

1225-0767(ISSN Print)  
2287-6715(ISSN Online)  
한국연구재단 등재학술지

# 한국해양공학회지

제31권 제6호 (통권 제139호)

2017년 12월

Journal of Ocean Engineering  
and Technology



Vol. 31, No. 6 (Serial Number 139)  
December 2017

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

# 한국해양공학회지 Journal of Ocean Engineering and Technology

## 편집위원회

**위원장**  
김윤해 한국해양대학교

**편집이사**  
정준모 인하대학교  
허동수 경상대학교

**편집위원**  
김국현 동명대학교  
김영훈 경남대학교  
김진환 카이스트  
나원배 부경대학교  
문경만 한국해양대학교  
박종천 부산대학교  
송창용 목포대학교  
신성원 한양대학교  
안석환 중원대학교  
엄원석 연세대학교  
윤현규 창원대학교  
이우동 경상대학교  
이종현 제주대학교  
이탁기 경상대학교  
임영섭 서울대학교  
정동호 한국해양과학기술원  
최형식 한국해양대학교  
하태민 강원대학교

**국제논문 편집위원**  
Ahmet Ergin, Istanbul Technical University  
Atilla Incecik, University of Strathclyde  
Moo Hyun Kim, Texas A&M University  
Sime Malenica, Bureau Veritas

## 연구윤리위원회

**위원장**  
서성부 동의대학교

**운영분과 및 심의 교육·분과 위원**  
윤현규 창원대학교  
조일형 제주대학교

## 학회 임원

**학회장**  
조효제 한국해양대학교

**부회장**  
하문근 삼성중공업  
김용수 대우조선해양  
김선진 부경대학교  
윤종성 인제대학교  
정대연 대영엔지니어링  
김병권 스틸플라워

## Editorial Boards

**Editor-in-Chief**  
Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

**Manuscript Editors**  
Joonmo Choung, Inha University, Korea  
Dong-Soo Hur, Gyeongsang National University, Korea

**Editorial Board Members**  
Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea  
Younghun Kim, Kyungnam University, Korea  
Jinwhan Kim, KAIST, Korea  
Won Bae Na, Pukyong National University, Korea  
Kyung-Man Moon, Korea Maritime and Ocean University, Korea  
Jong Chun Park, Pusan National University, Korea  
Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea  
Sungwon Shin, Hanyang University, Korea  
Seokhwan Ahn, Jungwon University, Korea  
Won Suk Ohm, Yonsei University, Korea  
Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea  
Woo Dong Lee, Gyeongsang National University, Korea  
Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea  
Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea  
Youngsub Lim, Seoul National University, Korea  
Dongho Jung, KRISO, Korea  
Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea  
Taemin Ha, Kangwon National university, Korea

**International Advisory Editorial Board Members**  
Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey  
Atilla Incecik, University of Strathclyde, UK  
Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA  
Sime Malenica, Bureau Veritas, France

## Research and Ethics Boards

**Chief**  
Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

**Management and Deliberative and Education Department**  
Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea  
Il-Hyoung Cho, Jeju National University, Korea

## Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

**President**  
Hyo-Jae Jo, Korea Maritime and Ocean University, Korea

**Vice President**  
Mun-Keum Ha, Samsung Heavy Industries, Korea  
Yong-Soo Kim, DSME, Korea  
Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea  
Jong-Sung Yoon, Inje University, Korea  
Dae-Yeon Chung, DY Engineering, Korea  
Byeongkwon Kim, Steel Flower, Korea

## About Journal of Ocean Engineering and Technology

“Journal of Ocean Engineering and Technology” is the official journal in Korean by “The Korean Society of Ocean Engineers”. The ISO abbreviation is “J. Ocean Eng. Technol.” and acronym is “JOET”. It was launched in 1987. It contains original research articles, case reports, brief communications and reviews on technical issues. It is published bimonthly in February, April, June, August, October, and December each year. Supplement numbers are published at times. All of the manuscripts are peer-reviewed.

### AIMS and SCOPE

**Journal of Ocean Engineering and Technology (JOET)** is published bimonthly in February, April, June, August, October, and December each year. It provides original research articles, case reports, brief communications and reviews on technical issues for engineers and researchers who are working in the field of offshore engineering; naval architecture; marine structural mechanics; safety and reliability; materials; pipelines and risers; polar and arctic engineering; computational fluid dynamics and vortex induced vibrations; port and waterfront design and engineering; linear and nonlinear wave mechanics; hydrodynamics; fluid-structure interaction; cable, mooring, buoy technology; underwater technology; geotechnology; foundation engineering; ocean mining; coastal engineering; marine renewable energy; aquacultural engineering; instrumentation, and full-scale measurements; model tests; satellite observations; marine environmental engineering; stochastic processes; hydroelasticity, subsea engineering; fluid mechanics; ocean acoustics, oceanographical engineering; computational methods/numerical analysis; shore protection; beach nourishment; sediment transport; risk and limit state design and assessment; ship maneuvering; buoyancy and stability (static and dynamic); seakeeping and control systems; and ship resistance and propulsion. Conference papers, research papers, diploma papers and academic articles can be submitted. All of the manuscripts are peer-reviewed.

### GENERAL INFORMATION

Full text is freely available from <http://www.joet.org> and <http://www.ksoe.or.kr> without logging. This journal was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) grant funded by the Korea government(MOSF&MSIP). Total or a part of the articles in this journal are abstracted in NRF (National Research Foundation Fund of Korea), Google Scholar, and KCI (Korean Citation Index).

Manuscript should be submitted via the online manuscript website <http://www.joet.org> Other correspondences can be sent via an email to the Editor in Chief, Prof. Yun-Hae Kim, Division of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 1 Dongsam-dong, Youngdo-ku, Busan 49112, Korea (Tel: +82 51 410 4355, Fax: +82 51 410 4350, e-mail: [yunheak@kmou.ac.kr](mailto:yunheak@kmou.ac.kr)).

Correspondence concerning business matters should be addressed to Secretary-Treasurer of KSOE, Heejin Lee, President O/T room No.1302, 13, Jungang-daero 180beon-gil, Dong-gu (48821), Busan, Korea (Tel: +82 51 759 0656, Fax: +82 51 759 0657, e-mail: [ksoehj@ksoe.or.kr](mailto:ksoehj@ksoe.or.kr)).

A subscription to the journal can be obtained by sending your order to or e-mailing to Secretary-Treasurer of KSOE. The annual charge for subscription is 100,000KRW or equivalent.

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2017 by The Korean Society of Ocean Engineers (KSOE) / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

© It is identical to Creative Commons Non-Commercial Licenses.

This paper meets the requirements of KS X ISO 9706, ISO 9706-1994, and ANSI/NISO Z39.48-1992 (Permanence of Paper)

Printed on December 31, 2017 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.



**한국해양공학회지**  
Journal of Ocean Engineering and Technology

**목 차**

제31권 제6호 (통권 제139호)

2017년 12월

**<학술논문>**

해상 LNG 병커링 터미널용 파일 가이드 계류 시스템 설계: 싱가포르 항의 사례 연구 이성엽 · 장대준 .....	379
댐 붕괴에 의한 토양 거동 시뮬레이션 김경성 · 박동우 .....	388
CEL기법을 이용한 앵커 끝림 시뮬레이션에 의한 Rock-berm 설계 신문범 · 박동수 · 서영교 .....	397
제3세대 파랑모델의 비선형 에너지 이송항 계산 효율 증대를 위한 SRIAM 계산모델 개발 이주용 · 윤재선 · 하태민 .....	405
실리카 에어로겔을 첨가한 폴리머 폼의 기계적 특성 안재혁 · 김정현 · 김정대 · 박성균 · 박강현 · 이제명 .....	413
3D 휴먼 시뮬레이션을 통한 세일링 요트 윈치 배치 설계 연구 송연희 · 김동준 · 장성록 · 이유정 · 민경철 .....	419
고유 변형도법과 리메칭 기술을 접목한 블록의 역세팅 형상 예측기술 현충민 · 최한석 · 박창우 · 김성훈 .....	425

**한국해양공학회지**  
**Journal of Ocean Engineering and Technology**

**CONTENTS**

Volume 31, Number 6

December, 2017

---

**<Original Research Articles>**

- Design of Pile-Guide Mooring System for Offshore LNG Bunkering Terminal: A Case Study for Singapore Port  
Seong-yeob Lee and Daejun Chang ..... 379
- Simulation of Soil Behavior due to Dam Break Using Moving Particle Simulation  
Kyung Sung Kim and Dong-Woo Park ..... 388
- Design of Rock-berm by Anchor Dragging Simulation using CEL Method  
Mun-Beom Shin, Dong-Su Park and Young-kyo Seo ..... 397
- Development of SRIAM Computation Module for Enhanced Calculation of Nonlinear Energy Transfer in 3<sup>rd</sup> Generation Wave Models  
Jooyong Lee, Jaeseon Yoon and Taemin Ha ..... 405
- Mechanical Behavior of Polymer Foam Reinforced with Silica Aerogel  
Jae-Hyeok Ahn, Jeong-Hyeon Kim, Jeong-Dae Kim, Sungkyun Park, Kang Hyun Park and Jae-Myung Lee ..... 413
- Research on Arrangement Design for Sailing Yacht Winch using 3D Human Simulation  
Yeun-Hee Song, Dong-Joon Kim, Seong Rok Chang, Yujeong Lee and Kyong-Cheol Min ..... 419
- Prediction Technology of Reverse Setting Block Shape with Inherent Strain Method and Re-meshing Technology  
Chung-Min Hyun, Han-Suk Choi, Chang-Woo Park and Sung-Hoon Kim ..... 425

# Design of Pile-Guide Mooring System for Offshore LNG Bunkering Terminal: A Case Study for Singapore Port

Seong-yeob Lee\* and Daejun Chang\*

\*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

## 해상 LNG 병커링 터미널용 파일 가이드 계류 시스템 설계: 싱가포르 항의 사례 연구

이성엽\* · 장대준\*

\*한국과학기술원 기계공학과

**KEY WORDS:** LNG fuelled ship 액화천연가스 추진 선박, LNG bunkering terminal 액화천연가스 병커링 터미널, Pile-guide mooring System 파일가이드식 무어링 시스템, Early design 초기 설계

**ABSTRACT:** In this study, a pile-guide mooring system (PGMS) was designed for an offshore liquefied natural gas bunkering terminal (LNG-BT), which is an essential infrastructure for large LNG-fuelled ships. The PGMS consisted of guide piles to restrict five motions of the floater, except for heave, as well as a seabed truss structure to support the guide piles and foundation piles to fix the system to the seabed. Singapore port was considered for a case study because it is a highly probable ports for LNG bunkering projects. The wave height, current speed, and wind speed in Singapore port were investigated to calculate the environmental loads acting on the hull and PGMS. A load and resistance factor approach was used for the structural design, and a finite element analysis was performed for design verification. The steel usage of the PGMS was analyzed and compared with the material usage of a gravity-based structure under similar LNG capacity and water depth criteria. This paper also describes the water depth limit and wave conditions of the PGMS based on estimation of the initial investment and the present value profit difference. It suggests a suitable LNG-BT support system for various design conditions.

### Abbreviation

	IMO
	International maritime organization
BOG	LNG
Boil off gas	Liquefied natural gas
EEDI	LNG-BS
Energy efficiency design index	LNG bunkering shuttle
FEA	LNG-BT
Finite element analysis	LNG bunkering terminal
GBS	LNGC
Gravity-based structure	LNG carrier
HFO	LNG-FS
Heavy fuel oil	LNG Fuelled ship
HLV	LRFD
Heavy lift vessel	Load and resistance factor design

Received 1 September 2017, revised 7 September 2017, accepted 20 November 2017

Corresponding author Daejun Chang: +82-42-350-1510, djchang@kaist.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

LWT  
Light weight tonnage  
MEPC  
Marine environment protection committee  
MUSD  
Million united states dollars  
PGMS  
Pile-guide mooring system  
PTS  
Port-to-ship  
PTT  
Portable tank transfer  
PVPD  
Present value profit difference  
STS  
Ship-to-ship  
SWH  
Significant wave height  
TTS  
Truck-to-ship  
USD  
United states dollars

## 1. 서 론

글로벌 화물운송 시장에서 선박이 차지하는 비율은 절대적이다. 선박은 효율적이며 친환경적인 수송수단이지만, 오늘날 더 개선된 지구환경을 위해 선박으로부터 오염물질 방출이 큰 폭으로 저감되어야 한다. 2016년 10월 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC) 70차 회의에서, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 전 해역에서 선박배출가스의 황 함유량을 0.5%로 제한하는 글로벌 해상환경 규제 강화 적용 시기를 2020년으로 확정하였다. 또한 에너지효율설계지수(Energy efficiency design index, EEDI)의 도입으로 새롭게 설계되는 선박은 이산화탄소 방출량을 단계적으로 줄여야 한다(MEPC, 2016). 그러나 현재 선박에 사용되는 중유계열의 bunker유(Bunker fuel oil)는 온실가스를 포함한 공해물질 배출량이 많기 때문에 강화된 환경 규제를 만족시키기 힘들다.

이러한 문제에 대한 해결방안으로 조선 및 해운업계에서는 선박의 추진 연료로써 액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)를 고려하고 있으며 연료탱크, bunker링 터미널 등의 인프라에 관한 연구들이 수행되고 있다. 단일 성능과 압축 성능을 동시에 지닌 단일계 연구, 기화천연가스(Boil off gas, BOG)를 줄일 수 있는 단일 구조 연구, 탱크의 공간 효율을 높이기 위한 각형 압력용기 설계 등이 LNG 연료탱크 및 bunker링용 저장탱크의 내조설계를 보다 경제적으로 하기 위해 수행되었다(Jung et al., 2016; Yun, 2015; Ahn et al., 2017). LNG bunker링 사업에 대해, Kim(2016)은 LNG 도입 이후 비용을 최소화하기 위한 위치 선정과 차별화된 bunker링 방식 및 사업구조의 필요성을 강조하고, 부산항의 경쟁력 확보 방안을 연구하였다.

LNG bunker링 터미널(LNG bunkering terminal, LNG-BT)은 크게 4가지 방식으로 분류된다: (1) 탱크로리(Tank lorry)에서 선박으로 충전하는 방식(Truck-to-ship, TTS) (2) 미리 충전해 놓은 LNG 연료탱크를 직접 교체하는 방식(Portable tank transfer, PTT) (3) 육상 LNG-BT에서 선박으로 충전하는 방식(Port-to-ship, PTS) (4) 해상 LNG-BT에서 LNG bunker링 셔틀(LNG bunkering shuttle, LNG-BS)을 이용하여 선박으로 충전하는 방식(Ship-to-ship, STS). 이 중 STS 방식의 해상 LNG-BT가 대형 선박 bunker링의 유일한 대안이다. 이에 관련하여 국내 울산항, 부산항을 대상으로 입출항 선박수, 선종별 연료 소모량, 안정성, 경제성, 주요기능 등을 고려하여 해상 LNG bunker링 터미널 사업 추진 가능성과 개념설계에 대한 연구가 수행되었다(Kim et al., 2017a; Yun et al., 2015). 또한, 부유식 LNG-BT에 작용하는 풍하중 및 조류하중을 LNG-BS 배치와 차폐효과를 고려하여 계산한 연구(Park et al., 2017), 터미널을 지지할 수 있는 파일가이드식 무어링 구조물 설계와 최적 목표신뢰도(Target reliability) 선정에 관한 연구 등이 수행되었다(Lee et al., 2016).

STS 방식의 해상 LNG-BT는 많은 장점이 있다고 알려져 있으나, 아직까지 안정성에 대한 우려가 크고 지지구조물에 대해 지배적인 해결책이 나오지 않은 상태이다. 현재 해상구조물에 가장 많이 사용되는 계류 시스템 또는 지지방식으로는 자켓 구조물(Jacket structure), 중력식 구조물(Gravity-based structure, GBS), 터렛(Turret) 등이다. 자켓 구조물은 지지 가능한 플랫폼의 한계 자중이 약 3~5만톤이기 때문에 15만톤 이상의 LNG를 저장해야 하는 LNG bunker링 터미널에 적합하지 않다. GBS의 경우 무거운 플랫폼 지지가 가능하지만 자켓 구조물에 비해 경제성이 낮고 해저면 상태에 따라 설치해역이 제한되는 단점이 있다. GBS 방식은 천해(수심 20m 이하)에서 큰 장점이 있을 것으로 보인다. 터렛 무어링 방식은 수심이 깊은 해역에서 경제성이 있을 것으로 판단되나, 선박간 bunker링에 대한 안전성 검토가 필요하다. 따라서, 육상에서 멀지 않은 해역(수심 20m~100m)에서 LNG-BT와 같이 자중이 15만톤 이상이고 선박간 LNG bunker링을 빈번하게 수행해야 하는 초대형 부유체를 지지할 수 있는 적절한 계류 시스템 연구가 필요하다.

본 연구에서는 해상 LNG-BT를 효율적으로 지지할 수 있는 파일가이드식 무어링 구조물(Pile-guide mooring system, PGMS)을 제안하며 싱가포르 항을 대상으로 설계를 수행한다. 설계안에 대해 유한요소해석을 통한 검증은 수행하고, 경제성 평가를 통해 제안된 무어링 구조물의 적용 범위를 연구한다.

## 2. 시스템 설명(System Description)

### 2.1 STS LNG bunker링 과정(STS LNG Bunkering Procedure)

Fig. 1은 STS 방식 LNG bunker링 절차이다. LNG선(LNG carrier, LNGC)은 LNG 생산설비로부터 LNG-BT로 LNG를 공급한다. Yun 등의 연구(Yun et al., 2015)에서, LNG-BT는 5개의 대기압 탱크와 1개의 압력 탱크를 가지고 있으며, 약 300,000m<sup>3</sup> 용량의 LNG를 저장할 수 있다. LNG-BT는 LNG-BS에게 LNG를 공급하고, 최종적으로 LNG-BS가 LNG를 연료로 사용하는 선박(LNG-fuelled ship, LNG-FS)에게 STS 방식으로 공급한다.

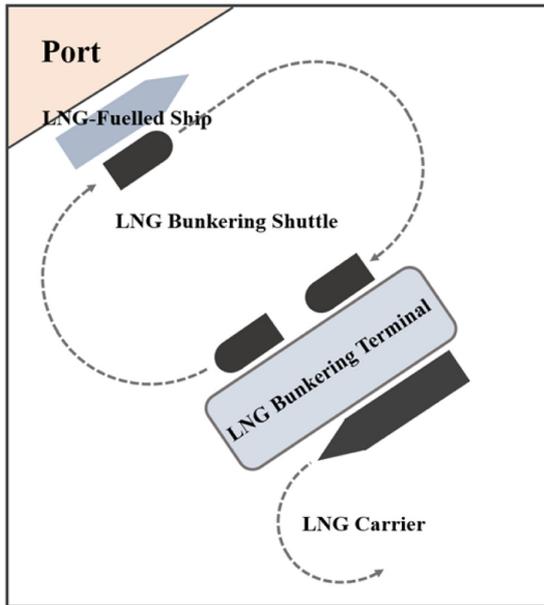


Fig. 1 Ship-To-Ship LNG Bunkering Procedure (Yun et al., 2015)

2.2 해상 LNG bunkering 터미널을 위한 파일 가이드 무어링 시스템

Fig. 2는 해상 LNG bunkering 터미널을 위한 가이드 파일을 이용한 무어링 구조물(PGMS)이다. 6개의 가이드파일(Guide-pile)이 부유체를 지지하도록 설계되었으며, 이들은 해저면에 고정되어 있는 트러스 구조물(Seabed truss structure)에 삽입된다. 최적 파일 개수는 목표해역의 환경조건에 따라 달라지며, 길이는 수심, 조수간만의 차, 부유체의 흘수가 고려되어 설계된다. 트러스 구조물은 말뚝 파일(Foundation pile)에 의해 해저면에 고정된다. LNG-BT는 자체적으로 부유체 기능을 할 수 있으며, 해수면 또는 흘수(Draft)가 변할 때 가이드파일을 따라 상하동요(Heave)를 자유롭게 할 수 있다. 나머지 5 자유도 운동(Surge, sway, roll, pitch, and yaw)은 가이드파일에 의해 구속된다. 따라서 부유체의 큰 자중과 부력의 변화가 무어링 구조물에 가해지지 않는다. 가이드파일과 트러스 구조물은 부유체에 작용하는 횡 방향 파력(Wave excitation force), 해류력(Current force), 풍력(Wind force)을

고려하여 설계된다(Lee et al., 2016).

3. A Case Study: 싱가포르 항

3.1 배경

3.1.1 싱가포르 항의 LNG bunkering 사업 계획

싱가포르는 말라카해협을 지리적 이점이 있어 석유 bunkering 시장에서 가장 높은 점유율을 가진 국가 중 하나이다. LNG bunkering 사업에 있어서도 아시아에서 가장 적극적이며 높은 경쟁력이 기대된다. 싱가포르 항은 2020년부터 선박에 LNG bunkering 서비스 제공을 목표로 2013년부터 관련 계획을 수립·진행해왔고, 2018년부터 시범사업이 추진될 예정이다. 최근 싱가포르 정부는 LNG bunkering 표준화 사업을 수행 중이며, LNG 추진선박 확대를 위해 6척의 신조선박에 대해 적당 200만 싱가포르달러(S\$)를 지원하는 정책을 발표하였다. 또한, 항만 내 LNG 추진선박에 대한 입항료를 5년간 면제하는 인센티브제 도입을 고려하고 있다(Kim et al., 2017b).

3.1.2 싱가포르 항의 LNG bunkering 기대 수요량

싱가포르 항에는 연간 약 128,000척의 선박이 지나가고 있으며(Table 1), 이중 40%가 싱가포르 항에서 중유 계열의 bunker유(Heavy fuel oil, HFO)를 공급받고 있다(MPA, 2012b). DNV-GL (2012)은 향후 bunkering을 위해 싱가포르 항으로 들어오는 선박의 약 15%가 LNG를 연료로 공급받을 것이라고 예상했다. LNG와 HFO의 에너지 밀도 차이(저위 발열량 기준 1,000m<sup>3</sup>의 HFO는 약 1,654m<sup>3</sup>의 LNG)를 고려하고 LNG를 연료로 사용하게 될 다섯 종류의 선박을 가정하여 예상 LNG bunkering 양을 Table 2와 같이 계산하였다(Yun et al., 2015). LNG-FS은 LNG가 약 10% 남았을 때 bunkering을 받게 되고, 주유시 85%까지 연료탱크를 채운다고 가정하였을 때(IMO, 2006) 하루 약 35,000m<sup>3</sup>의 LNG bunkering이 이루어질 것으로 예상된다. LNG 수입 가격과 bunkering용 예상 가격 차이를 2.5\$/MMBTU(58.5\$/m<sup>3</sup>)로 가정했을 때(Sund and Whitefield, 2014), 매년 12.6×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>의 LNG bunkering이 예상되는 싱가포르 항의 기대 수입은 737.1 MUSD/yr로 계산되었다.

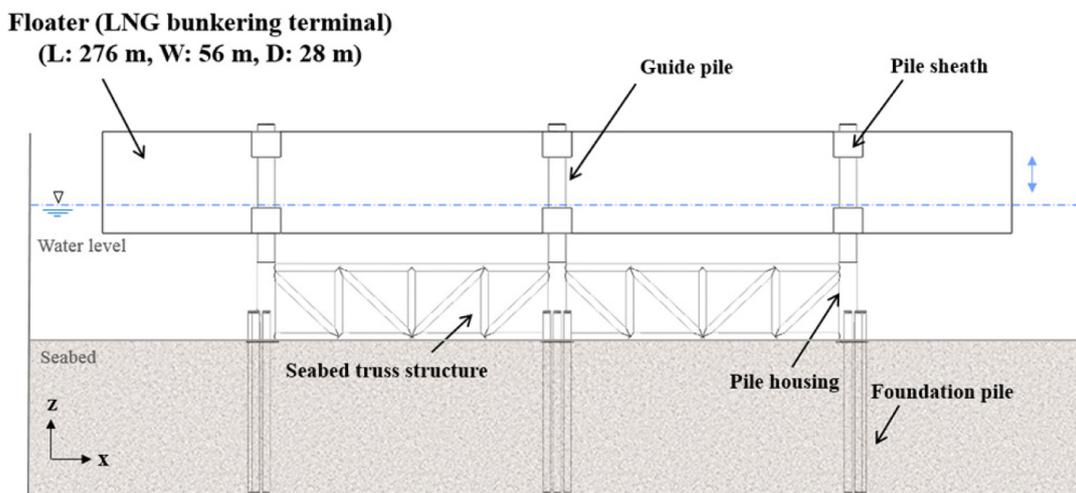


Fig. 2 Concept of pile-guide mooring system

**Table 1** Ship statistics in Singapore port in 2011 (MPA 2012b)

Ship types	Ships/year	Ships serving for transoceanic transport		
		Ships/day	GT/year	Fraction [%]
Container	19,290	52.8	657,025,000	15.1
Freighters	4,623	12.7	41,483,000	3.6
Coasters	3,907	10.7	1,739,000	3.1
Bulk carriers	13,093	35.9	604,740,000	10.2
Oil & chemical tanker	20,449	56.0	585,906,000	16.0
LNG & LPG	1,831	5.0	66,776,000	1.4
Passengers	411	1.1	19,968,000	0.3
Regional ferries	33,452	91.6	7,178,000	26.1
Barges	10,637	29.1	17,255,000	8.3
Tugs	11,065	30.3	2,557,000	8.6
Miscellaneous	9,240	25.3	115,655,000	7.2
Total	127,998	350.7	2,120,282,000	100.0

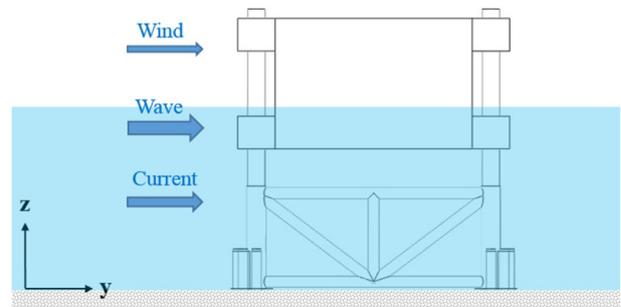
**Table 2** Target ships for LNG bunkering and expected LNG demand

Target ships	LNG bunker ships (40% * 15%)		Fuel tank size for HFO	LNG demand (75% filling)	
	Ships/year	Ships/day	10 <sup>3</sup> [m <sup>3</sup> ]	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /year	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day
Container	1,157	3	4.0	5.4	14.9
Bulk carrier	786	2	2.4	2.2	6.0
Oil & chemical tanker	1,227	3	1.9	2.6	7.1
LNG & LPG carrier	110	1	3.5	1.6	4.3
Passenger ship	25	1	2.2	1.0	2.7
Total	3,304	10	-	12.6	35.0

### 3.2 파일가이드식 계류 시스템(Pile-Guide Mooring System) 설계

#### 3.2.1 환경하중 계산

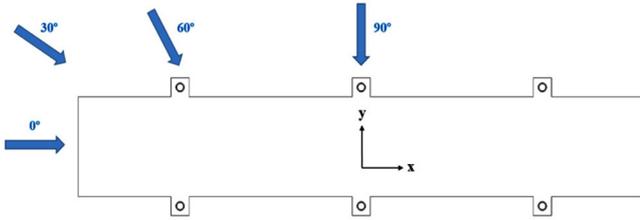
Fig. 3은 부유체와 PGMS에 작용하는 환경하중(풍력, 해류력, 파력)이다. 싱가포르 항의 환경조건은 상대적으로 유순하며 무어링 구조물 설계에 사용된 풍속(Wind velocity), 해류 속도(Current speed), 유의파고(Significant wave height, SWH)는 Table 3과 같다(NEA, 2009; MPA, 2012a; Zhang, 2004). 환경하중 중에 부유체에 가해지는 가장 지배적인 힘은 파력(Wave excitation force)이며, 부유체에 LNG가 가득 채워져 있을 때 가장 커진다.

**Fig. 3** Environmental load acting on pile-guide mooring system**Table 3** Weather conditions of Singapore port

Item	Unit	Value	Description	Remarks
Wind velocity	m/s	28	for 100 years	NEA 2009
Tidal level	m	3.1	Mean high water springs	MPA 2012a
		2.5	Mean high water neaps	
		0.5	Mean low water springs	
		1.2	Mean low water neaps	
Current speed	m/s	1.5~2.0	Narrow channels	Zhang 2004
		< 0.5	Eastern parts of straits	
SWH	m	1.5	Higher than the maximum wave height recorded	Zhang 2004

**Table 4** Dead weight condition (98% filling condition)

DWT estimation	Unit	Value
Weight (LWT + LNG 98%)	ton	164,446
Draft	m	11
Center of gravity (x, y, z)	m	(16.58, 0, 3.94)
Moment of inertia, $I_{xx}$	ton · m <sup>2</sup>	165,469,017
Moment of inertia, $I_{yy}$	ton · m <sup>2</sup>	4,011,71,164
Moment of inertia, $I_{zz}$	ton · m <sup>2</sup>	4,099,984,257



**Fig. 4** Direction of wave excitation forces

부유체에 작용하는 파력은 ANSYS-AQWA를 사용하여 계산하였다. Table 4는 탱크에 LNG가 98% 채워졌다는 가정 아래 계산된 무게중심과 2차 관성 모멘트 값이다. 여기서 부유체의 경하중량(Light weight tonnage, LWT)은 Hull (22,475ton), LNG탱크 (17,677ton), 평형수 탱크(10,404ton), Accommodation (800ton), 상부설비 (2,200ton), Flare stack (800ton), Cargo systems (500ton), Cargo loading arms (300ton), 기타 기계 장치(500ton) 에 15% 마진을 더하여 약 64,000ton으로 추산된다. 부유체 정보(Table 4)와 포텐셜 이론을 기반으로 부유체에 가해지는 파력(Froude-Krylov 힘과 Diffraction 힘)을 계산할 수 있다(ANSYS, 2013). Pierson-Moskowitz spectra를 사용하여 8초 이상 12초 미만의 평균 유의 파주기를 가지는 불규칙파(Irregular wave)를 표현하였고, Fig. 4와 같이 4개의 파향(0°, 30°, 60°, 90°)을 고려하여 부유체에 작용하는 최대 파력을 Table 5와 같이 계산하였다. 힘과 모멘트를 동시에 고려했을 때 60°로 접근하는 파도가 주요했다. 부유체는 가이드파일을 따라 상하동요(Heave)를 자유롭게 할 수 있기 때문에 무어링 구조물에 Z 방향 힘이 작용하지 않는다고 가정하였다. 해류력은 부유체와 무어링 구조물 모두에 작용하며 Y 방향일 때 가장 크다. 부유체에 약 8.7MN, 트러스 구조물에 약 3.9MN의 해류력이 가해진다. 풍력은 부유체에만 작용하며 Y 방향일 때 약 2.2MN이다.

**Table 5** Wave excitation forces and moments acting on LNG-BT

Direction/ Rotation	Unit	Wave direction			
		0°	30°	60°	90°
X	MN	9	10	13	Negligible
Y	MN	Negligible	14	39	57
RX	MN · m	Negligible	379	966	1,426
RY	MN · m	5,581	5,855	5,474	Negligible
RZ	MN · m	Negligible	1,444	2,459	Negligible

**3.2.2 파일가이드식 계류 시스템 설계**

하중 내력 계수 설계법(Load and resistance factor design, LRFD)과 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)을 사용하여 무어링 구조물의 형상과 치수를 결정하였다. LRFD설계란 기준 이상의 안전 수준을 보장하기 위해 식 (1)-(2)와 같이 하중에는 가중계수 (Load factor,  $\gamma_f$ ), 부재의 저항력에는 감쇠계수(Material factor,  $\gamma_m$ )를 곱하여 구조물을 설계하는 방법이다.  $S_k$ 는 구조물에 가해지는 하중이고,  $R_k$ 는 부재의 저항력이다. 본 연구에서는 항복강도 (Yield strength)를 부재의 저항력이라고 가정하였다. 자중과 환경 하중에 대해 1.3의 가중계수를 적용하였고, 부재(ASTM A36 steel)의 저항력에 대해서는 1.15의 강도감쇠계수를 사용하였다 (DNV-GL, 2011). A36 강재의 물성은 Table 6과 같다.

$$S_d = \sum_{i=1}^n (\gamma_f \cdot S_{ki}) \tag{1}$$

$$R_d = (1/\gamma_m) R_k \tag{2}$$

**Table 6** Material properties of ASTM A36 Steel

Property	Unit	Value
Density	kg/m <sup>3</sup>	7,800
Young's modulus	GPa	200
Poisson's ratio	-	0.26
Yield strength	MPa	250

모델링 및 구조해석은 범용 FEA 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 굽힘응력이 크게 작용하고 상대적으로 변형률이 큰 가이드파일과 말뚝 파일에는 8절점 감차 적분 고체 요소(8-node linear brick, reduced integration, hourglass control, C3D8R)를, 압축력이 주로 작용하는 트러스 구조물에는 4절점 감차 적분 Shell 요소(4-node doubly curved thin shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains, S4R)를 사용하였다. 부유체와 무어링 구조물에 자중과 환경하중을 가하고, 말뚝 파일이 해저면에 고정되었다고 가정하여 FEA를 수행하였다. 가이드 파일과 부유체, 트러스구조물이 만나는 지점과 말뚝 파일 상부에서 환경 하중에 의한 최대 굽힘응력이 나타하며, 8면체 전단 응력 항복 조건(Octahedral shear stress yield criterion)을 사용하여 허용응력 설계의 만족 여부를 확인하였다. Fig. 5는 LRFD로 설계된 PGMS 모든 구성 요소들의 응력 해석 결과(von Mises Stress, MPa)이다. 본 연구에서 부유체(Hull)의 변형은 고려되지 않았으며 토질은 Table 7과 같이 사질점토(Sandy Clay)로 가정하였으나, 목표해역 안에서도 구체적인 설치 위치에 따라 조성이 바뀔 수 있다. 토질 모델에 대해서는 Mohr-Coulomb 파괴 기준에 의거한 탄 · 소성 구성 모델을 적용하였다.

