & -0.181 & 0.181 & -0.181 & 0.181 \\ 0.07 & 0.07 & -0.07 & -0.07 & -0.240 & -0.240 & 0.240 & 0.240 \\ 0.252 & -0.252 & -0.252 & 0.252 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \\ F_8 \end{bmatrix}$$

Fig. 4는 본 무인수중선의 무게중심과 추진기 배치를 나타낸 것이다.

### 3.2 호버링 컨트롤

호버링 컨트롤은 해류에 의해 횡동요, 종동요, 회전을 일으키는 무인수중선을 정지 제어 하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 Heave, roll, pitch, yaw 4축 제어를 구현한다.

제어기는 PD 컨트롤을 기반으로 다음과 같이 구성한다.

$$u = \begin{bmatrix} surge \\ sway \\ heave \\ roll \\ pitch \\ yaw \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{P_D} e_D(t) + K_{D_D} \dfrac{de_D(t)}{dt} \\ K_{P_R} e_R(t) + K_{D_R} \dfrac{de_R(t)}{dt} \\ K_{P_P} e_P(t) + K_{D_P} \dfrac{de_P(t)}{dt} \\ K_{P_Y} e_Y(t) + K_{D_Y} \dfrac{de_Y(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $e = \eta_d - \eta$ 는 에러, $\eta_d$는 원하는 상태의 값, $\eta$는 현재 상태, $K_P$는 비례 가중치, $K_D$는 미분 가중치이다.

## 4. 동적 위치 제어 알고리즘

앞서 구현한 객체 탐지 알고리즘과 호버링 컨트롤을 이용하여 동적 위치 제어 알고리즘을 개발한다. 알고리즘은 Camera 영상을 통해 객체를 식별하기 전과 후로 나뉜다. 동적 위치 제어 알고리즘을 Fig. 5와 같이 블록도의 형태로 나타내었다.

객체를 식별하기 전에는 Roll, pitch를 PD 제어하고 조이스틱을 이용해 무인수중선을 수동 조작한다. 객체를 식별하고 난 뒤에는 Bounding box에서 획득한 정보를 바탕으로 Surge, sway, heave를 PD 컨트롤을 기반으로 하여 제어한다. Yaw는 물체를 발견했을 당시의 Yaw값을 기준으로 PD제어를 실시한다. 이때 무인수중선이 객체를 정면에서 바라볼 수 있게 $\eta_{d.yaw}$의 수치는 조정하였다. Surge는 Focal length를 활용하여 상대적 위치를 계측한다. 고정된 Focal length의 길이와 Film의 크기를 아는 상태에서 화면상의 물체의 길이가 화각에 비례한다는 사실을 이용하여 거리를 계산한다. 식은 다음 식(3)과 같다.

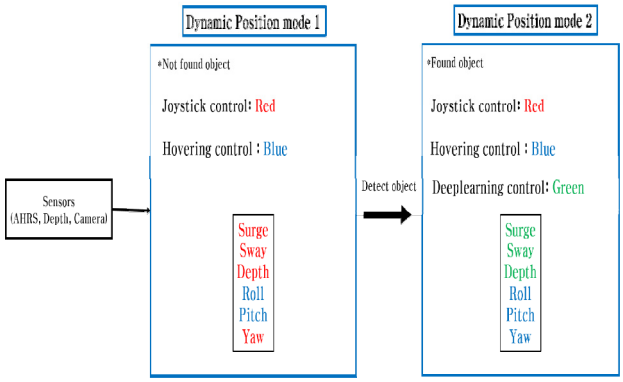



**Fig. 5** Block diagram of the Dynamic Position algorithm

$$Distance\ to\ object(mm) = \frac{f(mm) \times real\,height(mm) \times height(pixels)}{object\,height(pixels) \times sensor\,height(mm)} \quad (3)$$

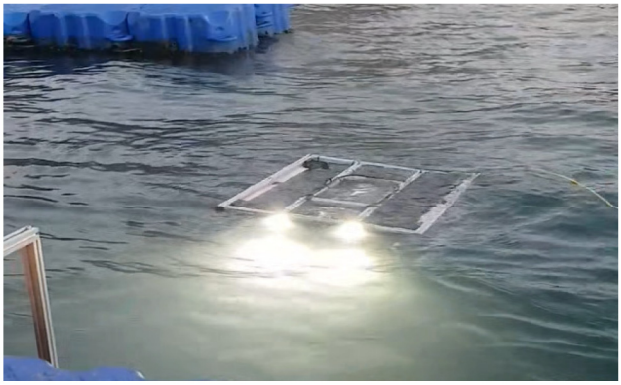


**Fig. 6** Sea experiment

## 5. 실해역 실험

본 연구에서 연구한 알고리즘과 이를 적용한 무인수중신 성능시험을 위해 실해역에서 실험하였다. 상대위치의 정확도 판별을 위해 무인수중선에 USBL을 부착하여 알고리즘의 신뢰성을 확인 할 수 있게 하였다. 실험은 한국해양대학교 연안에서 실험을 진행하였다. Fig. 6는 실해역에서 실험 당시 무인수중선의 모습이다.

### 5.1 호버링 제어 실험

본 실험에서는 Xsens社의 MTI-G-710을 사용하였다. 센서 개별 실험을 통해 센서의 정확도를 확인하였고, 이를 기반으로 한 호버링 컨트롤을 실해역에서 진행하였다. 당시 파도는 3 ft, 너울은 3 ft였다.

본 데이터는 0.1초 주기로 저장되었으며, AHRS는 0.1초 주기, Depth 센서는 0.5초의 주기로 데이터를 송신한다. Yaw와 Depth의 목표 제어값은 10° 와 0.65 m 이다. 평균 오차값은 Roll 0.77°, pitch 0.85°, yaw 0.86°, depth 0.01 m이다.

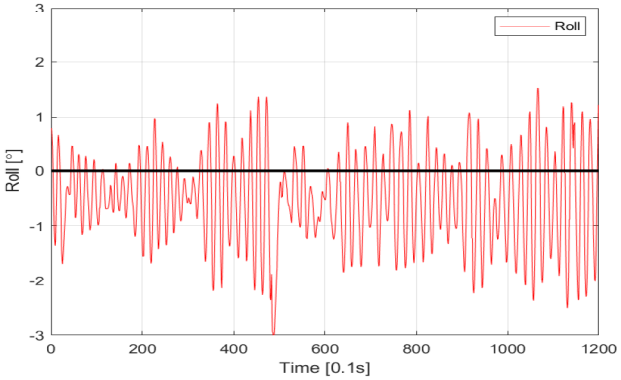



**Fig. 7** Hovering result of Roll

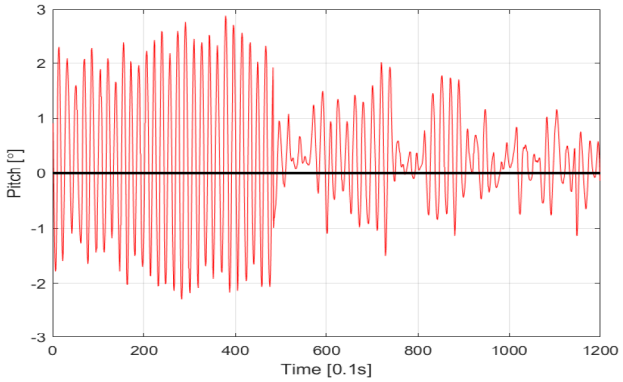



**Fig. 8** Hovering result of Pitch

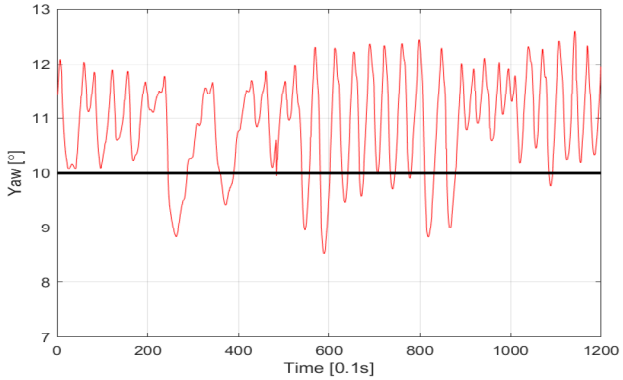



**Fig. 9** Hovering result of Yaw

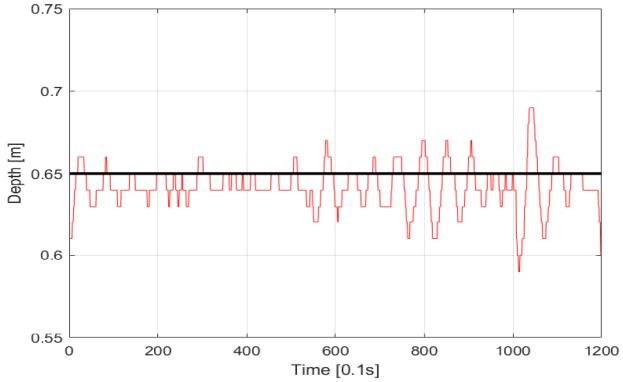



**Fig. 10** Hovering result of Depth

### 5.2 동적 위치 제어 알고리즘 실험

본 실험에서는 4장의 동적 위치 제어 알고리즘을 이용하여 실해역에서 실험을 진행하였다. 실험은 노란색 별모양 표적을 프로파일에 부착하여 수심 2.6 m의 깊이에 위치시켰다. 프로파일의 수심 1 m에는 USBL을 부착하여 알고리즘의 결과를 검증 할 수 있게 하였다. USBL의 데이터 주기는 2초, Camera는 30 FPS이다. 실험은 약 2분 동안 진행하였고 ROV의 평균 거리오차는 약 5 cm 이였다. 또한 USBL과 카메라가 측정한 거리는 동일한 경향을 보였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 싱글보드컴퓨터를 탑재하여 객체 검출 알고리즘을 구현한 ROV를 제작하였다. YOLOv2를 이용하여 객체 검출을 하였으며, Focal length에 기반한 물체와의 거리측정을 실시하고 검증하였다. AHRS를 활용한 호버링 제어를 선행하였으며, 더하여 카메라를 활용한 동적 위치 알고리즘을 구현하였다. USBL을 참조센서로 활용하였으며 실해역 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

H.Cho, J.Gu, H.Joe, A.Asada, and S.-C.Yu. (2015). “Acoustic beam profilebased rapid underwater object detection for an imaging sonar,” Journal of Marine Science and Technology, vol. 20, no. 1, pp. 180 - 197.

I. Schjolberg, T.B., Gjersvik, A.A, Transeth, and I.B. Utne. (2016). “Next generation subsea inspection, maintenance and repair operations”, IFACPapersOnLine, vol. 49, no. 23, pp. 434 - 439.

J. Redmon and A. Farhadi. (2017) YOLO9000: Better, faster, stronger. In CVPR.

M.Skaldebo, B.O.A. Haugalokken, I.Schjolberg. (2019). “Dynamic Positioning of an Underwater Vehicle using Monocular Vision-Based Object Detection with Machine Learning” in OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE

Z.Chen, Z.Zhang, F.Dai, Y.Bu, and H.Wang. (2017). “Monocular vision based underwater object detection,” in Sensors.

# 그래픽 데이터를 활용한 기계학습 적용 파랑 예측 기초 연구

김윤호 · 조석규 · 최종수 · 박지용(한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소)

# An early stage study on wave prediction by machine learning using graphical wave fields

Yun-Ho Kim · eok-Kyu Cho · Jong-Su Choi · JiYong Park(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering)

The Convolution Neutral Network(CNN) has been widely utilized to classify the image categories in machine learning. We initially conducted some numerical trainings in order to figure out the application validity of the machine learning in the overall sea condition prediction. A long-crested wave condition was firstly producted with Airy wave superpositions. We constructed the suitable the CNN structure with proper training parameters. Various image filtering techniques were adopted and evaluated in wave field prediction. Various short-crested waves were also modelled and trained in wave height classification. While the middle range of wave height categories were not predictable, the highest and lowest wave height categories showed the good prediction results. Some variations on training parameters and structures were lastly performed in order to increase the prediction accuracy in short-crested wave trainings while their effectiveness was not significant.