**3.2.3 파일가이드식 계류 시스템의 경제성**

목표해역에서 LNG 벙커링 터미널을 위한 적정 계류 시스템을 결정하기 위해서는 구조물의 초기 투자비용( $C_{bst}$ )과 가용도 차이(Availability difference)로 발생할 수 있는 이익 차이(Present

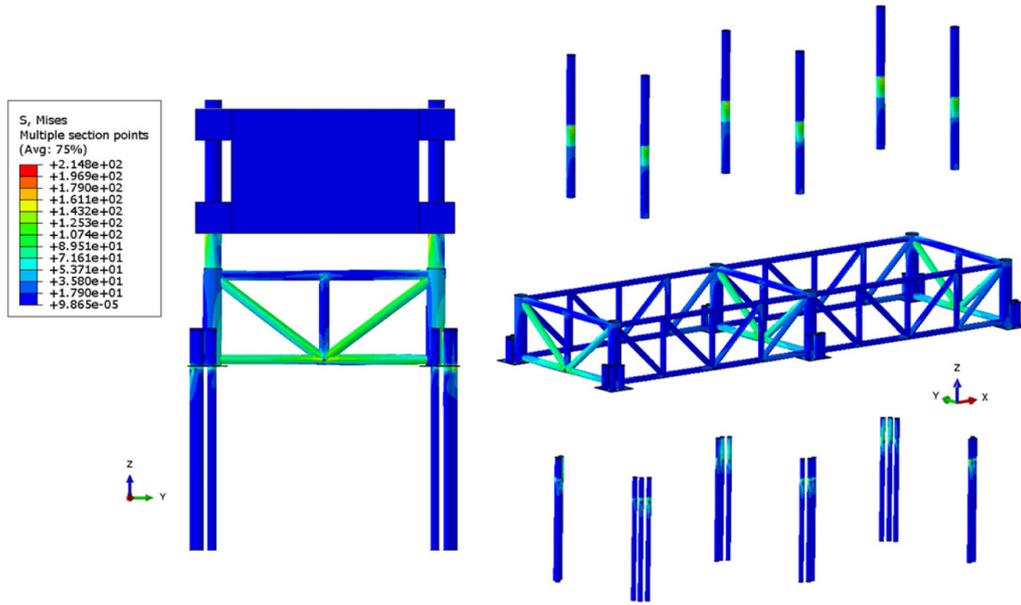


Fig. 5 Finite element analysis of pile-guide mooring system

Table 7 Material properties of sandy clay

Property	Unit	Value
Young's modulus	MPa	150
Cohesion yield strength	kPa	50
Poisson's ratio	-	0.3
Friction angle	degree	32
Dilation angle	degree	0

value profit difference, PVPD)를 비교분석해야 한다. 구조물의 초기투자비용은 제작비( $C_m$ ), 운송비( $C_t$ ), 설치비( $C_i$ )의 합으로 계산된다. 제작비는 재료비(Material cost), 기술비(Engineering cost), 장비비(Equipment cost), 인건비(Labor cost)를 포함하고, 운송비는 제작 완료된 구조물을 바지선 등으로 옮길 때 사용되는 비용을 의미한다. 설치비는 구조물을 목표해역에 위치시키는데 사용되는 비용을 의미하며 구조물의 특성 및 형태에 따라 크게 달라진다. 예를 들어, GBS 구조물을 설치할 때에는 바지선과 Heavy Lift Vessel (HLV)만 필요한 반면, PGMS와 같은 자켓 형식의 구조물을 설치할 때에는 말뚝파일 파일링(Piling) 작업을 위한 Hydraulic hammer와 Grouting 장비 등이 추가로 필요하다. Van

Wijngaarden(2013)은 해상 풍력 발전기를 지지하는 자켓 또는 삼각대(Tripod) 형식 구조물의 경제성 평가를 수행하였으며 HLV, Hydraulic hammer 등이 고려된 운송비와 설치비는 전체 비용의 약 30%로 평가되었다. 유사구조물인 PGMS의 초기투자비용(Cost)은 식 (3)과 같이 제작비에  $\beta$ 값을 곱하여 계산할 수 있으며, PGMS의  $\beta$ 값은 1.43이다(Lee et al., 2016). 강구조물의 제작비는 복잡하지 않은 구조물(파일)에 대해 톤당 2495USD, 복잡한 구조물(트러스구조물)에 대해 톤당 4990USD로 추산하였다(De Vries, 2007).

$$Cost = C_m + C_t + C_i = C_m \times \beta \tag{3}$$

Table 8 Dimension, steel and concrete usage of pile-guide mooring system

Component	Guide pile	Seabed truss structure		Foundation pile
		X-direction	Y-direction	
Diameter [m]	3.70	1.20	2.30	2.00
Steel usage [ton]	1,790	1,829		1,065

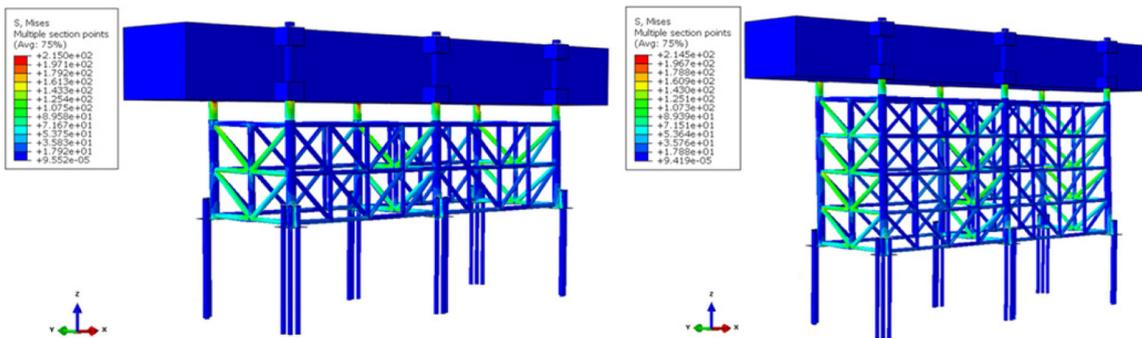


Fig. 6 Finite element analysis on different water depths

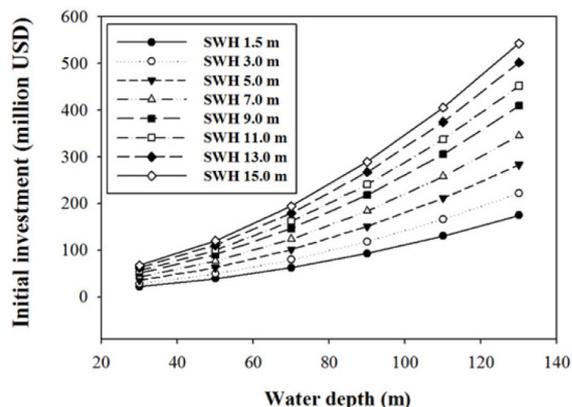
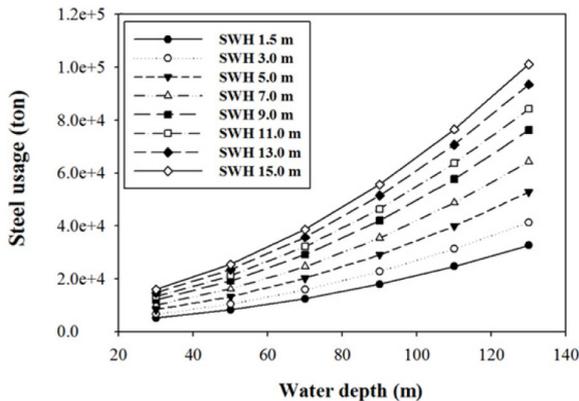


Fig. 7 Steel usage of pile-guide mooring system

싱가포르 항을 기준으로 설계된 PGMS의 주요 부재 치수와 강재(Steel) 사용량은 Table 8과 같다. 설계 유의파고 1.5m, 수심 30m 조건에서 벙커링 터미널(길이 276m, 폭 56m, 높이 28m)을 지지하기 위해 약 5,128ton의 강이 사용되고 초기 투자비용은 약 21.7MUSD로 계산되었다. PGMS의 초기 투자비용은 횡방향 파력과 수심에 민감하기 때문에, Fig. 6과 같이 다양한 수심과 설계 유의파고에 대해 PGMS를 설계하였다. 각 경우의 유한 요소 모델에서 강재 사용량을 계산하였고, 초기 투자비용은 식 (3)을 기반으로 Fig. 7과 같이 추산되었다.

계류 시스템 선정에 따른 이익 차이(PVPD)는 STS LNG 벙커링의 가용도 차이를 통해 고려될 수 있으며, 식 (4)와 같이 계산된다.  $P$ 는 싱가포르 항의 연간 벙커링 예상 수익(737.1MUSD/yr),  $\Delta A$ 는 가용도 차이(Availability difference),  $n$ 은 구조물의 기대수명(Lifespan)을 의미한다. 미래에 발생하는 이익에 대해 할인율(Discount rate,  $d$ )을 적용하여 현재가치로 환산 후 PVPD를 계산하였다. 일반적인 산업 국가에서의 할인율은 약 2~8%이다(Thoftchristensen, 2012). 부유체간 LNG 벙커링은 병렬 계류 방식(Side By Side)으로 수행되고 상대 수직운동이 2m 이하로 제한되어야 한다(Naciri et al., 2007). 따라서 벙커링 가용도는 부유체간 상대 운동해석과 목표해역의 일단위 파고 분석을 바탕으로 평가되어야 하지만, 무어링 구조물 개념 설계를 다루는 본 연구에서는 초기 투자비용과 가용도 차이가 적정 계류시스템 선정에 얼마나 큰 영

향을 주는지를 먼저 분석하였다. 목표해역에서 부유체 운동해석을 통한 LNG 벙커링 가용도 차이를 분석하는 연구가 추후 필요하다.

$$PVPD = \sum_{i=1}^n P\Delta A(1+d)^{-i} \tag{4}$$

Fig. 8은 가용도 차이에 따른 PVPD를 보여준다. 왼쪽 그래프는 LNG-BT의 기대수명이 30년, 오른쪽 그래프는 기대수명이 50년인 경우이다. 가용도 차이에 따른 PVPD 변화는 그림과 같이 구조시스템의 기대수명과 할인율에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 아래 무어링 구조물 비교에 있어서 해상 LNG-BT의 기대 수명을 30년, 할인율을 5%로 가정하였다.

비슷한 수심(29m)에 대해 GBS 방식으로 설계된 최초 해상 LNG 인수 설비인 Adriatic LNG는 이탈리아 베니스와 매우 가까운 해역에 설치되었다. 이 해상 설비는 길이 180m, 폭 88m, 높이 47m이고, 좌우측 두개의 무어링 구조물(Mooring dolphins)이 있다. 이 중력식 지지 구조물을 위해 약 30,000톤의 강재와 90,000m<sup>3</sup>의 콘크리트가 사용되었다(Waters et al., 2007). 해양 구조물에 사용되는 콘크리트의 단가는 약 200USD/m<sup>3</sup>이며, 제작비 중 재료비가 약 40%를 차지하기 때문에 콘크리트 구조물의 제작비를 약 500USD/m<sup>3</sup>으로 가정하였다(Barker, 2017). 철근은 제작비를 톤당 2495USD로 계산하였다. GBS 구조물은 PGMS 방

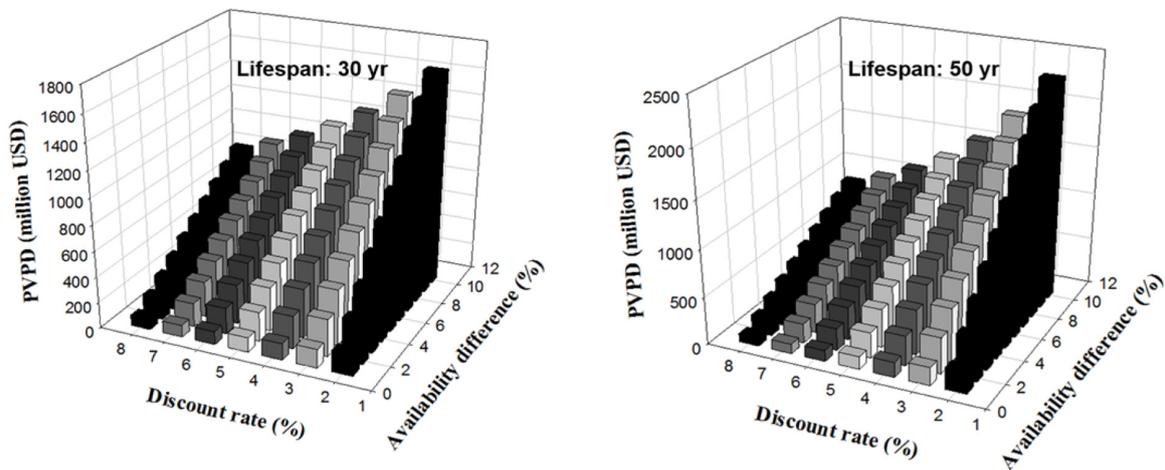


Fig. 8 Present value profit difference of LNG-BT in Singapore port

**Table 9** Comparison of mooring solutions for offshore LNG-BT

Comparison item	GBS	Turret mooring system	PGMS
Supportable weight	No limit	No limit	No limit
Target water depth	< 20 [m]	No limit	< 110 [m] depending on design wave height
LNG-BT motion	Negligible	Need to check	Negligible
Ship accessibility	High	Limited	High
Applications	Shallow water with frequent LNG transfer, Harsh wave conditions	Deep sea and shallow water depending on availability of LNG STS transfer	Mid-depth with frequent LNG transfer, Relatively calm sea state

식과 비교했을 때 상대적으로 설치가 용이하다. 운송비와 설치비가 전체 비용의 약 10%라고 가정하였고, 이때 GBS의  $\beta$ 값은 1.11이다. 그 결과 철근 30,000톤과 90,000m<sup>3</sup>의 콘크리트를 사용하여 GBS 방식으로 설계된 지지 구조물의 초기 투자 비용은 약 133MUSD로 추정되었다. 이 경제성 평가를 바탕으로 GBS 방식과 PGMS 방식을 비교해보았다. 부유체의 모든 자유도가 구속되는 GBS 방식과 상하동요를 제외한 5 자유도 운동이 구속되는 PGMS 방식의 벙커링 가용도는 비슷할 것으로 예상되기 때문에, 싱가포르 항(설계 유의파고 1.5m, 수심 30m)에서는 GBS 방식(133MUSD)보다 PGMS 방식(21.7MUSD)이 경제적으로 우수할 것으로 평가되었다. PGMS 방식은 부유체 일부가 잠겨있기 때문에 횡방향 파력에 큰 영향을 받는다. GBS의 설계에 따라 초기 투자비용이 달라질 수 있으나 Fig. 7과 Adriatic LNG를 비교했을 때 설계 유의파고가 15m 이내인 천해(< 50m)에서는 PGMS 방식(< 120MUSD)이 우수할 것으로 기대된다. 파고가 상대적으로 높은(설계 유의파고 > 15m) 천해(< 20m)에서는 GBS 방식이 PGMS 방식보다 효과적일 수 있다.

터렛 무어링 방식은 웨더베이닝(Weather vaning)이 가능하여 부유체에 작용하는 환경하중을 최소화 시킬 수 있으며 깊은 수심까지 적용 가능하다는 장점이 있으나 PGMS방식과 비교했을 때 부유체 움직임이 크기 때문에 선박간 LNG 벙커링 안정성과 가용도 검토가 필요하다. 싱가포르 항에서 터렛 무어링 방식을 사용할 경우 약 10~12MUSD의 초기 투자비용이 필요할 것으로 예상된다(England et al., 2001; Ryu et al., 2007). 따라서 수심 30m에서 터렛 무어링 방식은 PGMS 방식과의 가용도 차이가 0.1% 이하(PVPD < 11MUSD)일 때 유효할 것으로 보인다. 싱가포르 항의 환경조건은 상대적으로 유순하므로 PGMS 방식과 터렛 무어링 방식의 가용도 차이가 크지 않을 것(1~2% 미만, PVPD < 150MUSD)으로 예상된다. 이러한 해상 조건에서는 약 수심 110m까지 PGMS 방식(< 131MUSD)이 유리할 것으로 분석되었다.

적정 계류 시스템은 목표해역의 해상 조건, 수심, LNG 벙커링 규모 등에 따라 바뀔 수 있으며, 초기 투자비용과 가용도 분석을 통한 PVPD 비교를 통해 결정될 수 있다. Table 9는 위 경제성 평가를 근거로 요약한 무어링 시스템의 특징과 적용 가능 범위이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해상 LNG 벙커링 터미널을 지지할 수 있는 파 일가이드식 계류 시스템(PGMS)을 하중 내력 계수 설계법과 유한요소해석으로 설계하였다. 또한 구조물의 초기 투자비용과

용도 차이로 발생될 수 있는 이익 차이를 비교분석하여 제안된 무어링 시스템의 적용 범위를 제시했다. 벙커링 가용도는 부유체간 상대 운동해석과 목표해역의 일단위 파고 분석을 바탕으로 평가되어야 하지만, 무어링 구조물 개념 설계를 다루는 본 연구에서는 초기 투자비용과 가용도 차이가 적정 계류시스템 선정에 주는 영향을 먼저 분석하였다. 추후 부유체 운동해석을 기반으로 하는 LNG 벙커링 가용도 분석에 대한 연구가 필요하다.

(1) 우선 아시아에서 LNG 벙커링 사업에 적극적이며 높은 경쟁력이 기대되는 싱가포르 항의 해상 조건에 맞게 PGMS를 설계하였다. 해상 LNG 벙커링 터미널(길이 276m, 폭 56m, 높이 28m)을 지지하기 위해 약 5,128ton의 강(Steel)이 사용될 것으로 계산되었고, 약 21.7MUSD의 초기 투자비용이 발생할 것으로 예상했다. PGMS 방식의 경제성은 설계 파고와 수심에 민감하기 때문에 다양한 환경 조건에 대해 구조물을 설계하고 초기 투자비용을 추산하였다.

(2) 부유체의 모든 자유도가 구속되는 GBS 방식과 상하동요를 제외한 5 자유도 운동이 구속되는 PGMS 방식의 벙커링 가용도는 비슷할 것으로 예상되기 때문에, 싱가포르 항(설계 유의파고 1.5m, 수심 30m)에서는 GBS 방식보다 PGMS 방식이 경제적으로 우수할 것으로 평가되었다. PGMS 방식은 부유체 일부가 잠겨있기 때문에 횡방향 파력에 큰 영향을 받는다. GBS 방식 또한 설계 파고에 따라 초기 투자비용이 달라질 수 있으나, 설계 유의파고 15m 이내인 천해(< 50m)에서는 PGMS 방식이 우수할 것으로 분석되었다. 파고가 상대적으로 높고(설계 유의파고 > 15m) 제작 단가를 줄일 수 있는 천해(< 20m)에서는 GBS 방식이 PGMS 방식보다 효과적일 수 있다.

(3) 터렛 무어링 방식은 웨더베이닝(Weather vaning)이 가능하여 부유체에 작용하는 환경하중을 최소화 시킬 수 있으며 깊은 수심까지 적용 가능하다는 장점이 있으나 PGMS방식과 비교했을 때 부유체 움직임이 크기 때문에 선박간 LNG 벙커링 안정성과 가용도 검토가 필요할 것으로 보인다. 싱가포르 항과 같이 환경조건이 유순하고 수심이 110m 이내인 해역에서는 PGMS 방식이 더 우수할 것으로 분석되었다.

(4) 적정 계류 시스템은 목표해역의 해상 조건, 수심, LNG 벙커링 규모 등에 따라 바뀔 수 있다. 본 연구에서 조사한 싱가포르 항에 적합한 계류 시스템과 PGMS 적용범위가 다른 항에 바로 적용되기는 힘들지만(항구마다 LNG 벙커링 규모와 해상 조건이 다르기 때문), 본 연구에서의 초기 투자비용 추산 과정과 가용도 차이에 의한 이익 차이 분석 과정을 활용하여 다른 목표해역에서도 적합한 계류 시스템 형태가 결정될 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 LNG 플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(한국연구재단-Global Ph.D. Fellowship program, No. 2016H1A2A1909008)입니다.

## References

- Ahn, J.K., Choi, Y.S., Jo, C.H., Cho, Y.H., Chang, D.J., Chung, H., Bergan P., 2017. Design of a Prismatic Pressure Vessel with Internal X-beam Structures for Application in ships. *Ships and Offshore Structures*, 12(6), 781-792.
- ANSYS, 2013. AQWA Theory Manual Release 15.0. ANSYS Inc., USA.
- Barker, M., 2017. Bridge Economy and Life Cycle Costs of Steel & Concrete Bridges. NACE 2017 Short Span Steel Bridge Workshop, Cincinnati, Ohio.
- De Vries, W., 2007. Final Report WP 4.2 Support Structure Concepts for Deep Water Sites. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV-GL), 2011. DNV-OS-C101. Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method).
- Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV-GL), 2012. DNV Report; Shipping 2020.
- England, L.T., Duggal, A.S., Queen, L.A., 2001. A Comparison Between Turret and Spread Moored F(P)SOs for Deepwater Field Developments. *Deep Offshore Technology* 2001.
- International Maritime Organization (IMO), 2006. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. Chapter 15: Filling Limits for Cargo Tanks.
- Jung, W.D., Kim, T.W., Kim, J.H., Lee, D.Y., Chun, M.S., Lee, J.M., 2016. Measurement of Real Deformation Behavior in C-type Lng Mock-up Tank using Strain Gage. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(2), 117-124.
- Kim, K.D., Choi, K.S., Oh, Y.S., Cho, S.H., Kim, S.H., Shin, D.G., Jung, D.H., Kim, H.E., Shin, D.H., 2017a. A study of LNG Bunkering Demands on Ulsan Port for Demonstration of Floating LNG Bunkering Terminal. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 21(1), 65-71.
- Kim, G.S., 2016. A Study on Price Competitiveness for LNG Bunkering in the Busan Port. *Journal of Korea Port Economic Association*, 32(1), 123-133.
- Kim, G.S., Kim, E.S., Lee, K.Y., Park, S.J., 2017b. Weekly report of Korea Maritime Institute (KMI), 19.
- Lee, S.Y., Jo, C.H., Bergan, P., Pettersen, B., Chang, D.J., 2016. Life-cycle Cost-based Design Procedure to Determine the Optimal Environmental Design Load and Target Reliability in Offshore Installations. *Structural Safety*, 59, 96-107.
- Maritime and Port Authority of Singapore (MPA), 2012a. Singapore Tide Tables Year 2013. Hydrographic Department of MPA, Singapore.
- Maritime and Port Authority of Singapore (MPA), 2012b. Port Statistics. [Online] Available at : <<http://www.mpa.gov.sg/>> [Accessed October 2017].
- Marine Environment Protection Committee (MEPC), 2016. Report of the Marine Environment Protection Committee on Its 70<sup>th</sup> Session
- Naciri, M., Waals, O., de Wilde, J., 2007. Time Domain Simulations of Side-by-side Moored Vessels Lessons Learnt from a Benchmark Test. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: OMAE 2007-29756*.
- National Environment Agency (NEA), 2009. *Weatherwise Singapore*, Singapore.
- Park, B.W., Jung, J.H., Hwang, S.C., Cho, S.K., Jung, D.H., Sung, H.G., 2017. Wind Tunnel Test of Wind Loads and Current Loads Acting on FLBT and LNG Bunkering Shuttles in Side-by-side Configuration and Comparison with Empirical Formula. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(4), 266-273.
- Ryu, S., Duggal, A.S., Heyl, C.N., Geem, Z.W., 2007. Mooring Cost Optimization via Harmony Search. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: OMAE 2007-29334*.
- Sund, K., Whitefield, A., 2014. Gas Prices Today and Going Forward (Wholesale Prices and the Impact on Retail Prices for LNG as Bunkering Fuel). *MarTech LNG Value Chain Development Seminars*, SUND energy.
- Thoft-Christensen, P., 2012. Infrastructures and Life-Cycle Cost-Benefit Analysis. *Structure & Infrastructure Engineering*, 8(5), 507-516.
- Van Wijngaarden, M., 2013. Concept Design of Steel Bottom Founded Support Structures for Offshore Wind Turbines. Delft University of Technology, The Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Waters, L.B., Mueller, C.V., Hellen, P.C., Hurst, G.L., 2007. Design and Construction of Gravity Based Structure and Modularized LNG Tanks for the Adriatic LNG Terminal.
- Yun, S., Ryu, J., Seo, S., Lee, S., Chung, H., Seo, Y., Chang, D., 2015. Conceptual Design of an Offshore LNG Bunkering Terminal: a Case Study of Busan Port. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 226-237.
- Yun, S.K., 2015. Thermal Analysis of LNG Storage Tank for LNG Bunkering System. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 39(9), 876-880.
- Zhang, D., 2004. Numerical Simulation of Large-scale Waves and Currents. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.

# Simulation of Soil Behavior due to Dam Break Using Moving Particle Simulation

Kyung Sung Kim\* and Dong-Woo Park\*

\*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea

## 댐 붕괴에 의한 토양 거동 시뮬레이션

김경성\* · 박동우\*

\*동명대학교 조선해양공학부

**KEY WORDS:** Moving particle simulation 입자법, Multiphase flow 다상유동, Soil behavior 지표면 토양 거동

**ABSTRACT:** A Lagrangian approach based computational fluid dynamics (CFD) was used to simulate large and/or sharp deformations and fragmentations of interfaces, including free surfaces, through tracing each particle with physical quantities. According to the concept of the particle-based CFD method, it is possible to apply it to both fluid particles and solid particles such as sand, gravel, and rock. However, the presence of more than two different phases in the same domain can make it complicated to calculate the interaction between different phases. In order to solve multiphase problems, particle interaction models for multiphase problems, including surface tension, buoyancy-correction, and interface boundary condition models, were newly adopted into the moving particle semi-implicit (MPS) method. The newly developed MPS method was used to simulate a typical validation problem involving dam breaking. Because the soil and other particles, excluding the water, may have different viscosities, various viscosity coefficients were applied in the simulations for validation. The newly developed and validated MPS method was used to simulate the mobile beds induced by broken dam flows. The effects of the viscosity on soil particles were also investigated.

### 1. 서 론

댐 붕괴에 의해 큰 파형을 가지는 유체는 심각한 강의 범람 및 구조물에 큰 피해를 줄 수 있다. 이에 따라 수리학을 연구하는 학자들로부터 이러한 ‘댐 붕괴’ 문제는 많은 이론적, 실험적, 그리고 수치적 방식으로 연구되어 왔다. ‘댐 붕괴’ 문제는 형태 및 경계조건의 단순함에도 불구하고 격렬한 자유표면에 기인한 비선형 유동으로 인해 해석에 어려움이 존재한다. 또한 ‘댐 붕괴’에 의한 유동은 유동자체의 해석 뿐만 아니라 지표면의 토양 등의 물질들을 움직이게 하는 경우도 있으며, 토양 등의 물질과 함께 흐르는 유동은 구조물에 충격 시 환경과 기반 시설에 심각한 피해를 끼칠 수 있다. 이러한 문제들에 관한 연구는 오일러리안 기반의 격자를 사용한 전산유체역학 방식으로 연구가 수행되어 왔다. 격자를 이용한 일반적인 전산유체역학 방식은 댐 붕괴 등에 의한 대-변형에 기인한 자유표면의 격렬한 거동이나 부서짐을 Marker and cell 방식이나 Volume of fluid 방식으로 자유표면을 추적하고 구현하는 방식을 사용한다(Kim and

Chen, 2014). 그러나 이러한 방식은 날카로운 형태의 자유표면이나 분쇄와 같은 형태를 구현하기에는 어려움이 있어 비선형성이 강한 ‘댐 붕괴’에 기인한 유동 및 유동으로 인한 지표 토양의 거동 구현에는 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하고 앞서 언급한 대-변형에 기인한 자유표면 거동의 구현을 위해 최근 적용되는 방식으로는 라그랑지안 기법을 따르는 입자법이 대두되었다. 입자법은 각각의 이산화된 입자를 추적하고 물리량을 기록하는 라그랑지안 기법을 따르므로 자유표면을 포함한 경계면이 대-변형에 기인한 날카로운 경계를 형성하는 문제 및 분쇄를 구현하는데 있어 기존의 격자 기반의 방식에 비해 장점을 가진다. 이러한 입자법의 종류로는 Smoothed particle hydrodynamics(SPH) (Monaghan, 1994)과 Moving particle simulation(MPS)법이 (Koshizuka and Oka, 1996) 대표적이며, 이외에 사용하는 목적에 맞게 구성된 Dissipative particle dynamics(DPD)과 Lattice boltzmann method(LBM) 등이 있다. 초기 입자법의 발전시기에는 SPH법은 상태방정식으로 압력을 해석하는 기법을 사용하여 연산속도가 빠른 장점이 있었

Received 29 April 2017, revised 4 May 2017, accepted 30 October 2017  
Corresponding author Dong-Woo Park: +82-51-629-1654, dwpark@tu.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다. 그러나 포아송 방정식을 음적으로 해석하는 MPS와 비교하여 압력 진동 및 오차가 크다는 단점이 있었다. 현재는 MPS와 같은 방식의 압력 해법을 사용하는 Incompressible smoothed particle hydrodynamics (ISPH)법의 개발로 SPH법과 MPS법 간의 차이는 많이 사라졌다고 사료된다(Xu et al., 2009). 본 연구에서는 열거된 입자법 방식 중 MPS법을 사용하였다. MPS법은 SPH와 유사한 알고리즘을 가지고 있지만 SPH법에서는 입자의 물리량 분포를 연속함수로 근사한 뒤 이에 대한 구배 및 발산 등을 구하는 방식을 사용한다. 그러나 MPS법의 경우 입자간 상호작용을 함수화 한 방식을 이용하여 SPH법과는 차별을 두고 있다. 또한 MPS는 기존의 참고문헌들에서 ‘댐 붕괴’에 좋은 결과를 보여주고 있어 본 연구의 시뮬레이션 기법으로 선택하였다.

MPS법은 Koshizuka and Oka(1996)에서 처음 제안되었으며, Tanaka and Masunaga(2010)과 Lee et al.(2011)에서 압력해법을 위한 포아송 압력 방정식에 다항식 형태의 소스항과 자유표면 탐색 기법을 복수 조건 탐색기법으로 개량하며 초기 입자법에서 문제가 되어왔던 압력의 수치 진동을 개선하였다. 또한 초기 다상유동의 문제에 최적화되어 있던 MPS법은 Kim et al.(2014)에 의해 표면장력 모델, 유체-유체간 경계조건모델, 부력수정모델 등 다상유동 시 입자간 상호작용모델을 적용하여 다상유동 문제에 적합하도록 개발되어왔다. 고체 입자에 관한 MPS법의 연구는 Gotoh and Fredsoe(2000)에서 유체입자와는 다른 밀도를 가진 입자를 배치함으로써 연구되었으며, 다상 유체 등 급격한 밀도차가 생기는 입자 배치 시 이를 구현하는 기법 연구는 Khayyer and Gotoh(2013)에서 입자수밀도 평균화 방식을 채택하여 연구되었다.

본 연구에서는 댐 붕괴에 의해 발생한 유동이 지표의 토양을 교란시키는 문제를 시뮬레이션 하였다. 지표의 토양과 붕괴 유체간의 상호작용을 효과적으로 계산하기 위해 Kim et al.(2014)에서 제안한 다상유동형 MPS법을 채택하였으며, 2개의 상이 존재하고 입자간 물리량의 큰 차이가 없다고 판단되어 Khayyer and Gotoh(2013)에서 제안한 입자 물리량 평균화 방식은 배제하였다. 토양입자는 Janosi et al.(2004)에서 사용한 Polyethylene-oxide(PEO)를 사용하였으며 가두어진 유체를 격벽을 제거하여 붕괴 유동을 재현하는 방식을 사용하여 붕괴 유체에 의한 토양 거동의 시뮬레이션 수행하였다.

## 2. Moving Particle Simulation

완전한 라그랑지안 접근법을 따르는 비압축성 MPS법의 지배 방정식으로 연속방정식 식 (1)과 Navier-stoke 방정식 식 (2)를 사용한다.

$$\frac{D\rho}{Dt}=0 \quad (1)$$

$$\frac{Du}{Dt}=\frac{1}{\rho}\nabla P+\nu\nabla^2\vec{u}+\vec{g}+\rho\sigma\kappa\vec{n} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $t$ 는 시간,  $P$ 는 압력,  $\vec{u}$ 는 입자 속도,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\nabla$ 는 구배,  $\nabla^2$ 는 라플라시안,  $g$ 는 중력가속도,  $\sigma$ 는

표면장력 계수,  $\kappa$ 는 경계면 곡률,  $\vec{n}$ 은 경계면의 법선벡터를 의미한다. 지배방정식의 차분항은 라그랑지안 접근법을 따르는 입자법의 형태로 변환하여야 한다. 이를 위해 입자간 상호작용 모델을 적용한 구배모델, 확산모델, 그리고 비압축성모델을 사용하여 차분항을 계산할 수 있다. 식 (2)에서 좌변의 네 번째 항인 표면장력항은 경계면 입자에만 적용이 가능하도록 설정하였다. 입자법을 따르는 차분항에 관한 자세한 내용은 Kim et al. (2014)에서 찾을 수 있다.

MPS법의 장점으로는 기인한 날카롭고 분쇄가 발생하는 자유 표면의 대-변형에 관한 모사가 가능하다는 점이다. 자유표면 모사를 위해서는 자유표면 경계조건을 만족시켜야 한다. 운동학적 자유표면 경계조건은 입자를 각각 추적함으로써 만족이 되며, 동역학적 자유표면 경계조건은 자유표면 입자에 대기압을 적용함으로써 만족시킬 수 있다. 이를 위해 높은 정도의 자유표면 탐색 기법이 필요하며, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 Lee et al.(2011)에서 제안한 다중 조건 형 자유표면 탐색 기법을 사용하였다. 다중 조건 형 자유표면 탐색기법은 다음과 같이 입자수 밀도의 크기를 이용하는 식 (3)과 주변입자의 물리적 개수를 이용하는 식 (4)를 사용한다.

$$n_i < \beta_1 n^0 \quad (3)$$

$$N_i < \beta_2 N_0 \quad (4)$$

여기서  $n_i$ 는 입자수밀도로서 유체의 밀도에 대응되며,  $n_0$ 는 초기 입자 배치 시 입자수밀도,  $N_i$ 는 중심입자에 대한 주변입자 개수,  $N_0$ 는 초기 배치 시 유체 중에 잠겨있는 유체의 주변 입자의 개수,  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는 조건식 계수로서 임의의 상수이다. 본 연구에서는 Lee et al.(2011)에서 제안하는 조건식 계수 값인  $\beta_1=0.97$ 과  $\beta_2=0.85$ 를 사용하였다. 입자수밀도를 구하는 공식은 식 (5)에 나타나 있다.

$$n_i = \sum_{i \neq j} w(r_{ij}) \quad (5)$$

여기서  $w(r_{ij})$ 는 가중치함수이다. 가중치함수는 입자법이 가지고 있는 연속성 위배를 보완하는 함수로써, 중심입자에 대한 주변입자의 영향을 계산한다. 본 연구에서 사용된 가중치함수는 식 (6)을 이용하여 구한다.

$$w(r_{ij}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r_{ij}}{r_e}\right)^3 \left(1 + \frac{r_{ij}}{r_e}\right)^3 & 0 < r_{ij} \leq r_e \\ 0 & r_{ij} > r_e \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $r_{ij}=(r_j-r_i)$ 이며,  $r_i$ 는  $i$ 번째 입자의 위치,  $r_e$ 는 유효임계거리이다. 식 (6)에서 보이는 것과 같이 중심입자에서 멀어질수록 주변입자의 중심입자에 대한 영향력은 줄어들며, 임계유효거리를 벗어나면 주변입자가 중심입자에 끼치는 영향을 알 수 있다.

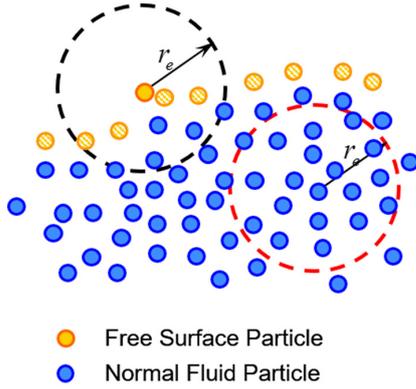


Fig. 1 Schematic of free surface particle searching

본 연구에서는 다상유동이 포함된 문제의 모사를 위해 자유 표면을 포함한 유체-유체간의 경계면 탐색 기법이 추가적으로 필요하다. 이를 위해 Lee et al.(2011)에서 제안된 다중조건형 자유표면입자 탐색 기법 중 첫 번째 조건인 식 (3)을 수정한 다중 조건형 경계입자탐색기법을 사용하였으며, 식 (7)과 같이 수정 되었다.

$$\beta_3 n^0 < n_i < \beta_1 n^0 \tag{7}$$

여기서  $\beta_1$ 은 식 (3)에서 사용된 값과 동일하며 같으며  $\beta_3$ 은 수치실험을 통해 0.35로 설정되었다. 식 (7)에서 보이는 것과 같이 경계면으로 인식되기 위해서는 입자수밀도가 초기입자배치시의 입자수밀도보다  $\beta_1$ 배 작으면서  $\beta_3$ 배 큰 경우에만 인식이 될 수 있다. 이를 통해 파쇄 혹은 상이 다른 유체로 하나 혹은 아주 적은 수의 입자가 존재할 시 경계층을 형성하지 않게 되어 실질적인 경계면 탐색이 가능하다.

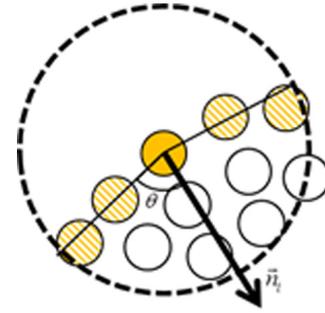
다상유동의 정도 높은 모사를 위해 사용된 입자간 상호작용 모델 중 표면장력 모델의 연산을 위해 기존의 입자수밀도외에 추가로 표면장력을 위한 입자수밀도를 추가하였다. 추가된 입자수밀도는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} n_i^{st1} &= \sum_{j \neq i} w^{st1}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \\ n_i^{st2} &= \sum_{j \neq i} w^{st2}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \end{aligned} \tag{8}$$

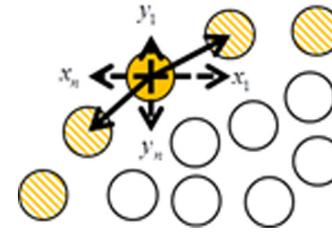
여기서 표면장력을 위한 가중치함수는 식 (9)를 이용하여 계산 된다.

$$\begin{aligned} w^{st1} &= \begin{cases} 1 & (0 < r \leq r_e^{st}) \\ 0 & (r > r_e^{st}) \end{cases} \\ w^{st2} &= \begin{cases} 1 & (0 < r \leq r_e^{st} \text{ and } n_j^{st1} > n_i^{st1}) \\ 0 & (r > r_e^{st}) \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

여기서  $r_e^{st}$ 는 표면장력을 위한 임계거리이며 수치실험을 통해 기본값을 초기입자거리의 1.3배로 설정하였다. 위의 새로이 추가된 표면장력계산을 위한 입자수밀도를 이용하여 경계면의 곡률을 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다.



(a) Model for curvature of interface



(b) Model for normal vector for interface

Fig. 2 Schematic models for surface tension

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{2}{r_e^{st}} \cos\left(0.5\pi \frac{n_i^{st2}}{n_0^{st1}}\right) \tag{10}$$

여기서  $R$ 은 곡률반경이며  $n_0^{st1}$ 은 초기 입자배치에서의 표면장력을 위한 입자수밀도이다.

표면장력의 계산에 있어서 또 다른 요소는 경계면의 법선벡터이다. 입자법의 경우 개개의 입자가 물리량을 가지며 독립적으로 거동하기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 경계면 입자를 인지한 후 이를 이용하여 법선벡터를 탐색하였다. Fig 2(b)에 나타난 바와 같이 중심입자로 설정된 경계면 입자와 임계거리 내 주변입자 중 경계면 입자로 인지된 입자간의 거리를 이용하여 입자간 상호 물리량을 파악하고 이를 합하여 법선 벡터를 구하고, 추후 합하여진 법선벡터를 절대값을 취한 값으로 나누어주어 단위법선벡터를 구하는 방식을 사용하였으며, 이는 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_i &= \overrightarrow{n_x} \sum_{j \neq i} x_n w^{st1}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) + \overrightarrow{n_z} \sum_{j \neq i} z_n w^{st1}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \\ n_i &= \frac{a_i}{|a_i|} \end{aligned} \tag{11}$$

또 다른 다상유동형 입자간 상호 모델은 부력수정모델이다. 입자법 중 MPS법에서는 주변입자의 영향을 가중치함수를 이용하여 계산하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 가중치함수의 경우 전 방향 확산의 형태를 가지고 있기 때문에, 입자간 밀도차가 나는 경우 압력의 방향을 잘못 해석할 수 있는 여지가 있다. 이러한 문제는 부력수정항을 추가하는 방식으로 해결이 가능하다. 부력수정항은 압력구배로부터 입자의 속도를 구하는 단계에 추가된다. 본 연구에 사용된 부력수정항은 식 (12)와 같다.

$$\vec{u}_i = -\frac{\Delta t d}{\rho_i n^0} \quad (12)$$

$$\left[ \sum_{j \neq i} \frac{P_j - P_i}{|r_j - r_i|} w(|r_j - r_i|) (\vec{r}_j - \vec{r}_i) - \sum_{j \neq i} \frac{\vec{g}(\rho_j - \rho_i)(z_j - z_i)}{(r_j - r_i)^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) C_B w(|r_j - r_i|) \right]$$

여기서  $\Delta t$ 는 시간간격,  $d$ 는 시뮬레이션 모델의 차원,  $C_B$ 는 부력수정계수이다. 부력수정계수는 임의의 상수이며 본 연구에서는 수치실험을 통해 0.5로 설정되었다. 경계입자탐색모델과 표면장력모델, 부력수정모델의 자세한 내용과 검증은 Kim et al. (2014)에서 찾을 수 있다.

### 3. 수치해석 모델 및 결과

본 연구의 목표는 ‘댐 붕괴’에 기인한 유체의 격렬한 유동 생성 및 생성된 유동에 의해 지표면의 토양 거동 시뮬레이션이다. 본 연구를 효과적으로 수행하기 위해 검증을 시도하였으며, 검증에 사용된 문제 설정은 본 연구의 방향과 일치하며 입자법 중 MPS법의 검증에 대표적으로 사용되는 단일유체 ‘댐 붕괴’ 문제를 재현하였다. Fig. 3과 같이 길이 0.6m, 높이 0.4m인 2차원 수조의 좌측벽에 길이 0.15m, 높이 0.3m의 유체기둥을 설정하고 중력에 의해 자연발생적인 유동을 발생시키도록 설정하였다. 실험에는 존재하는 격벽의 이동은 빠른 상승이 수치 불안정성을 유발할 수 있다고 판단하여 시뮬레이션 상에서 격벽은 포함시키지 않았다. 사용된 유체 입자의 수는 총 45000개를 사용하였으며 초기 입자간 거리는 0.001m로 설정하였다. 사용한 시간간격은 0.0001초를 사용하였다.

Fig. 4는 Koshizuka et al.(1996)에서 수행한 ‘댐 붕괴’ 실험과 본 연구에서 개발된 MPS법을 이용한 수치 시뮬레이션 결과의 비교이다. 실험에 대한 시뮬레이션 결과 검증을 위해 유체입자의 밀도와 동점성계수는 각각 1000kg/m<sup>3</sup>과 1.0×10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s로 실험

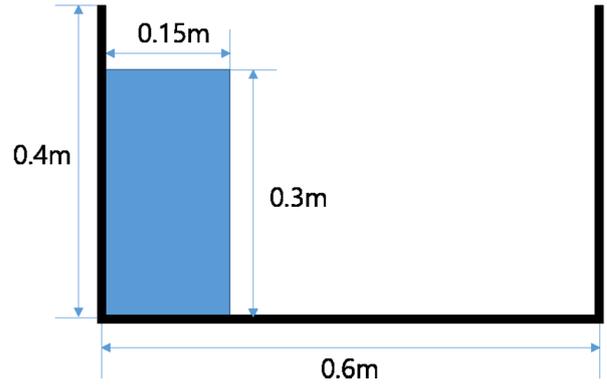


Fig. 3 Schematic model for dam break problem

에서 사용한 것과 동일하게 설정하였다. Fig. 4에서 보이는 것과 같이 실험과 시뮬레이션 결과를 동일 시간에 대한 스냅샷을 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

일반적으로 입자기반 전산유체역학 기법에서 토양과 같은 고체입자는 유체입자에 비해 높은 밀도와 동점성계수를 설정하여 구현한다. 따라서 점성효과가 적절히 적용되었는지 확인하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 앞서 실험과의 비교를 통해 검증된 MPS법에 다양한 동점성계수를 설정하여 점성효과가 적절히 구현되는지를 확인하였다. 본 시뮬레이션에서 사용한 동점성계수는 Table 1에 나타나 있다. 밀도는 비교를 위해 앞서 설정한 시뮬레이션과 같은 1000kg/m<sup>3</sup>으로 동일하게 적용하였다. Fig. 5는 동점성계수를 달리한 경우들에 대해 같은 시간에서의 결과 비교를 나타낸다. Fig. 5의 비교에서 알 수 있는 것은 동점성계수가 높아짐에 따라 선단 형태가 뭉툭해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 점성에 의한 진행방향으로의 속도 저항의 결과이다. 특히 Case A-VII과 같이 점성이 매우 높은 비-뉴토니안 유체인 경우 꿀 등의 경우와 같이 뭉쳐짐이 발생하는 것을 확인할

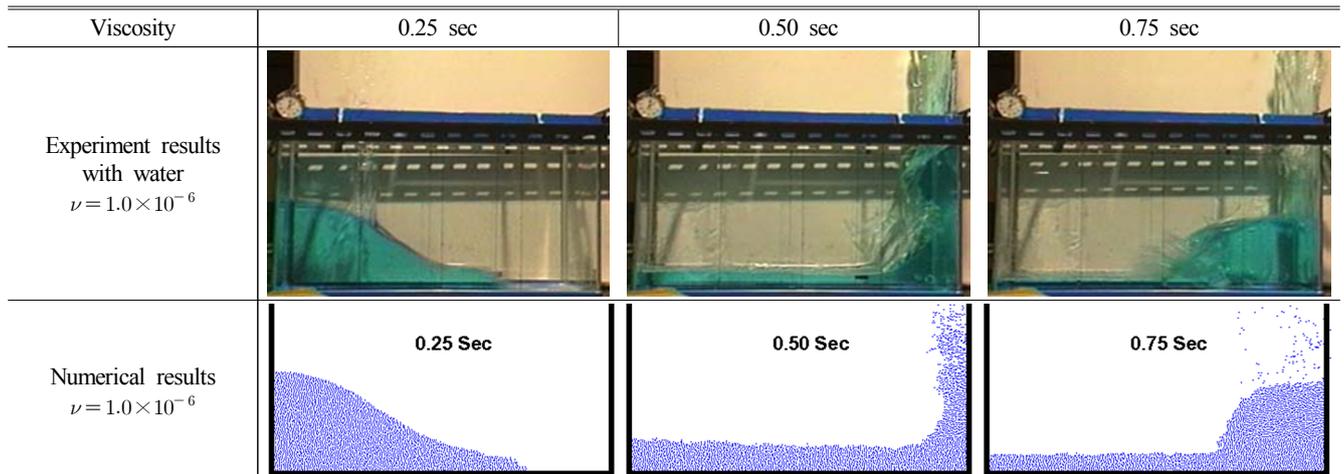


Fig. 4 Comparison between Exp. and simulation

Table 1 Properties of particle for broken dam simulation

Case	A-I	A-II	A-III	A-IV	A-V	A-VI	A-VII
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1000						
Kinematic viscosity [m <sup>2</sup> /s]	1.0×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	5.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup>	1.0×10 <sup>-3</sup>	1.0×10 <sup>-2</sup>

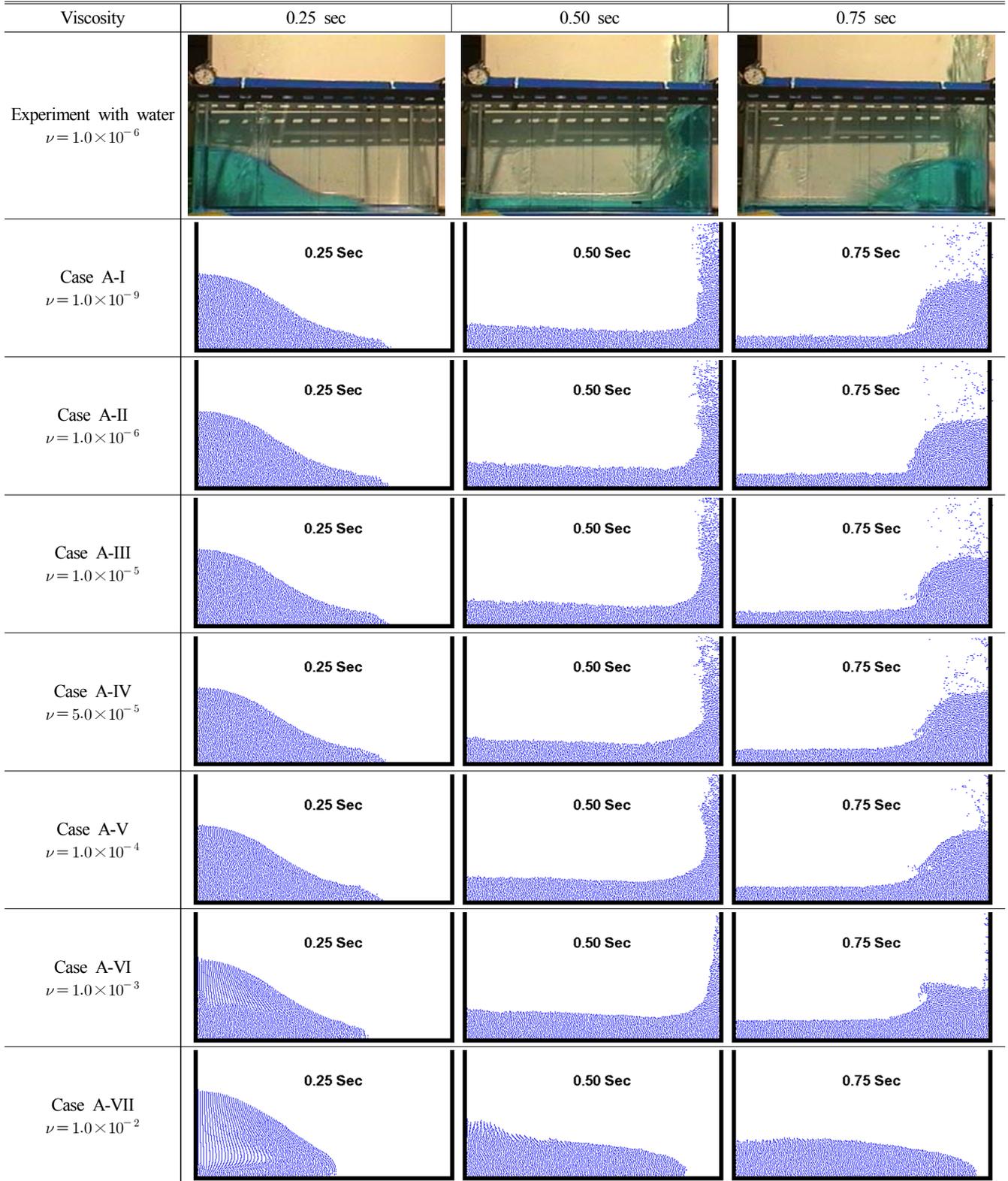


Fig. 5 comparison of various kinematic viscosity

수 있으며 이를 통해 점성효과가 적절히 작용하고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 점성은 유동의 진행방향 속도에 대한 저항으로 볼 수 있다. 따라서 유속의 비교를 통해 점성 효과의 영향을 확인하였다. Fig. 6은 각각의 경우들에 대한 시뮬레이션 결과로서 세로축의 Z는 선단의 위치, L은 수조의 길이로

붕괴파의 전단면에서의 선단(Leading edge)의 위치변화를 수조 길이로 나눈  $[Z/L]$  무차원수를, 가로축은 시간을 중력가속도를 수조길이로 나눈 값의 제곱근의 곱으로  $[t \times \sqrt{(2g/L)}]$  시간에 대한 무차원수로 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보이는 것과 같이 점성이 높아짐에 따라 선단의 속도는 눈에 띄게 느려지는

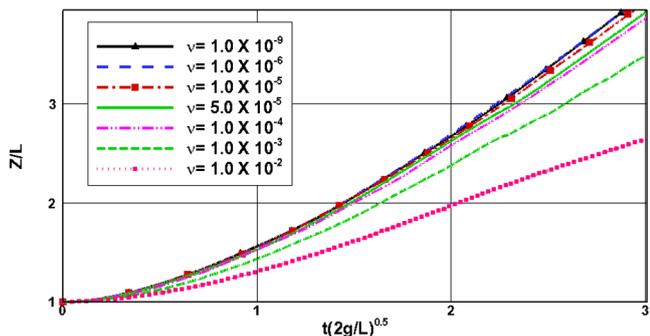


Fig. 6 Comparison of the position change of leading edge

것을 확인할 수 있으며, 동점성계수가  $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  이하가 되면 선단 속도는 수렴하는 모습을 보인다. 이를 통해 동점성계수가  $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  이하인 경우 비점성유체로 가정할 수 있다.

앞선 비교를 통해 검증된 프로그램을 이용하여 본 연구의 목표인 격렬한 유동에 기인한 지표면의 토양 거동 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7은 시뮬레이션을 위한 모델이다. 유동을 만드는 유체는 물로 설정하였으며 토양으로는 PEO모형을 이용하여 Janosi et al.(2004)에서 수행된 실험과 같은 조건을 설정하였다. 시뮬레이션에서 사용된 물과 PEO모형의 밀도는 각각  $1000 \text{kg}/\text{m}^3$  과  $997 \text{kg}/\text{m}^3$ 을 사용하였으며 물과 PEO모형의 동점성계수는 각

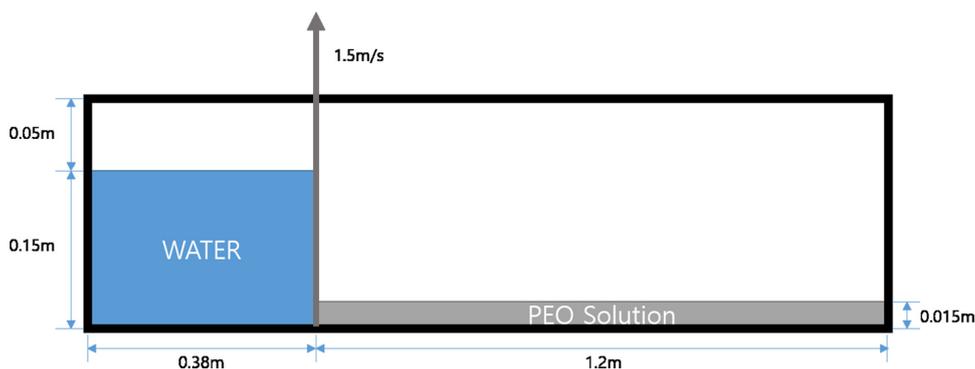


Fig. 7 Schematic model for soil behavior simulation

Time	Experience	Simulation
$t=0.131\text{s}$	0.131 s	
$t=0.196\text{s}$	0.196 s	
$t=0.261\text{s}$	0.261 s	
$t=0.327\text{s}$	0.327 s	
$t=0.392\text{s}$	0.392 s	
$t=0.457\text{s}$	0.457 s	

Fig. 8 Comparison of soil behavior between Exp. and simulation

Table 2 Characteristics of particles

Case	B-I	B-II	B-III	B-IV	B-V
Density (water) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1000				
Density (soil) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1000				
Kinematic viscosity (Water) [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$1.0 \times 10^{-6}$				
Kinematic viscosity (Soil) [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$0.935 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$

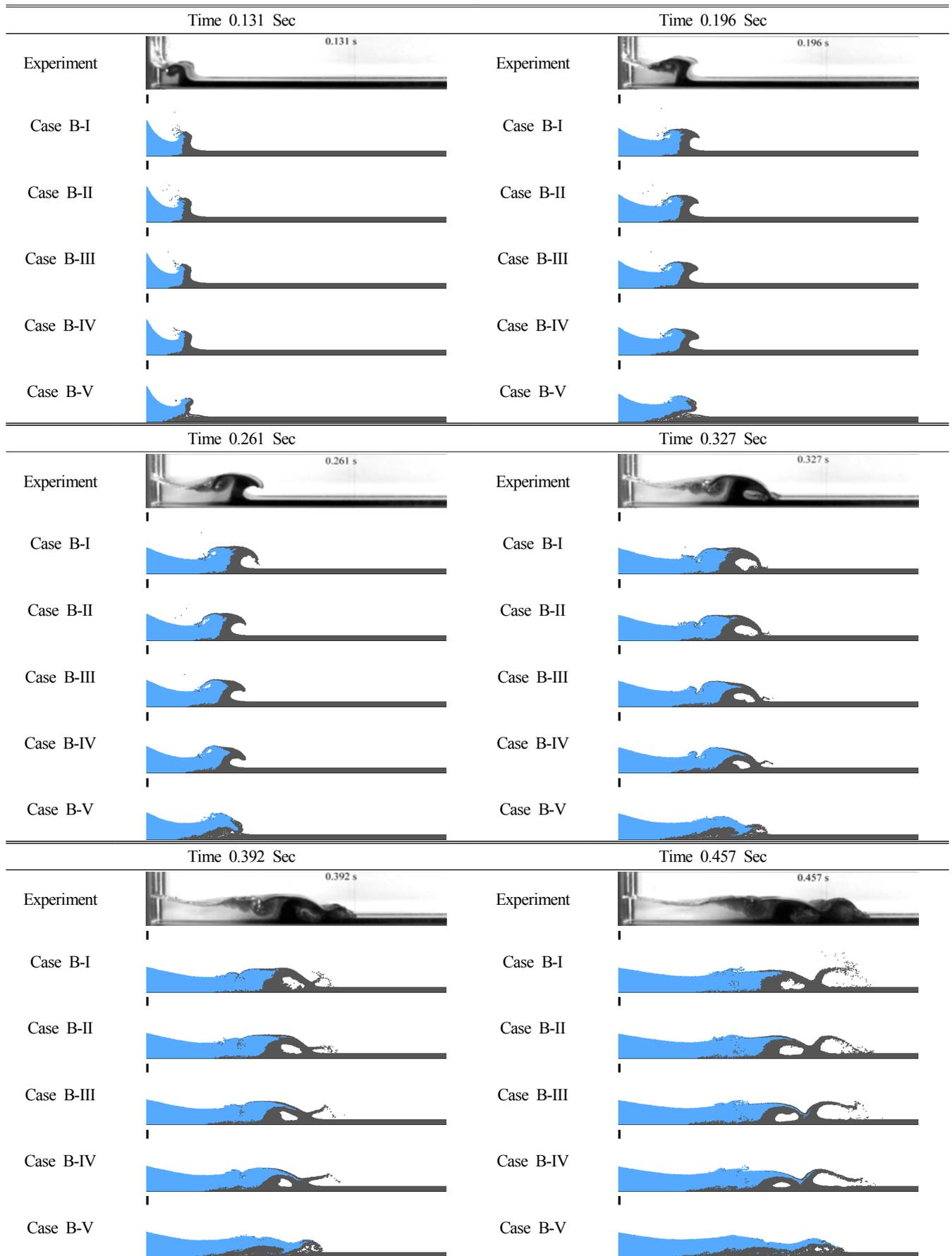


Fig. 9 Snapshot comparisons between experiment and simulations

각  $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 와  $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 물의 입자개수는 57000개, PEO모델의 입자개수는 18000개를 사용하여 초기 입자간 거리를 0.001m로 설정하였다.

초기조건에서 물은 격벽에 의해 토양과 분리되어 있으며 격벽이 1.5m/s의 속도로 상승하면서 물이 붕괴된다. 붕괴로 인해 격렬한 유동이 생성되고 생성된 유동이 바다에 깔려있는 PEO를 충격하게 된다. Fig. 8은 Janosi et al.(2004)의 실험의 결과와 동일한 시간에서의 시뮬레이션 결과이다. 앞서 검증에 위한 단일 유체의 ‘댐 붕괴’ 문제의 경우 격벽의 상승속도가 매우 빠르기 때문에 격벽의 상승에 의한 유동의 수치적 오류를 줄이기 위해 시뮬레이션에서는 격벽을 사용하지 않았다. 그러나 격렬한 유동에 의한 토양의 거동 시뮬레이션 문제에서는 격벽의 상승속도가 상대적으로 낮기 때문에 격벽을 모델링하였다. 또한 PEO모델과 같이 점성이 낮은 경우는 격벽이 없는 상태에서는 선단이 하부를 미는 형태가 아닌 상부에서 무너져 내리는 형태가 나올 수 있어 수치적 오류가 발생할 가능성이 높다는 판단에 격벽을 사용하였다. Fig. 8에서 보여지는 것과 같이 시뮬레이션 결과가 실험과 유사함을 알 수 있다.

고체입자의 경우 유체와 혼합되면 진흙과 같이 비-뉴턴 유동을 가지는 형태가 될 수 있다. 비-뉴턴 유동은 점성이 매우 높은 유체의 유동으로써 앞서 단일 유체의 ‘댐 붕괴’ 문제에서 사용된 높은 동점성계수의 시뮬레이션 결과에서 보이는 것과 같다. 따라서 본 연구에서는 자갈 등의 경우를 상정한 PEO모델 뿐만 아니라 진흙 등에 대한 다양한 문제에 적용 가능성을 파악하고자 Table 2에 나타나 있는 토양 특성들의 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. 이때 붕괴되는 유체는 물로 동일하게 적용하였다. Fig. 9는 각각의 경우에 대한 시뮬레이션 결과 비교이다.

앞서 단일 유체의 붕괴 시뮬레이션으로부터 예측할 수 있듯이 Case B-I~IV까지의 경우 낮은 동점성계수에 의해 점성의 영향이 크게 작용하지 않기 때문에 4개의 경우 모두 비슷한 양상을 보인다. 붕괴된 물 입자가 토양을 충격하게 되고, 붕괴 유체가 토양을 밀어 올리게 된다. 토양의 경우에 붕괴 유체에 의한 충격으로 권파의 형태를 띠게 된다. 권파의 형태로 발달되는 시각을 비교하면 높은 동점성계수에 의해 유동에 저항값이 높아져 발달 속도가 느려짐을 알 수 있다. 추가적으로 선단의 속도로 인해 유체의 충격에 의해 파형으로 발달하는 토양의 선단의 형태가 달라지는 것 역시 관찰되었다. 점성이 낮은 Case B-I과 B-II의 경우, 선단이 날카로운 형상을 지니며 그 끝(Tip)에서 감아지는 형태가 보이나, 상대적으로 점성이 높은 Case B-III과 B-IV의 경우 상대적으로 뭉툭한 선단의 형상을 관찰할 수 있다. 이는 상대적으로 저하된 유속이 낮은 에너지를 가지게 되기 때문으로 파악된다. 또 다른 주목할 부분은 권파의 후류 부분의 에어포켓 부분이다. 점성이 높아질수록 유동의 속도에 저항하는 값이 커지게 되며 이에 따라 파의 진행속도 역시 저하된다. 저하된 유속에 의해 에어포켓의 크기가 점점 줄어들며, 이 후 점성이 높아지는 Case B-IV부터는 에어포켓이 보이지 않았다. 또한 상대적으로 점성이 높은 경우인 Case B-III과 B-IV의 경우는 Case B-I과 B-II의 경우에 비해 느린 것을 확인할 수 있다.

동점성계수가  $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 인 비-뉴턴 유체로 가정할 수 있는 Case B-V의 경우 앞의 경우와는 다른 결과를 보인다. 먼저 붕괴

유체가 토양을 충격하였을 시 Case B-I~IV까지의 경우는 충격 에너지에 의해 토양 입자가 밀려올라가는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 동점성계수가 높은 Case B-V의 경우에는 유체가 토양을 밀어 올리지 못하고 토양을 넘어가는 유동을 보인다. 이는 토양입자의 동점성계수가 매우 높아 입자간 결속력이 높고, 이에 따라 붕괴유체가 토양을 크게 변형시키지 못하는 것으로 사료된다. 토양입자 위를 넘어간 유동은 토양입자 간 결속력이 상대적으로 낮은 상부의 입자와 혼합되어 유동을 만들어낸다. 그러나 그 크기가 앞서 수행된 Case B-I~IV에 비해서는 매우 작음을 알 수 있다.

다양한 점성계수를 가진 경우들을 비교한 결과 특이한 점은 Case B-III의 경우 동점성계수가 실험에서 사용된 PEO의 동점성계수보다 50배 높은 경우이지만 PEO와 같은 동점성계수를 사용한 Case B-I에 비해 실험결과와 더욱 유사함을 알 수 있다. 이는 PEO의 모델을 고체입자가 아닌 유체로 가정하였기 때문에 발생할 수 있는 문제로 사료된다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 입자기반 전산유체역학 기법 중 Moving particle semi-implicit 법을 이용하여 ‘댐 붕괴’에 기인한 격렬한 유동 생성 및 생성된 유동에 의한 지표면 토양의 거동을 시뮬레이션 하였다. 토양입자의 경우 상이 다른 유체입자를 가정하여 시뮬레이션하였으며 이를 위해 다상유동형 MPS법을 사용하였다. 사용한 다상유동형 MPS법은 Kim et al.(2104)의 방식을 채택하였으며, 다상유동을 위해 부력수정항, 표면장력항과 유체-유체 경계조건을 도입하였다. 검증을 위해 본 연구에서 개발된 다상유동형 MPS법을 본 연구의 목표 문제가 유사한 단상유체의 댐-붕괴 문제에 적용하였으며 동일 실험과의 비교를 통해 검증하였다. 또한 토양입자의 경우 점성이 다를 수 있음을 인지하여 단상유체의 댐-붕괴문제에 다양한 동점성계수값을 설정하여 시뮬레이션하고 그 결과를 비교하였다. 단상유체의 댐-붕괴문제에서 다양한 동점성계수를 적용하였을 시 점성의 물리적 의미인 유동속도에 대한 저항을 측정하여 점성항의 효과를 확인하였다. 점성이 높아질수록 붕괴유동의 속도가 저하됨을 선단의 위치변화를 비교하여 확인할 수 있었으며, Snapshot비교를 통해 점성의 높아짐에 따라 선단 형태가 뭉툭해짐을 확인하였다.

검증 이후 다상유동형 MPS법 프로그램을 이용하여 ‘댐 붕괴’에 기인한 격렬한 유동에 의한 토양의 거동을 시뮬레이션 하였다. 붕괴될 물로 가정된 유체는 격벽에 의해 막혀있으며, 격벽 넘어 토양입자를 배치하였다. 검증을 위한 토양입자는 Janosi et al.(2004)에서 사용된 PEO모델을 사용하였다. 격벽의 상승은 유체입자의 붕괴를 유발하였으며, 붕괴에 기인한 격렬한 유동은 토양을 충격하는 시뮬레이션을 수행하여 동일한 실험과 그 결과를 비교하였다. 붕괴에 기인한 유동은 토양입자를 충격하였으며 토양입자를 위로 밀어 올리는 형태의 유동을 발생시켰다. 유체와의 충격에 의해 움직인 토양입자는 유체의 형태와 비슷한 파형을 가졌고 그 형태는 권파의 형태를 띠었으며 이는 실험에서 관찰된 것과 유사하였다.

나아가 토양의 경우 진흙 또는 다양한 물체가 있을 수 있기

때문에 다양한 점성을 적용한 토양 입자를 배치하여 동일한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 설정으로는 물로 가정한 동일한 붕괴유체가 점성이 다른 토양입자를 충격하는 경우를 설정하였다. 비교결과 동점성계수가  $1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  이하인 경우 점성에 의한 유동저항이 크지 않아 아주 작은 발달 시간의 차이가 존재하였을 뿐 비슷한 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있었다. 그러나 발달속도의 차이에 의해 토양입자의 점성이 높은 경우 충격에 의한 파의 선단형태가 뭉툭해짐을 확인할 수 있었으며, 이는 단산유체의 땀-붕괴문제 시뮬레이션에서 확인된 것과 같은 형태임을 알 수 있다.

토양입자의 동점성계수가  $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 로 매우 높은 경우는 동점성계수가 상대적으로 낮은 경우와는 다른 결과를 보였다. 높은 점성으로 인해 붕괴유체의 충격에도 토양입자의 거동이 크지 않음을 확인할 수 있었으며, 붕괴유체가 토양입자를 충분히 밀어 올리지 못하고 그 위를 넘어가는 유동을 보였다. 이는 꿀 등의 비-뉴턴 유체위에 물 등의 유체를 흘려보내었을 때와 유사한 형태를 지님을 알 수 있다.