KEY WORDS: Wave prediction 파랑 예측, Machine learning 기계 학습, Convolution Neutral Network(CNN) 합성곱 신경망, Airy wave fields Airy 파랑장, Short-crested wave 단파정파

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by both a grant from the National R&D Project ‘Development of an electric-powered car ferry and a roll-on/roll-off power supply system’ funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea (PMS4420) and a grant from the National R&D Project ‘Establishment of sea test-bed for wave energy converters’ funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea (PMS4040). The authors especially thank the wave energy converter research team of Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering for their dedicated efforts.

# Hyper-Parameter Optimization of ANN-Based Mooring Line Tension Prediction System Using Bayesian Optimization

Daesoo Lee*, Ji-Su Lim*, Seungjae Lee*

*Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

KEY WORDS: Bayesian optimization, Hyper-parameter optimization, Artificial neural network(ANN), Mooring line tension prediction system

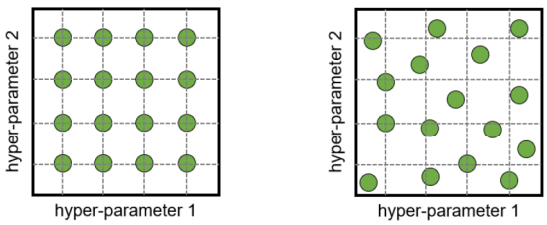
ABSTRACT: *Development of an ANN-based mooring line tension prediction system has been studied by many researchers. However, the hyper-parameters of the systems have been selected either manually or using a traditional hyper-parameter search method such as a random-search method. In this paper, the hyper-parameter optimization of the ANN-based mooring line tension prediction system is studied with Bayesian optimization to provide a further improvement in the tension prediction performance.*

## 1. Introduction

Typically, dynamic simulation for a moored floating structure and fatigue analysis on mooring lines takes a long computational time because it requires a huge amount of numerical calculation to represent dynamic behavior of the floating structure. To speed up the dynamic simulation and fatigue analysis, several studies have been conducted. Simões et al. (2002) proposed a neural network architecture to predict the top tension on mooring lines and a hawser in a system where a turret-FPSO is connected with a shuttle tanker by the hawser. Guarize et al. (2007) proposed a hybrid artificial neural network (ANN)-finite element method (FEM) approach where the ANN is trained with short motion and top tension time histories generated by a FEM-based time-domain simulation and the trained ANN calculates the rest of top tension history with an input of a prescribed motion time history. Christiansen et al. (2013) proposed an ANN-based mooring line fatigue analysis approach for the fast fatigue analysis and a procedure for the fatigue analysis based on the proposed approach. Sidarta et al. (2017) proposed an ANN-based mooring line top tension prediction system that receives previous motion time histories only as input unlike Christiansen et al. (2013) where the ANN receives previous motion time histories as well as previous predicted top tension histories as input. Although the previous studies showed the robust tension prediction performance, optimization of the hyper-parameters of the neural network model was not considered, which may lead to the additional performance improvement, otherwise (Snoek et al., 2012). Traditionally, a grid-search method and random-search method were often employed to optimize the hyper-parameters of a neural network, and it is known that the random-search method is more efficient than the grid-search method(Bergstra and Bengio, 2012). Thus, the hyper-parameter search is often conducted using the random-search method. Yet, the random-search method does not consider a previously-obtained training result such as a loss function to search the next hyper-parameter set. Using the Bayesian optimization, the previously-obtained training result can be utilized to determine the next hyper-parameter set to search (Snoek et al., 2012). In this paper, hyper-parameters of the ANN-based mooring line tension prediction system are searched using the Bayesian optimization. and comparative results between the random-search method and the Bayesian optimization are presented.

## 2. Theory

### 2.1 Grid-Search and Random-Search Methods




(a) grid-search (b) random-search

**Fig. 1** Grid-search and random-search methods

The grid-search and random-search methods are illustrated in Fig. 1. The grid-search method is known to be slower to find the optimal hyper-parameters than the random-search method because the grid-search method searches all hyper-parameter combinations one after another along the crossing points on the grid, and if an optimal hyper-parameter set is located in a late position in the grid, it would take a long time for the grid-search method to reach that, while the random-search method can reach the optimal hyper-parameter set any time since its searching order is random (Bergstra and Bengio, 2012).

### 2.2 Bayesian Optimization

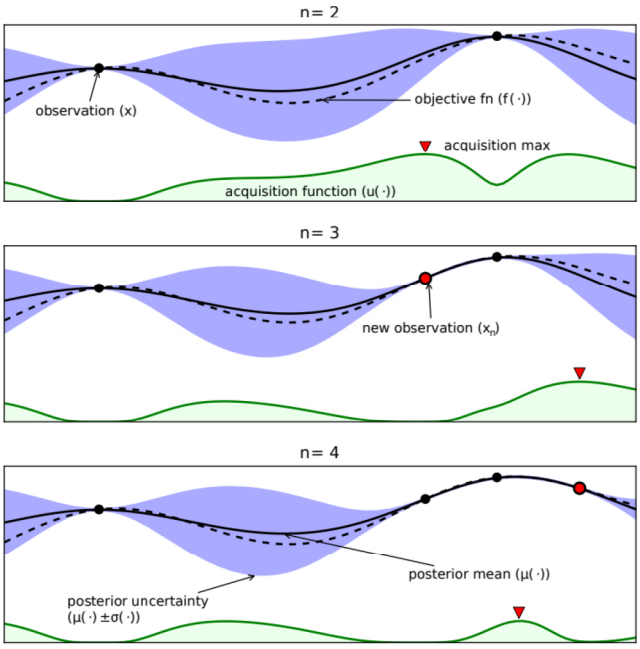



**Fig. 2** Illustration of the Bayesian optimization procedure over three iterations

The Bayesian optimization procedure is illustrated in Fig. 2 (Sidarta et al., 2017). The figure shows the mean and confidence intervals estimated with a probabilistic model of the objective function where the estimated mean and confidence intervals are represented in the black dotted line and the purple shade, respectively. Although the objective function drawn by black solid lines is shown, it is usually unknown when a neural network is used to yield the objective function. The figure also shows acquisition functions on the lower shaded side. The acquisition function is a function that recommends the next input parameter, $x$, to search, which might result in a higher objective. The acquisition is high where the model predicts a high objective which is relative to exploitation and where the prediction uncertainty is high, which is relative to exploration. Therefore, the Bayesian optimization can be used to optimize hyper-parameters of a neural network, where the input, $x$, would be the hyper-parameters such as a number of hidden layers, hidden layer size, and learning rate. The objective function can be a negative loss function.

## 3. Target Function for Bayesian Optimization

The Bayesian optimization is used to optimize the hyper-parameters of the ANN-based mooring line tension prediction system. An overall configuration of the tension prediction system is shown in Fig. 3 where HL, BN, and DO denote a hidden layer, batch normalization layer, and dropout layer, respectively, and $X(t)$ and $\hat{T}(t)$ denote an input vector and output vector, respectively. $X(t)$ consists of 10s-long previous six degrees of freedom ship positions and $\hat{T}(t)$ consists of mooring line tensions for existing mooring lines at a current timestep.

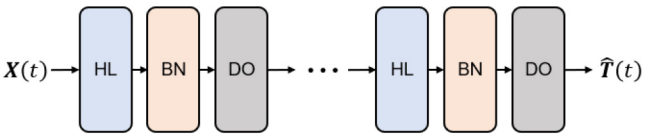



**Fig. 3** Configuration of the ANN-based mooring line tension prediction system

The hyper-parameters to be optimized are presented in Table 1. It should be noted that the exponents of the ranges from 'Hidden layer size', 'Learning rate', and 'L2 regularization's decay rate' are used as the input ranges for the Bayesian optimization so that those exponential ranges can be linearized.

**Table 1** Hyper-parameters to be optimized

| Hyper-parameter name | Range for searching |
|---|---|
| Number of hidden layers | $[2,10]$ |
| Hidden layer size | $[2^5,2^9]$ |
| Use of batch normalization | {False,True} |
| Dropout rate | $[0.0,0.5]$ |
| Learning rate | $[10^{-2},10^{-3}]$ |
| Type of optimizer | {Adam,RMSProp} |

| | |
|---|---|
| L2 regularization's decay rate | $[10^{-1}, 10^{-6}]$ |
| Type of activation function | {sigmoid, tanh, relu, leaky relu} |
| Type of weight initializer | {He uniform, He normal, Xavier uniform, Xavier normal} |

## 4. Results

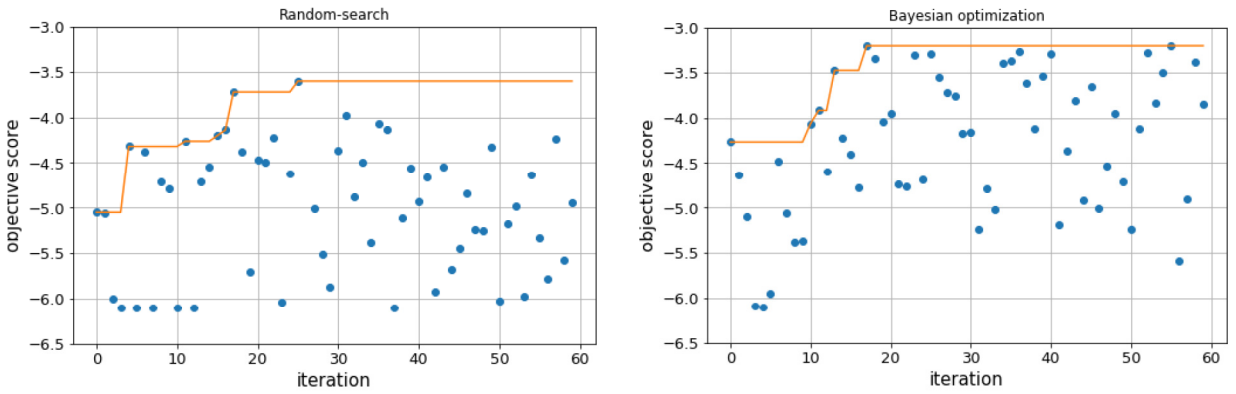
The hyper-parameters of the ANN-based mooring line tension prediction system are optimized by the random-search method and Bayesian optimization. The training dataset for the tension prediction system is obtained from dynamic simulations on a 244m-FPU with 16 catenary mooring lines in various wave states that are sampled from a wave scatter diagram provided by DNV-GL (2018). Fig. 4 shows the objective scores obtained by the random-search method and the Bayesian optimization. The used objective function is a negative mean average error (MAE) of the actual tension and predicted tension over the 16 mooring lines and test wave states. For visual clarity, a log scale is applied to the MAE. Fig. 4 presents that the Bayesian optimization can result in the faster convergence with the higher objective score than the random-search method. The best hyper-parameters found by the random-search method and Bayesian optimization are presented in Table 2.

**Table 2** Best hyper-parameters found by the random-search method and Bayesian optimization

| Hyper-parameter name | Best hyper-parameters | |
|---|---|---|
| | Random-search method | Bayesian optimization |
| Number of hidden layers | 3 | 4 |
| Hidden layer size | 303 | 248 |
| Use of batch normalization | False | True |
| Dropout rate | 0.08 | 0.04 |
| Learning rate | 0.004 | 0.001 |
| Type of optimizer | Adam | Adam |
| L2 regularization's decay rate | 0.000006 | 0.000001 |
| Type of activation function | Sigmoid | Relu |
| Type of weight initializer | Xavier uniform | Xavier uniform |

## 5. Conclusion

To optimize the hyper-parameters of the ANN-based mooring line tension prediction system, the random-search method and the Bayesian optimization are studied. The result shows that the Bayesian optimization can result in a faster convergence with the higher objective score than the random-search method. Therefore, it is expected that the




(a) Random-search method (b) Bayesian optimization

**Fig. 4** Objective scores obtained by the random-search method and Bayesian optimization (the yellow line tracks the maximum scores)

tension prediction performance of the ANN-based mooring line tension system can be further improved by optimizing the hyper-parameters with the Bayesian optimization.