본 연구에서의 시뮬레이션 결과 비교를 통해 격렬한 유동이 생성되었을 시 그 유동과 충격하는 토양은 유동에 어느 정도 저항하지만 이 후 유동과 혼합되어 다상유동을 만들었다. 그리고 이는 같은 실험에서의 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러나 다양한 물성치를 가진 토양의 거동을 위해 토양입자를 고체입자의 특성을 가진 형태로 구현하는 것은 매우 필요하며 이는 후속 연구를 통해 개발될 예정이다. 향후 후속 연구를 기반으로 '땀 붕괴'와 같은 격한 형태의 유동이 아닌 일반적인 형태의 유동에 의해 해저면이 교란되는 형태 등의 유체의 유동과 토양입자의 거동간의 문제를 해결할 수 있는 기반이 될 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2017학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다(과제번호/2017F033).

## References

- Gotoh, H., Fredsoe, J.R., 2000. Lagrangian Two-phase Flow Model of the Settling Behavior of Fine Sediment Dumped into Water. *Coastal Engineering*, 2000, 3906-3919.
- Janosi, I.M., Jan, D., Szabo, K.G., Tel, T., 2004. Turbulent Drag Reduction in Dam Break Flows. *Experiments in Fluids*, 37(2), 219-229.
- Khayyer, A., Gotoh, H., 2013. Enhancement of Performance and Stability of MPS Mesh-free Particle Method for Multiphase Flows Characterized by High Density Ratios. *Journal of Computational Physics*, 242, 211-233.
- Kim, H.S., Chen, H. C., 2014. Three-Dimensional Numerical Analysis of Sediment Transport Around Abutment in Channel Bend. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(24), 21.
- Kim, K.S., Kim, M.H., Park, J.C., 2014. Development of Moving Particle Simulation Method for Multiliquid-Layer Sloshing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 350165.
- Koshizuka, S., Oka, Y., 1996. Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. *Nuclear Science and Engineering*, 123(3), 421-434.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H., Hwang, S.C., 2011. Step-by-step Improvement of MPS Method in Simulating Violent Free-surface Motions and Impact-loads. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(9), 1113-1125.
- Monaghan, J.J., 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110.2, 399-406.
- Tanaka, M., Masunaga, T., 2010. Stabilization and Smoothing of Pressure in MPS Method by Quasi-compressibility. *Journal of Computational Physics*, 229(11), 4279-4290.
- Xu, R., Stansby, P., Laurence, D., 2009. Accuracy and Stability in Incompressible SPH(ISPH) Based on the Projection Method and a New Approach. *Journal of Computational Physics*, 228(18), 6703-6725.

# Design of Rock-berm by Anchor Dragging Simulation using CEL Method

Mun-Beom Shin\*, Dong-Su Park\* and Young-kyo Seo\*

\*Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

## CEL기법을 이용한 앵커 끌림 시뮬레이션에 의한 Rock-berm 설계

신문범\* · 박동수\* · 서영교\*

\*한국해양대학교 해양공학과

**KEY WORDS:** Submarine cable 해저케이블, Seabed 해저지반, Rock-berm 락범, Stockless anchor 스톡리스 앵커, Dragging 끌림, CEL(coupled eulerian lagrangian) method CEL 기법, Penetration depth 침투깊이

**ABSTRACT:** In this study, an anchor dragging simulation was performed using the CEL method to design a rock-berm, which is a protection method for submarine cables. In order to simulate an anchor drag, preliminary simulations were first performed to determine the initial anchor penetration depth, anchor drag velocity, drag angle, and distance between the anchor and rock-berm. Based on the preceding simulation results, a safe rock-berm design for protecting the submarine cables was simulated to calculate the anchor penetration depth by the anchor dragging. As a result, the penetration depth of the anchor was found to be shallower in a hard seabed, and the penetration depth was deeper in a soft seabed. , the height of the rock-berm was determined according to the physical properties of the seabed.

### 1. 서 론

최근 육지와 도서간 혹은 국가와 국가를 잇는 전력망과 해상 풍력단지 등의 수요가 증가함에 따라 그에 비례하여 해저케이블(Submarine cable)에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 뿐만 아니라 이 같은 해저에 설치되는 케이블은 세계 해양을 연결하여 위성통신과 함께 통신 발전에 크게 이바지 하고 있으며, 그 수요는 앞으로 더욱 증가 할 것으로 예상된다.

하지만 해저에 설치되는 케이블은 육상에 비해 보다 열악한 환경에 노출되어 있어 가동 중 손상을 입을 가능성이 매우 높다. 특히 해저케이블의 외력에 의한 손상 중 가장 큰 위협요인은 어로 활동으로 그중 70% 정도가 크고 작은 어선의 앵커로 인해 수십 200m 이내에서 가장 많이 발생하고 있다(Jung et al., 2007). 그 사례로 2006년 제주도와 해남을 잇는 해저케이블이 외력에 의한 손상으로 제주도 전역에 정전사태가 발생하였고 이는 선박용 앵커 충돌이 원인으로 추정되었다. 이처럼 해저케이블은 안강망 조업 및 새우조망과 같은 어구활동이 활발한 지역과 선박 통행량이 많은 주 항로에 설치되어 사고위험에 항상 노출되어 있다. 해저케이블뿐 아니라 해저파이프라인에 대한 사고 시나리오도 앵커의 끌림 및 저인망 어업활동으로 인해 주로

발생한다(Liu et al., 2013). 또한 Det norske veritas(DNV) RP-107에 따르면, 해저에 설치되는 파이프라인 및 케이블에 대해 손상을 줄 수 있는 것들을 정의하고 설계 시 이들을 고려하도록 권장하고 있으며, 그중 선박용 앵커를 중대한 위험요소 중 하나로 분류하고 있다. 이러한 케이블의 사고로 인한 인명사고 및 환경오염, 그리고 막대한 경제적 손실의 예방을 목적으로 해양설비의 설치 및 운영에 대한 엄격한 안전 규제가 요구된다(DNV, 2010).

따라서 해저케이블을 안정적으로 가동하기 위해서는 다양한 충돌 외력으로부터 케이블을 안전하게 보호해야 한다. 이를 위해 해저지반(Seabed)을 굴착하여 매설하는 트렌칭·백필링(Trenching and backfilling)시스템이 많이 적용되고 있으며, 락범(Rock-berm)과 보호구조물로 피복하는 등의 다양한 보호공법이 적용되고 있다. 보호공법에 관한 국내 연구는 앵커 충돌 및 끌림에 의한 원통 연결 보호구조물의 최대 응답 해석(Woo and Na., 2010)과 SPH(Smooth particle hydrodynamic)기법을 이용하여 해저지반이 고려되지는 않았지만 락범에 대한 낙하하는 앵커의 충돌 시뮬레이션(Woo et al., 2014)이 수행되는 등 보호공법에 관한 연구가 국내에서도 활발하게 진행되어왔다. 하지만 실제 조업 시 사용되는 앵커와 운항하는 선박의 앵커는 낙하에 의한

Received 18 October 2017, revised 25 October 2017, accepted 8 November 2017

Corresponding author Young-Kyo Seo: +82-51-410-4683, yseo@kmou.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

충돌 보다 끌림에 의한 충돌을 더 큰 위해요소로 분류하고 있다(DNV, 2010). 그러나 해저지반과의 상호작용을 고려한 앵커 끌림에 의한 충돌 안정성에 관한 연구와 그 결과에 따른 보호공법인 락범 설계 기준이 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 해저지반과 앵커 그리고 보호공법인 락범의 상호작용을 고려하여, 앵커의 끌림을 고려한 락범 설계를 제안 하고자 한다. 이를 위해 선박으로부터 투하된 앵커가 조류 및 앵커 회수에 의한 영향으로 발생하는 끌림으로 인해 해저지반 내 매설된 케이블과 충돌하면 케이블은 파괴 및 오작동이 예상되므로 안전하지 않다는 해석상 설정을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 선박용 앵커는 스톡리스 앵커(Stockless anchor)이며, 사용된 해석 기법은 Abaqus/Explicit의 CEL(Coupled eulerian lagrangian)방법을 적용하였다. 이를 이용한 끌림 해석(Dragging analysis)을 실시하여, 끌림에 의해 해저지반내로 앵커가 침투하는 깊이를 산정하고, 락범으로 보강하였을 때 앵커가 침투되는 깊이와 비교하여 최종적으로 해저지반 성질에 따른 안전한 락범 설계를 제안하고자 한다.

## 2. 3차원 유한요소 모델링

### 2.1 CEL기법을 이용한 대변형 해석

FEM(Finite element method)은 토목 및 기초공학 분야에서 다양하게 활용되어져 왔으며, 특히 지반-구조물 상호작용을 고려한 거동 분석을 모사하는 중요한 도구로 사용되어져 왔다. 하지만 앵커 끌림과 같은 대변형(Large deformation)이 발생하는 해석에는 격자(Mesh)의 왜곡(Distortion) 현상과 접촉면 문제 등으로 인해 경계조건을 풀어내는데 한계가 있다(Kim and Jeong., 2014). 따라서 본 연구에서는 이러한 대변형 문제를 해석하기 위한 대체 해석법인 CEL(Coupled eulerian lagrangian)기법을 사용하여 앵커 끌림 해석을 수행 하고자 한다.

CEL 기법이란 연속체의 거동을 물체의 좌표 및 시간으로 정의하여 주로 구조 및 지반 공학의 해석에 사용되는 Lagrangian 모사법과 공간 좌표 및 시간으로 정의하여 주로 유체역학의 해석에 사용되는 Eulerian 모사법을 합친 것으로, Eulerian으로 모사된 영역내의 Lagrangian 요소의 거동을 각 요소의 체적비인

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fig. 1 Eulerian volume fraction (EVF)

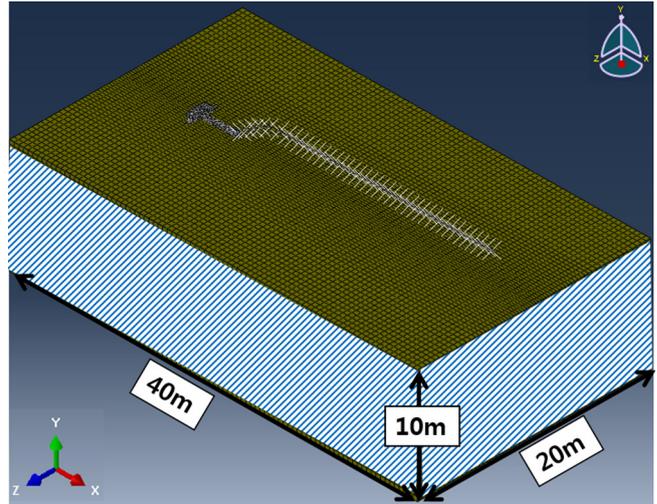


Fig. 2 Finite element modeling using CEL method

EVF(Eulerian volume fraction)로 나타내며, Fig. 1(ABAQUS user's manual)과 같이 각각의 Eulerian element는 물성이 채워져 있는 비율로 표현된다. 이러한 Eulerian 모사법의 장점을 바탕으로 대변형에 대한 비틀림이나 왜곡 없이 해저지반 대변형에 의한 앵커 거동 모사가 가능하다. 실제로 CEL기법을 이용한 대변형에 관한 연구가 다양하게 수행되어져 왔으며, CEL해석기법의 대변형 해석적용에 대한 검증이 이루어졌다(Qiu et al., 2011). 또한 CEL기법을 적용하여 락범은 고려하지 않은 상태에서의 모형 앵커 끌림의 영향에 관한 Case별 수치해석 연구(Zhao and Liu., 2015)등이 수행되었다.

### 2.2 유한요소 모델링

3차원 유한요소 모델링을 위해 Abaqus/Explicit를 이용하여 Fig. 2와 같이 해저지반과 락범을 Eulerian으로 모델링하고, 앵커와 앵커를 연결하는 체인은 Lagrangian으로 모델링 하였고, 약 25만개의 격자가 사용되었다. 경계조건 설정은 모델링된 해저지반 하단부의 법선방향(Y축) 변위와 모델링된 해저지반 옆면의 접선방향(X, Z축) 변위를 구속하는 조건을 적용하였다.

앵커는 10.5ton의 스톡리스 앵커(Stockless anchor)를 선정하여 (SPS-KSA-V3311-5978, 2014) Fluke의 최대 각도인 42°로 모델링

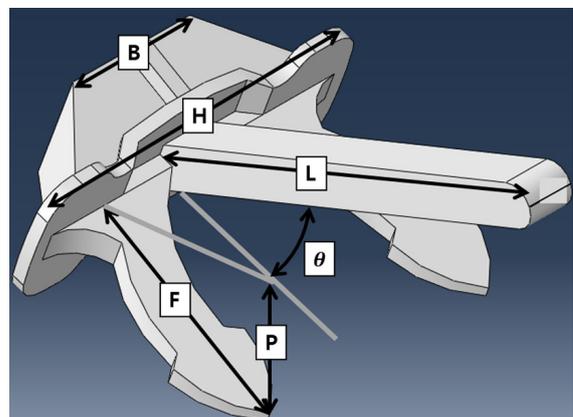
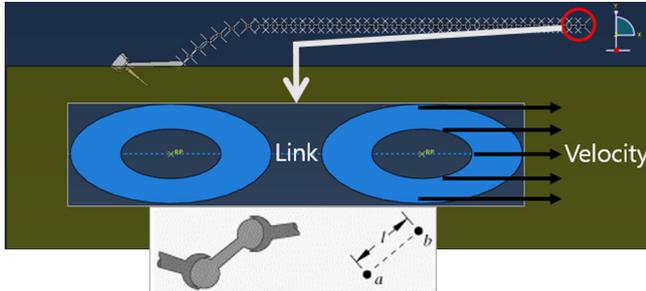


Fig. 3 Shape of stockless anchor

**Table 1** Parameters of the stockless anchor

	L [m]	F [m]	B [m]	H [m]	P [m]	$\theta$ [°]
10.5 [Ton]	3.13	1.65	0.9	2.52	1.11	42

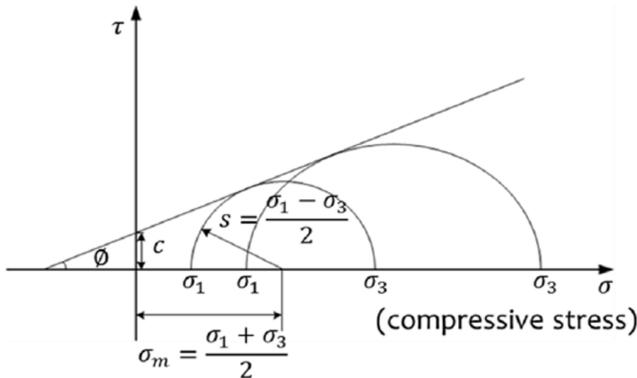


**Fig. 4** Modeling of the chain and connecting type

하고 강체(Rigid body)로 설정하였으며, 형상은 Fig. 3에 나타났고 앵커의 재원은 Table 1에 나타내었다. 앵커 체인(Anchor chain)은 Fig. 4와 같이 각각의 체인을 강체로 모델링 한 후 체인과 체인을 연결하는 Link type의 wire로 연결하여, 연결부의 회전을 제어하는 설정을 적용하였다.

해석의 단계(Analysis step)는 1단계에서 해저지반의 초기 토압을 고려하기 위해 중력을 적용하여 안정화 작업을 수행하였고, 2단계는 앵커 체인을 해저지반에 안착시키는 작업을 수행하였고, 마지막 3단계에서는 앵커 체인 연결부 제일 끝 부분에 속도를 주어 앵커가 끌릴 수 있게 설정하였다.

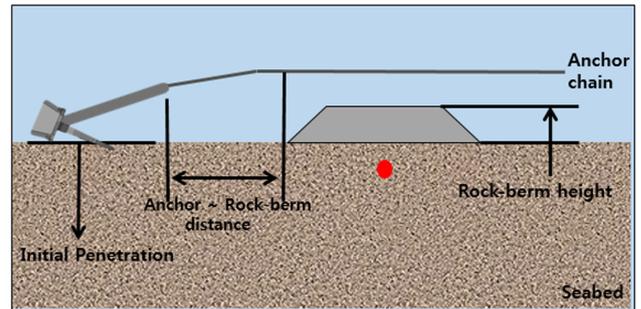
또한 해저지반은 느슨한 모래(Loose sand)와 조밀한 모래(Dense sand) 그리고 연약점토(Soft clay) 총 3가지를 고려하였으며, 변형이 가능한 탄소성체(Elastic-plastic)로 해석에 사용된 해저지반 및 락법에 적용되는 역학적 물성은 다양한 항복기준(Failure criteria)중 재료의 파괴 시 응력이 응력원의 포락선으로 나타나는 Mohr의 파괴 기준과 점착력(Cohesion,  $c$ )과 내부마찰각(Friction angle,  $\phi$ )의 강도정수를 포함한 직선관계를 갖는다는 Coulomb의 기준을 합성한 Mohr-Coulomb 구성모델을 적용하여 락법과 해저지반을 조성하였다. 일반적인 Mohr-Coulomb의 항복기준을 Fig. 5에 나타내었고, 적용된 해저지반과 락법의 역학적 물성을 Table 2에 나타내었다(Das, 2009).



**Fig. 5** Mohr-coulomb failure criterion

**Table 2** Material properties of seabed and rock-berm

	$\gamma_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]
Soft clay	1611	0.01	5.9
Loose sand	1952	29.2	0.5
Dense sand	2020	36	0.5
Rock-berm	2650	48	0.05



**Fig. 6** Settings required for dragging simulation

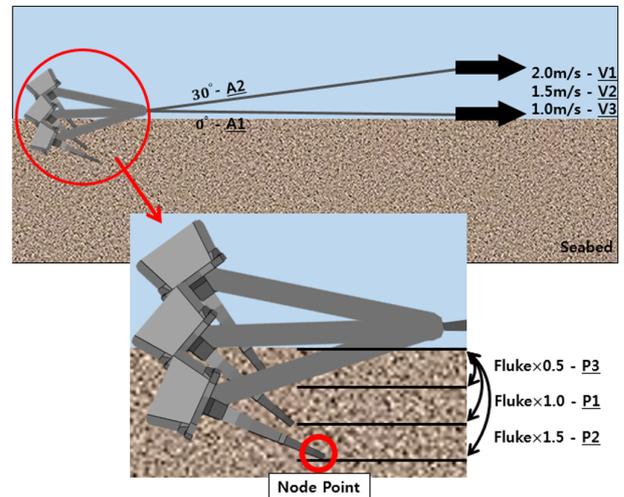
### 3. 해석 시나리오 설정

#### 3.1 해석 시나리오 설정

앵커 끌림 수치 시뮬레이션을 실시하기 위해 끌림 시나리오에 대한 설정은 다음의 순서로 진행하였다. 앵커는 해저지반에 침투하여 해양에서 선박 및 구조물을 정점에 계류시키기 위한 장치이다. 하지만, 다양한 해양환경과 선박의 재원에 의해 끌림에 관한 기준 설정이 모호하다. 따라서 Fig. 6과 같이 모든 설정의 추론 값과 가정이 요구되며, 본 연구에서는 매우 보수적인 시나리오를 설정 하고자 한다.

#### 3.2 시나리오 설정을 위한 선행해석

앵커 끌림 시나리오 설정을 위해 락법으로 보강되지 않은 해저지반에서의 앵커 초기 침투깊이(Initial penetration)설정, 앵커 끌림 속도(Drag velocity) 및 끌림 각도(Drag angle) 설정, 그리고



**Fig. 7** Settings values considered for the preceding analysis

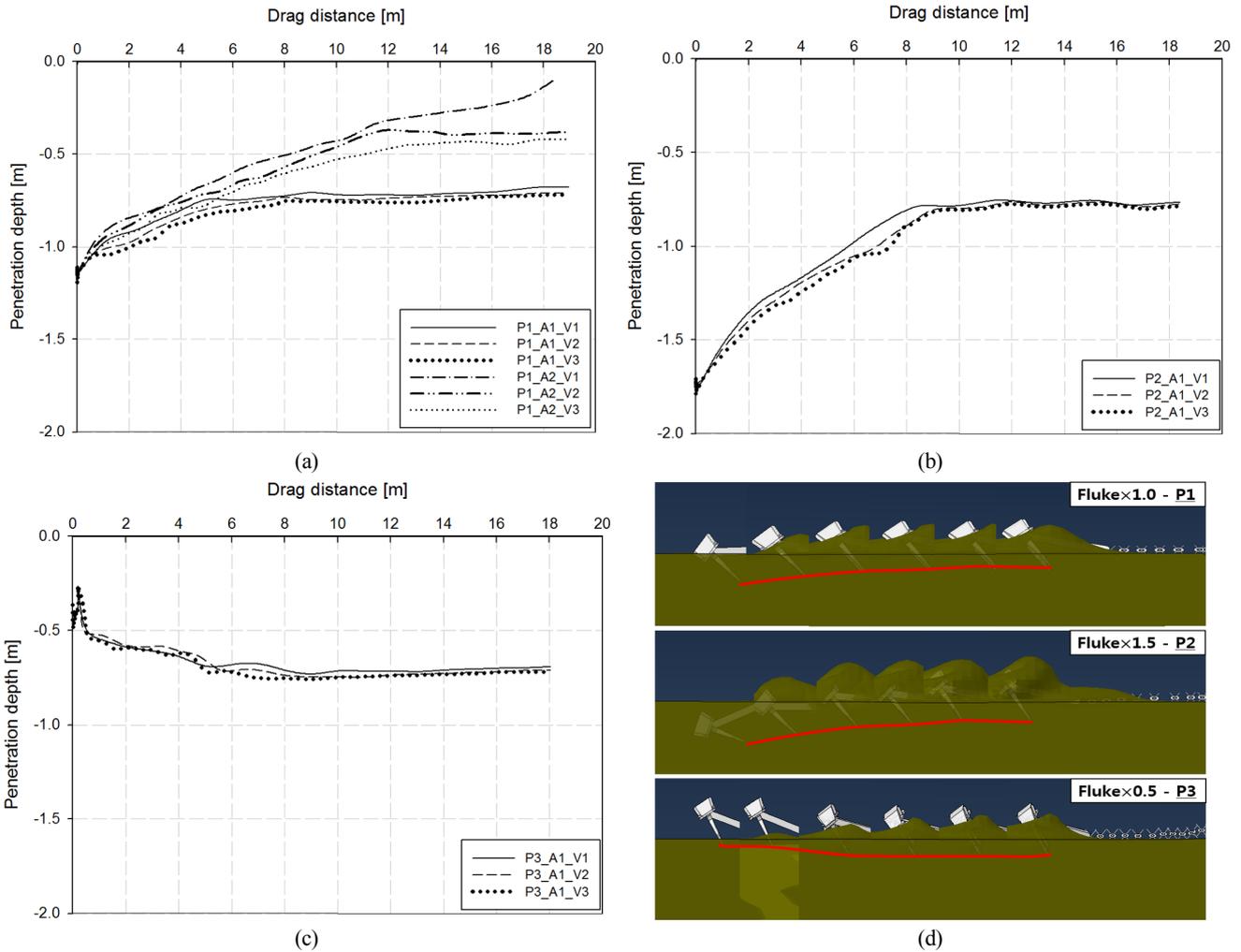


Fig. 8 Preceding simulation results of anchor trajectory at different initial penetration, drag velocities and drag angles

앵커와 락범의 이격거리(Anchor- rock-berm distance)설정을 위한 선행해석을 실시하였다. 선행해석에서 고려된 설정 값들을 Fig. 7에 나타내었으며, Fig. 7과 같이 먼저 앵커의 초기 지반 침투깊이에 대한 설정은 앵커가 낙하(Drop)하여 해저지반에 충돌 시 해저지반의 변위는 0.074m ~ 0.351m까지 지반 물성치와 앵커의 중량에 따라 결과 차이를 보였으며(Shin and Seo., 2017), 해저지반에 나타나는 변위가 곧 앵커가 지반에 침투되는 깊이가 된다. 또한 단단한 지반일수록 앵커가 침투되는 깊이는 얕을 것이며, 앵커가 낙하되어 해저지반에 안착 후 앵커는 지반내로 시간이 지남에 따라 더 깊게 침투할 것으로 예상된다.

따라서 초기 침투깊이 설정을 위해 앵커 Fluke(Fig. 3의 F)이 해저지반에 침투해 있는 상태(P1)와 Fluke의 1.5배(P2), 0.5배(P3)의 초기 침투깊이를 설정하여 해석을 수행하여 비교하였다. 둘째로, 침투되어 있는 앵커가 끌리는 속도와 각도에 대한 설정이 필요하다. 앵커가 끌리는 속도 및 각도에 따라 해저지반내로 침투하는 깊이에 대한 차이가 나타났으며(Zhao and Liu., 2015), 본 연구에서는 앵커 끌림 속도에 따른 비교를 위해 통상 선박이 앵커를 회수하는 속도와 비슷한 2m/s(V1), 1.5m/s(V2), 1m/s(V3)로 설정하였고 또한 끌림 각도를 0°(A1)과 30°(A2)를 비교하여 해석을 수행하였다. 마지막으로, 앵커와 락범의 이격거리에 대한

설정이 필요하며, 이는 모든 선행해석 결과를 분석하여 이격거리를 산정하였다. 앵커 침투깊이 측정은 각 Case별 끌림 시 앵커 최하단부인 Fluke 끝부분 Node point의 궤적을 추적하여 산정하였다. 또한 본 절의 선행 해석은 앵커 끌림에 의한 락범 설계 해석 시 적용되어야 하는 시나리오 설정을 위해 진행되었으므로, 선행 해석에서 고려한 해저지반은 3가지로 분류된 지반 물성치 가운데 중간의 강도를 갖는 느슨한 모래를 사용하였다.

3.3 선행해석 결과 분석 및 시나리오 결정

먼저 끌림 각도를 설정하기 위해 초기 침투깊이의 P1과 끌림 각도 A1, A2에 따른 끌림 속도 별 지반 침투깊이 결과를 Fig. 8(a)에 나타내었다. 끌림 각도에 따라 앵커가 지반내로 침투하는 깊이 결과에 많은 차이를 보였으며, 본 연구에서는 보수적인 설정 값을 사용하여 락범 설계를 하고자 끌림 각도는 A1으로 결정하였다. 또한 초기 침투깊이와 끌림 속도를 결정하기 위해 끌림 각도 A1을 적용한 초기 침투깊이 P2, P3에 따른 끌림 속도별 앵커의 지반 침투깊이 결과를 Fig. 8(b), (c)에 나타내었다. 결과를 보면 앵커의 초기 침투깊이 설정을 변경 할수록 끌림에 의한 침투깊이는 끌림 거리에 따라 차이를 보이지만, 끌림 거리 8m 이상에서의 초기 침투깊이 P1, P2, P3에 대한 오차율은 2~5% 대

로 비교적 적은 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한 끌림 속도는 V1일 때는 약게 침투 하는 결과가 나타났으나, 마찬가지로 끌림 거리 8m 이상의 거리에서 속도 V2와 V3의 결과비교 시 전체적으로 3~6%대로 속도에 의한 차이 또한 비교적 적은 것으로 나타났다.

따라서 앵커의 초기 침투깊이는 Fluke이 해저지반에 완전 침투해있는 상태(P1)로, 끌림 속도는 1.5m/s(V2)로 결정하였다. 앵커와 락범의 이격거리는 Fig 8(a) P1의 결과와 Fig 8(b) P2의 결과의 경우 앵커 끌림에 의해 침투깊이가 점차 얕아지고 끌림 거리 8m 이후 침투깊이가 일정해지는 경향을 보였으며, 이는 끌림 거리 8m 이전 해저케이블과 충돌해야 보수적인 설정임을 나타내고 있다. 반대로 Fig 8(c) P3의 결과는 앵커 끌림에 의해 침투깊이가 점차 깊어지고 끌림거리 8m 이후 침투깊이가 일정해지는 경향을 보였으며, 이는 끌림거리 8m 이후 해저케이블과 충돌해야 보수적인 설정임을 나타내고 있다. 이처럼 침투깊이가 일정해지는 끌림 거리를 반영하여 앵커와 락범의 이격거리는 8m로 결정 하였다.

#### 4. 락범 설계를 위한 해석

##### 4.1 락범 단면 설계

앵커가 끌리면서 해저지반에 매설되어있는 케이블에 부딪히면 케이블은 끊어지며 파괴 된다.

이러한 위험을 방지하기 위한 보호공법으로 매설된 해저지반 상부에 락범을 시공하여 보강한다. 앵커가 체인과 함께 끌릴 때 락범 보강 효과에 의해 해저지반 내로 침투하지 않고 빠져나올 수 있으며, 락범 보강높이 변경에 따라 그 효과도 달라질 것이다. 따라서 락범 설계를 위해 먼저 유한요소 모델링은 사석으로 구성되는 락범의 경우 SPH(Smooth particle hydrodynamic) 기법과 DEM(Discrete element method)와 같은 개별적인 Particle로 모델링 하여 락범 거동을 구현할 수 있다. 하지만 현재까지의 상용 프로그램들은 CEL 기법과 위 두 모델링 기법 간의 연동이 불가능함에 따라 본 연구에서는 설계된 락범 보강 효과에 의한 앵커의 해저지반 침투깊이 영향을 평가하기 위해 락범을 해저지반과 같은 Eulerian으로 모델링 하였다. 설계 검증을 위한 락범 단면을 Fig. 9에 나타내었으며 적용된 물성치를 Table 2에 나타내었다. Fig. 9와 같이 락범 하단부 길이는 3절에서 결정된 앵커와 락범의 이격거리(8m)와 동일한 길이로 설정하였고, 상부 길이는 2m로 고정하였으며, 폭은 모델링된 해저지반의 폭과 맞추어 20m로 모델링 하였다. 또한 락범 높이를 3가지(0.5m, 1.0m, 1.5m)로 변경하며, 결정된 해석 시나리오에 따라 해저지반의 물

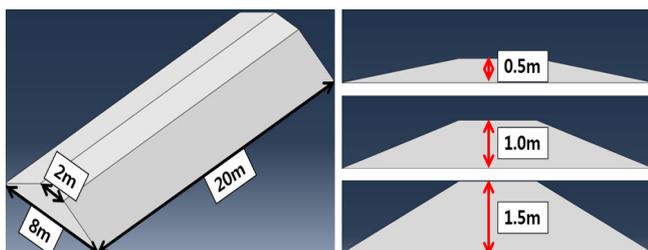


Fig. 9 Cross-section of rock-berm modeling

성치 별 설계된 락범 단면 검증을 위한 앵커 끌림 시뮬레이션을 실시하였다.

##### 4.2 락범 설계 단면 검증을 위한 앵커 끌림 해석

먼저 선행 연구로써 결정된 앵커 끌림 해석 시나리오를 Fig. 10에 나타내었다. 앵커와 락범의 이격거리 8m, 초기 앵커 침투 깊이는 Fluke 깊이(1.11m)만큼이며, 앵커 끌림 속도를 1.5m/s, 앵커 끌림 각도는 0°로 적용하였다. 여기서, 앵커와 락범의 이격거리는 끌림 시 앵커의 최하단부인 Fluke의 끝부분 Node point와 락범이 시작되는 부분 사이의 거리로 설정하였다. 또한 선행 연구와 동일하게 해석을 3단계로 설정하고, 3가지 해저지반 물성치(연약점토, 느슨한 모래, 조밀한 모래) 별 3가지 락범 타입(0.5m, 1.0m, 1.5m)에 따른 해석 case를 설정하였다.

실제 매설된 해저케이블 상부에 락범이 보강되며, 앵커 끌림 시 매설된 해저케이블에 의한 해저지반이 끌림에 저항하는 힘 및 변형이 달라질 것으로 예상된다. 하지만 그 영향은 적을 것으로 판단되어 해저케이블의 모델링은 배제하고 락범으로 보강되는 정중상부 아래 케이블이 매설되어 있다고 가정하였고, 설계된 락범 단면 검증을 위해 앵커 Fluke 끝부분 Node point의 궤적을 추적하여 락범 정 중상부 하단에 앵커의 끌림에 의한 침투 깊이를 산정하였다.

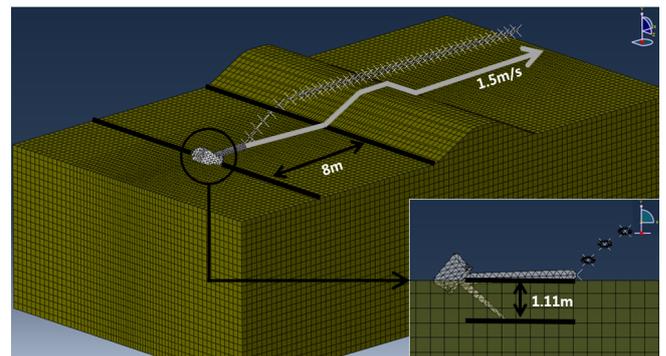


Fig. 10 Scenario of anchor dragging analysis

Table 3 Analysis case

Simulation case	Seabed type	Rock-berm heights[m]
S00	Soft clay	0
S05	Soft clay	0.5
S10	Soft clay	1.0
S15	Soft clay	1.5
L00	Loose sand	0
L05	Loose sand	0.5
L10	Loose sand	1.0
L15	Loose sand	1.5
D00	Dense sand	0
D05	Dense sand	0.5
D10	Dense sand	1.0
D15	Dense sand	1.5

## 5. 해석 결과 및 분석

본 결과에서 해저지반 물성 종류와 락범 설계 단면에 따른 해석 Case를 Table 3과 같이 정의하였다. 정의된 해석 Case의 앞 대문자는 분류된 해저지반 물성치의 앞 대문자를 인용한 것이며, 뒤 숫자는 설계된 락범 단면의 높이를 의미한다. 예를 들어 L10은 느슨한 모래의 해저지반에서 락범 높이 1.0m일 때의 해석 Case를 의미하고 대문자 뒤 00으로 설정된 Case는 락범이 보강되지 않은 Case이다.

해저지반 물성이 연약점토에서의 락범 높이 변화(S05, S10, S15)에 따른 앵커 끌림에 의한 궤적과 락범 정 중앙에서의 침투 깊이에 대한 해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 결과를 보면 해저지반 성질이 연약점토이고, 0.5m의 락범이 보강되었을 때, 락범 정 중앙에서의 앵커 침투 깊이는 -1.29m로 해저면 기준 아래 (-)로 침투하는 결과를 보였으며, 락범의 보강 효과에 의해 앵커 끌림 시 침투하는 깊이가 점차적으로 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 설계된 락범 높이의 최대인 1.5m의 락범이 보강되어도 앵커가 침투하는 깊이는 해저면 기준 아래(-)값이 나타났

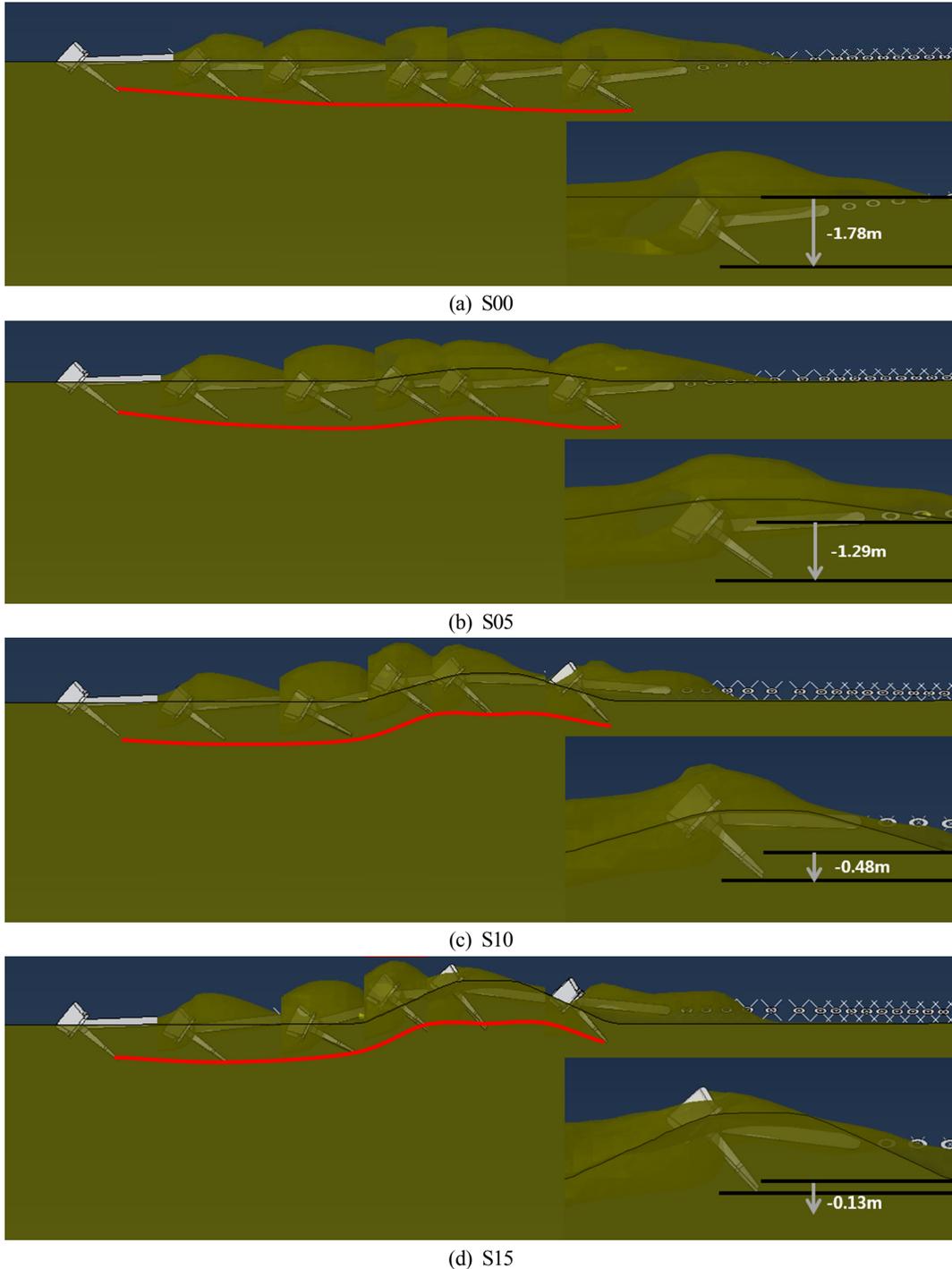


Fig. 11 Results of anchor penetration depth

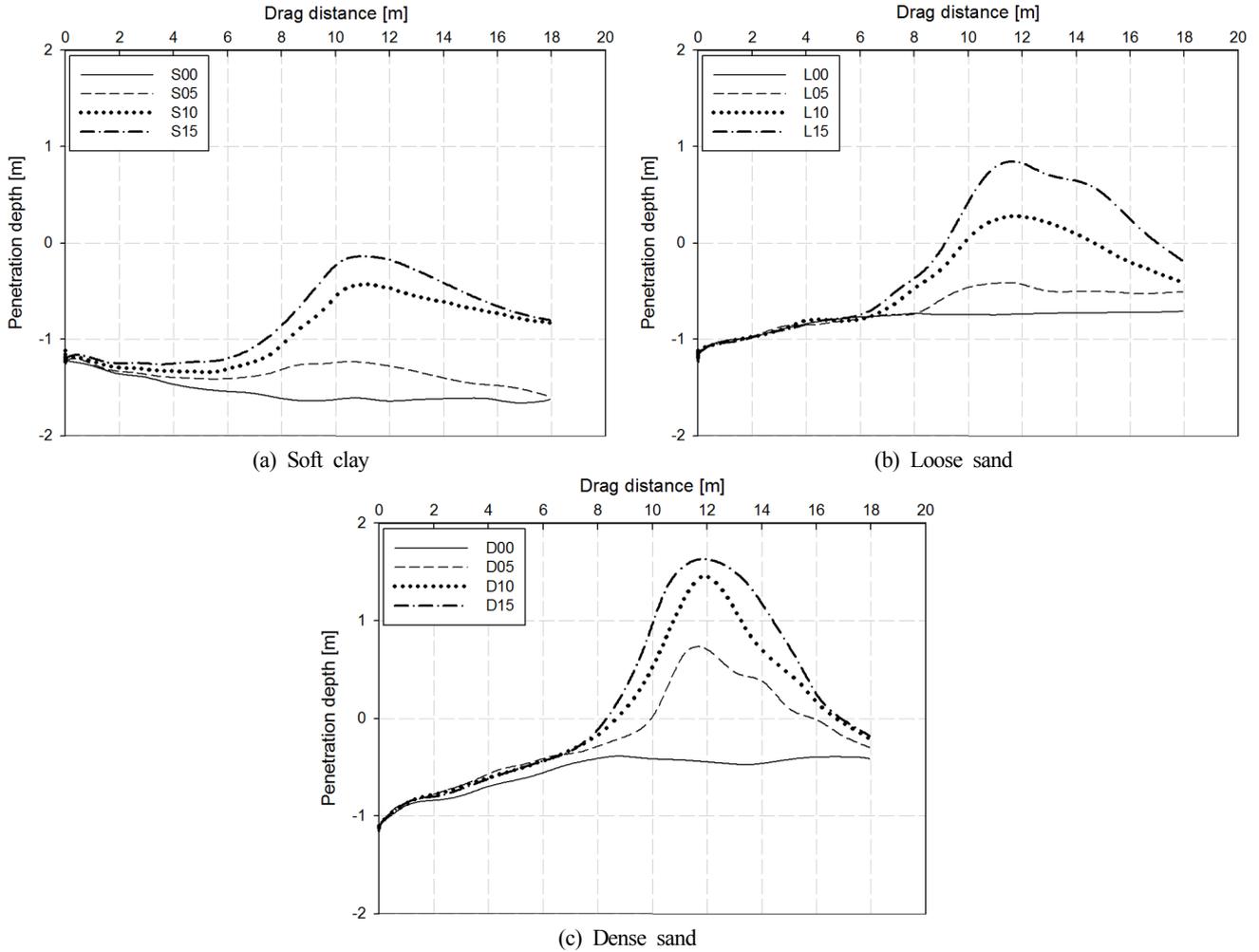


Fig. 12 Results of anchor penetration depth

으며, 이는 락범 정 중앙에 0.13m 이하로 매설된 케이블의 경우 앵커 끌림에 의해 충돌할 위험이 있다고 판단 할 수 있다. 또한 락범의 정 중앙을 지난 후 앵커가 끌림에 의해 해저지반에 재 침투하는 결과를 보였으며, 이는 0°의 각도로 일정하게 끄는 보수적인 시나리오 설정에 의한 효과로 판단된다.

모든 Case에 대한 해석 결과를 Fig. 12와 같이 그래프로 나타 내었다. 결과를 보면 설계된 락범 높이의 증가에 따른 앵커 침 투깊이 감소율이 조성된 해저지반 물성 따라 차이를 보였으며, 연약점토는 약 52%, 느슨한 모래는 약 137%, 조밀한 모래는 약 126%씩 감소하는 결과를 보였다. 또한 단단하게 조성된 해저지 반일수록 앵커가 침투하는 깊이에 대한 차이를 보였고 실제 느슨한 모래로 조성한 해저지반과 조밀한 모래로 조성한 해저지 반에서 락범으로 보강 되지 않았을 때 앵커 침투깊이 결과가 -1.78m와 -0.439m로 75%정도의 차이를 보였다. 따라서 해저케이블이 묻혀있는 해저지반의 성질에 따라 락범 보강을 달리 적용 해야 과다 설계 혹은 과소 설계를 방지할 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

본 연구는 해저지반에 매설된 해저케이블을 앵커 끌림에 의한 충돌로부터 보호하기 위해 락범을 설계하고, 대변형 해석이 가

능한 Abaqus/Explicit의 CEL기법을 적용한 수치 해석적 모형실험을 실시하였다.

앵커는 10.5ton 스톱리스 앵커를 선정하였으며, 끌림에 의한 락범 설계 검증 해석을 위해 다양한 변수들에 대한 시나리오 설정이 요구되었다. 이를 위해 Mohr-Coulomb 모델을 적용한 해저 지반을 모델링 하여 락범으로 보강되지 않은 상태에서 초기 앵커 침투깊이, 앵커 끌림 속도 및 각도에 대한 변수들을 변경하며 앵커의 궤적을 추적하여 침투깊이를 산정하는 선행연구를 수행하였다. 그 결과 매우 보수적인 시나리오 설정을 위해 초기 앵커 침투깊이는 앵커 Fluke의 길이(1.11m)로 결정되었으며, 앵커의 끌림 속도는 1.5m/s, 각도는 0°로, 그리고 앵커와 락범의 이격거리는 8m로 결정 되었다.

다음으로 해저케이블을 보호하기 위한 락범 단면을 하단부 길이는 앵커와 락범의 이격거리인 8m, 상부 길이는 2m이며, 높이를 0.5m, 1.0m, 1.5m의 3가지 타입으로 설계 하였다. 또한 연약점토, 느슨한 모래, 조밀한 모래로 조성된 3가지 해저지반에서의 설계된 락범 단면을 검증 하는 해석을 수행하고, 락범 정 중앙에서의 앵커 침투깊이를 산정하여, 설계된 락범을 검증 하였다.

설계된 락범 검증 해석 결과 모든 해석 case에서 락범 적용에 의해 보강이 됨을 알 수 있었다. 또한 락범이 보강되지 않았을 때 연약점토로 조성된 해저지반과 조밀한 모래로 조성된 해저

지반에서의 침투깊이 차이가 75%로 해저지반이 단단할수록 앵커 끌림에 의한 침투깊이가 감소하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 연약점토에서는 설계된 락범의 최대 높이인 1.5m를 보강하여도 락범 정 중앙에서의 앵커 침투깊이가 -0.13m로 해저지반 아래(-)로 침투하는 결과를 보였으며, 이는 해저케이블이 0.13m 이하로 매설된 경우 추가적인 락범 보강이 요구됨을 알 수 있었다. 또한 느슨한 모래로 조성된 해저지반의 경우 1.0m 높이로 설계된 락범 적용 시 락범 정 중앙에서의 앵커 침투깊이가 해저지반 +0.28m로 침투하지 않는 결과를 보였다. 이는 1.0m의 높이로 락범을 보강하면, 해저케이블의 매설된 깊이에 상관없이 충분히 안전하다고 판단할 수 있다. 마찬가지로 조밀한 모래로 조성된 해저지반의 경우 0.5m 높이로 설계된 락범 적용 시 안전한 결과가 나타났다.

따라서 연약점토에서는 1.5m 이상, 느슨한 모래에서는 1.0m, 조밀한 모래에서는 0.5m의 락범 높이를 적용해야 매설된 해저케이블이 앵커 끌림에 의한 충돌로부터 안전하다고 판단 할 수 있다.

향후 앵커 끌림 실내실험에 의한 해저지반 침투깊이를 산정하고, 앵커 낙하에 의한 충돌 실내실험을 실시하여 락범 설계에 관한 앵커 낙하(Drop) 및 끌림(Drag)의 비교 연구를 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2017년 산업통상자원부 지원 산업핵심기술과제 “ARC7 극지환경용 해양플랜트 내빙구조 설계기술 개발 (10063417)” 과제의 지원으로 수행된 결과임.

## References

ABAQUS, 2017. ABAQUS User's Manual. ABAQUS 2017, Rhode Island, Dssault Systems.

- Das, B.M., 2009. Principles of Geotechnical Engineering. 7<sup>th</sup> Edition, Cengage Learning, USA.
- Det Norske Veritas(DNV), 2010. Recommend and Practice DNV-RP-F107 Risk Assessment of Pipeline Protection. Norway, DNV
- Jung, J.J., Lee, Y.S., Shin, H.S., 2007. A Study for Construction of Shore-end Submarine Cable. Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, 2(3), 203-209.
- Kim, Y.H., Jeong, S.S., 2014. Analysis of Dynamically Penetrating Anchor based on Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) Method. Journal of the Korean Society Civil Engineers, 34(3), 895-906.
- Liu, Y., Hu, H., Zhang, D., 2013. Probability Analysis of Damage to Offshore Pipeline by Ship Factors. Journal of the Transportation Research Board, 2326, 24-31.
- Qiu, G., Henke, S., Grabe, J., 2011. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations. Computers and Geotechnics, 38, 30-39.
- Shin, M.B., Seo, Y.K., 2017. Impact Characteristics of Subsea Pipeline Considering Seabed Properties and Burial Depth. Journal of Ocean Engineering and Technology, 31(3), 219-226.
- SPS-KSA-V3311-5978, 2014. Anchor, Korea Industrial Standards.
- Woo, J.H., Na, W.B., 2010. Analyses of the Maximum Response of Cylinders-Connected Protector under Anchor Colliding and Dragging. Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(5), 81-87.
- Woo, J.H., Na, W.B., Yu, J.S., 2014. Anchor Collision Simulation of Rock-berm using SPH Technique. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(1), 9-15.
- Zhao, Y., Liu, H., 2015. The Drag Effects on the Penetration Behavior of Drag Anchors During Installation. Ocean Engineering, 109, 169-180.

# Development of SRIAM Computation Module for Enhanced Calculation of Nonlinear Energy Transfer in 3<sup>rd</sup> Generation Wave Models

Jooyong Lee\*, Jaeseon Yoon\*\* and Taemin Ha\*\*\*

\*Construction and Environmental Research Center, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

\*\*Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan, Korea

\*\*\*Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Sancheok, Korea

## 제3세대 파랑모델의 비선형 에너지 이송항 계산 효율 증대를 위한 SRIAM 계산모듈 개발

이주용\* · 윤재선\*\* · 하태민\*\*\*

\*성균관대학교 건설환경연구소

\*\*한국농어촌공사 농어촌연구원

\*\*\*강원대학교 건설시스템공학과

**KEY WORDS:** Nonlinear energy transfer 비선형 에너지 이송항, Wave model 파랑모델, Computation module 계산모듈

**ABSTRACT:** Because of the rapid development of computer technology in recent years, wave models can utilize parallel calculations for the high-resolution prediction of open sea and coastal areas with high accuracy. Parallel calculations also allow national agencies in the relevant sectors to produce marine forecasting data through massive parallel calculations. Meanwhile, the eastern coast of the Korean Peninsula has been increasingly damaged by swell-like high waves, and many researchers and scientists are continuing their efforts to anticipate and reduce the damage. In general, the short-term transformation of swell-like high waves can be reproduced relatively well in the third generation wave models, but the transformation of relatively long period waves needs to be simulated with higher accuracy in terms of the nonlinear wave interactions to gain a better understanding of the low-frequency wave generation and development mechanisms. In this study, we developed a calculation module to improve the calculation of the nonlinear energy transfer in the 3rd generation wave model and integrated it into the wave model to effectively consider the nonlinear wave interaction. First, the nonlinear energy transfer calculation module and third generation model were combined. Then, the combined model was used to reproduce the wave transformation due to the nonlinear interaction, and the performance of the developed operation module was verified.

### 1. 서 론

최근 컴퓨터 기술이 급격하게 발달함에 따라 파랑모델의 연산을 수행하는데 병렬계산을 활용할 수 있게 되어 넓은 해역에 걸친 고해상도 파랑예측이 가능해졌다. 기상청과 해양조사원 등의 관련 기관에서는 대규모 병렬계산을 통한 파랑모델링을 통해 해양예보자료를 생산하여 대국민서비스 및 유사시 인명구조 등 관련 현업에 활용하고 있다. 이처럼 파랑모델의 활용도가 커짐에 따라 정확도 향상이 요구되고 있고 관련 연구자들이 다방면으로 모델의 성능 향상을 위해 노력하고 있다. 이 중 파랑모델의 비선형 에너지 이송항은 파랑의 비선형 상호작용에 의한 변형을

예측할 수 있어 초창기부터 관심을 받아왔으나 이를 재현하는 Boltzmann 적분은 4차 적분을 포함한 복잡한 수식으로 구성되어 있기 때문에 정확한 해석을 위해서는 막대한 계산시간이 소요되어 실용적이지 못하다(Hasselmann, 1962; Hasselmann and Hasselmann, 1981; Hasselmann and Hasselmann, 1985a; Masuda, 1980). 이에 따라 제3세대 파랑모델에서는 하나의 공명상호작용 쌍만을 고려하는 방법을 사용하여 왔다(Hasselmann and Hasselmann, 1985b). 그러나 획기적인 접근으로 정확성을 상당히 유지시켰음에도 불구하고 단순화로 인해 주기가 상대적으로 긴 파랑을 모델링할 경우 제대로 재현해내지 못하는 한계가 있다 (Hashimoto et al., 1998; Van Vledder, 2006; Tolman, 2013).

Received 1 November 2017, revised 3 November 2017, accepted 4 December 2017

Corresponding author Taemin Ha: +82-33-570-6514, tmha@kangwon.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근 동해안에서 이상고파라 알려져 있는 너울성 고파랑에 의한 피해가 증가하여 이를 예측하고 피해를 저감하기 위한 노력이 계속되고 있다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이 파랑모델에서 너울성 고파랑을 재현하기 위해서는 주기가 상대적으로 긴 파랑에 대한 재현 정확도를 높일 필요가 있으며, 이에 대한 대안으로 파랑의 비선형 상호작용을 고려하는 비선형 에너지 이송항의 계산효율을 증대시키는 계산기법의 도입이 요구되고 있다. 이러한 요구에 발맞추어 본 연구에서는 제3세대 파랑모델의 비선형 에너지 이송항 계산 효율 증대를 위한 계산모듈을 개발하고 파랑모델에 이를 접합하여 파랑의 비선형 상호작용을 효율적으로 고려할 수 있는 모델링 기법을 제안하였다. 먼저 비선형 에너지 이송항 계산모듈과 파랑모델의 접합을 수행하였으며, 접합된 파랑모델을 활용하여 비선형 상호작용에 의한 파랑 변형을 재현하고 개발된 계산모듈의 성능을 검증하였다.

## 2. 파랑모델

### 2.1 비선형 상호작용

파랑모델에서 에너지 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial E(\omega, \theta)}{\partial t} + C_g \cdot \nabla E(\omega, \theta) = S \tag{1}$$

$$S = S_{\infty} + S_{dis} + S_{nl} \tag{2}$$

여기서,  $E(\omega, \theta)$ 는 파랑의 방향 스펙트럼,  $C_g$ 는 파랑의 군속도,  $S$ 는 Source항을 나타낸다. Source항은 식 (2)와 같이 각각 바람에 의한 입사에너지( $S_{\infty}$ ), 파랑의 전파과정에서 발생하는 감쇠에너지( $S_{dis}$ ), 비선형 에너지 이송항( $S_{nl}$ )으로 구성되어 있다. 이 중 Low frequency대에서는 비선형 파랑 상호작용에 의한 영향이 상대적으로 크기 때문에 파랑에너지 전달시 Frequency downshift가 발생하는 등 파랑의 발달과정에서 수치모델이 비선형 파랑 상호작용을 제대로 구현하지 못하게 되면 Low frequency대 에너지가 제대로 전파되지 못하고 소멸되어 파랑의 발달이 제대로 재현되지 못하는 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(k_4)}{\partial t} = & \int \dots \int dk_1 dk_2 dk_3 G(k_1, k_2, k_3, k_4) \\ & \times \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \\ & \{n_1 n_2 (n_3 + n_4) - n_3 n_4 (n_1 + n_2)\} \end{aligned} \tag{3}$$

제3세대 파랑모델에서 비선형 상호작용은 Hasselmann(1962)에 의한 식 (3)의 Boltzmann 적분을 계산하여 구현하게 된다. 여기서,  $n_i = n(k_i) = \Phi(k_i) / \omega_i$ 는 Wave action density,  $\Phi(k_i)$ 는 파수 스펙트럼,  $G(k_1, k_2, k_3, k_4)$ 는 Coupling 계수를 각각 나타낸다. 식 (3)에 나타난 것처럼 Boltzmann 적분은 4차 적분을 포함한 매우 복잡한 형태를 가지고 있기 때문에 정확해를 계산하여 파랑을 예측하는 일은 매우 어렵다. Boltzmann 적분을 정교하게 해석하는 연구는 미국, 네덜란드, 일본 등을 중심으로 수십 년 전부터 진행되어 왔다(Hashimoto et al., 1998; Hashimoto et al., 2002;

Hasselmann and Hasselmann, 1981; Masuda, 1980; Resio and Perrie, 1991; Webb, 1978). 하지만 여러 연구에서 밝혀낸 계산 기법을 파랑모델에 적용하게 되면 계산이 매우 복잡하게 되며, 현대의 컴퓨터 기술로도 막대한 계산시간이 소요되어 실제 지형에서 파랑변형을 수치모델링 하는 일은 대규모 병렬연산 시스템을 활용하더라도 현실적으로 수행하기 어려운 수준이다 (Komatsu and Masuda, 1996; Tolman, 2013; Van Vledder, 2006).

### 2.2 SRIAM(Simplified RIAM) 기법

SWAN, WAM, WAVEWATCHIII 등 현업에서 사용하는 많은 파랑모델은 이러한 어려움에 봉착하여 계산이 용이한 DIA (Discrete interaction approximation; Hasselmann and Hasselmann, 1985b) 기법을 사용하고 있으나 수많은 비선형 상호작용을 하나의 대표값으로 나타내기 때문에 많은 문제점을 보여주고 있다(Fig. 1). 이에 따라 파랑모델에 WRT(Webb-resio-tracy) 기법 (Van Vledder, 2006)이나 EDIA(Extended DIA) 기법(Hashimoto and Kawaguchi, 2001), GMD(Generalized multi-DIA) 기법(Tolman, 2013) 등을 도입하여 그 한계를 극복하려 하고 있다. 본 연구에서는 이 중 계산의 효율성이 높고 상당한 정확도를 보이는 것으로 알려진 SRIAM(Simplified RIAM) 기법(Fig. 2; Komatsu, 1996)을 현업에서 사용되는 파랑모델에 접합하여 비선형 파랑 상호작용을 구현하고 파랑 예측에 활용하고자 한다.

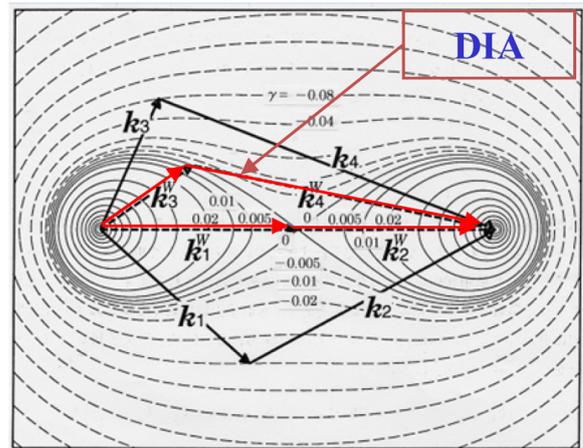


Fig. 1 DIA scheme (Hasselmann and Hasselmann, 1985b)

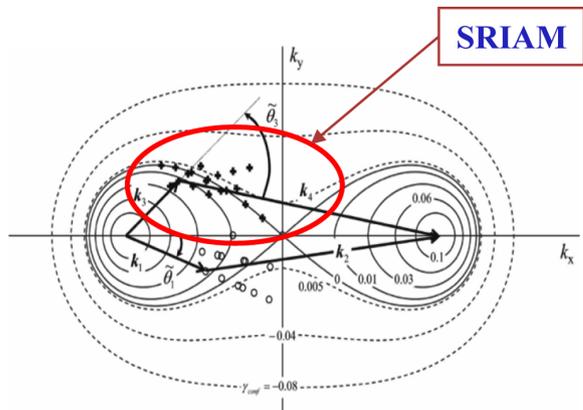


Fig. 2 SRIAM scheme (Hashimoto et al., 2014)

Komatsu and Masuda(1996)는 대칭 조건을 도입하여 Masuda (1980)의 정확도에 상응하는 정확도를 가지면서 300배 이상 빠르게 계산할 수 있는 RIAM 기법을 제안하였다. 비록 300배 이상의 속도향상 효과를 얻는다하더라도 RIAM 기법은 현업 파랑모델에서 사용하는 단순화 기법인 DIA 기법에 비해 대략 2,000배 이상의 계산시간을 필요로 하기 때문에 여전히 막대한 계산시간이 소요되어 실용성이 떨어진다. 이를 개선하기 위해 Komatsu(1996)는 수 많은 파수의 조합 중 파랑 에너지를 효율적으로 재현해낼 수 있는 20개의 최적화된 계수를 유도하여 RIAM 기법을 단순화하였으며, 이를 통해 약간의 정확도 손해가 발생하지만 RIAM 기법에 비해 100배 이상의 계산 효율을 높인 SRIAM 기법을 제안하였으며 RIAM 기법에 상응하는 정확도를 가지고 있는 것으로 알려져 있다 (Hashimoto and Kawaguchi, 2001). RIAM 기법은 높은 정확도에 비해 DIA 기법에 비해 약 2,000배 높은 계산시간이 소요되기 때문에 현업에서 운용되는 파랑모델에 적용하는 것은 사실상 불가능하고 연구목적으로도 사용에 제한이 많다. 반면, 그보다 100배 이상 빠른 SRIAM 기법을 대규모 병렬 계산을 통해 활용할 수 있다면 DIA보다 20여배 정도 시간이 더 걸리지만 현업에서 운용되는 파랑모델에 적용하여 파랑 예측 정확도를 높이는 데 기여할 수 있다고 사료된다.

### 2.3 SRIAM 기법의 파랑 모델 접합

2008년 일본의 JAMSTEC(Japan agency for marine-earth science and technology)에서는 비선형 상호작용 계산을 개선하기 위해 WAVEWATCHIII에 SRIAM과 RIAM을 접합하는 연구를 수행하여 모델의 성능을 검증하는 연구를 발표하였으나(Tamura et al., 2008), WAVEWATCHIII의 공식 버전에 포함하기 위한 NOAA(National oceanic and atmospheric administration)의 공식적인 공개 요청을 거절하여 현재 비공개로 연구를 수행하고 있다. 하지만 WAVEWATCHIII에 접합된 SRIAM 기법이 RIAM의 정확도에 상응하는 정확도를 보여주어 파랑의 비선형 상호작용을 상당히 정확하게 재현할 수 있는 것이 검증되었으며, SRIAM 기법이나 RIAM 기법의 계산 결과와 비교 할 때 기존의 DIA 기법은 매우 상이한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다(Tamura et al., 2008).

Hashimoto et al.(2014)은 기존의 Komatsu(1996)의 SRIAM 기법에서 일부 나타나는 계산오류를 수정하여 파랑의 전파를 고려하지 않고 Source항의 변화만을 계산할 수 있도록 단순화한 WAM모형에 도입하여 저주파대에서의 Frequency downshift를 계산하여 발표하였다. 본 연구에서는 JAMSTEC에서 수행한 연구를 토대로 미국 해양대기국(NOAA, National oceanic and atmospheric administration)에서 공식적으로 파랑 예측에 사용하고 있으며, 우리나라에서도 기상청과 해양수산부에서 이미 현업 모델로 사용하고 있는 WAVEWATCHIII에 Hashimoto et al.(2014)가 개발한 SRIAM 기법을 접합하였다.

SRIAM 기법의 WAVEWATCHIII 접합에 필요한 요소기술은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 음해법(Lavrenov, 2003)을 활용하여 에너지 방정식의 비선형 에너지 이송항을 계산하는 수치모델을 개발하였다. SRIAM 기법이나 RIAM 기법을 통해 Source항에서 비선형 에너지 이송항을 계산할 때 기존의 파랑모델이 사용하는 Semi-implicit 기법을 활용할 경우 수치모델

의 오차가 기준을 초과하여 파랑모델의 정확도에 크게 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이에 Tamura et al.(2008)은 기존의 Source항 계산에서 사용하는 Semi-implicit 기법 대신 음해법을 도입하여 Semi-implicit 기법에 의한 결과보다 정확도를 크게 향상시켰다. 이에 본 연구에서는 WAVEWATCHIII에서 Hashimoto et al.(2014)의 SRIAM 기법을 사용할 경우 Source항에서 비선형 에너지 이송항을 Lavrenov(2003)의 음해법을 통해 계산하고 갱신할 수 있도록 수치 알고리즘을 개발하여 사용하였다. 두 번째로 파랑모델에 접합하여 병렬계산을 활용하기 위해 병렬계산을 지원하지 않는 기존의 모델을 병렬계산을 지원하는 모델로 변환하는 병렬 계산 소스코드를 개발하였다. SRIAM 기법의 도입을 위해 기존의 모델 구성을 분석하여 수치오류를 최소화하였으며, WAVEWATCHIII 접합을 위해 기존의 Source code에서 제공하고 있는 개발자 모듈(W3SNLX.ftn)을 활용하여 SRIAM 기법을 활용하는 비선형 에너지 이송항 계산기법을 개발하였다.

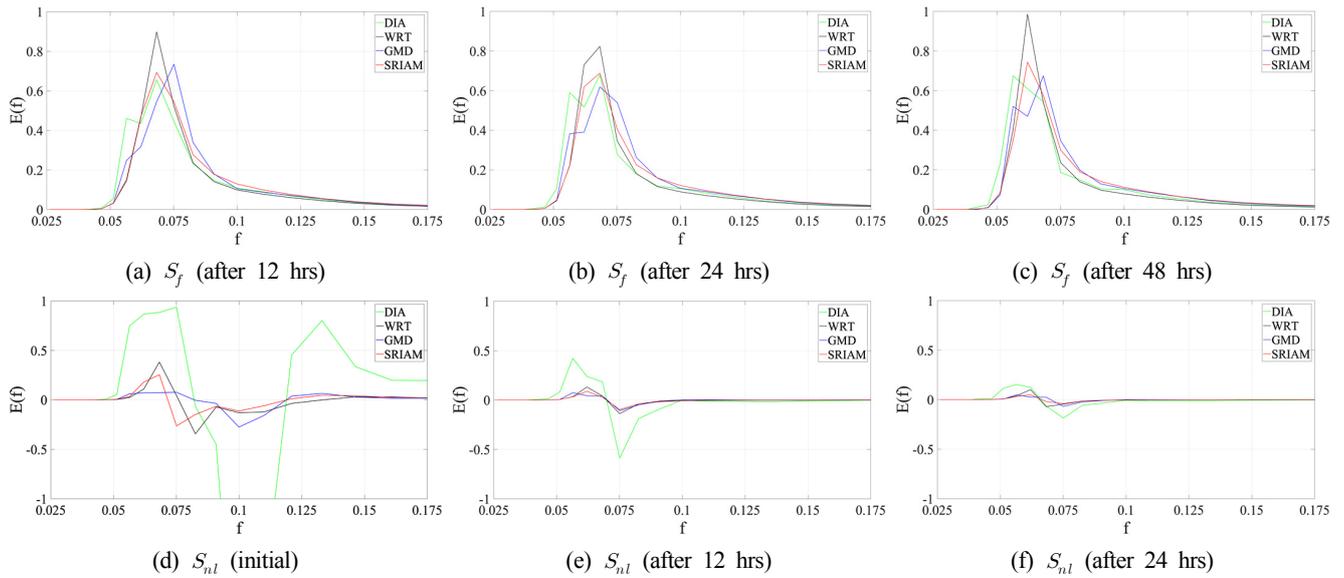
## 3. 파랑변형 수치모델링

### 3.1 비선형 에너지 이송항 계산기법 비교

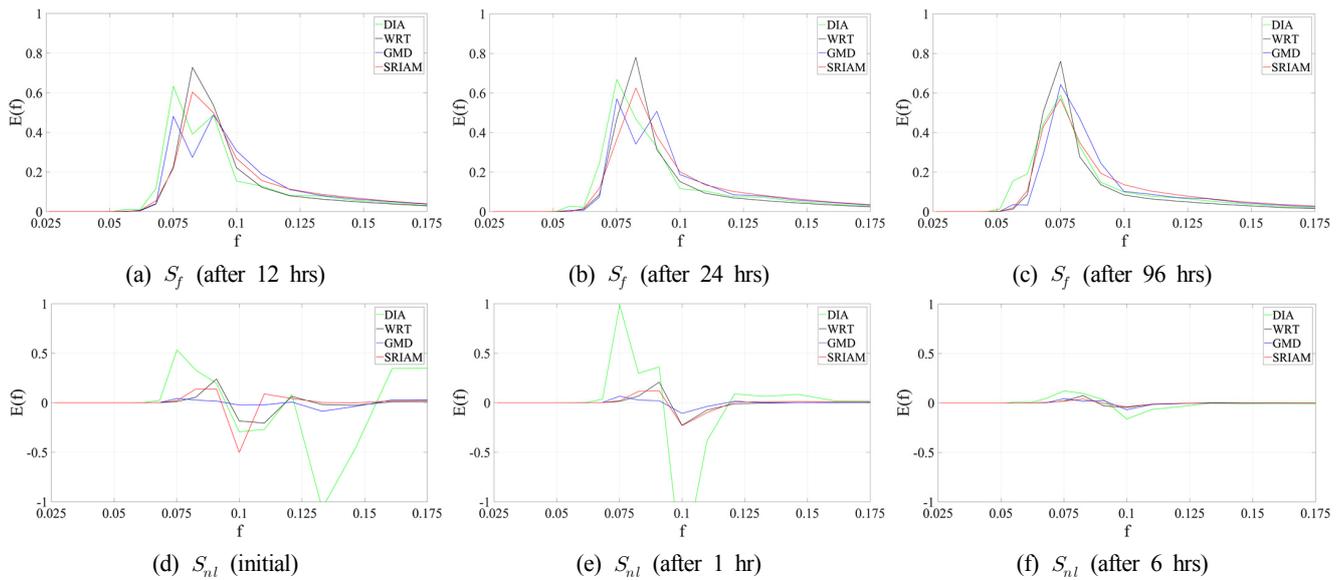
2장에서 설명한 SRIAM 기법 접합을 위한 요소기술을 활용하여 WAVEWATCHIII에 SRIAM 기법으로 비선형 에너지 이송항을 계산하는 모듈을 접합하고, 접합한 모듈의 성능 검증을 위해 다양한 조건의 초기 파랑 스펙트럼을 생성하여 WAVEWATCHIII의 비선형 에너지 이송항 기법들을 비교하였다. WAVEWATCHIII에서 고려할 수 있는 파랑의 전파, 에너지 소산 등의 영향을 포함하여 실험을 수행할 경우 비선형 에너지 이송항 계산 결과가 타 조건에 의해 교란되어 계산기법의 차이에 따른 비선형 에너지 이송항의 역할을 분석하기 어렵기 때문에, WAVEWATCHIII의 계산 조건에서 비선형 에너지 이송항을 제외한 다른 계산을 모두 끈 상태로 시간의 흐름에 따른 비선형 에너지 이송항을 수치 계산하여 결과를 비교하였다. 바람 조건은 Duration-limited 조건으로 수치모델링을 수행하였으며, 총 모의 시간은 120시간으로 하였다.