## Acknowledgments

This material is based upon work supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) under Industrial Technology Innovation Program. No. 10063405, 'Development of hull form of year-round floating-type offshore structure based on the Arctic Ocean in ARC7 condition with dynamic positioning and mooring system'

## References

Bergstra, J., Bengio, Y., 2012. Random search for hyper-parameter optimization. J. Mach. Learn. Res. 13, 281-305.

Christiansen, N.H., Voie, P.E.T., Høgsberg, J., Sødahl, N., 2013. Efficient mooring line fatigue analysis using a hybrid method time domain simulation scheme, in: Proceedings of the AMSE 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

DNV-GL, 2018. Class Guideline (DNVGL-CG-0130): Wave loads.

Guarize, R., Matos, N.A.F., Sagrilo, L.V.S., Lima, E.C.P., 2007. Neural networks in the dynamic response analysis of slender marine structures. Appl. Ocean Res. 29, 191-198. https://doi.org/10.1016/j.apor.2008.01.002

Sidarta, D.E., Kyoung, J., O'Sullivan, J., Lambrakos, K.F., 2017. Prediction of offshore platform mooring line tensions using artificial neural network, in: Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. pp. 1-11.

Simões, M.G., Tiquilloca, J.L.M., Morishita, H.M., 2002. Neural-Network-based prediction of mooring forces in floating production storage and offloading systems. IEEE Trans. Ind. Appl. 38, 457-466. https://doi.org/10.1109/28.993167

Snoek, J., Larochelle, H., Adams, R.P., 2012. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms, in: Advances in Neural Information Processing Systems. pp. 2951-2959.

# 확장 칼만필터 기반의 스파형 부유식 풍력터빈의 블레이드 피치 시스템 고장검출 알고리즘

조성필* · 안치영* · 심형원* · 김영식*
*선박해양플랜트연구소 친환경연료추진연구센터

# Fault detection of a blade pitch system in a spar-type floating wind turbine based on extended Kalman filters

Seongpil Cho*, Chi-Yeong Ahn*, Hyungwon Shim*, Young-Shik Kim*

*Alternative Fuels and Power System Research Center, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea*

**KEY WORDS:** Floating wind turbine 해상 부유식 풍력터빈, Hydraulic pitch system 유압 피치 시스템, Actuator and sensor faults 액츄에이터 및 센서 고장, Extended Kalman filter 확장 칼만필터

**ABSTRACT:** *This paper presents numerical modeling of the hydraulic blade pitch actuator and development of a fault detection scheme using extended Kalman filters. A spar-type floating wind turbine concept is modeled and simulated using an aero-hydro-servo-elastic simulation tool (Simo-Riflex). Because the blade pitch system has the highest failure rate, a numerical model of the hydraulic blade pitch system with actuators and sensors is developed and linked to Simo-Riflex to study the effects of faults on global responses of the spar-type floating wind turbine for different faults, fault magnitudes, and environmental conditions. For fault detection, an extended Kalman filter is employed to estimate the blade pitch angle and valve spool position of the blade pitch system. The proposed method is demonstrated in case studies of a spar floating wind turbine with stochastic wind and wave conditions and with consideration of different types of faults in actuators and sensors.*

## 1. 서 론

해상 풍력 터빈은 불규칙한 파도와 강한 바람이 부는 해양 환경에서 운영되며 사용수명 동안 풍력터빈에 다양한 고장이 발생한다. 풍력터빈의 액추에이터, 센서 및 시스템에 발생하는 고장은 시스템 특성을 변화시키며 전력 생산의 효율성이 낮아져 경제적 손실을 유발한다. 해상 풍력 발전소의 총비용 중 약 30%정도의 비용이 운영 및 유지보수를 위해 사용된다(Tavner, 2012).

RELIIAWIND 보고서(Gayo, 2011)에 따르면 블레이드 피치 시스템은 전체 고장률과 정지시간에 각각 21.3%, 23.4%의 기여도를 갖고 있으며 이는 블레이드 피치 시스템이 풍력 터빈의 고장빈도가 높다는 것을 의미한다. 블레이드 피치 시스템은 풍력터빈을 강한 풍하중으로부터 보호하며 풍속 이상 지역에서 일정한 발전량을 유지한다. 블레이드 피치 시스템은 피치 센서와 액추에이터로 구성되며 이들에 발생하는 고장은 제어 시스템에 영향을 미치며 로터, 메인 베어링 및 샤프트에 불균형 하중을 발생시킨다. 로터의 불균형 공기역학적 하중은 블레이드, 타워 및 지지 구조물의 전력 생산과 구조적 에도 영향을 미친다. (Chaaban, 2014) 이러한 고장은 조기에 발견하여 고장에 따른 빠른 조치를 수행하여야 안정적인 해상풍력 발전을 수행할 수 있다. 센서, 액추에이터 또는 기타 구성 요소의 잠재적 고장인 고장을 검출하려면 관측기 기반의 효과적인 고장판별 기법이 필요하다. 이러한 기법은 해상 풍력터빈의 안정적인 운영에 있어 고장의 유형, 위치 및 크기에 대한 중요한 정보를 제공한다.

이 연구에서는 풍력 터빈의 효과적인 고장 진단을 실시하기 위해 확장 칼만필터(EKF)와 기반으로 블레이드 피치 시스템용 고장검출 알고리즘을 다루고 있다. 제안된 알고리즘의 주요 부분은 블레이드 피치 시스템의 상태 추정이며, 이는 확장 칼만필터가 모델을 기반으로 최적의 추정 값을 계산한다. 이 알고리즘은 추정값 및 센서로부터 출력되는 측정값 기반으로 잔차(Residual)를 계산하며 잔차 및 적절한 평가 방법을 이용하여 시스템의 정상상태 또는 고장상태를 판별한다.

2장에서는 스파형 풍력터빈 모델, 제어기법 및 시뮬레이션을 설명한다. 3장에서는 확장 칼만필터 기반의 고장검출 알고리즘을 및 시뮬레이션의 결과를 나타내며 4장에서 결론을 나타낸다.

## 2. 풍력터빈 모델링 및 제어기법

### 2.1 풍력터빈 모델

스파형 부유식 풍력 터빈은 로터, 타워, 나셀, 부유체 및 계류라인으로 모델링되었다. 본 연구의 모델은 그림 1과 같이 NREL 5 - MW 해상 풍력 터빈, 스파형 부유체(OC3 - Hywind) 및 3개의 catenary 계류 케이블 모델링을 기반으로 한다(Jonkman 2009, Jonkman 2010, Cho 2018).

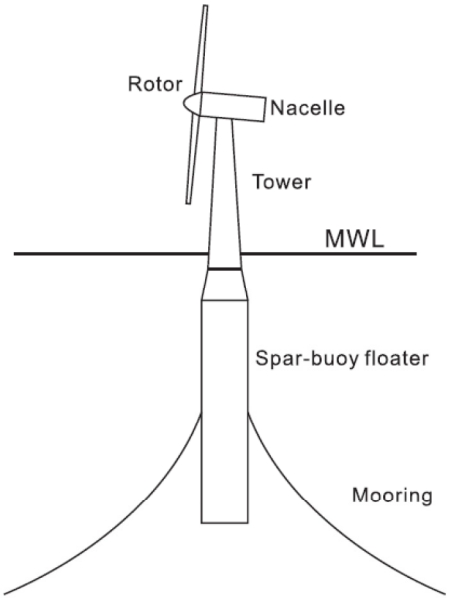



**Fig. 1** Schematic view of a spar type floating wind turbine

### 2.2 유압 블레이드 피치 시스템

유압 피치 시스템은 유압 펌프, 방향 제어 밸브, 유체 탱크 및 유압 실린더로 구성된다(Cho 2020). 블레이드 피치 각도는 터빈 허브에 위치한 유압 실린더에 의해 제어된다. 펌프는 유압을 이용하여 실린더를 직접 구동한다. 펌프에 의해 공급되는 유압은 방향제어밸브로 유량 및 실린더로 유체 유입방향을 효과적으로 조절하여 블레이드 피치각을 제어한다. 그림 2와 같이 블레이드 피치 시스템의 개략도는 일정한 압력 펌프, 어큐뮬레이터, 유체 저장탱크, 유압 실린더 및 방향 제어 밸브로 구성된다. 또한, 엔코더 및 선형가변변위 변환기(LVDT)를 이용하여 블레이드 피치 각도 및 밸브 스풀의 위치를 측정한다. 이러한 측정값은 제어기의 입력변수에 사용된다.

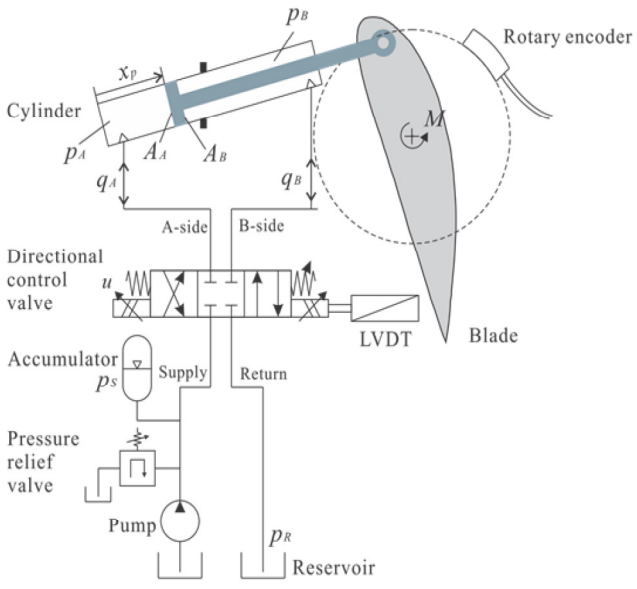



**Fig. 2** Schematic view of a hydraulic blade pitch system

### 2.3 풍력터빈 제어 시스템

기저 제어 시스템 (baseline control system)은 블레이드 피치와 발전기 토크 제어기로 구성된다(Cho 2020). Below-rated의 풍속 영역에서, 토크 제어기는 발전기 토크를 조절하여 블레이드의 최적 팁 속도 비를 유지함으로써 최대 전력발전을 수행한다. Above-rated 풍속 영역에서 블레이드 피치 제어기는 블레이드 피치 각도를 조정하여 정격전력을 생성하는 동안 블데이드에 작용하는 공기역학적 하중을 감소시킨다. 부유식 풍력 터빈의 경우 블레이드 피치 제어기를 사용하여 시스템 응답을 개선하고 부유체의 운동을 감소시킬 수 있다.

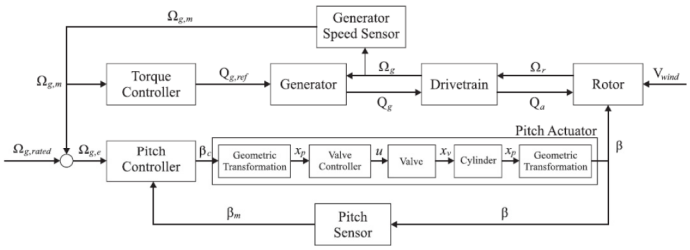



**Fig. 3** Block diagram of the baseline controller

블레이드 피치 각도 $\beta$는 식 (1)에 설명한 기하학적 관계에 기초하여 유압 실린더의 피스톤 위치 $x_p$에 의해 결정된다.

$$x_p(\beta) = \sqrt{L_p^2 + r_p^2 - 2L_p r_p \cos(\alpha_0 - \beta)} - l_p/2 \quad (1)$$

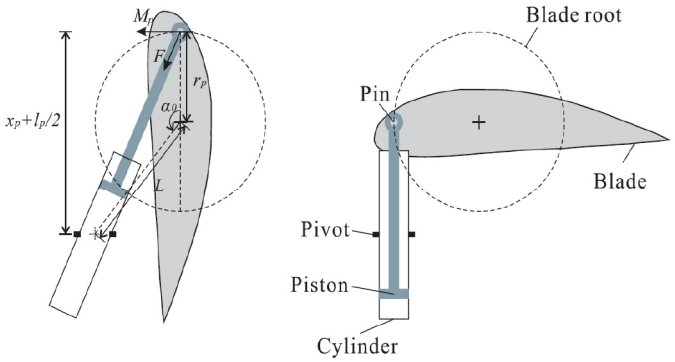



**Fig. 4** Geometry of the blade pitch actuator: (A) $\beta$ = 0° and (B) $\beta$ = 90°

실린더의 피스톤 위치 $x_p$는 밸브 스풀 위치 $x_{vs}$에 의해 제어된다. 이에 사용되는 제어기는 PI제어기이며 이는 피스톤 위치 오차 $e(t)$를 피드백한 후 제어 입력전압 $u_v$을 계산하여 방향 제어 밸브 위치를 효과적으로 제어한다.

$$u_{vs}(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau) \quad (2a)$$

$$e(t) = (x_p(\beta) - x_p(\beta_C)) \quad (2b)$$

여기서 $k_p$는 비례 이득, $T_i$는 적분 시간이며, 위치 오류 $e(t)$는 그림 3의 피치 제어기에서 블레이드 피치 각도 $\beta$ 및 피치 커맨드 $\beta_C$의 함수로 주어진다. 자세한 블레이드 피치 시스템을 나타내는 수식은 Cho et al. (2020)에 기술되어 있다.

### 2.4 다물리 해석 시뮬레이션

부유식 풍력 터빈 모델의 동적 응답해석은 시간 영역 수치 시뮬레이션을 위한 공력-파랑하중-제어-탄성의 코드의 일종인 Simo-Riflex (SINTEF 2018a, SINTEF 2018b)로 수치 시뮬레이션이 수행되었다. Simo는 1차 포텐셜 유동 이론 및 Morison-type 점성 항력에 따라 부유체에 가해지는 유체 역학적 힘과 모멘트를 계산한다. Riflex는 유한 요소법을 기반으로 블레이드, 샤프트, 타워 및 계류 시스템의 탄성체 구조해석을 수행한다. 또한, Riflex는 tower shadow, dynamic stall 및 skewed inflow correction을 포함한 블레이드 요소 운동량 이론 (BEM)에 기초한 블레이드에 작용하는 공기역학적 힘 및 모멘트를 계산한다. 따라서, Simo-Riflex는 구조 동역학, 유체역학 및 공기역학 모델은 토크 및 피치 제어기를 포함한 기저 제어 시스템과 연동되어 수치해석을 수행한다. Fig. 5는 Simo-Riflex와 제어 알고리즘의 데이터 전송을 나타낸다.

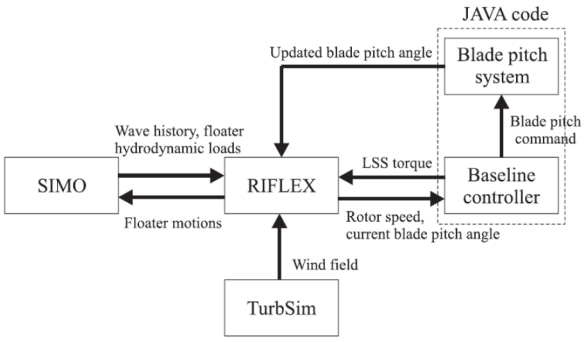



**Fig. 5** Data transmission between Simo-Riflex and controller

## 3. 고장검출

3장에서는 관측기 기반의 고장검출기법을 소개한다. 관측기는 확장 칼만필터가 사용되었으며 이는 시스템의 상태를 효과적으로 추정을 할 수 있다. 확장 칼만필터를 입력 명령과 측정된 데이터를 사용하여 상태와 측정으로 고장을 검출한다.

### 3.1 유압식 블레이드 피치 시스템의 발생 가능한 고장종류

블레이드 피치 시스템의 고장은 센서와 액추에이터 고장으로 분류할 수 있다. 피치 센서 고장은 엔코더 디스크의 먼지, 블레이드 피치 베어링의 부정렬, 및 부적절한 보정으로 인해 발생한다. 센서 및 액추에이터 고장은 로터를 불균형하게 회전시켜 블레이드에 비대칭력을 발생시킨다. 피치 액추에이터 고장의 경우 유압 피치 시스템의 총 고장률 중 오일, 밸브 및 슬러지 문제와 관련된 높은 고장률(37.3%)이 큰 비중을 차지한다 (Carroll, 2017). 또한 피치 액추에이터의 밸브 고장은 시스템 특성을 바꿀 수 있으며 블레이드 피치 각도와 응답 지연에 영향을 미친다. 또한, 과도 및 정상 상태 조건에서 풍력 터빈의 동적 응답에도 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 유압식 블레이드 피치 시스템의 피치 센서 및 액추에이터에 발생하는 6가지 고장 유형을 고려한다(Cho 2018, 2020). Table 1은 고장 유형을 설명한다.

**Table 1** Fault description

| 분류 | 고장 명 | 고장 발생위치 |
|---|---|---|
| 1 | 바이어스 | 피치 센서 |
| 2 | 고정값 | |
| 3 | 과도한 마찰 | 피치 액추에이터 |
| 4 | 밸브 잠김 | |
| 5 | 부정확한 전압 | |
| 6 | 단선 | |

### 3.2 확장 칼만필터를 이용한 고장검출

칼만 필터(Kalman filter)는 잡음(noise)이 포함되어 있는 측정값을 이용하여 시스템의 상태를 추정하는 재귀 필터로 과거에 수행한 측정값을 바탕으로 현재의 상태 변수의 결합분포를 추정한다. 특히 확장 칼만필터 (extended Kalman filter)는 선형성 가정을 완화시켜, 더 일반적인 시스템에 대해서도 사용이 가능 하도록 확장하여 특히 비선형 시스템에 좋은 성능을 보인다.

Fig. 6은 확장 칼만필터 기반의 고장검출시스템의 알고리즘을 보여준다. 여기서 잔차 r(k)는 측정값과 추정값의 차이를 나타내며 잔차의 크기는 고장의 척도를 나타낸다. 잔차의 값이 허용치(threshold)값을 넘기면 고장의 상태로 판별한다. 만약 넘지 않으면 알고리즘은 정상상태로 판별한다. 여기서 허용치는 H∞ 최적화 기법(H∞ optimization) 및 선형 행렬 부등식 (linear matrix inequality, LMI)를 이용하여 계산되며 이에 대해 자세한 식 및 관련 증명은 Cho et al. (2018)에 상세히 기술되어 있다.

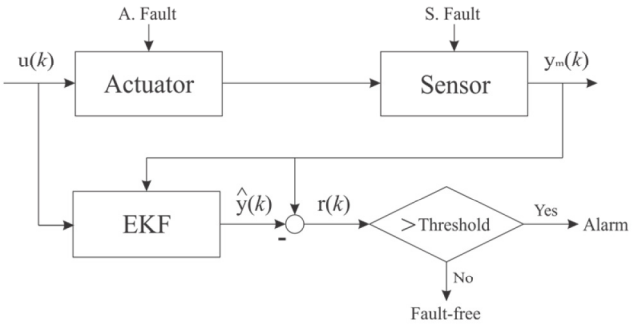
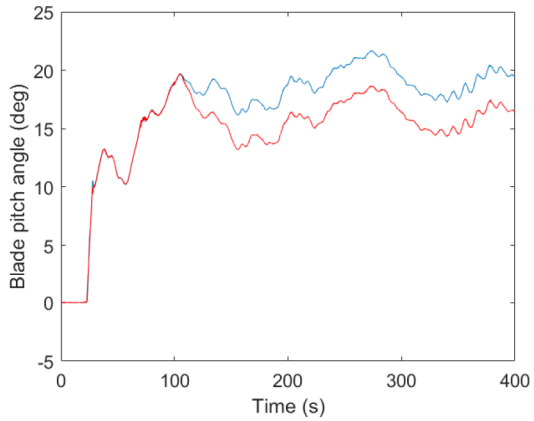


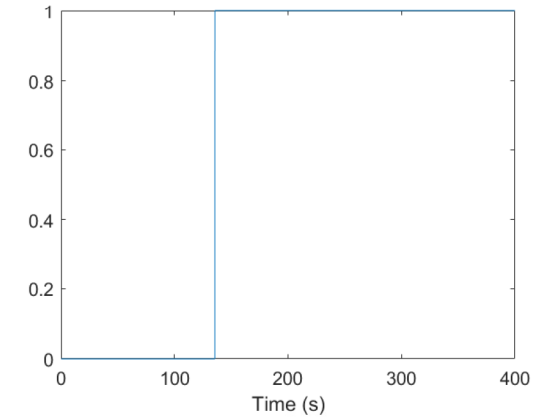

**Fig. 6 Algorithm for fault detection with a blade pitch system**

### 3.3 고장검출 결과

블레이드 피치 시스템에서 잔차가 허용치를 넘어섰을 때 고장검출 알고리즘은 고장검출 알람을 발생시켜 고장의 유무를 판별한다. 여기서 0은 고장이 아닌 상태이며 1은 고장상태를 나타낸다. Fig. 7은 풍력터빈의 3번째 블레이드의 피치센서에 바이어스 값이 나타났을 때 (고장 1의 경우) 확장 칼만필터 기반의 고장검출 알고리즘이 시스템의 고장의 유무를 판별하는 것을 보여준다. 106초에 피치센서에서 바이어스 값이 증폭되기 시작한 후 132초에 고장검출 알고리즘이 고장알람을 발생시켜 고장의 유무를 성공적으로 판별하였다.




(a) Blade pitch angle (red: estimation, blue: measurement)




(b) Fault detection (0: fault-free condition, 1: fault condition)

Fig. 7 Fault detection in the faulty blade (blade 3) in real-time under fault 1(bias on the pitch sensor)

## 5. 결 론

본 논문에서는 스파형 부유식 풍력 터빈 유압 블레이드 피치 시스템에 대한 모델링, 제어기법 및 고장검출기법을 자세히 다루며 본문을 기반으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 스파형 부유식 풍력터빈 모델은 NREL 5 MW 풍력 터빈 모델, OC3 Hywind 부유체 및 3개의 catenary 계류 케이블로 구성된다.

(2) 유압 피치 시스템 모델링은 유압 펌프, 방향 제어 밸브, 유체 탱크 및 유압 실린더로 구성된다.

(3) PI 제어기는 정격 풍속 이상의 발전기 토크를 일정하게 유지하면서 블레이드 피치시스템 및 밸브 스풀의 위치를 최적으로 제어하였다.

(4) 다양한 환경 조건 하에서 기저 제어기와 함께 Simo-Riflex을 사용하여 동적 응답 분석을 위해 풍력-파랑하중-제어-구조 동역학이 연계된 시간 영역 시뮬레이션을 수행했다.

(5) 확장 칼만필터 기반의 고장검출 알고리즘은 센서의 측정값과 필터의 예측값을 계산된 잔차와 임계값을 비교하여 고장검출을 수행한다.