초기 파랑 스펙트럼 생성을 위해 JONSWAP 스펙트럼(Hasselmann et al., 1980)을 초기 조건으로 활용하였으며, 파고와 파랑의 주기에 관해 Goda(2003)가 제안한 공식  $T_{1/3} = 3.3(H_{1/3})^{0.63}$ 을 활용하여 스펙트럼을 생성하였다. 주기의 변화와 스펙트럼의 에너지 분포양상에 따른 비선형 에너지 이송항과 스펙트럼의 변화를 종합적으로 살펴 보기 위해 JONSWAP 스펙트럼의 변수 중 첨두 주기와  $\gamma$ 값을 다양하게 조합하여 초기 스펙트럼을 생성하였으며, 각각의 조합에 따른 비선형 에너지 이송항과 스펙트럼 변화 양상을 각각 분석하였다.

Fig. 3은 상대적으로 주기가 긴( $f = 0.075s^{-1}$ ) 초기 파랑 스펙트럼에서 시간의 흐름에 따른 비선형 에너지 이송항과 파랑 스펙트럼의 변화를 도시한 것이다. 스펙트럼의 변화를 살펴보면 앞서 설명한대로 Frequency downshift가 발생하였으며, SRIAM 기법을 통해 비선형 에너지 이송항을 계산한 경우에 Semi-exact 계산기법인 WRT 기법의 결과와 가장 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 특히, WAVEWATCHIII에서 기본적으로 제공하고 있는 GMD 기법의 결과와 비교할 때 더 정확한 계산 결과를 보여줌을 확인할 수 있으며, 향후 비선형 에너지 이송항에 의한 파랑변형을 좀 더 효율적으로 계산할 수 있을 것으로 기대된다.



**Fig. 3** Numerical results of nonlinear energy transfer( $S_{nl}$ , Bottom) and wave energy spectrum( $S_f$ , Top) using different numerical schemes ( $\gamma=3.3$ ,  $T_p=13.3s$ )

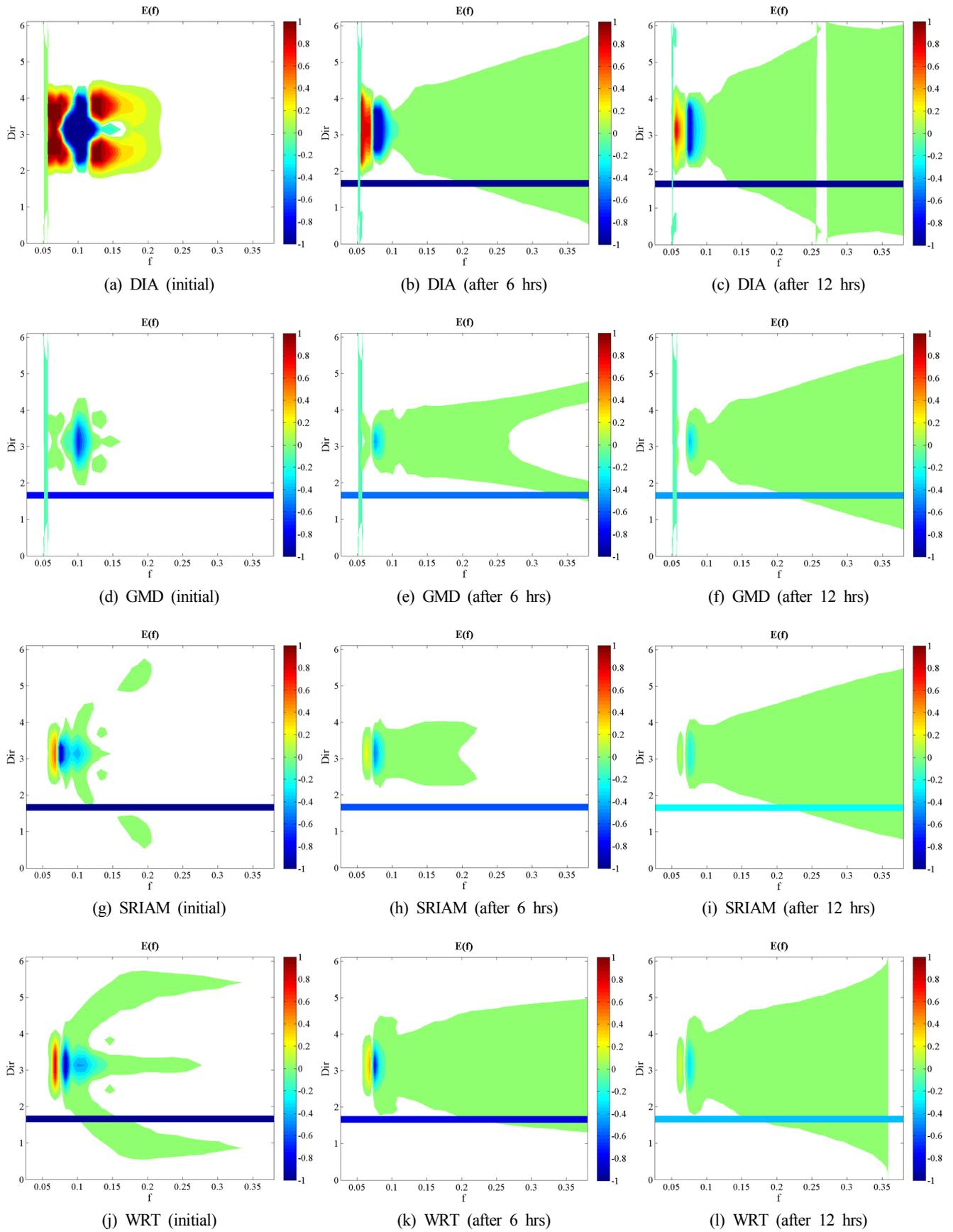


**Fig. 4** Numerical results of nonlinear energy transfer( $S_{nl}$ , Bottom) and wave energy spectrum( $S_f$ , Top) using different numerical schemes ( $\gamma=7.0$ ,  $T_p=10.0s$ )

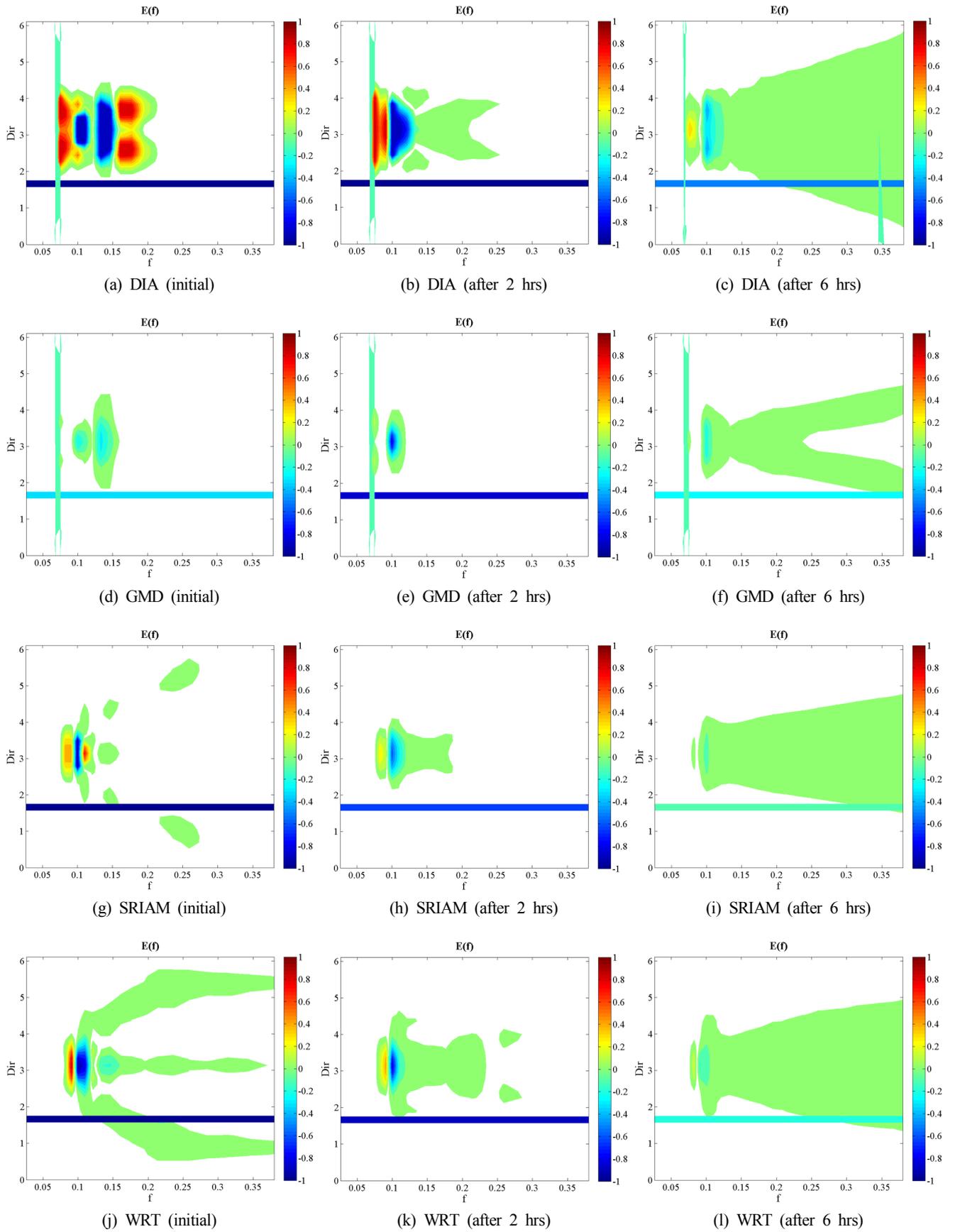
Fig. 5는 상대적으로 주기가 긴  $\gamma=3.3$ ,  $T_p=13.3s$  인 조건에서 비선형 에너지 이송항의 변화를 주파수와 파향으로 세분하여 2차원으로 도시한 결과이다. 앞서 설명한대로 SRIAM 기법을 통해 계산된 결과는 Semi-exact 계산기법인 WRT 기법의 결과와 정성적인 분포양상을 상당히 유사하게 나타내고 있으며, 정량적으로도 DIA 기법이나 GMD 기법에 비해 탁월한 결과를 나타내고 있다. DIA 기법은 정성적으로 WRT 기법이나 SRIAM 기법의 결과를 단순화한 형태로 재현하고 있으나 정량적으로는 두 기법과 현저한 차이를 보여주고 있다. 이와 반대로 GMD 기법은 정량적으로 WRT 기법이나 SRIAM 기법과 유사하나 정성적으로 주파수와 파향 모두에서 상당한 차이를 보이고 있다. 다만, 본 연구에서

는 GMD 기법에서 매개 변수 조정 없이 WAVEWATCHIII ver. 4.18의 기본값을 사용했기 때문에 매개 변수를 조정을 통해 GMD 기법을 실험 케이스에 최적화한다면 결과가 좀 더 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 앞선 조건보다 일반적인 풍파의 특성을 나타내도록 주기를 조금 낮춘  $\gamma=7.0$ ,  $T_p=10.0s$  인 조건에서 비선형 에너지 이송항의 변화를 주파수와 파향으로 세분하여 도시한 결과이다. Fig. 5와 유사하게 SRIAM 기법은 DIA 기법이나 GMD 기법에 비해 정량적 뿐 아니라 정성적으로도 WRT 기법에 거의 상응하는 정확도를 보여주고 있다. 특히, 주파수에서는 어느 정도 비슷한 경향을 보이고 있으나, 파향의 측면에서 보면 매우 상이한



**Fig. 5** Comparison of frequency-direction distribution of nonlinear energy transfer ( $S_{nl}$ ) among different numerical schemes ( $\gamma=3.3$ ,  $T_p=13.3s$ )



**Fig. 6** Comparison of frequency-direction distribution of nonlinear energy transfer( $S_{nl}$ ) calculated by different numerical schemes ( $\gamma = 7.0$ ,  $T_w = 10.0s$ )

결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. DIA 기법은 저주파수 부근에서 비선형 에너지 이송항이 과다하게 계산되어 Frequency downshift가 WRT 기법에 비해 과하게 재현되었으며, 반대로 GMD 기법은 저주파수 부근에서 비선형 에너지 이송항이 작게 계산되어 Frequency downshift가 충분히 발달하지 못하였다. 이로 인한 스펙트럼의 발달 오차를 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구를 통해 개발한 SRIAM 기법을 활용하는 비선형 에너지 이송항 계산모듈이 WAVEWATCHIII의 기존 코드와 충돌 없이 잘 접합된 것을 확인할 수 있었다. Hashimoto et al.(2014)은  $\gamma$ 값이 작은 경우에 비선형 에너지 이송항의 영향이 상대적으로 원만하게 나타나 수치모델의 계산기법의 차이가 미미하게 나타나는 것을 실험을 통해 밝혀내었으며, 본 연구에서도  $\gamma$ 값이 작은 경우에는 4가지 비선형 에너지 이송항 계산기법에 따른 스펙트럼의 변화 양상에 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있었으나 지면상 본 논문에 결과를 포함하진 않았다.

### 3.2 다양한 초기조건(JONSWAP 스펙트럼)에 대한 비선형 에너지 이송항 변화 비교

수치실험 결과에서 알 수 있듯이 비선형 에너지 이송항을 계산할 때 DIA 기법은 타 기법에 비해 초기부터 매우 큰 값을 가지는 것으로 나타났으며, 나머지 기법들은 양적으로 비슷한 값을 보였으나 발달과 소멸 양상이 기법에 따라 상이했다. 그에 따라 비선형 에너지 이송항의 초기 계산 결과부터 누적되어 스펙트럼의 변화가 나타났으며, Fig. 3과 Fig. 4의 스펙트럼 변화에서 모두 시간의 흐름에 따라 Semi-exact 계산기법인 WRT 기법에 SRIAM 기법이 가장 유사한 결과를 나타내었다. Hashimoto et al.(2014)은 풍파(Wind wave)의 조건에서는 Frequency downshift 현상이 매우 두드러지게 나타나고 풍파에서 너울(Swell)의 조건으로 변해감에 따라 Frequency downshift 현상이 작아지는 것을 실험을 통해 확인하였으며, 본 연구에서도 유의 주기  $T_p$ 가 상대적으로 길어 보다 너울에 가까운 Fig. 3보다 풍파 조건에 가까운 Fig. 4에서 Frequency downshift가 뚜렷하게 나타났다. 또한,  $\gamma$ 값이 커짐에 따라 비선형 에너지 이송항의 영향이 커지는 것으로 나타났으며, 이로 인해 스펙트럼의 변화에서 Frequency downshift 현상이 심해지는 것을 확인할 수 있었다. 비선형 에너지 이송항에 대한 스펙트럼의 변화는 Semi-exact 계산기법인 WRT 기법을 기준으로 볼 때 SRIAM 기법이 DIA 기법이나 GMD 기법에 비해 상대적으로 정확하게 스펙트럼의 변화를 계산해 내는 것을 확인할 수 있다.

2.2절에서 설명한 바와 같이 SRIAM 기법은 DIA 기법에 비해 약 20여배 계산시간이 더 소요되는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 SRIAM 기법이 DIA 기법에 비해 계산시간이 약간 더 소요되었다. 이는 하나의 공명상호작용쌍만을 고려하는 DIA 기법과 달리 SRIAM 기법에서 20개의 대표 공명상호작용쌍을 고려하여 비선형 상호작용을 계산하기 때문으로, GMD 기법과 같이 다중으로 DIA 기법을 고려할 때에도 몇 개의 조합을 고려하는가에 따라 계산시간이 더 소요될 수 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 이상적인 조건의 소규모 격자에서 실험을 수행할 경우 단일 PC를 사용하더라도 계산시간에는 거의 차이가 없었으며, Semi-exact 계산기법인 WRT 기법에 비해서는 월등히 빠

른 계산 속도를 나타냈다. WRT 기법에 의한 계산시간은 본 연구와 같이 단순한 실험에서도 다른 기법에 비해 몇 십 배 이상인 부분이 소요되었다. 실제 지형에서 파랑모델링을 수행할 경우 WRT 기법은 현업에 적용이 불가능한 수준의 계산시간이 필요하며, SRIAM 기법은 병렬연산을 활용한다면 현업에서 충분히 사용 가능할 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 제3세대 파랑모델의 저주파 파랑의 재현 정확도 향상을 위해 비선형 에너지 이송항을 효율적으로 계산할 수 있는 SRIAM 기법을 활용한 계산모듈을 개발하고, 이를 파랑모델에 접합하여 파랑의 비선형 상호작용을 효율적으로 고려할 수 있는 모델링 기법을 제안하였다. 이를 위해 비선형 에너지 이송항 계산에 음해법을 도입한 수치 알고리즘을 개발하였으며, 제3세대 파랑모델인 WAVEWATCHIII의 개발자 모듈을 활용하여 비선형 에너지 이송항 계산모듈을 접합하였다. 끝으로 접합된 파랑모델을 활용하여 비선형 상호작용에 의한 파랑 변형을 재현하고 개발된 계산모듈의 성능을 검증하였다. 검증결과 파랑모델에 접합된 SRIAM 기법을 활용할 경우 파랑모델이 비선형 에너지 이송항에 대한 스펙트럼 변화를 기존의 DIA 기법이나 GMD 기법에 비해 Semi-exact 계산기법인 WRT 기법에 준하는 정확도로 재현하였다. 또한, SRIAM 기법이 기존의 DIA 기법이나 GMD 기법에 비해 계산시간이 약간 더 소요되는 것으로 나타났으나 WRT 기법과 비교할 때 월등히 빠른 계산속도를 나타냈다. 본 연구를 통해 개발된 계산모듈은 동해 이상고파와 같은 장주기 파랑예측에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 조류와 해류 등의 바다의 흐름과 파랑의 상호작용 등의 해석에 적용이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 아직까지 실험역에 대한 적용이 미흡하여 이에 대한 추가 연구가 필요하며, 바다의 흐름과의 상호작용을 재현하기 위해서는 관련된 후속 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원(사업명: 해양과학국제연구사업, 과제번호: 20170265, 과제명: 극한 폭풍파 대응 연안 직립형 도시 구조물 취약성 함수 개발)의 지원과 기상청 연구개발 프로그램의 재원으로 한국기상산업진흥원(KMIPA 2015-1072)의 지원을 받아서 수행하였습니다. 또한, 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Goda, Y., 2003. Revisiting Wilson's Formulas for Simplified Wind-wave Prediction. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(2), 93-95.
- Hashimoto, N., Kawaguchi, K., 2001. Extension and Modification of the Discrete Interaction Approximation (DIA) for Computing

- Nonlinear Energy Transfer of Gravity Wave Spectra. Proceedings of the 4th ASCE International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, San Francisco USA, 530-539.
- Hashimoto, N., Haagsma, I.G., Holthuijsen, L.H., 2002. Four-wave Interactions in SWAN. Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Cardiff UK, 392-404.
- Hashimoto, N., Tsuruya, H., Nakagawa, Y., 1998. Numerical Computations of the Nonlinear Energy Transfer of Gravity-wave Spectra in Finite Water Depth. Coastal Engineering Journal, 40(1), 23-40.
- Hashimoto, N., Suciatty, F., Yamashiro, M., Yokota, M., Kodama, M., 2014. Numerical Study on Frequency Downshift of Gravity Wave Spectra in Deep and Intermediate Water Depths Due to Nonlinear Energy Transfer. Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Seoul Korea, 146-158.
- Hasselmann, D.E., Dunkel, M., Ewing, J.A., 1980. Directional Wave Spectra observed during JONSWAP 1973. Journal of Physical Oceanography, 10, 1264-1280.
- Hasselmann, K., 1962. On the Non-linear Energy Transfer in a Gravity-wave Spectrum: Part I. General Theory. Journal of Fluid Mechanics, 12, 481-500.
- Hasselmann, K., Hasselmann, S., 1981. A Symmetrical Method of Computing the Non-linear Transfer in a Gravity Wave Spectrum. Hamburger Geophysikalische Einzelschriften, Wittenborn.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1985a. The Wave Model EXACT-NL. Ocean Wave Modelling, The SWAMP group. Plenum Press, New York.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1985b. Computation and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravitywave Spectrum: Part I. A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral. Journal of Physical Oceanography, 15, 1369-1377.
- Komatsu, K., A. Masuda, 1996. A New Scheme of Nonlinear Energy Transfer among Wind Waves: RIAM Method - Algorithm and Performance, Journal of Oceanography, 52, 509-537.
- Komatsu, K. 1996. Development of a New Generation Wave Forecasting Model based on a New Scheme of Nonlinear Energy Transfer among Wind Waves, Dr. Thesis, University of Kyushu, 155.
- Lavrenov, I., 2003. Wind-waves in Oceans: Dynamics and Numerical Simulations. Springer.
- Masuda, A., 1980. Nonlinear Energy Transfer between Wind Waves. Journal of Physical Oceanography, 10, 2082-2093.
- Resio, D.T., Perrie, W., 1991. A Numerical Study of Nonlinear Energy Fluxes Due to Wave-wave Interactions. Part 1: Methodology and Basic Results, Journal of Fluid Mechanics, 223, 609-629.
- Tamura, H., Waseda, T., Miyazawa, Y., Komatsu, K., 2008. Current Induced Modulation of the Ocean Wave Spectrum and the Role of Nonlinear Energy Transfer, Journal of Physical Oceanography, 38, 2662-2684.
- Tolman, H.L., 2013. A Generalized Multiple Discrete Interaction Approximation for Resonant Four-wave Nonlinear Interactions in Wind Wave Models with Arbitrary Depth. Ocean Modelling, 70, 11-24.
- Van Vledder, G.P., 2006. The WRT Method for the Computation of Non-linear Four Wave Interactions in Discrete Spectral Wave Models. Coastal Engineering, 53, 223-242.
- Webb, D.J., 1978. Nonlinear Transfer between Sea Waves. Deep Sea Research, 25(3), 279-298.

# Mechanical Behavior of Polymer Foam Reinforced with Silica Aerogel

Jae-Hyeok Ahn\*, Jeong-Hyeon Kim\*, Jeong-Dae Kim\*, Sungkyun Park\*\*,  
Kang Hyun Park\*\*\* and Jae-Myung Lee\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

\*\*Department of Physics, Pusan National University, Busan, Korea

\*\*\*Department of Chemistry, Pusan National University, Busan, Korea

## 실리카 에어로겔을 첨가한 폴리머 폼의 기계적 특성

안재혁\* · 김정현\* · 김정대\* · 박성균\*\* · 박강현\*\*\* · 이제명\*

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*부산대학교 물리학과

\*\*\*부산대학교 화학과

**KEY WORDS:** Polyurethane foam 폴리우레탄 폼, Cryogenic 극저온, Mechanical properties 기계적 특성, Compression behavior 압축 거동, Silica aerogel 실리카 에어로겔

**ABSTRACT:** In the present study, silica-aerogel-polyurethane foams were synthesized to improve the mechanical characteristics and insulation performance of the polyurethane foam applied to a liquefied natural gas carrier at a cryogenic temperature of -163 °C. A silica-aerogel-polyurethane foam bulk was prepared using a homogenizer by varying the weight ratio of the silica aerogel (0, 1, 3, and 5 wt%), while maintaining the contents of the polyol, isocyanate, and blowing agent constant. Compression tests were performed at room and cryogenic temperatures to compare the mechanical properties of the silica-aerogel polyurethane foams. The internal temperature of the universal testing machine was maintained through the cryogenic chamber. The thermal conductivity of the silica-aerogel-polyurethane foam was measured using a heat flow meter to confirm the insulation performance. In addition, the effect of the silica aerogels on the cells of the polyurethane foam was investigated using FE-SEM and FTIR. From the experimental results, the 1 wt% silica aerogel polyurethane foam showed outstanding mechanical and thermal performances.

### 1. 서 론

최근 환경규제 강화로 친환경적 연료인 액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)의 수요가 증가함에 따라 액화천연가스 운반선의 수요가 증가하고 있다. 천연가스 혹은 액화천연가스를 운반하기 위해서는 연료저장탱크 내부의 온도를 유지시킬 수 있는 기술이 중요하며, 이를 효율적으로 달성하기 위해 단열성능이 우수한 재료를 사용하는 방법이 주로 채택되고 있다(Lee et al., 2016). 액화천연가스는 통상적으로 1.1bar의 압력과 -163°C의 극저온 환경에서 운반되며 이러한 점을 고려하였을 때 액화천연가스 운반선의 단열시스템 구조에 많이 사용되는 폴리우레탄 폼에 관한 연구가 다수 보고되었다(Lee et al., 2015). 일반적으로 폴리우레탄 폼은 소재의 우수성으로 인해 LNG 연료저장탱크 및 파이프 등 다양한 분야에 적용되는 대표적인 단열재로 알려져 있으며 무엇보다

다도 가격대비 성능이 우수하다는 장점이 있다 (Park et al., 2016b). 폴리우레탄 폼은 고분자 복합재료로서 다공성의 특징을 가지며 재료의 단열성능이 내부 기공의 크기 및 형태에 따라 좌우되기 때문에 폴리우레탄 폼의 성능 향상을 위한 연구가 계속해서 진행되고 있다(Modesti et al., 2007; Kim et al., 2016).

폴리우레탄 폼의 기계적 특성 및 단열성능 강화를 목적으로 한 연구 결과를 살펴보면 Han et al.(2010)은 유리섬유강화 폴리우레탄 폼의 반복충격시험을 통해 LNG 선박에 작용하는 슬로싱 하중을 견딜 수 있는 단열시스템에 대한 연구를 수행하였으며, Yang et al.(2013)은 실리카 에어로겔의 폴리우레탄 멤브레인에 적용하기 위한 공정 및 적용조건 특성에 대한 연구를 수행하였다. Lee et al.(2015)은 폴리우레탄 폼에 압축하중을 가하여 기계적 특성을 파악하고 밀도와 같은 기계적 성질에 큰 영향을 미치는 영향변수를 설정하여 구조해석에 필요한 항복강도와 탄

Received 16 August 2017, revised 26 August 2017, accepted 20 December 2017

Corresponding author Jae-Myung Lee: +82-51-510-2342, jaemlee@pusan.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성계수를 조사하고 재료 구성 방정식을 제안하였다. 또한 Park et al.(2016a) 은 폴리우레탄 폼에 첨가되는 발포제의 성분이 미치는 영향에 대해 조사하였으며 성분을 다르게 하여 유리섬유 강화 폴리우레탄 폼의 기계적 특성을 파악하는 연구를 수행하였다.

그러나 이러한 폴리우레탄 폼에 대한 많은 연구에도 불구하고 강도 및 단열성능 등에서 문제점들이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 폴리우레탄 폼의 단열성능을 더욱 높이고 기계적 강도 또한 강화할 수 있도록 실리카 에어로겔의 사용을 검토하였다. 실리카 에어로겔은 1931년 미국의 Kistler 박사에 의해 처음으로 만들어 졌다(Dorcheh and Abbasi, 2008). 이후, 1980년대에 상업적으로 이용되기 시작하였으며 2011년부터 상압 건조공법이 개발되어 가격이 하락하면서 여러 다양한 분야에 연구개발이 이루어지고 있다(Oh and Choi, 2009). 특징으로는 지구상에서 존재하는 가장 가벼운 고체로 알려져 있으며, 실리카를 기반으로 하는 초다공성 구조를 가지고 있다. 내부공간이 거의 비어 있는 상태로 열차단성과 흡음성이 우수하다. 이러한 장점 때문에 실리카 에어로겔에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 실리카 에어로겔을 폴리우레탄 폼에 적용한 연구는 드물며 특히 액화천연가스 운반선의 환경을 고려한 극저온 상태에서의 기계적 성능 평가는 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 상온 및 극저온에서의 압축시험을 통해 실리카 에어로겔을 첨가한 폴리우레탄 폼의 기계적 성능평가를 수행하여 기존의 폴리우레탄 폼과의 압축강도를 비교하였으며 실리카 에어로겔의 첨가량에 따른 단열성능을 평가하기 위해 열전도도를 측정하였다. 또한 FTIR 분석 및 SEM 촬영을 통해 폴리우레탄 폼과 실리카 에어로겔 사이의 결합을 파악하고 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼의 미세구조를 분석하여 폼의 셀 구조 안정성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

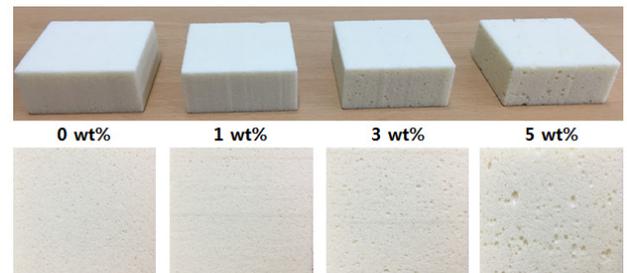
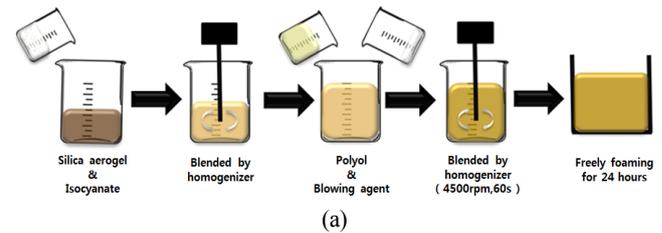
### 2.1 시험편 제조

본 연구에서 폴리우레탄 폼에 적용한 실리카 에어로겔(REM tech)의 재료물성치는 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 볼 수 있듯이 실리카 에어로겔은 90~99% 기공성을 가진 특수소재로 밀도가 낮고 열전도도가 약 0.02W/m·K이다. 실리카 에어로겔의 우수한 단열성능 때문에 항공우주산업 및 건축산업등 다양한 분야에서 널리 적용되고 있다(Kim et al., 2011; Park et al., 2013; Venkataraman et al., 2014).

폴리우레탄 폼을 제작하기 위해 폴리올(Polyol, Korea Polytech corporation), 이소시아네이트(polymeric MDI M20R, Korea Polytech corporation), 발포제(HFC-245fa, Korea Polytech corporation)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 폴리우레탄 폼은 Polyol, Polymeric MDI, HFC-245fa를 1000:1160:50의 비율로 고정하고 실리카 에어로겔을 첨가하여 Bulk형태의 시험편을 제작하였다. 첫 번째로 실리카 에어로겔을 균질하게 혼합하기 위해 호모제나이저를 이용하여 상대적으로 점도가 낮은 Polymeric MDI와 충분히 혼합시킨 후, 혼합용액에 Polyol과 HFC-245fa를 넣고 4500rpm에서 약 60초 동안 분산시켜 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼 용액을 만들었다.

**Table 1** Property of silica aerogel general data

Silica aerogel powder type general data	
Particle size range [ $\mu\text{m}$ ]	10~200
Pore diameter [nm]	20
Pore volume [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	2.2~2.5
Bulk density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	70~150
Surface chemistry	Hydrophobic
Thermal conductivity [W/m·K]	0.0018~0.02 at 25°C
Surface area [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	300~350
Porosity [%]	90~99



**Fig. 1** (a) Fabrication process of silica aerogel polyurethane foam and (b) surface of silica aerogel polyurethane foam.

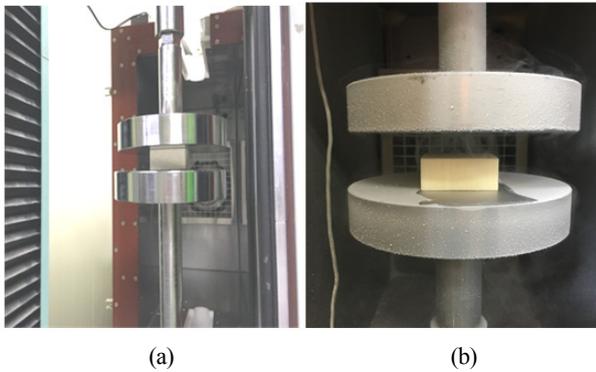
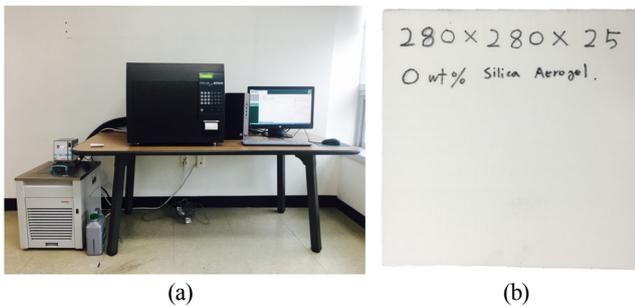
그 후 준비된 용액을 개방형 박스형태 틀에 붓고 상온에서 24시간 동안 자연발포를 거쳐 Bulk형태의 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼을 완성하였으며 Fig. 1 (a)에 제작 과정을 나타내었다. Bulk형태의 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼은 상온 및 극저온(-163°C) 압축시험을 수행하기 위해 50×50×25mm 크기로 가공하여 시험편을 제작하였으며 제작된 모든 시험편은 기계적 특성평가를 위해서 한국산업규격(KS M 3809)을 준수하여 제작하였다. Fig. 1 (b)는 가공된 압축 시험편의 형상으로 Silica aerogel을 0%, 1%, 3%, 5%의 중량비로 첨가한 재료의 측면부를 촬영한 사진이다.