이러한 연구를 기반으로 추후에 고장의 유무 판단뿐만 아니라 고장의 종류, 위치 및 시간을 효과적으로 진단이 가능한 알고리즘 개발이 요구된다. 향후 연구에서 이 알고리즘은 머신러닝 기반의 알고리즘을 추가하여 6개의 블레이드 피치 시스템 고장을 효과적으로 진단 가능하도록 개선될 것이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업인 “전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개발” 과제(20200469-01, PMS4420)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Jonkman J, Butterfield S, Musial W, Scott G. (2009) “Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development”, Technical Report NREL/TP-500-38060 USA.

Jonkman J. (2010) “Definition of the floating system for phase IV of OC3” Technical Report NREL/TP 500 47535 USA.

Carroll J, McDonald A, McMillan D. (2016) “Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines”. Wind Energy. Vol. 19, pp 1107-1119

Chaaban R, Ginsberg D, Fritzen CP. Structural load analysis of floating wind turbines under blade pitch system faults. Wind Turbine Control and Monitoring. 2014;301 334. Springer

Cho S, Gao Z, Moan T. Model based fault detection, fault isol ation and fault tolerant control of a blade pitch system in floating wind turbines. RenewableEnergy. 2017;120:306 321

Cho S, Bachynski EE, Nejad AR, Gao Z, Moan T. Numerical modeling of the hydraulic blade pitch actuator in a spar type floating wind turbine considering fault conditions and their effects on global dynamic responses. Wind Energy. 2020 Feb;23(2):370-90.

Gayo J B (2011) Reliability focused research on optimizing wind energy system design, operation and maintenance: tools, proof of concepts, guidelines &methodologies for a new generation, ReliaWind Report.

SINTEF Ocean (2018a). Simo 4.15.0 user guide.

SINTEF Ocean (2018b). Riflex 4.15.0 user guide.

Tavner P. (2012) Offshore Wind Turbines: Reliability. London, UK: Availability and Maintenance, The Institution of Engineering and Technology (IET).

# 고정식 진동수주형 파력 발전기의 수치 및 실험적 연구

정현철*·김홍빈*·성우진*·구원철*
*인하대학교 조선해양공학과

# Numerical and experimental study of a fixed oscillating water column wave energy converter

Hyen-Cheol Jung*, Hong-Bhin Kim*, Woo-Jin Seong* and WeonCheol Koo*
*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea*

**KEY WORDS**: Oscillating water column (OWC) 진동수주, Wave energy converter 파력발전기, Chamber(챔버), Numerical wave tank(수치파수조)

**ABSTRACT**: ***본*** *연구에서는 고정식 진동수주형 파력 발전기의 최적형상을 찾기 위해 이차원 완전비선형 수치조파수조(Numerical wave tank)를 재현하여 챔버 구조물의 각 형상 변수에 따른 챔버내 수면 변위의 영향을 분석하였다. 수치 해석 결과의 검증을 위해 이차원 미니수조 실험을 수행하였고 그 결과를 수치해석 결과와 비교 분석하였다. 챔버 스커트의 흘수가 깊을수록 공진 주기가 커지며, 본 계산 조건에서 챔버폭 대비 입사파장이 약 12배인 경우 챔버내 수면 변위가 최대가 되었다. 점성 감쇠를 고려하여 인위적인 감쇠계수를 적용한 결과, 공진주기에서 가장 큰 감쇠가 발생하였다. 공진 주기보다 큰 입사파 조건에서 실험결과와 수치해석 결과간에 차이가 발생하였는데, 이는 미니수조의 길이 제한으로 실험 수행시 반사파의 효과적인 제거가 어렵기 때문에 발생한 것이었다.*

## 1. 서 론

전 세계적으로 에너지 수요가 늘어남과 동시에 화석 연료 사용량이 급증하고 있다. 화석 연료 자체는 오랜기간 사용한 경험 등으로 저장 및 운용에 상대적으로 용이하고, 단위 질량당 열량도 커서 에너지원으로써 적합하지만, 탄소 균형으로 인한 환경 문제, 그리고 자원의 한정등으로 언젠가는 고갈될 수밖에 없는 문제를 가지고 있다. 이를 대비하여 친환경 재생 에너지가 각광받고 있고, 그 중 파도로 인해 발생하는 에너지는 친환경적이면서도 무한에 가까운 발전 지속성이 큰 에너지원이다. 현재 파력 발전의 종류로는 크게 가동 물체형, 진동 수주형, 수압면형, 월파형 등의 종류가 있지만, 본 실험에서는 장치 자체의 신뢰도가 우수한 진동수주형(Oscillating water column: OWC) 구조물에 대해 연구를 진행하였다. 진동수주형 파력 발전기는 입사파로 인한 챔버내 수면 높이 변화에 따른 공기 체적변화를 이용하여 공기 터빈을 구동시킴으로서 파워를 생산하는 구조이다. 본 연구에서는 진동수주형 파력 발전기의 최적의 형상 제원을 찾기 위해 이차원 완전 비선형 수치 파수조 (Koo et al., 2010)를 재현하여 수치 모델에 대한 각 형상에 따른 영향을 파악하였다. 또한 입사파가 챔버내로 진입할 때 챔버 스커트에서 발생하는 점성에 의한 에너지 손실을 구현하기 위해 점성 감쇠 계수를 대입하였다(Koo et al., 2012). 실험을 통해 챔버내 파고를 직접 측정하여 수치해석 결과와 동등한 조건의 실험 결과를 비교하였다.

## 2. 극한조건의 상사

### 2.1 지배방정식

본 연구에서 고정식 진동 수주형 파력 발전기를 수치적으로 재현하기 위해 경계요소법을 기반으로 이차원 시간영역 완전 비선형 수치조파수조(Numerical wave tank) 기법을 사용하였다. 이차원 수치조파수조는 포텐셜 유동으로 계산 영역을 비점성, 비압축성. 비회전성 유체로 가정하였고, 지배방정식으로는 라플라스(Laplace) 방정식을 이용하였다.

$$\nabla\phi^2 = 0 \tag{1}$$

위의 식 (1)을 Green’s 2nd identity를 이용하여 경계적분방정식으로 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha\phi_i = \iint_{\Omega_m}\left(G_{ij}\frac{\partial\phi_j}{\partial n} - \phi_j\frac{\partial G_{ij}}{\partial n}\right)ds \tag{2}$$

위의 식 (2)에서 $\alpha$는 표면각(solid angle)로서 필드 점들이 경계면에 위치하면 0.5의 값을 갖는다. 우변의 그린 함수는 $G_{ij} = -(1/2\pi)\ln R_1$ 로 표현되며, 여기서 $R_1$은 유체장 내의 소스점과 필드점 사이의 거리를 의미한다. 자유표면의 비선형 변화를 실시간으로 재현하기 위해 Mixed Eulerian-Lagrangian(MEL)법을 사용하였다. 이 방법은 고정된

Euler 좌표계에서 지배 방정식을 푼 다음, 이동 경계점(노드)과 그 점에서 계산된 값들을 Lagrangian 방법으로 매 시간 스텝마다 수정 대입함으로써 비선형 파와 부체간 상호작용 문제 등에 많이 이용되어 왔다. 이차원 수치조파수조 기법을 적용하여 실험 수조에서 만들 수 있는 천이구역(Intermediate depth)를 재현하였다. 연구는 조파기 선형 운동에 상응하는 Wave profile식을 입사파 경계조건으로 대입하여 입사파를 발생시킨 후, 비선형 자유표면 경계조건하에서 파의 전파를 재현하였다. 이때 수조 바닥은 편평하다고 가정하였다. 수심 변화에 따른 파형 변화(고차항의 증가)는 이론 및 실험값 등과 비교하여 계산의 정확성을 확인하였고, 파입자 속도 분포를 선형 이론식 등과 비교하여 그 차이를 나타내었다.

### 2.2 경계조건

챔버 내 입사파를 구현하기 위해 각 경계면에 경계조건을 적용하였는데 자유수면의 경우에는 선형 경계조건식을 사용하였다. 자유수면 경계조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad on\ z = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{P_a}{\rho} \quad on\ z = 0 \tag{4}$$

위의 식 (3)과 식 (4)는 각각 선형 운동학적(Kinematic)자유수면 경계조건과 선형 동역학적(Dynamic)자유수면 경계조건을 Lagrangian frame에 대해 변환시킨 운동학적(Kinematic) 및 동역학적(Dynamic) 자유수면 경계조건을 나타낸다. $\eta$는 자유수면파, $g$는 중력 가속도, $\rho$는 유체의 밀도이고, $P_a$는 대기 압력으로 0으로 가정한다. 자유수면 경계조건 외에 다른 경계조건식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad on\ the\ side\ wall \tag{5}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad on\ z = -h \tag{6}$$

식 (5)는 생성된 파가 인공 감쇠 영역에서 흡수된다는 가정 하에 벽면 끝단 경계면에 불투과성 경계 조건식을 사용하였다. 마찬가지로 수조 바닥면 경계조건도 불투과성 경계조건식으로 식 (6)에 나타내었다.

## 3. 실험장비 및 내용

### 3.1 이차원 미니 조파수조




**Fig. 1** Overview of two-dimensional mini wave tank

본 연구에서는 인하대학교의 이차원 미니 조파 수조를 이용하였다. 수조의 제원은 폭 0.3 m, 길이 6 m, 높이 0.5 m로 측면과 밑면이 투명한 재질의 아크릴로 되어있어 어느 방향이든 파랑의 관측이 가능하다 (Fig. 1).



**Fig. 2** Ultrasonic wave height gauge (TSPC-30S2-485)

### 3.2 초음파 파고계

본 실험에서 파고를 계측하기 위해 초음파 파고계 (TSPC-30S2-485) 를 사용하였다. 이는 송수신기를 공중에 설치하여 연직하 방향으로 발사한 초음파가 해면에서 반사되는 시간을 측정한다. 대기 중에서 초음파의 전파속도가 수중에 비해 늦고 온도변화에 대한 속도변화를 무시할 수 없기 때문에 파고계 내에 온도보정회로가 내장되어 있다. 파고계의 교정을 위해 정지되어 있는 물에서 파고계의 높이를 변화해가며 신호를 계측하였다. 입사파, 챔버 내 파고 계측과 반사파를 측정하기 위해 4 개의 파고계를 사용하였다.

### 3.3 피스톤형 조파기

입사파 생성을 위해 조파판을 구동시켜 목적하는 파랑을 재현하였다. 본 수조에는 규칙파와 불규칙파를 제어할 수 있는 피스톤(piston) 타입 조파판이 설치되어 있어 비교적 정확한 파를 생성할 수 있다.

### 3.4 OWC 모델

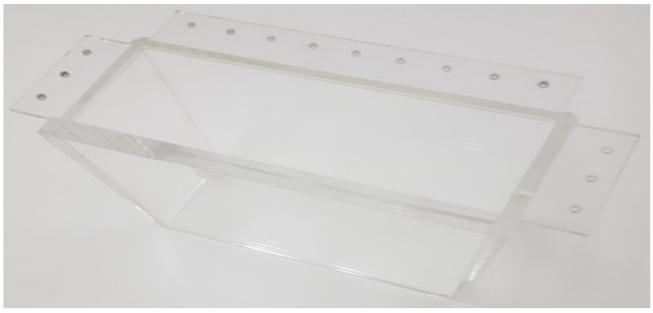


**Fig. 3** OWC experimental model

CAD 프로그램을 기반으로 형상을 모델링하고, 아크릴 재질을 사용한 OWC 모델을 제작하였다. 본 실험에 사용된 OWC의 모델에 대한 구체적인 제원은 Table 1에 기술하였다. 또한 입사파가 챔버내로 진입할 때 모서리등에서 발생할 수 있는 점성 와류(Vortex)를 최소화하기 위해 챔버 모서리를 라운딩(Rounding) 처리하여 제작하였다.

Table 1 Owc model specification (unit : cm)

| | |
|---|---|
| Water depth (h) | 35 |
| Chamber gap (cw) | 10 |
| Skirt thickness (B) | 2 |
| Wave height (H) | 2 |
| Free board (fb) | 15 |
| Chamber top (ct) | 0.5 |
| Skirt draft (d) | 10 |
| End wall (vw) | 21.72 |

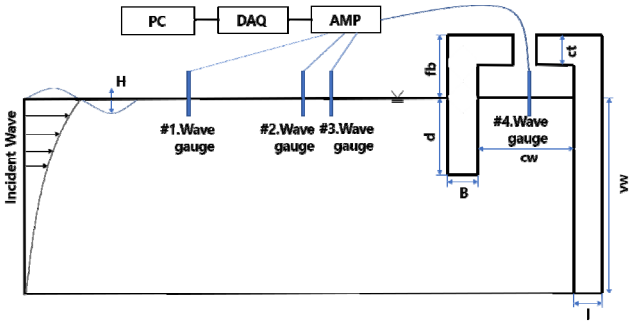



Fig. 4 Overview of an experimental setup

Fig. 4의 수치조파수조 개략도에서 B는 Skirt 두께, d는 흘수, fb는 챔버의 높이, ct는 챔버 벽면의 두께, cw는 챔버 내부 폭(chamber gap)을 나타낸다.

## 4. 수치해석 및 실험 결과

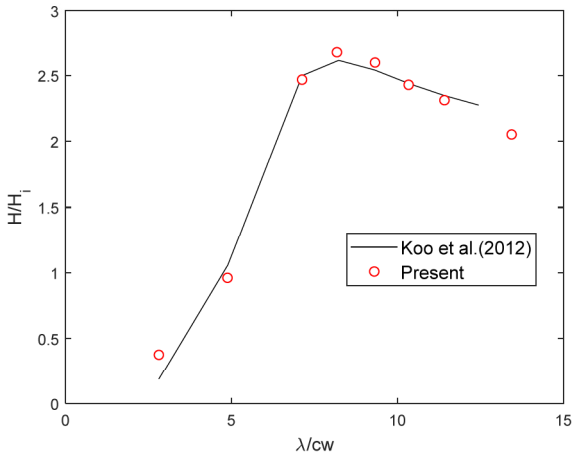



Fig. 5 Comparison of chamber elevations with previous numerical results

본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램의 검증을 위해 기존 연구 결과(Koo et al., 2012)와 비교하였다 (Fig. 5). 기존 연구에서 사용된 동일한 OWC 모델의 형상과 제원 및 동일한 파랑조건을 적용하여 비교 하였다. Table 2은 기존 연구에서 사용된 수치 및 실험모델의 제원을 나타내며, 챔버 폭 대비 입사파장의 변화에 따른 챔버내 수면 변위는 기존 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 수치해석 모델은 인하대학교 이차원 미니 수조와 동일한 크기로 설정하였고 (L×B×D: 6m × 0.3m × 0.5m), 입사파고는 2cm로 고정하였다.

Table 2 Main particulars of the OWC model (unit: cm) (Koo et al., 2012)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Water depth (h) | | 35 | |
| Chamber gap (cw) | | 20 | |
| Skirt thickness (B) | | 3.75 | |
| Wave height (H) | | 1 | |
| Free board (fb) | | 5 | |
| Chamber top (ct) | | 1 | |
| Skirt draft (d) | 8.0 | 16.5 | 25.0 |
| End wall (vw) | 28.4 | 25 | 21 |

Table 3 Cases of OWC numerical analysis (unit: cm)

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d (cm) | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | 15 | 17.5 | 20 | 22.5 | 25 |
| B (cm) | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| cw (cm) | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | 15 | 20 | 20 | | | |

선행연구에서 챔버내의 수면변화는 OWC 스커트 흘수(d), 챔버 폭(cw) 그리고 스커트 두께(B)로 인해 영향을 받는 것으로 나타났다. 이를 고려하여 흘수(d), 챔버 폭, 두께를 변수로 하여 OWC의 제원을 선정하였다(표 2). 먼저 스커트 흘수(d)로 인한 챔버내 수면 변화 영향을 알아보기 위해 두께와 폭은 유지한 채 스커트 흘수에 대해서 변화시켜가며 아래과 같이 수치해석을 진행하였고 그 결과를 비교하였다.

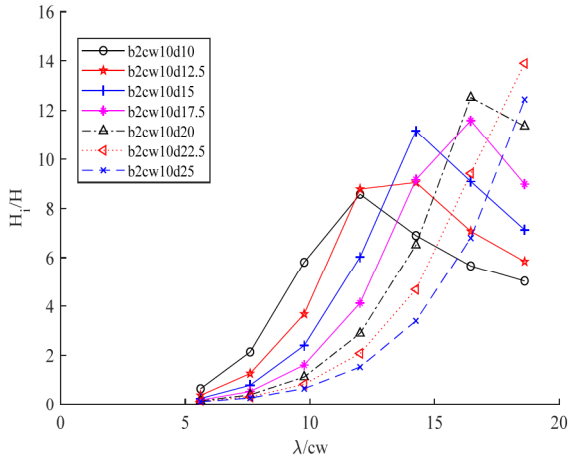



Fig. 6 Comparison of wave heights in the chamber for various skirt drafts(d) (b=2cm, cw=10cm) (Numerical)

Fig. 6은 Skirt의 흘수의 변화에 따른 챔버내 파고를 무차원화하여 나타낸 것이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 챔버폭

에 비해 파장비가 작을 때는 스커트 흘수가 작을수록, 챔버내 파고가 크지만, 파장이 증가하면 흘수가 큰 경우에 챔버내 수면변화가 크다. 이는 흘수 증가로 인해 OWC내 공진주기가 증가하기 때문으로 판단된다. 다시 말해, 스커트 흘수가 작으면 공진주기도 짧아서 파장이 작은 경우에 좀 더 많은 파 에너지가 챔버에 유입될 수 있고, 반대로 흘수가 증가하면 챔버에 쉽게 유입될 수 있는 파의 길이가 증가하여 장파에서 보다 큰 수면 변화를 보인다고 할 수 있다. 흘수 10 cm 에서 챔버내 수면변화가 급격히 발생하는 공진 현상은 입사파장이 챔버폭의 약 12배정도 이고, 흘수가 10cm보다 더 크면, 공진을 발생시키는 입사파장의 크기는 더 증가한다. Skirt의 흘수, 두께, 챔버 내부 폭을 변수로 수치 해석한 결과, 비교를 통해 Skirt의 두께가 2cm, Skirt의 흘수가 10cm, 챔버 내부 폭이 10cm일 때 최적의 결과가 나왔음을 확인하였다.

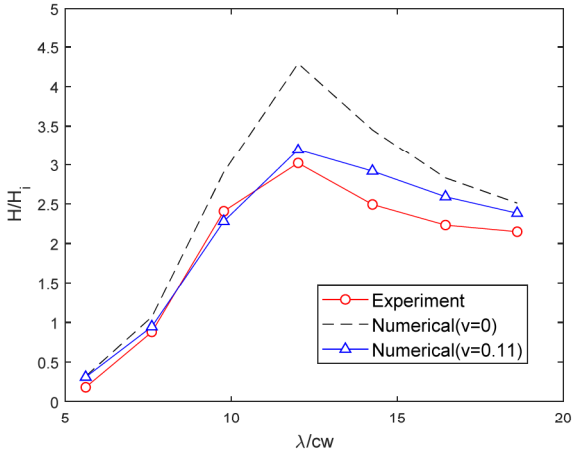



**Fig. 7** Comparison of chamber elevations with viscous damping between numerical results and experiment (H = 2 cm)

Fig. 7에서 파고 2cm, 파주기는 0.8s~1.2s의 조건에서 챔버내 수면 변위를 실험값과 수치해석 결과와 비교하였다. OWC 모델에 대해서는 스커트의 두께를 2cm, 스커트 흘수를 10cm, 챔버 내부 폭을 10cm로 고정하였다. 포텐셜 유동의 수치해석 결과는 근본적으로 점성의 영향을 고려할 수 없기 때문에, 실험값에 비해 대체로 큰 값을 가지며, 특히 공진주기 ($\lambda/cw$ = 12)에서 더 큰 차이를 보인다. 다만, 수치계산 결과에 점성 계수(v)를 추가하여 계산한 결과는 실험결과와 대체로 유사함을 알 수 있다. 여기서 점성 계수는 공진 구간에서의 실험값과 일치하도록 적당한 값을 산정하여 수치해석에 적용하였다. 점성계수를 추가한 수치해석 결과는 공진 구간보다 짧은 파장 구간 ($\lambda/cw$ < 12)에서는 실험과 잘 일치하지만, 공진구간보다 긴 파장 구간에서는 여전히 차이를 보인다. 이는 장파 조건에서 이차원 미니수조의 짧은 길이의 한계로 인해 반사파가 온전히 제어되지 못해서 발생한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

고정식 OWC에 대해 포텐셜 유동 기반의 수치해석과 실험을 수행하여, OWC 챔버 스커트 흘수, 챔버 폭, 두께에 따른 챔버내 수면 변위를 비교하였다. 챔버 스커트 흘수가 증가할수록 챔버내 수면 변위가 최대가 되는 공진 구간이 장파 영역으로 이동하였고, 본 연구에서 스커트 흘수가 10cm 조건에서 입사파장이 챔버 폭 대비 약 12배일 때 공진이 발생하였다(입사파고 대비 약 3배 크기의 수면 변위 발생). 수치해석과 실험과의 비교를 통해, 점성으로 인한 수치해석과 실험간의 차이가 공진구간에서 최대를 보였다. 또한, 적절한 점성계수를 대입한 수치해석 값은 실험값과 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있었는데, 장파구간에서는 미니수조의 크기 제한으로 반사파로 인한 실험값의 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 추후 이와 같은 결과를 바탕으로 OWC 챔버의 Orifice 최적 제원과 해저 바닥면의 부가물 설치를 통한 수면 변위 증폭에 대한 수치해석 및 실험 연구를 진행할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부 '산업전문인력역량강화사업'의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2020년 미래 해양플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업, 과제번호 : P0012646)

## 참 고 문 헌

구원철, 김무현, and 최윤락 (2010). "고정식 진동수주형 파력발전장치의 챔버 유동 및 파에너지 변환효율 해석." 대한조선학회 논문집 47 3 : 388-397.

구원철, 권진성, 김준동, 김성재, 김민우 and 최문관 (2012). " 고정식 진동 수주형 파력 발전기 (OWC) 형상파라미터의 실험 연구." 한국해양공학회지 26 3:3-38.

권진성, and 구원철 (2012). "해안 고정식 파력발전기 (OWC)의 최적화 형상 연구." 한국해양환경 · 에너지학회 학술대회논문집 : 1366-1370.

문재승, 홍기용, 신승호, 현범수, 유황진, 박순종 (2007). "OWC 형 파력발전장치 공기실 형상에 따른 왕복유동장 해석. " 한국항해항만학회지 31 1 : 29-33.