### 2.2 특성 평가

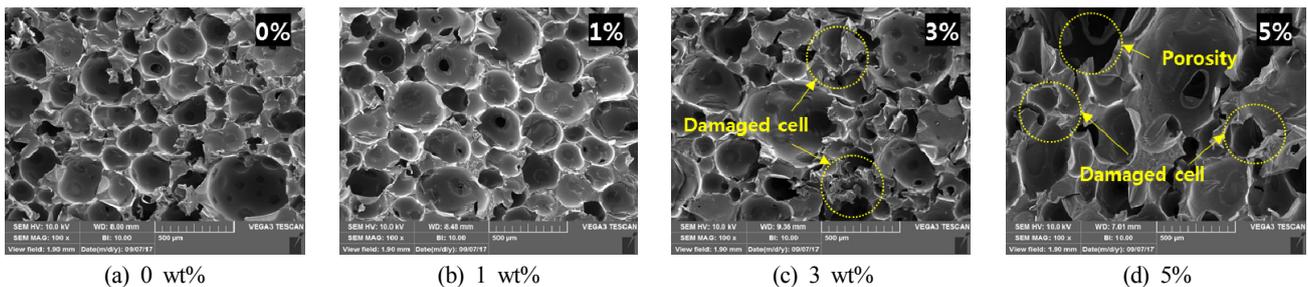
본 연구에서는 한국산업규격(KS M ISO844)을 준수하여 모든 압축시험을 진행하였으며 극저온 압축시험의 경우 내부온도에 대한 열평형을 고려하여 압축시험 챔버 내부의 온도를 -163°C로 고정하여 약 1시간 동안 극저온 압축시험 시험편을 예비냉각시킨 후 압축 시험을 진행하였다. Table 2는 본 연구의 압축시험 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 실리카 에어로겔과 이소시아네이트, 폴리올과 발포제를 균질하게 분산하기위해 호모

**Table 2** Compression test temperature condition of sample specimen

Temperature [°C]	Silica aerogel [wt%]			
20	0	1	3	5
-163	0	1	3	5

**Fig. 2** Photographs of compression test progress at (a) room temperature and (b) cryogenic temperature**Fig. 3** (a) Photographs of HFM(heat flow meter) and (b) thermal conductivity test specimen

게나이저(T50-digital ULTRA-TURRAX, IKA)를 사용하였다. 용액의 발포가 완료되고 가공된 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼의 시험편 셀 구조 및 형태분석을 위해서 주사전자현미경(FE-SEM SUPRA25, ZEISS)을 사용하여 미세구조를 관찰하였다. 또한 상온 및 극저온에서 압축시험을 수행하여 기계적 강도 평가를 하였으며 만능재료시험기(KSU-5M, 경성시험기(주))에 극저온용 챔버를 장착하여 사용하였다. 챔버 내부에 액체질소를 분사하고 자동 온도 조절장치를 이용하여 극저온 환경인 영하 163°C를 유지하며 압축시험을 진행하였다. Fig. 2 (a)는 상온 압축시험을 Fig. 2 (b)에서는 극저온 압축시험을 나타낸다.

**Fig. 4** Cell shape and structure of the silica aerogel polyurethane foam, depending on wt% of silica aerogel

본 연구에서는 실리카 에어로겔을 첨가한 폴리우레탄 폼의 단열성능을 확인하기 위해 열전도도를 측정하였다. 열전도도 측정을 위해 Heat flow meter(HFM, NETZSCH)를 사용하였고 Fig. 3은 HFM(Heat flow meter) 장비 사진을 나타낸다.

압축시험을 수행한 시험편과 동일한 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼의 Bulk에서 시료크기 280×280×25mm으로 열전도도 시험편을 가공하여 상온에서 열전도도 값을 측정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 미세구조 분석

실리카 에어로겔이 폴리우레탄 폼의 셀 형성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 주사현미경을 통해 관찰하였다. Fig. 4는 발포방향에 대한 폴리우레탄 폼의 샘플을 촬영한 것이다. 중량비가 비교적 낮은 경우에서 폴리우레탄 폼의 셀 크기가 일정하고 안정적이며 셀 형태도 단힌 형태를 보이는 것을 확인하였다. 중량비가 증가할수록 셀은 크기가 일정하지 않으며 셀 형태 또한 불규칙적이고 셀이 파괴되는 현상을 보였다. 그러나 중량비 증가에 따라서 비례적으로 셀 크기나 형태가 변화된다고 판단하기는 어렵지만 3wt%이상 실리카 에어로겔을 첨가하면 셀 구조 및 형태가 파괴됨을 확인할 수 있었다. Table 3은 FE-SEM을 통해 셀의 평균 크기를 측정한 결과를 나타낸다. 셀의 평균크기는 점차적으로 증가하지만 1wt%의 경우 최소 크기와 최대 크기의 차이가 크지 않고 셀의 형태 및 크기가 다른 중량비에 비해 일정한 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 1wt%에서의 단열성능 효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 셀의 크기가 작고 형태 및 분포가 균일할수록 단열성능이 향상되는데 0wt%와 1wt%에서 단열성능은 기존의 폴리우레탄 폼의 셀 사이에 있던 공기층보다 단열성능이 뛰어난 실리카 에어로겔이 사용되면서 열전달을 방해하며 셀의 크기 역시 기존의 폴리우레탄 폼보다 크기가 증가하여 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 3wt%와 5wt%에서는 미세구조를 확인한 결과 셀의 크기는 증가한 반면 셀이 파괴되거나 열이 전달될 수 있는 기공이 발생하여 단열성능이 저하된 것으로 보인다.

이는 과거 연구보고에 따르면 실리카 에어로겔 같은 초미세 입자는 일종의 충전제 역할을 하여 셀을 더 조밀하고 균일하게 구성하게 하지만 과량으로 첨가되었을 때 폴리우레탄 폼과의 분산성이 떨어지게 되고 결국 셀 형성에서 기존 폴리우레탄 폼의 셀보다 일정하고 단힌 형태의 셀을 형성하기 어렵게 된다는 보고가 있다(Park et al., 2016). 또 다른 연구에 의하면 셀 형성 시 첨가제의 양, 분산관계는 폴리우레탄 폼의 밀도에도 큰 영향

**Table 3** Cell size of silica aerogel polyurethane foam

Silica aerogel [wt%]	Average cell size [ $\mu\text{m}$ ]	Minimum cell size [ $\mu\text{m}$ ]	Maximum cell size [ $\mu\text{m}$ ]
0	124±59	30	360
1	175±59	80	353
3	198±74	70	520
5	207±91	75	574

을 미치고 특히 첨가제의 분산성이 좋지 못한 경우 전체적인 밀도가 일정하지 않거나 균일한 형태의 셀을 형성하기 어렵게 된다는 연구 보고가 있다(Dorcheh and Abbasi, 2008). 따라서 첨가제인 실리카 에어로겔의 중량비가 높아질수록 폴리우레탄 폼과의 분산성이 떨어져서 3wt%, 5wt%의 경우에서 셀이 파괴되거나 균일하지 않은 현상이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 열전도도

HFM을 통해 단열성능이 우수한 실리카 에어로겔을 첨가했을 때 중량비가 증가함에 따라서 열전도도는 높아지는 대신 기계적 성능은 약화될 것이라고 예상하였다. 그러나 실리카 에어로겔의 첨가량이 증가할수록 오히려 기존 폴리우레탄 폼의 열전도도보다 더 높은 열전도도를 보여 단열성능이 하락하였으며 Table 4에 측정된 열전도도 값을 표시하였다. 그러나 1wt%에서는 단열성능이 향상되어 첨가량에 따라서 비례적으로 단열성능이 향상되는 것이 아님을 확인할 수 있었고 실리카 에어로겔을 1wt% 첨가한 폴리우레탄 폼에서 가장 우수한 단열성능을 나타내었다. 이는 SEM 촬영을 통해 알 수 있듯이 중량비가 증가할수록 셀의 크기 및 형태가 균일하지 못하여 열전도도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.3 ATR-FTIR 분석

본 연구에서는 적외선을 통해 진동을 흡수하여 스펙트럼의 형

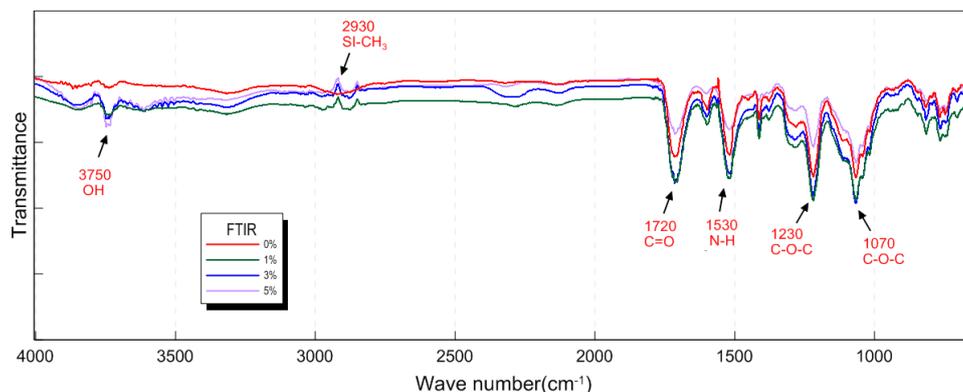
태로 나타내는 ATR-FTIR 분광법을 사용하여 재료의 배향 및 결정형태등 구조 변화를 확인하였다. Fig. 5에 실리카 에어로겔을 첨가한 폴리우레탄 폼의 FTIR 스펙트럼 결과를 표시하였다. 공통적으로 폴리우레탄 폼에 의해 나타난 Peak점은  $1720\text{cm}^{-1}$ ,  $1530\text{cm}^{-1}$ ,  $1230\text{cm}^{-1}$ ,  $1070\text{cm}^{-1}$ 으로 나타난다. 폴리우레탄 폼은 우레탄 결합(Urethane Bond)인 -OH 활성 수산기와 이소시아네이트에서의 -N=C=O인 이소시아네이트기(Isocyanate Group)가 반응하여 열을 발생시키면서 형성된다. 이 때 -NHCOO-의 구조를 가진 화합물을 생성시키는데, 1000 이상의 분자가 결합된 상태를 폴리우레탄 폼이라고 한다. FTIR 분석결과 공통적인 Peak점에서 폴리우레탄 결합의 형태를 볼 수 있다. 먼저  $1720\text{cm}^{-1}$ 에서는 C=O stretching vibrations,  $1530\text{cm}^{-1}$ 에서는 N-H bending vibrations,  $1230\text{cm}^{-1}$ 은 C-O-C stretching vibrations 의 Peak를 확인할 수 있었고  $1070\text{cm}^{-1}$ 에서는 C-O-C antisymmetric stretching vibrations을 나타내었다. 실리카 에어로겔을 첨가한 1wt%와 3wt%에서는 공통적으로 나타난 Peak의 형태 및 길이가 증가하다가 5wt% 이상이 되면 감소하는 것을 확인하였다. 또한 0wt%와 비교하였을 때  $3750\text{cm}^{-1}$ 에서의 -OH stretching vibrations의 Peak의 길이가 0wt%보다 더 크게 나타났고 실리카 에어로겔의 주성분인  $\text{SiO}_2$  성분으로 인한 Peak점은  $2930\text{cm}^{-1}$ 에서 Si-CH<sub>3</sub> 결합을 통해 차이를 확인할 수 있었다.

### 3.4 압축시험 결과

압축시험을 통해 응력-변형률 관계에 대한 실험의 신뢰성 및

**Table 4** Thermal conductivity of silica aerogel polyurethane foam at a temperature of 20°C

Temperature [°C]	Silica aerogel [wt%]	Thermal conductivity [W/m·K]	density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
20	0	0.03020	140.31
	1	0.02676	167.79
	3	0.03109	153.51
	5	0.03414	130.84

**Fig. 5** ATR-FTIR peak analysis of silica aerogel polyurethane foams

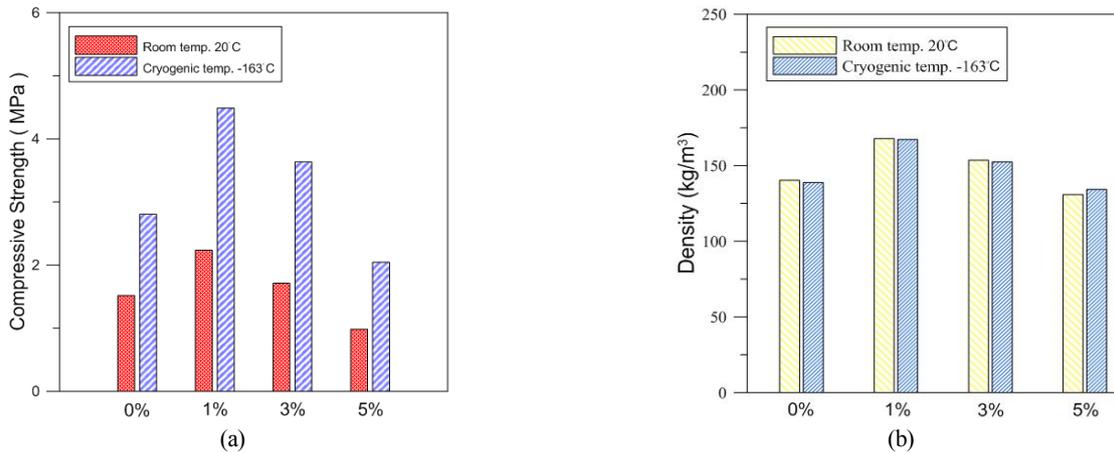


Fig. 6 (a) Compressive strength of silica aerogel PUF, (b) density of silica aerogel PUF comparisons

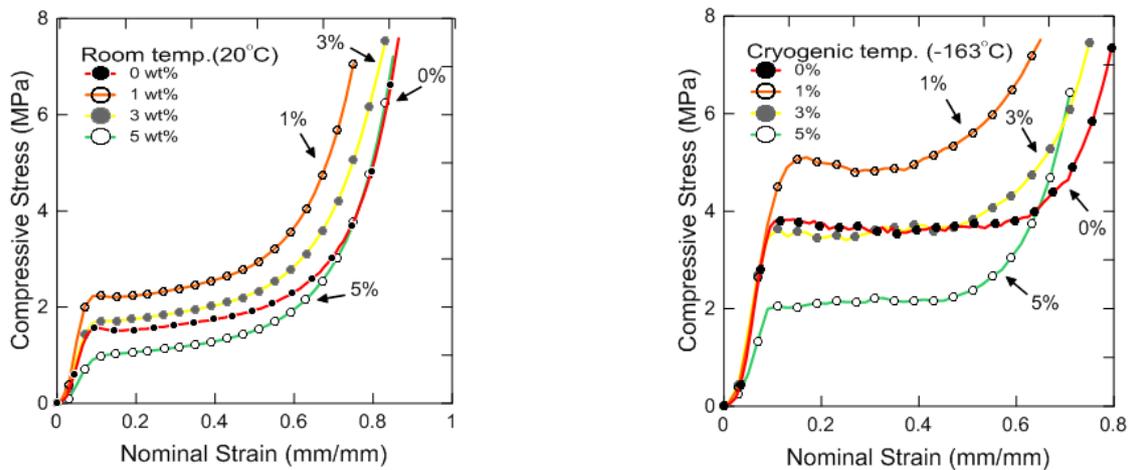


Fig. 7 Compression test results of silica aerogel polyurethane foam under the identical conditions

재현성을 확보하기 위해서 동일한 압축시험 조건 당 총 4번의 반복시험을 통해 평균에 가장 근접한 데이터를 해당 조건의 대표값으로 결정하였다. Table 4는 해당 조건의 대표값에 대한 압축시험 결과 및 해당 시험편의 밀도를 나타낸다. 중량비와 온도에 대한 압축강도의 경향성을 파악하기 위해 Fig. 6 (a)에 경향성을 나타내는 그래프를 표시하였다. 또한 재료의 밀도를 고려하기 위해서 Fig. 6 (b)에 중량비 별 밀도를 표시하였다. 경향성을 살펴보면 1wt%를 기준으로 모두 압축강도가 감소하는 경향을 보였으며 밀도 또한 압축강도와 유사한 경향을 보였다. Fig. 7은 상온과 극저온에서 압축강도를 비교하기 위해서 각 시험편의 밀도를 고려하여 중량비에 따라 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 상온 및 극저온에서 기존 폴리우레탄 폼인 0wt%보다 1wt%가 모두 압축강도가 높은 결과를 보였다. 1wt%의 경우 0wt% 대비 상온에서 63.997%, 극저온에서 37.454% 증가하는 것을 알 수 있었다.

그러나 1wt%에서는 압축강도가 증가하는 반면 3wt%와 5wt%에서는 압축강도가 오히려 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 과거 연구를 보면 실리카 에어로겔 첨가제는 폴리우레탄 폼의 핵생성제 역할을 수행하여 균일한 셀을 형성시키고 셀의 양을 증가시키는 역할을 하지만 3wt% 이상으로 과도하게 첨가되게 되면 용액의 점도가 높아져 분산을 어렵게하고 균질한 셀 형성을 방해

한다. 이를 통해 3wt%와 5wt%에서는 폴리우레탄 폼과의 분산관계가 악화되어 셀이 붕괴되는 현상이 더욱 심해져 강도가 감소하는 것으로 사료된다(Nazeran and Moghaddas, 2017; Zhao et al., 2015).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실리카 에어로겔이 폴리우레탄 폼의 기계적, 단열성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 중량비에 따른 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼을 제작 및 합성하여 압축시험을 통해 재료의 거동을 파악하였으며 미세구조를 파악하기 위해 FE-SEM 촬영을 통해 셀 구조를 확인하였다. 본 연구의 주요 결과는 아래에 요약되었다.

(1) 실리카 에어로겔을 첨가한 폴리우레탄 폼을 기존 폴리우레탄 폼인 0wt%를 포함하여 1wt%, 3wt%, 5wt%까지 실리카 에어로겔 폴리우레탄 폼을 제작한 결과, 1wt%에서의 압축강도가 상온에서 2.2354Mpa, 극저온에서 4.4884Mpa 로 가장 높은 기계적 거동을 보였다.

(2) 실리카 에어로겔을 1wt% 첨가했을 때, 다른 구조에 비해 안정적이고 균질한 셀 구조를 보이며 셀 모양 또한 상대적으로

일정하고 닫힌 형태로 존재하였다. 그러나 1wt%이상으로 실리카 에어로겔을 첨가한 경우 폴리우레탄 폼 용액과의 분산성이 감소하여 온전한 셀 형태를 유지하지 못하고 셀이 파괴되거나 크기가 균일하지 않게 되는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 실리카 에어로겔의 첨가량에 따라 비례적으로 열전도도가 감소하는 것이 아님을 확인할 수 있었고 오히려 첨가량이 많아 질수록 단열성능이 감소하는 현상을 보였다. 그러나 1wt%에서는 단열성능이 향상되어 이를 통해 1wt% 이하의 실리카 에어로겔 첨가는 기존 폴리우레탄 폼의 단열성능을 향상시킴을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

- Dorcheh, A.S., Abbasi, M.H., 2008. Silica Aerogel; Synthesis, Properties and Characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1), 10-26.
- Han, D.S., Park, I.B., Kim, M.H., Noh, B.J., Kim, W.S., Lee, J.M., 2010. The Effects of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Behavior of Polyurethane Foam. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(1), 263-266.
- Kim, S.K., Kim, J.H., Lee, J.H., Park, S.B., Lee, J.M., 2016. Comparative Study on Mechanical Behavior after Deformation Recovery of Polymeric Foam for Ships and Offshore Structures. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(3), 195-200.
- Kim, N.H., Hwang, H.S., Park, I., 2011. Facile Preparation of Nanoporous Silica Aerogel Granules. *Applied Chemistry for Engineering*, 22(2), 209-213.
- Lee, J.H., Kim, S.K., Lee, J.M., 2016. Temperature-Dependent Viscoplastic-Damage Constitutive Model for Nonlinear Compressive Behavior of Polyurethane Foam. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 29(5), 437-445.
- Lee, J.H., Park, S.B., Kim, S.K., Bang, C.S., Lee, J.M., 2015. Modified Gurson Model to Describe Non-linear Compressive Behavior of Polyurethane Foam with Considering Density Effect. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 28(5), 543-551.
- Modesti, M., Lorenzetti, A., Besco, S., 2007. Influence of Nanofillers on Thermal Insulating Properties of Polyurethane Nanocomposites Foams. *Polymer Engineering & Science*, 47(9), 1351-1358.
- Nazeran, N., Moghaddas, J., 2017. Synthesis and Characterization of Silica Aerogel Reinforced Rigid Polyurethane Foam for Thermal Insulation Application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 461(1), 1-1.
- Oh, K.W., Choi, H.W., 2009. Acoustic Characteristics of Ultra-porous Aerogel/Fiber Composite Materials. *Textile Science and Engineering*, 46(1), 48-54.
- Park, S.B., Lee, C.S., Choi, S.W., Kim, J.H., Bang, C.S., Lee, J.M., 2016a. Polymeric Foams for Cryogenic Temperature Application: Temperature Range for Non-Recovery and Brittle-Fracture of Microstructure. *Composite Structures*, 136, 258-269.
- Park, S.B., Choi, S.W., Kim, J.H., Bang, C.S., Lee, J.M., 2016b. Effect of the Blowing Agent on the Low-Temperature Mechanical Properties of CO<sub>2</sub>- and HFC-245fa-Blown glass-Fiber-Reinforced Polyurethane Foams. *Composites Part B*, 93, 317-327.
- Park, K.W., Lee, Y., Yoon, J.K., Koo, K.W., 2013. A Study on Physical Characteristics of Silica Aerogel/Polymer Composite Materials. *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 62(9), 1318-1323.
- Venkataraman, M., Mishra, R., Militky, J., Hes, L., 2014. Aerogel Based Nanoporous Fibrous Materials for Thermal Insulation. *Fibers and Polymers*, 15(7), 1444-1449.
- Yang, J.H., Yoon, S.H., Jeong, C.H., Min, M.H., Kim, T.K., 2013. Application Properties of Ultra Light Weight Silica Aerogel to Polyurethane Membrane. *Textile Coloration and Finishing*, 25(4), 279-286.
- Zhao, C., Yan, Y., Hu, Z., Li, L., Fan, X., 2015. Preparation and Characterization of Granular Silica Aerogel/Polyiso Cyanurate Rigid Foam Composites. *Construction and Building Materials*, 93(15), 309-316.

# Research on Arrangement Design for Sailing Yacht Winch using 3D Human Simulation

Yeun-Hee Song\*, Dong-Joon Kim\*, Seong Rok Chang\*\*, Yujeong Lee\*\* and Kyong-Cheol Min\*\*\*

\*Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*\*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Koje College

## 3D 휴먼 시뮬레이션을 통한 세일링 요트 윈치 배치 설계 연구

송연희\* · 김동준\* · 장성록\*\* · 이유정\*\* · 민경철\*\*\*

\*부경대학교 조선해양시스템공학과

\*\*부경대학교 안전공학과

\*\*\*거제대학교 조선해양공학과

**KEY WORDS:** Arrangement design 배치설계, 3D human simulation 3D 휴먼 시뮬레이션, Sailing yacht 세일링 요트, Winch arrangement 윈치 배치, Grinder 그라인더

**ABSTRACT:** Unlike other leisure boats, a sailing yacht is propelled by wind power using sails that are controlled by the crew. Therefore, the ergonomic design of the equipment that the crew has to operate for sailing might be very important. However, it is difficult to find design rules and regulations for the equipment arrangement of a sailing yacht based on ergonomics. In this study, the arrangement design for the height and side plate angle of a winch for a sailing yacht was examined from an ergonomic design point of view. In a simulation, a Korean male in his 20s was selected as a human model for a grinder. The physical load was analyzed when he was operating a winch using a 3D human simulation. The lower back load showed the highest value when using the grinder at 90° and 180°. Based on the results for the lower back load when using the grinder with various winch heights, it is suggested that the winch height from the cockpit floor to the top of the winch should be more than 40% of the height of the human operator. In addition, according to the results for the lower back load with various horizontal distances from the body, it is suggested that the side plate angle should be less than 16°.

### 1. 서 론

최근 국내에서는 해양수산부장관배 국제요트대회 및 새만금 국제요트대회 등 다양한 요트대회가 개최되고 있으며, 2015년 해양수산부에서 해양신사업 육성과 일자리 창출을 위한 ‘마리나산업 전략적 육성대책’을 발표하면서 요트에 대한 관심이 높아지고 있다(Kim et al, 2016). 해양레저장비 중 선박으로 분류되는 것은 크게 동력으로 추진하는 파워보트와 바람의 힘으로 추진하는 세일 요트로 나누어진다. 이 중에서 국내에서 진행된 세일 요트에 관한 연구 현황을 살펴보면 주로 조선공학적인 해석을 다루고 있다. 관련 연구로 Ji et al.(2010)은 세일링 요트의 구조적 안전성평가에 대한 연구로 유한요소해석을 통하여 안정성 평가를 수행하였고, Shin et al.(2006)은 해양레저 선박으로서 소

형 요트의 기본구조설계 및 구조해석 기법을 제시하였다.

한편, 일반적으로 레저보트 대부분의 공간이 협소하여 인간공학적인 배치 및 사용을 위한 연구가 필수적이라 판단된다. 하지만 세일링 요트와 관련된 설계 규정에 인간공학적인 고려가 일부 언급되고 있으나, 침실 및 생활공간에 대한 고려일 뿐 윈치 등 리깅류에 대한 인간공학적인 설계기준이 적용된 사례는 찾아보기 어렵고, 이에 대한 인간공학적인 연구 또한 드문 편이다.

Kim et al.(2013a)은 세일링 요트 운항 시 발생하는 크루(Crew)의 이동 동선을 분석하고 각각의 주요 임무에서 발생하는 자세들을 분석하여 해당 자세의 위험성에 대한 기초연구를 수행하였다. 또한, Kim et al.(2013b)은 수치 휴먼 모델링(Digital human modeling)의 인간공학적인 분석기법을 이용하여 세일링 요트 운항 시 발생하는 작업 자세를 크게 7가지로 분류 하고, 전문가와

Received 25 January 2017, revised 31 January 2017, accepted 18 December 2017

Corresponding author Dong-Joon Kim: +82-51-629-6614, djkim@pknu.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

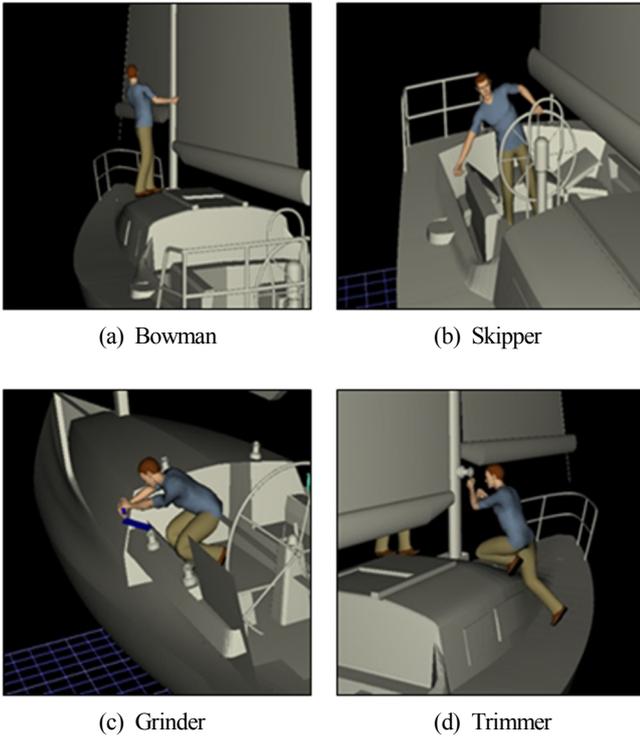


Fig. 1 Human modeling of working posture of crews (Kim et al. 2013b)

의 인터뷰를 바탕으로 각 크루가 가장 많이 취하는 자세를 4가지로 축소하였다. 4가지 자세로는 Fig. 1에서와 같이 바우맨의 전방주시, 스킵퍼의 휠조종, 그라인더의 윈치조종, 트리머의 돛개양을 선택하였다. 수치 휴먼 모델링을 이용하여 평가한 결과 4명의 크루 중 트리머와 그라인더가 활동 범위가 넓고 작업 자세 위험성이 높은 것을 알 수 있었다.

또한, Kim et al.(2013b)의 결과에 따르면 트리머와 그라인더 임무 중에서도 그라인더의 작업이 세일링 작업 시 일반적으로 가장 빈번히 발생하고 짧은 시간 내에 큰 힘을 요하기 때문에 트리머 보다 작업위험성이 더 높다고 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 그라인더의 작업에 대하여 집중적으로 연구하였다.

본 논문에서는 세일링 요트 윈치 배치 설계 기준에 대한 연구로써, 인간공학적 분석기법을 활용하여 윈치 배치에 따른 그라인더의 신체부하를 측정하고 윈치의 적합한 위치를 제안하고자 한다. 인체 모델링 프로그램으로는 3D 휴먼시뮬레이션 프로그램인 Jack(Siemens, 2003)을 이용하였다. 이를 통해 윈치 배치 변화에 따른 그라인더의 허리 부하를 측정하고 분석하여 무리한 부하가 걸리지 않도록 윈치의 최적 배치 범위를 찾고자 하였다.

## 2. 휴먼 모델링과 허리부하 경향 분석

### 2.1 휴먼 모델링

그라인더의 작업을 시뮬레이션하기 위해서는 먼저 휴먼 모델링이 필요하다. 본 연구에서 휴먼 모델은 사이즈코리아 사이트(sizekorea.kats.go.kr)의 20대 남성 표준 사이즈를 기준으로 하여, 전체 사이즈 중 5%ile, 50%ile, 95%ile에 해당하는 그룹의 평균

Table 1 Size of human model

Human	Height[cm]	Weight[kg]
5%ile	165	63
50%ile	175.49	77.69
95%ile	191.00	108

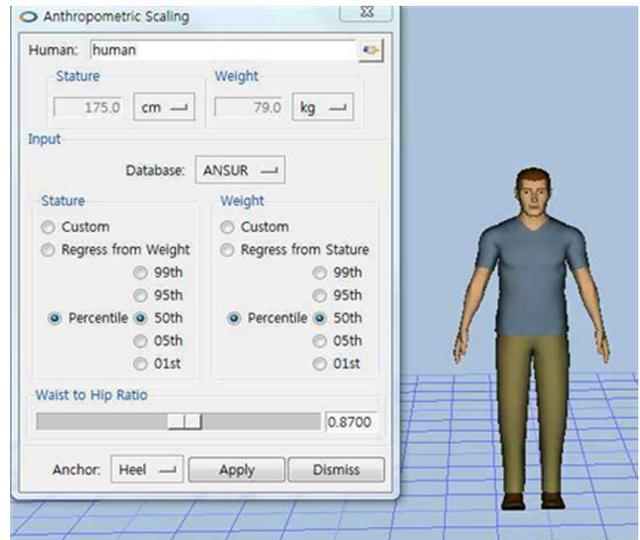


Fig. 2 Human model

사이즈를 이용하였다. 여기서 ile은 Percentile을 나타내는 단위로, 계측치를 작은 쪽에서부터 세어 몇 %째의 값이 어느 정도 인지를 나타내는 통계적 표시이다. 즉, 5%ile은 작업자를 큰 순서로 정렬했을 때 작은 쪽에서 5%에 속하는 크기를 의미하며, 키는 165cm, 몸무게는 63kg에 해당된다. 5%ile, 50%ile, 95%ile에 해당하는 신체 사이즈는 Table 1과 같이 결정하였다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 위해 Jack 프로그램을 이용하였다. Jack 프로그램은 설계에 가상인력을 포함시키고 인적 요인 및 인체공학 해석을 수행할 수 있는 휴먼 시뮬레이션 도구로 인간공학 연구에서 널리 사용되고 있다. Table 1에 나타나 있는 모델을 Jack 프로그램을 이용하여 Fig. 2와 같이 Human 모델을 생성하였다.

### 2.2 그라인더의 작업각도에 따른 허리부하 경향 분석

그라인더의 윈치 작업에서 최대 허리부하가 걸리는 각도를 파악하기 위하여, Fig. 3과 같이 윈치 작업 각도를 0°, 90°, 180°로 구분하여 허리부하를 측정하였다. 0°, 90°, 180°의 세 가지 각도를 택한 것은 한 바퀴 윈치를 회전시키는 동안 부하가 변화하는 대표적인 각도로 판단하여 선정하였다. 그리고 허리부하는 NIOSH(National institute of occupational safety & health, 미국 국립산업안전보건연구원) Lifting equation과 동일한 기준을 적용하기 위하여 L5(요추5번)를 중심으로 해석하였다.

또한, 각도 별 윈치 높이에 따른 허리부하에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 윈치 높이를 대상 선박의 높이 기준으로 10%씩 이동하여 분석하였다. 아울러 신장에 따른 허리부하의 경향을 알아보기 위하여 앞서 설정한 휴먼 모델링 3그룹에 대하여

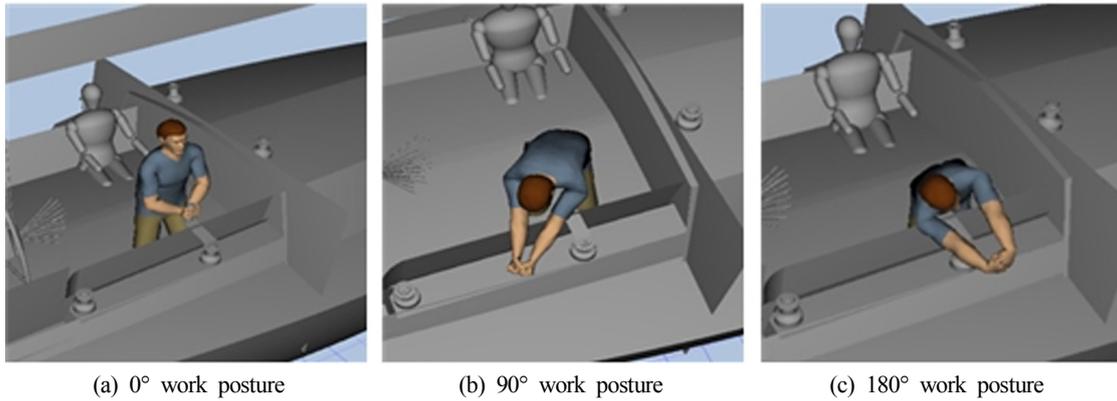


Fig. 3 Work posture by winch degree of grinder

상기 연구를 수행하였다.

시뮬레이션을 통해 측정된 허리부하 결과는 Table 2와 Fig. 4와 같다. 여기서 허리부하의 값은 힘 단위를 갖는다. Upper 10%와 Under 10%는 Deck 높이를 10%씩 상·하로 이동시킨 것을 의미하며, 그에 따른 윈치 높이의 변화는 기준 높이에서 10%씩 감소·증가시킨 것을 의미한다. 즉, 데크(Deck) 높이가 Upper 10%일 경우, 윈치 높이는 10% 감소한다.

Fig. 4에 따르면 작업 각도별로는 신장과 무관하게 0°보다 90° 및 180°에서 허리부하가 크게 나타남을 알 수 있었다. 허리부하 절대값의 차이는 있지만 모든 그룹의 그래프에서 윈치 작업각

도가 90°와 180°일 경우 0°에 비해 큰 부하가 걸리는 경향이 있음을 알 수 있었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 90°의 경우 비대칭 작업과 허리굽힘으로 인한 허리 회전, 180°의 경우 허리가 더 많이 굽어진 것이 허리부하에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

그라인더의 신장에 따른 허리부하는 작업각도와 무관하게 전체적으로 증가하였다. 하지만 5%ile와 50%ile 사이에서 변화는 크지 않으나, 50%ile에서 95%ile 사이에서는 크게 증가하였다. 이는 윈치의 기준위치가 고정되어 있으므로 신장이 커질 때 상대적으로 윈치 높이는 낮아지게 된다. 따라서 신장의 변화 보다는 윈치의 상대적 높이변화가 작업 시 허리부하에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

윈치 높이의 변화에 따른 허리부하는 5%ile의 경우 작업각도 0°에서 기준높이와 Under 10%보다 Upper 10%일 경우 높게 나오고, 50%ile의 경우 유사한 경향을 보이나 절대 값의 차이는 줄어들었다. 95%ile의 경우 작업각도 0°에서 두 그룹과는 달리 기준높이의 값이 Upper 10%와 같이 Under 10%보다 높게 나왔다. 여기서도 윈치의 상대적 높이가 어느 범위 이하의 값이 되면 0°작업에서도 허리부하가 증가되는 것을 알 수 있었다.

Table 2 Low back compression force(N) on grinder working by human model size and winch handle position

Human	Winch height	Position of winch handle		
		0°	90°	180°
5%ile	upper 10%	1,357	1,539	1,480
	base H.	1,002	1,549	1,580
	under 10%	892	1,407	1,502
50%ile	upper 10%	1,724	1,957	1,871
	base H.	1,451	1,929	1,994
	under 10%	1,419	1,841	1,871
95%ile	upper 10%	2,445	2,564	2,444
	base H.	2,361	2,618	2,593
	under 10%	2,060	2,485	2,470

### 3. 윈치 높이 및 거리변화에 따른 허리부하 분석

#### 3.1 윈치 높이 변화에 따른 허리부하 분석

앞의 결과에 따르면 상대적 윈치 높이 변화에 따라서 허리부하가 달라지는 것을 알 수 있었다. 따라서 윈치 높이를 50mm씩 상·하로 변화를 주어 윈치 제어 작업 시 허리부하를 분석하였

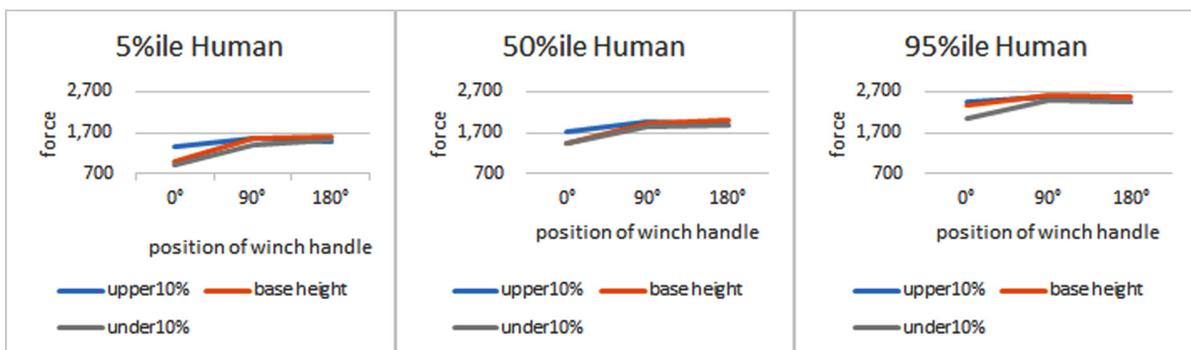


Fig. 4 Trend analysis of load on each human model

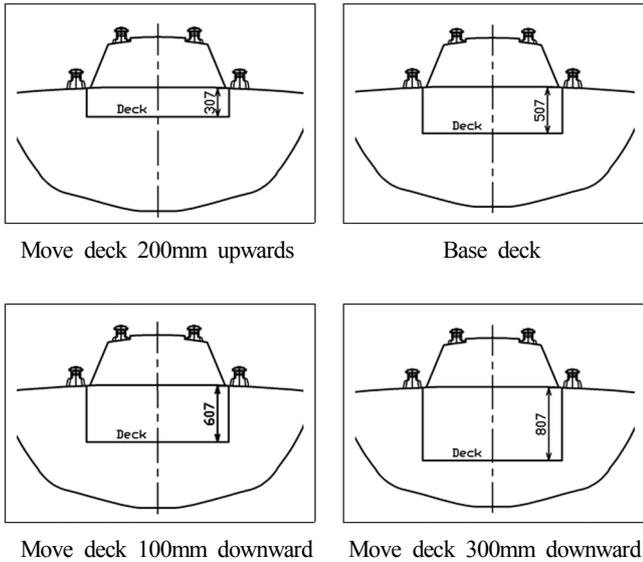


Fig. 5 Cases of deck height

다. 이를 위하여 윈치 작업 각도는 큰 부하가 걸리는 것으로 판단되는 90°로 고정하고, 윈치 작업자는 평균(50%) 체형으로 선택하여 시뮬레이션을 수행하였다.

윈치 높이 변화에 따른 허리부하 분석 시뮬레이션의 조건은 다음과 같다.

- ▶ 50%ile 인체모델로 고정
- ▶ 윈치작업 위치를 90°로 고정
- ▶ Fig. 5과 같이 윈치 높이는 50mm씩 상하로 변화
- ▶ 윈치높이(%)는  $\frac{\text{윈치 T 높이}}{\text{표준체형작업자의키}(175\text{cm})}$ 로 계산하였다.
- ▶ 윈치 T 높이는 선체 데크에서 윈치상부까지 측정된 높이

Fig. 6은 Jack 프로그램을 이용하여 윈치 작업 시 크루에 걸리는 허리부하를 측정하는 예이다.

윈치 높이 변화에 따른 허리부하를 측정한 결과를 종합하면 Table 3과 Fig. 7과 같다. 175cm 신장의 작업자를 기준으로 바닥에서부터 윈치 높이가 65cm(37.1%)이하일 경우 허리부하가 1600N보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었고, 윈치 높이 87.5cm (50%)이상에서는 허리 부하가 급격하게 줄어드는 경향을 알 수 있었다.

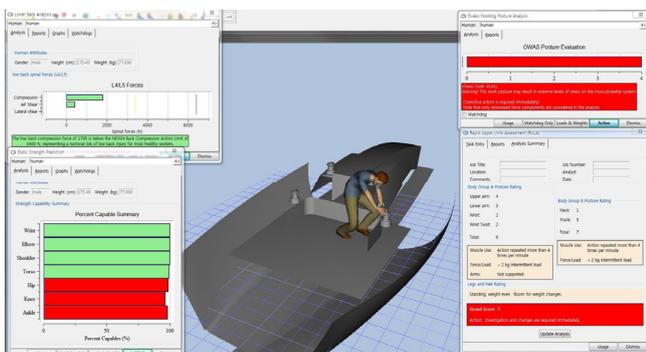


Fig. 6 Analysis of work posture by 3D human simulation program according to changing deck height

Table 3 Alteration of low back compression force by deck height change

Winch height[%]	Low back force[N]
28.6	1795
31.4	1742
34.3	1733
37.1	1610
40.0	1575
42.9	1560
45.7	1396
48.6	1525
51.4	1380
54.3	1109
57.1	1049
60.0	948
62.9	675

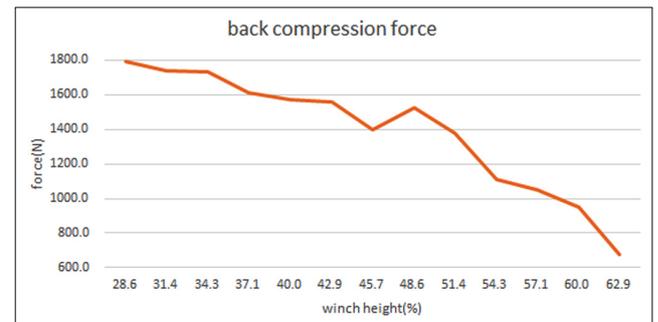


Fig. 7 Alteration of low back compression force by deck height change

윈치 높이에 따른 허리부하의 위험성을 판단하는 정확한 평가기준을 찾고자 하였으나, 직접적으로 적용할 만한 것을 찾기 어려웠다. 한편, NIOSH lifting equation(들기작업지침)에 따르면 들기 작업을 할 때 요추(L5/S1)디스크에 650kg 이상의 생체역학적 부하가 부과되는 작업은 작업자에게 매우 위험하며, 또한 이를 초과하면 대부분의 사람 허리에 무리가 가해지게 되는 안전작업하중으로는 생체역학적 부하 350kg(3400N)이하로 명시되어 있다(Jäger and Luttmann, 1999). 본 연구의 그라인더 윈치조작은 들기 작업과는 다르나 유사한 자세를 취하기 때문에 이 기준을 고려하였다.

이 기준은 작업의 반복 횟수, 작업 시간 및 작업 형태에 따라 안전작업하중이 감소할 수 있다. 반복 횟수에 관한 감소기준에 대한 연구로는 Chaffin 등이 저술한 Occupational biomechanics (Chaffin et al., 1999)이 있으며, 직업적으로 10회 이상 반복 작업의 경우 안전작업하중의 30%이하로 적용하는 것을 권고하고 있다. 또한 반복 횟수와 시간에 관한 감소기준에 대한 연구로는 Garg(1976) 및 Snook and Ciriello(1991)이 있다. 이 연구에 따르면 에너지 소모량을 고려하여 2시간 이상 작업일 경우 분당 3회의 작업 시 작업 허용량은 적정 작업량의 55% 정도이며, 분당 4회의 작업 시는 45% 정도임을 밝혔다. 그리고 작업 형태에

관한 감소기준에는 Snook(1978)의 연구에 의하면, 비대칭 작업의 경우 30°경사 시 약 90%로 경감한 하중을 적용하는 것을 권고하고 있다.

요트 항해 시 방향을 전환하거나 최적의 세일 형상으로 수정하기 위해 세일트림(Sail trim)을 할 때 주로 원치작업을 하며, 최악의 기상 상황 이거나 레이싱을 수행할 경우 방향전환 및 세일트림은 빈번히 일어난다. 원치작업은 원치를 회전시키기 위하여 허리를 굽히고 팔을 이용하여 원치 핸들을 회전시키는 작업을 의미하며, 이러한 원치 작업의 반복횟수와 시간에 대한 기준을 찾기 위해 작업환경을 가정하였다. 통상적으로 요트는 2시간 이상의 항해를 하며, 극한의 기상 상황 및 레이싱 등을 가정할 때 시간당 최대 15세트 정도의 원치작업을 수행하게 된다.

원치작업 시 숙련자의 경우 적절한 순간에 짧은 시간동안 수행하므로 보통 한 세트에 5~7회 회전시키는 작업을 하며, 초보자의 경우 경험이 많지 않기 때문에 한 세트에 최대 20회까지 회전을 하게 된다. 따라서 그라인더의 원치작업을 한 세트에 최대 14~15회 회전시키는 작업으로 가정한다. 여기서 원치작업은 회전시키는 연속 작업이나 본 연구에서는 1회 회전작업 당 허리굽힘자세를 1회 취하는 것으로 간주하였다.

따라서 원치작업은 평균 14~15회 회전작업을 15세트 정도 수행하므로 한 시간당 최대 210~225회의 허리굽힘자세를 취하는 것으로 가정하였고, 이는 1분당 3.5~3.7회의 작업 횟수를 가지게 된다. 작업시간과 횟수 기준인 Garg(1976) 및 Snook and Ciriello (1991)의 결과를 적용하면 작업 허용량은 안전작업하중의 약 50%이다.

또한 원치 손잡이가 그라인더의 신체를 기준으로 90°와 270°의 위치일 경우 비대칭 작업이 발생한다. 이작업시 허리가 30° 정도 비틀어져있다고 가정할 때, Snook(1978)의 결과에 따라 안전작업하중은 10% 경감하여야한다.

최종적으로 반복횟수, 시간 그리고 작업형태를 고려 할 때 가정된 극한상황에서의 요트 항해 시 경감된 안전작업하중비율은 약 45%이다. 따라서 안전작업하중 3400N의 45% 인 1530N 이하의 허리부하가 적당하다고 판단된다. 그러므로 Table 3 으로부터 적절한 원치 위치는 175cm 신장의 작업자를 기준으로 하였을 때 바닥으로부터 원치 윗면까지 높이는 40% 이상이 적당하다고 판단되며, 이것을 실제 거리로 환산 할 경우 바닥으로부터 약 70cm이다.

3.2 원치와 작업자간의 거리 변화에 따른 허리부하 분석

원치와 작업자간의 거리가 허리 부하에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원치 높이를 고정하고 원치가 위치한 선측 벽면을 Fig. 8과 같이 선측외판으로 각도를 변화시켰다. 이에 따라 원치의 위치 또한 선측 외판 각도에 따라서 초기위치보다 선측외판 쪽으로 멀어지게 된다. 원치 작업자의 신장을 평균(50%) 체형으로 고정하고 원치 위치 90°에서 작업자 허리부하를 분석하였다.

원치와 작업자간의 거리 변화에 따른 허리부하 분석 시뮬레이션의 조건은 다음과 같다.

- ▶ 50%ile 인체모델 고정
- ▶ 원치작업 위치를 90°로 고정
- ▶ 원치 높이는 40% 근처로 고정
- ▶ 선측각도는 선체 외판으로 벌어지는 각도를 측정(0°~ 20°)

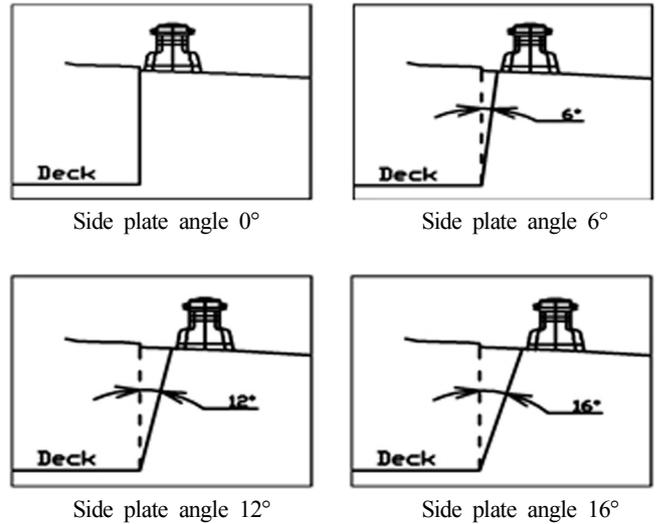


Fig. 8 Degree change of side plate

- ▶ 선측이 기울어짐에 따라 원치 위치도 선측 외판 쪽으로 이동
- ▶ 선체의 경사는 고려하지 않음

시뮬레이션을 통하여 선측각도 변화에 따른 결과를 종합하면 Table 4와 Fig. 9와 같다.

Fig. 9의 그래프 경향을 살펴보았을 때 0°에서 10°까지는 완만

Table 4 Alteration of low back compression force by change of side plate degree

Degree[°]	Low back force[N]
0°	1575
2°	1569
4°	1560
6°	1559
8°	1546
10°	1540
12°	1484
16°	1567
20°	1664

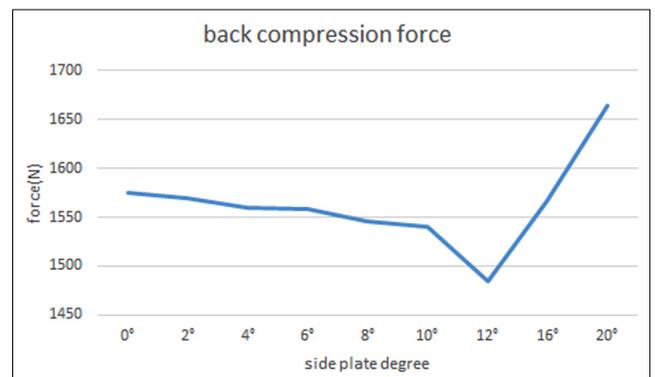


Fig. 9 Alteration of low back compression force by change of side plate degree

한 기울기로 허리부하가 줄어드나 12°이후에는 각도 변화에 따른 허리부하가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 12°근처가 최적 위치라고 판단된다. 또한 선측각도 16°이상일 경우 작업자 허리부하가 급격하게 증가할 것으로 예상되어, 이상의 선측각도는 곤란하다고 판단된다. 각도까지 위치를 실제 거리로 환산 할 경우 12°경우는 약 22cm이며, 16°경우 약 26cm이다. 이는 생체역학이나 심물리학적 연구에서 제시된 결과인 작업 시 작업자와 물체 사이 최적거리 25cm와 거의 일치하는 것으로 나타났다.(Snook, 1978; Chaffin et al., 1999)

#### 4. 결 론

항해 시 빈번히 발생하며 작업부하가 가장 커서 작업위험성이 높다고 판단되는 그라인더의 원치작업 시 무리한 신체부하를 유발하지 않는 원치의 적정 위치를 찾고, 그것의 배치 기준을 제시하기 위하여 원치작업을 3D 휴먼 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다.

이에 첫 번째로 원치작업 위치를 0°, 90° 그리고 180°로 구분하고, 두 번째로 원치를 기준위치보다 수직으로  $\pm 10\%$ 씩 이동하고, 세 번째로 그라인더의 신장을 3그룹으로 나누어 각 상황에 대하여 분석하였다. 그 결과, 각각의 신장에 대한 작업 위치 및 원치 높이에 따른 허리부하 절대값의 차이는 있지만, 모든 그룹이 90°와 180°작업에서 큰 부하가 걸리는 경향을 알 수 있었다. 또한, 그라인더의 신장에 따른 허리부하는 작업각도와 무관하게 전체적으로 증가하였다. 이는 원치의 기준위치가 고정되어 있으므로 신장이 커질 때 상대적으로 원치 높이는 낮아지게 되어 원치의 상대적 높이변화가 작업 시 허리부하에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

따라서 그라인더의 신장을 50%ile로, 원치 작업 위치를 90°로 고정된 후 원치 높이를 대상선박을 기준으로 50mm씩 상·하로 변화하여 허리부하를 분석하였다. 그 결과 175cm 신장의 작업자를 기준으로 하였을 때 원치 높이는 40% 이상 되는 곳에 놓이는 것이 적당하다고 판단된다. 또한 앞선 시뮬레이션과 같은 조건에서 원치의 위치를 상·하 방향이 아닌, 선측각도를 변화시켜 원치가 선측으로 멀어 질수록 그라인더에 걸리는 허리부하를 분석하였다. 그 결과 약 175cm 신장의 작업자를 기준으로 선측외판을 16°이상으로 하는 것은 허리에 과도함 부담을 줄 것으로 판단된다.

본 연구는 실제 작업자의 작업 부하를 직접 측정하지 않고, 3D 휴먼 시뮬레이션을 이용하여 경제적이며, 시간과 공간의 제약 받지 않고 시뮬레이션을 수행할 수 있었다. 그러나 시뮬레이션은 작업자의 실제동작을 섬세하고 정확하게 구현하는데 어려움이 있었다. 또한 본 연구는 선체가 항해 중 움직임이 있는 상태가 아닌 정지한 상태를 기준으로 허리부하를 측정하는 것

로 향후 선체운동에 따른 하중을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- Chaffin, D.B., Andersson, G., Martin, B.J., 1999. Occupational Biomechanics. 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, New York.
- Garg, A., 1976. A Metabolic Rate Prediction Model for Manual Materials Handling Jobs. Ph.D Dissertation, University of Michigan.
- Ji, S.H., Roh, J.S., Kang, S.W., Kim, H.W., Kim, M.H., 2010. Structural Safety Evaluation of 40 Feet Sailing Yacht by Computational Structure Analysis. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 47(5), 703-708.
- Kim, D.J., Oh, H., Lee, Y., Chang, S.R., 2013a. Fundamental Study for Ergonomic Design of Sailing Yacht. Journal of the Korean Society of Safety, 28(2), 73-77.
- Kim, D.J., Ko, C.G., Lee, Y., Chang, S.R., 2013b. Application of Digital Human Modeling for Design of Yacht. Journal of the Ergonomics Society of Korea, 32(5), 475-480.
- Kim, I.C., Oh, H.J., Kim, D.W., 2016. A Study on the Development of the Safe Navigation Route for a Sailing Yacht Focused on Geomundo(Port Hamilton). Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 22(2), 174-180.
- Jäger, M., Luttmann A., 1999. Critical Survey on the Biomechanical Criterion in the NIOSH Method for the Design and Evaluation of Manual Lifting Tasks. International Journal of Industrial Ergonomics, 23(4), 331-337.
- Shin, J.G., Lee, J.Y., Lee, J.H., Van, S.H., Lee, S.H., Yoo, J., 2006. A Study on the Structural Design and Structural Analysis for Small Yacht. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 43(1), 75-86.
- Siemens, P.L.M., 2003. Software, 2009. Tecnomatix Jack, Siemens PLM Software, Plano, TX.
- Snook, S.H., 1978. The Design of Manual Handling Tasks. Ergonomics, 21, 963-985.
- Snook, S.H., Ciriello, V.M., 1991, The Design of Manual Handling Tasks: Revised Tables of Maximum Acceptable Weights and Forces. Ergonomics, 34, 1197-1213.

# Prediction Technology of Reverse Setting Block Shape with Inherent Strain Method and Re-meshing Technology

Chung-Min Hyun<sup>\*\*</sup>, Han-Suk Choi<sup>\*</sup>, Chang-Woo Park<sup>\*\*</sup> and Sung-Hoon Kim<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Graduate School of Engineering Mastership, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

<sup>\*\*</sup>Central Research Institute, Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Geoje, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Automotive Mechanical Engineering, NamBu University, Kwangju, Korea

## 고유 변형도법과 리메싱 기술을 접목한 블록의 역세팅 형상 예측기술

현충민<sup>\*\*</sup> · 최한석<sup>\*</sup> · 박창우<sup>\*\*</sup> · 김성훈<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>포항공과대학교 엔지니어링대학원

<sup>\*\*</sup>삼성중공업 중앙연구소

<sup>\*\*\*</sup>남부대학교 자동차기계공학과

**KEY WORDS:** Reverse setting 역세팅, Backheating 백히팅, Inherent strain method 고유변형도법, Remeshing technoloty 리메싱 기법

**ABSTRACT:** In order to reduce the cost of corrections and time needed for the block assembly process, the reverse setting method is applied for a back-heated block to neutralize deck deformation. The proper reverse setting shape for a back-heated block to correct deformation improved the deck flatness, but an excessive amount of reverse setting could inversely affect the flatness of the block. A prediction method was developed for the proper reverse setting shape using a back-heated block, considering the complex geometry of blocks, thickness of the deck plate, and thermal loading conditions such as welding and back-heating. The prediction method was developed by combining the re-meshing technique and inherent strain-based deformation analysis using the finite element method. Because the flatness deviation was decreased until the lower critical point and thereafter it tended to increase again, the optimum value for which the flatness was the best case was selected by repeatedly calculating the predefined reverse setting values. Based on this analysis and the study of the back-heating deformation of large assembly blocks, including the reverse setting shape, the mechanism for selecting the optimum reverse setting value was identified. The developed method was applied to the actual blocks of a ship, and it was confirmed that the flatness of the block was improved. It is concluded that the developed prediction method can be used to predict the optimum reverse setting shape value of a ship's block, which will reduce the cost of corrections in the construction stage.

### 1. 서 론

현재 조선소에서 건조되고 있는 유조선, 컨테이너선, LNG운반선 등 대부분의 대형 선박은 용접을 이용한 블록 건조공법에 의해 생산되고 있다. 부재 조립공정에는 많은 용접이 있으며, 소조립, 중조립, 대조립 각각의 조립공정의 마무리 단계는 화염 토치를 이용한 곡직 교정작업으로 마무리 된다. 특히, 대조립 용접작업 후에 이루어지는 변형 교정작업은 국부적인 용접변형 제거에는 도움이 되지만, 이미 대형화된 블록 전체가 활처럼 휘어져 위로 볼록 혹은 아래로 볼록해지는 형태의 글로벌(Global) 변형을 유발하고, 결국 다음 단계인 탑재(Erection) 공정에서 블록 자체를 교정하거나 블록에 조립된 부재의 일부를 해체하여

치수 품질 교정 후 재 조립하는 과정이 필요하게 되어 많은 비용과 시간을 투입해야 하는 문제가 발생한다.

블록 탑재 작업은 선박 건조 기간의 1/3을 차지하는 중요 공정 이므로, 블록의 형상 및 치수의 정확성은 탑재작업을 비롯한 선박 건조의 효율성과 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 선박 건조 생산성을 향상시키기 위해서는 블록의 조립 과정에 따라 발생하는 용접과 곡직에 의한 변형을 예측하고, 사전에 이 변형의 역형상이 되도록 부재를 역설계하거나 역세팅 조립하여 변형이 발생하더라도 이를 최소화 하여 이후에 요구되는 변형 교정 작업을 없애거나 최소화 해야 한다. 이에 본 연구에서는 블록 단계에서의 용접 혹은 곡직 변형에 의해 발생하는 글로벌(Global)변형을 고유변형도 해석방법(Ha, 2008; Ha and Jang, 2008; Ha and Jang,

Received 8 August 2017, revised 15 August 2017, accepted 20 December 2017

Corresponding author Sung-Hoon Kim: +82-062-970-0120, learn\_run@nambu.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

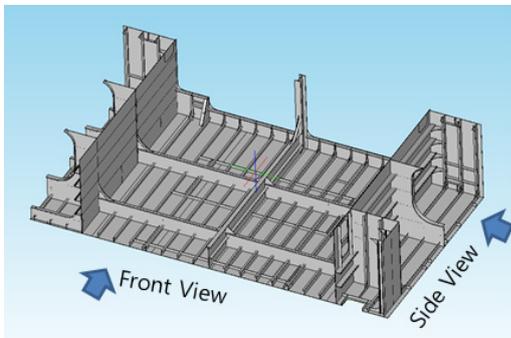
2004)을 통해 사전에 예측하고 이를 최소화하기 위한 블록 역세팅 조립 기술을 개발하였고, 이를 실제 블록 조립에 원활히 적용하기 위한 최적 역세팅 형상 예측에 관한 연구를 진행하였다.

2. 블록의 글로벌(Global) 변형과 역세팅 조립기술

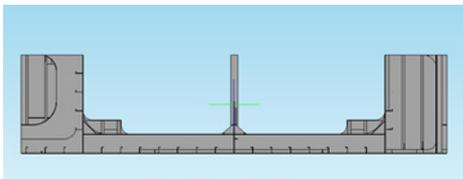
2.1 블록의 Global 변형

Fig. 1은 여러 개의 소부재와 중조립 부재로 이루어진 대조립 블록의 사례이다. 블록을 구성하고 있는 소부재의 개수와 위치에 따라 수축, 수백 미터(m)의 용접이 이루어지며, 변형은 수축(Shrinkage)과 각변형(Angular distortion), 굽힘(Bending) 등을 유발하게 된다.

Fig. 1 (b) 또는 Fig. 2 (a)에 나타낸 정면 단면의 용접 전 단면 형상은 용접 후 Fig. 2 (b)와 같이 변형이 발생하고, 이 변형을 교정하기 위해 Fig. 2 (c)와 같이 이면에 백히팅 작업을 수행한다.



(a) 3D isometric view



Real Front View



Simplified front View

(b) Simplified front view

Fig. 1 Sample of large assembly block

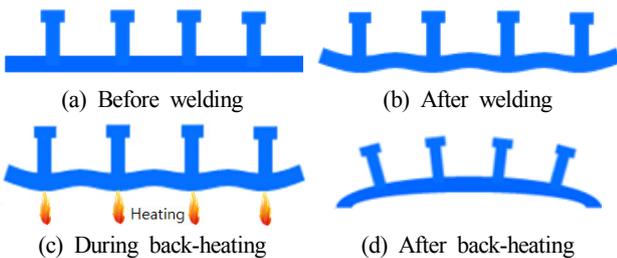


Fig. 2 Variation of deformation due to process

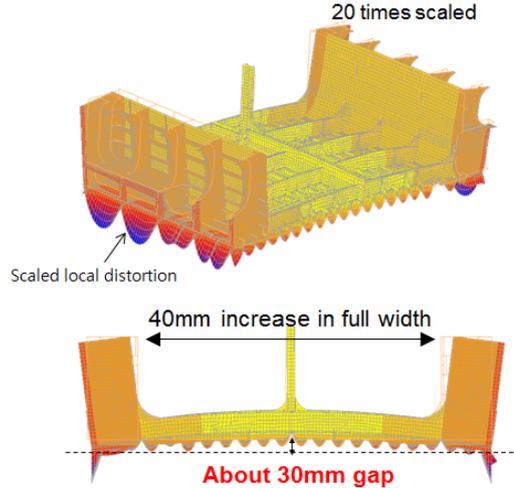


Fig. 3 Global distortion shape for large block



(a) Global distortion and triangle heating (b) After correction

Fig. 4 Before and after correction for global distortion

하지만, 이러한 백히팅 작업은 블록의 하부에 열 응력을 집중시키는 효과를 가져오게 되며, Fig. 2 (b)와 같은 국부적인 용접 변형이 발생한 경우 이를 교정하는 효과를 볼 수 있으나, Fig. 2 (d)와 같이 블록이 전체적으로 위로 볼록 혹은 아래로 볼록해지는 글로벌 변형을 일으키는 문제가 있다. 이러한 글로벌 변형은 블록 전체의 뒤틀림 문제이기 때문에 이후의 탑재공정에서 이웃 블록간의 심각한 치수 불균일을 일으키며, 아래 Fig. 3과 같은 형태로 데크(Deck)가 전체적으로 위로 볼록해지는 형태의 변형을 잔류시킨다.

이러한 변형은 Fig. 4 (a)같이 내부재에 다시 삼각가열 형태와 같은 히팅(heating)작업에 의한 수많은 곡직작업을 통해 교정되거나, 탑재 공정에서 블록을 교정(Correction) 해야만 한다.

2.2 블록 역세팅 조립기술

블록의 글로벌 변형을 방지하기 위한 역세팅 조립 기술은 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 발생하는 변형을 사전에 예측하고, 적절한 조립 방법을 선택하여, 내부재 및 소조립 부재를 Fig. 5와 같이 변형 형상으로 역세팅 하도록 하는 것이다. 이러한 역세팅 조립을 통해, 블록 제작과정에서 발생하는 용접과 곡직에 의해 발생하는 변형을 상쇄할 수 있다.



Fig. 5 Schematic reverse setting shape of block

따라서, 블록의 형상에 따라 다르게 발생하는 글로벌(Global) 변형을 최소화 하는 최적 역세팅 형상( $\delta$ )을 결정하는 것이 중요하다.

### 3. 변형도법과 리메싱을 이용한 역세팅 형상 예측기술

#### 3.1 역세팅 적용에 따른 백히팅 변형 거동 분석

백히팅에 의해 블록에 열이 가해지면 백히팅 반대측 면의 온도( $T_{top}$ )와 백히팅 면의 온도( $T_{bot}$ )의 온도 차이에 의해서 각변형( $\theta$ )과 부재 횡 방향의 수축변형( $\delta$ )이 Fig. 6과 같이 발생한다(Ha et al, 2007; Jang et al, 2002; Jang et al, 2005). 식 (1)과 같이 열팽창계수( $\alpha$ )와 온도 차이(식 (2))에 의한 열 변형(Thermal strain)이 발생하며, 이로 인해 식 (3)과 같이 열에 의해서 윗면과 아랫면은 각각 길이 변화가 발생한다. 윗면(Top face)과 아랫면(Bottom face)의 길이 변화 차이에 의해 각변형( $\theta$ )이 발생하게 되는데, 이때 각변형( $\theta$ )는 식 (4)와 같이, 횡 방향의 변형( $\delta$ )은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta T_t, \quad \varepsilon_b = \alpha \cdot \Delta T_b \tag{1}$$

$$\Delta T_t = T_i - T_t, \quad \Delta T_b = T_i - T_b \tag{2}$$

$$L_t = L + L \cdot \varepsilon_t, \quad L_b = L + L \cdot \varepsilon_b \tag{3}$$

$$\theta = \text{Atan}\left(\frac{L_t - L_b}{2 \cdot t}\right) \tag{4}$$

$$\delta = \delta_{rotation} + \delta_{shrinkage} = L \cdot (1 - \cos\theta) + \frac{L_t - L_b}{2t} \tag{5}$$

여기서,  $T_t, T_b, T_i$  는 Element의 Top layer 온도, Bottom layer 온도, 초기 온도를 의미하며,  $\alpha$ 는 고유변형도법에 의해 계산된 가상의 열팽창 계수이다. 또한,  $L, L_t, L_b$ 는 Element의 초기 길이와 변형된 Top layer, Bottom layer의 길이를 의미한다. 또한,  $\delta_{rotation}$ 와  $\delta_{shrinkage}$ 는 각각 Element의 회전과 수축에 의한 횡방향의 변위(Displacement)이다.

Fig. 7은 역세팅 형상 적용 여부에 따른 블록의 곡직 변형을 보여주고 있다. 적절한 역세팅 비율이 적용되는 Fig. 7 (b)과 같은 경우 횡방향 수축 변형에 의해서 지지점 사이의 길이를 단축시키기 위해 편평도가 개선된다. 하지만, Fig. 7 (c)와 같이 과도한 역세팅