# 부유식 파력 발전장치의 운동성능 해석을 위한 유체-다물체 동역학 연성해석 기술 개발

윤상문(부산대학교) · 석준(중소조선연구원) · 박종천(부산대학교)

# Development of fluid-multibody dynamics coupling method for analysis of motion performance of floating wave energy converter

Sang-Moon Yun(Pusan National University) · Jun Seok(Research Institute of Medium & Small Shipbuilding) · Jong-Chun Park(Pusan National University)

전 세계적인 지구온난화 문제로 신재생에너지에 대한 수요가 증가하고 있으며, 특히 다양한 장점을 가지고 있는 파력발전장치에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 하지만 현재까지 파력발전장치 기술의 수준이 상용화 단계까지는 이르지 못하고 있으며, 다양한 유형의 파력발전장치에 관한 연구가 진행 중에 있다. 특히, 제안된 장치들 중 가장 큰 비율을 차지하는 점 흡수식 유형에 해당하는 부유 파력발전장치는 같은 크기의 구조물을 다수로 사용하거나 다른 신재생에너지 장치와 병행하여 설치할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 점 흡수식 부유 파력발전장치의 운동성능 해석을 위한 유체-다물체 동역학 연성해석 기술을 개발하였다. 유동해석을 위해 open-source 입자법 유체해석 프로그램인 DualSPHysics v4.4.12 기반으로 압력 안정성을 개선한 솔버를 활용하였으며, 다물체 동역학 해석을 위해서 상용 프로그램인 RecurDyn을 활용하였다. 개선된 유동해석 프로그램 및 연동 시스템의 수치조파수조 및 부유체 해석에 관한 성능을 검증하기 위해 2차원 파랑 중 단순 사각 부유체에 대한 운동 시뮬레이션을 수행하였으며, 정량적 검증을 위해 Ren et al. (2015)의 실험 및 smoothed particle hydrodynamics (SPH) 시뮬레이션 결과와 파고 및 부유체의 3자유도(surge, heave, pitch) 운동 시계열을 비교·분석하였다. 최종적으로 3차원 파랑 생성 테스트를 수행하고, 부유식 파력발전장치 및 PTO시스템을 모델링하여 성능 예측 시뮬레이션을 수행하였다. 파력발전장치의 운동성능 및 파력발전효율에 영향을 줄 수 있는 다양한 파라미터의 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하고 관련 특성 변화에 관한 분석을 수행하였다.

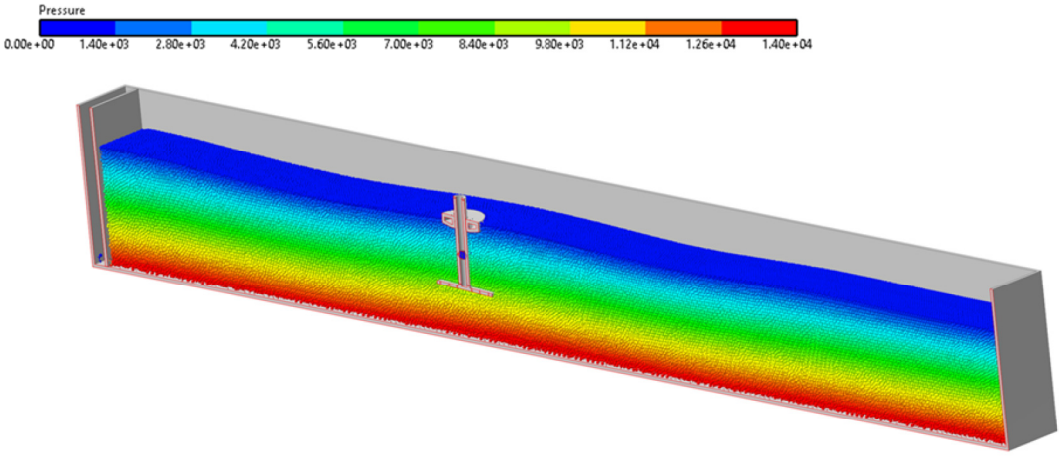



**Fig. 1** Snapshot of 3D floating wave energy converter simulation at 10s (pressure contour)

## 후 기

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(접근이 어려운 지역의 해안쓰레기 수거장비 기술 개발)

# 이차원 완전 비선형 수치 조파수조를 활용한 경사형 고정식 진동수주형 파력발전 장치의 성능해석

양현재*·구원철*
*인하대학교 조선해양공학과

# A Study on the Performance Evaluation of the Sloped Oscillating Water Column WEC Using a 2D Full Nonlinear Numerical Wave Tank

Hyunjai Yang*, WeonCheol Koo*

*Inha University, Incheon, Korea

KEY WORDS: Sloped oscillating water column 경사형 진동수주, Wave energy converter 파력발전장치, Numerical wave tank 수치 조파수조, Boundary element method 경계 요소법, Wave energy extraction 파력 추출

ABSTRACT: *In this study, a sloped oscillating water column(OWC) WEC with a partial open chamber was modeled in the time domain using a 2D full nonlinear numerical wave tank. The free surface elevations in the chamber were calculated at various incident wave periods. Viscous energy loss at the chamber duct due to wave column motion was considered. For verification, the results were compared with the results of the two-dimensional wave flume model test. The maximum wave energy extraction was estimated with chamber-air duct volume ratios.*

## 1. 서 론

지구 온난화로 인해 오늘날 지구촌 곳곳은 기온 상승, 해수면 상승 등 급격한 기후변화를 겪고 있다. 급격한 기후변화는 가뭄과 홍수, 냉해 등의 큰 피해를 주는 자연재해를 발생시킨다. 이를 대처하기 위해 유엔 기후변화협약, 교토의정서, 파리 기후 협약과 같은 국제적인 대응이 활발히 진행되고 있다. 우리나라 또한 2030년까지 37%의 온실가스 배출량을 줄이기로 선언하였다(환경부, 2018). 따라서 전 세계적으로 온실가스를 줄이기 위해 신재생에너지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 파력발전은 신재생 에너지 중 단위면적당 에너지밀도가 가장 큰 에너지원이며 무한대의 지속가능성을 가지고 있는 매우 유망한 자원이다. 그러나 계절적, 기후적 변동성이 심하고 많은 다양한 방법이 여전히 개발중에 있고 표준화된 발전 모델이 개발되지 못했다는 한계를 가지고 있다. 현재 전 세계적으로 파력발전 장치 개발이 진행되고 있으며, 영국을 중심으로 상당한 진전이 있는 상황이다. 앞으로 더 많은 연구 아이디어 개발과 기술 진보, 상용화 및 유지 보수 운영 노하우 기법 개발등 많은 연구 개발의 수요가 있다고 할 수 있다.

영국의 세계적인 해양 에너지 센터인 EMEC(The european marine energy centre ltd)에서 파력발전 장치를 1차 에너지 변환 형태에 따라 가동물체형, 월류/월파형, 진동수주형으로 분류하였다. 이중 진동수주형 파력발전 장치는 입사파에 의해 진동수주실 내부의 수면 변화가 발생하고, 이 수면 변화가 공기 유동을 발생, 최종적으로 공기 유동이 공기 터빈을 돌려 에너지를 추출하는 방식이다. 이러한 발전 방식은 파 에너지를 바로 사용가능한 에너지로 변환하는 방식보다는 효율이 낮을 수 있지만, 에너지 추출을 위한 공기 터빈이 수면 밖에 위치하기 때문에 유지 및 보수가 용이하다는 장점이 있다(EMEC, 2018).

진동수주형 파력발전 장치는 구조물의 운동 구속 조건에 따라 고정식과 부유식으로 분류할 수 있다. 본 연구와 관련 있는 고정식 진동수주형 파력발전 장치는 다양한 방법으로 연구가 진행중이다. Koo et al. (2010)은 일반적인 형태인 수직형 파력발전 장치를 이차원 완전 비선형 수치 조파수조를 통해 진동수주실 내부의 유동과 파 에너지 변환효율을 해석하였으며, 이차원 조파수조를 통해 형상 매개변수 연구 실험을 수행하였다 (Koo et al., 2012). 경사형 파력발전 장치는 수직형 파력발전 장치와 같이 준수한 에너지 추출 성능을 내면서 소형 항구에 위치한 경사형 방파제와 연계할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Park, et al. (2018)은 진동수주실의 스커트(Skirt)와 폭 변화에 따른 진동수주실 내부 상대파고를 측정하는 이차원 조파수조 실험을 하였으며, CFD 해석을 통해 열린 진동수주실과 덕트가 설치된 진동수주실 내부의 상대파고를 수조실험과 비교하여 신뢰도를 높였다 (Park, et al., 2018). 부유식 진동수주형 파력발전 장치도 연구가 진행 중인데, 특히 BBDB(Backward bent duct buoy)형 파력발전 장치에 대한 수치적, 실험적 연구가 수행된 바 있다 (Kim et al., 2012; Kim et al., 2012).

본 연구는 이차원 완전 비선형 수치 조파수조를 이용하여 경사형 고정식 진동수주형 파력발전 장치의 수치 모델링을 수행하고, 기존 유사한 형태의 OWC 실험결과와 비교하여 그 해석의

정확성을 검증하였다. 혼합 오일러리안-라그랑지안 법을 이용하여 자유표면의 비선형 파랑을 묘사하였으며, 비점성 유체 기반의 포텐셜 유동해석에서 점성 효과를 고려하기 위해 점성 감쇠계수(Viscous damping coefficient)를 추가하여 계산을 수행하고 실험값과 비교하였다. 또한, 덕트가 설치된 진동수주실 내에는 자유표면의 변위로 인한 공기압력이 발생하게 되는데, 이를 위해 공기 감쇠 효과를 적용하여 챔버 내부의 유동 변화를 계산하였다. 또한, OWC의 모든 에너지 구성요소를 계산하여 각 구성요소 에너지 합이 입사파 에너지와 일치하는지 파악하여 시스템 전체의 에너지가 보존되는지 확인하였다.

## 2. 문제의 정식화

본 연구에서는 계산 영역 내 유체를 비점성, 비압축성, 비회전성인 포텐셜 유체로 가정하여 고정식 진동수주형 파력발전 장치를 재현하였다. 이때, 이상 유체 유동을 잘 나타내는 속도 포텐셜은 다음과 같다. 수치해석을 위해 계산영역의 경계조건 및 수치해석 기법은 앞선 연구(Koo et al., 2010; Kim et al., 2012 등)에서 많이 기술된 바, 여기서는 간략하게 설명하고자 한다.

$$V = \nabla\phi \tag{1}$$

스칼라 값인 속도 포텐셜은 복잡한 유체 유동 현상을 쉽게 표현할 수 있다. 유체 유동은 연속방정식을 만족하게 되고 비압축성 유동은 지배방정식인 라플라스 방정식이 성립된다.

$$\nabla^2\phi = 0 \tag{2}$$

라플라스 방정식은 그린 이차 정리를 통해 다음과 같은 경계적분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha\phi_i = \iint_\Omega \left(G_{ij}\frac{\partial\phi_j}{\partial n} - \phi_j\frac{\partial G_{ij}}{\partial n}\right)ds \tag{3}$$

경계면에서의 입체각 $\alpha$는 0.5이며, 2차원의 그린함수는 $G_{ij} = -(1/2\pi)\ln R_1$ 이다. 여기서 $R_1$은 소스 점과 필드 점 사이의 거리를 의미한다.

자유표면의 경계조건은 운동학적 조건과 동역학적 조건으로 나눌 수 있는데, 자유표면상에 위치한 노드 점이 물 입자 운동과 같이 움직인다는 가정으로 자유표면 경계조건을 전체 미분하여 아래와 같은 비선형 자유수면 경계식으로 나타내었다.

$$\frac{\delta\eta}{\delta t} = -(\nabla\phi - \vec{\nu})\cdot\nabla\eta + \frac{\partial\phi}{\partial z} \tag{4}$$

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \nabla\phi\cdot\vec{\nu} - \frac{P_a}{\rho} \tag{5}$$

입사파 경계조건은 수치 조파수조 왼쪽 끝에 입사파 성분을 대입하여 진행파를 발생시켰고, 바닥 면, 우측 벽면, 고정 구조물 경계조건은 다음과 같은 불투과성 경계조건을 적용하였다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = 0 \tag{6}$$

입사파가 진동수주실 내부로 진입할 때 챔버 스커트 끝 단등에서 점성에 의한 에너지 손실이 발생하게 되는데, 이를 고려하기 위해 일반적으로 유동에서의 압력 감소 식은 다음과 같다.

$$\triangle P = K_L\frac{1}{2}\rho\tilde{V}^2 \tag{7}$$

위 식을 유속이 수주(Water column) 속도에 선형 비례하다는 가정하에 운동학적 자유표면 경계조건을 사용하여 압력 감쇠 식을 다음과 같이 정리하였다.

$$P_\nu(t) = K_L^*\dot{\bar{\eta}}(t) = \nu\frac{\partial\phi(t)}{\partial n} \tag{8}$$

덕트가 설치된 진동수주실 내에서는 자유표면의 변위로 인한 공기압력이 발생하게 되는데, 진동수주실 압력과 공기 덕트 속도 사이의 선형 관계를 가정하여 다음과 같이 정리하였다.

$$P_{ac}(t) = C_{dm}U_d(t) \tag{9}$$

여기서, $C_{dm}$은 선형 공압 감쇠 계수를 $U_d(t) = U_0\sin\omega t$는 공기 유속을 의미한다.

$$P_{ac}(t) = \frac{C_{dm}\Delta V}{A_d\Delta t} \tag{10}$$

최종적으로 점성 감쇠 효과와 공기 감쇠 효과를 적용하여 진동수주실 내부의 자유표면 경계조건을 아래 식으로 나타내었다.

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \nabla\phi\cdot\vec{\nu} - \frac{1}{\rho}\left(C_{dm}U_d + \nu\frac{\partial\phi}{\partial n}\right) \tag{11}$$

## 3. 수치해석 모델 및 결과

경사형 고정식 진동수주형 파력발전 장치의 수치 계산을 위한 전체적인 계산 영역을 다음과 같이 도식화하였다.

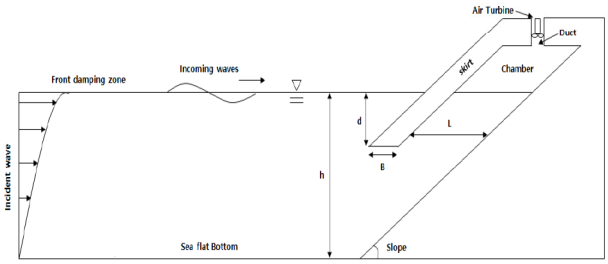



**Fig. 1** Schematic of a sloped oscillating water column system

여기서 d와 B는 진동수주실 스커트의 흘수와 두께 폭을 나타내며, L는 진동수주실의 너비(폭, gap), h는 수심을 나타낸다. 계산에 사용된 구조물의 제원은 Table 1 에 나타내었으며, 입사파는 Table 2와 같다.

**Table 1** Specification of an oscillating water column system

| Dimension | Case 1 |
|---|---|
| Air chamber | Nozzle (partial open) |
| d (m) | 0.1 |
| B (m) | 0.09 |
| L (m) | 0.25 |
| Slope (° ) | 33.7 |
| h (m) | 0.5 |

**Table 2** Incident wave conditions

| T (s) | H (m) | H/λ |
|---|---|---|
| 1 | 0.066 | 0.044 |
| 1.15 | 0.065 | 0.034 |
| 1.3 | 0.057 | 0.025 |
| 1.45 | 0.056 | 0.021 |
| 1.6 | 0.055 | 0.018 |
| 1.75 | 0.051 | 0.015 |
| 1.9 | 0.045 | 0.012 |
| 2.05 | 0.041 | 0.01 |

Case 1의 조건에서 진동수주실(챔버) 상부에 덕트가 설치되어 있어, 자유표면 변위로 인한 공기압력이 발생한다. 이를 자유 수면 경계조건식 적용하여 진동수주실 내부의 기압을 계산하였다. 또한, 점성 효과를 고려하기 위해 기존 연구(Yang et al., 2019)에서 구했던 점성 감쇠 계수를 이용하였다.

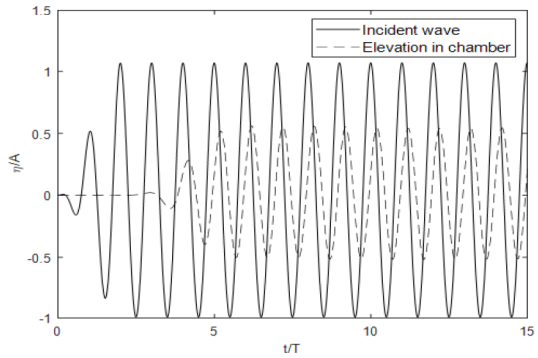



**Fig. 2** Time series of incident wave and elevation in the chamber at Case 1 (T=1.75s, H=0.051m)

Fig. 2 는 Case 1에서의 입사파와 진동수주실 내부의 자유표면 변위를 입사파 주기로 무차원한 시계열로 비교하였다. 입사파 주기 1.75초, 파고 0.051m 조건에서 진동수주실 내부의 자유표면 변위는 입사파 대비 약 1/2배 발생하였다.

이차원 수치 조파수조를 이용해 얻은 자유표면 변위를 Park et al. (2018)의 KRISO 수조실험 결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 챔버가 열려있는 경우(Cdm=0) 입사파장이 증가할수록 챔버내 수위가 입사파고 대비 최대 2.5배 정도까지 상승하지만, 챔버에 덕트가 설치되어 압력이 발생하고, 다시말해 공기유동으로 인한 에너지 추출이 되면, 챔버 수위는 급격히 감소하여 파고 대비 약 1/2배 정도로 낮아진다. 따라서 챔버가 열려있는 조건에서 덕트 설치 조건에서의 수위변화 차이가 에너지 추출양이 된다고 판단할 수 있다.

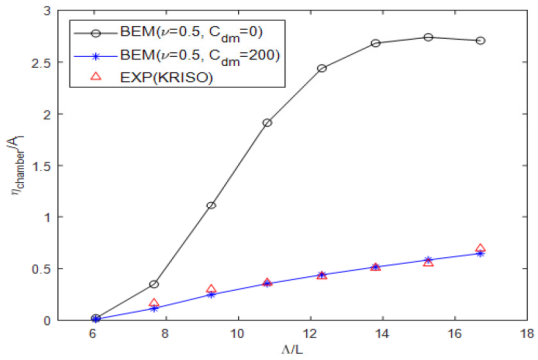



**Fig. 3** Comparison of wave elevations in the chamber for various ratios of chamber-duct size

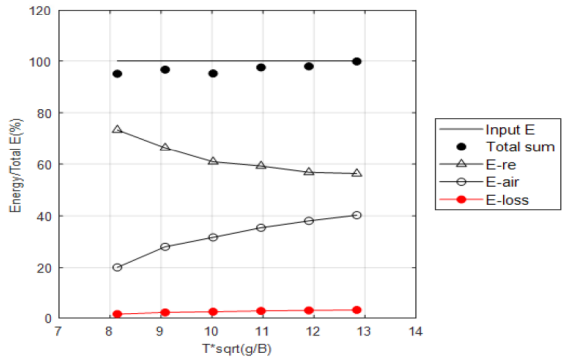



Fig. 4 Energy conservation of each components of energy flux

입사파 주기에 따른 에너지 요소별 크기와 총합을 Fig. 4에서 비교하였다. 반사파 에너지, 점성 감쇠 에너지, 챔버내 공기 에너지의 합은 입사파 에너지 플럭스와 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 OWC 시스템에서 모든 에너지 요소가 정확히 계측됨을 나타내며, 챔버내 공기 유동으로 인한 에너지는 입사파 주기가 증가할수록 대체로 증가하며, 입사파 에너지의 약 20~40% 정도가 됨을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 이차원 완전 비선형 수치 조파수조를 이용하여 경사형 고정식 진동수주형 파력발전 장치를 해석하고 실험결과와 비교하여 그 해의 유효성을 검증하였다. 챔버내 공기 유동으로 인한 에너지 추출을 위해 덕트가 설치된 진동수주실 조건에서 챔버내 자유수면 변위를 수조실험과 비교하여 에너지 추출양을 구하였다. 비섬성 유동의 포텐셜 유동 기반의 수치해석 결과를 보정하기 위해 기존연구에서 구한 점성 감쇠 계수를 추가하였으며, 공기 감쇠 계수를 통해 덕트가 설치된 진동수주실 내부 기압을 계산하였다.

추후 OWC 챔버내 에너지 추출량을 높이기 위해 챔버내 유동을 증폭할 수 있는 부가물을 해저면에 설치하여 에너지 추출양을 최대화할 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업의 지원을 받았습니다. (NRF-2018R1D1A1B07040677) 또한, 이 논문은 산업통상자원부 '산업전문인력역량강화사업'의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2020년 미래 해양플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업, 과제번호 : P0012646)

## 참 고 문 헌

환경부 및 관계부처 (2018). "2030 온실가스 감축 로드맵"

Kim, S.J. and Koo, W. (2012). "A Motion analysis of BBDB-type Floating Wave Energy Converter Using a Boundary Element Method", The Society of Naval Architects of Korea, Daegu, Republic of Korea, 31 May-1 June 2012.

Kim, S.J., Kwon, J., Kim, J.D., Koo, W., Shin, S., Kim, K. (2012). "Experimental Study of Hydrodynamic Performance of Backward Bent Duct Buoy (BBDB) Floating Wave Energy Converter", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 26, No 6, pp 53-58.

Koo, W., Kim, M.H., Choi, Y.R. (2010). "Numerical Analysis of Chamber Flow and Wave Energy Conversion Efficiency of a Bottom-Mounted Oscillating Water Column Wave Power Device", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol 47, No 3, pp 388-397.

Koo, W., Kwon, J.S., Kim, J.D., Kim, S.J., Kim, M.W., Choi, M.K. (2012). "Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Wave Energy Converter", Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, Vol 26, No 3, pp 33-38.

Park, S., Kim, K.H., Nam, B.W., Kim, J.S., Hong, K. (2018). "A Study on the Performance Evaluation of the OWC WEC Applicable to Breakwaters using CFD", Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, Vol 21, No 4, pp 317-327.

Park, S., Nam, B.W., Kim, K.H., Hong, K. (2018). "Parametric Study on Oscillating Water Column Wave Energy Converter Applicable to Breakwater", Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, Vol 4, No 2, pp 66-77.

The European Marine Energy Centre LTD (EMEC), Marine Energy/Wave Devices (2018). http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/

Yang, H.J., Koo, W., Kim, S.J. (2019). "A study on th Shape Parameters of a Sloped Oscillating Water Column WEC Using a 2D Full Nonlinear Numerical Wave Tank", The Society of Naval Architects of Korea, Gyeongju, Republic of Korea, 24-25 October 2019.

# 유향 변화에 따른 삼각배치 조류터빈의 성능 및 발전량 분석

조철희 · 조선근 · 정승원 · 문건웅(인하대학교)

재생에너지 정책의 성공적인 이행을 위해 에너지시스템의 규모가 증대함에 따라, 대규모 발전단지의 생산성 향상과 비용 절감을 통한 경제성 확보가 필요하다. 조류발전단지에서 조류터빈 삼각배치를 기본 단위로 전체 조류발전단지의 성능 및 발전량 특성을 산정할 수 있기 때문에 삼각배치 조류발전 시스템의 성능 및 발전량 분석은 필수적이며, 최적 조류터빈 삼각배치를 위해 터빈 간 이격거리에 따른 간섭 영향을 분석하여 각 터빈 성능에 미치는 영향을 검토해야 한다. 본 연구에서는 MRF(Moving Reference Frame method)를 통한 유동해석을 기반으로 직경 20m의 1MW급 조류터빈 3기의 삼각배치에서 횡방향 및 종방향 이격거리가 터빈 성능에 미치는 영향을 검토하였고, 유향이 계속적으로 변화하는 실해역에 적용하여 3개 유체 입사각(0°, 10°, 20°)에서 터빈 yaw-control이 구비된 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 분석을 수행하였다.

이 학술대회는 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로
한국과학기술단체총연합회의 지원을 받았습니다.
This work was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) grant funded by the Korean government.




**문의:** 한국해양공학회 학회사무국 (☎ 051-759-0656, FAX: 051-759-0657)
URL: www.ksoe.or.kr / E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr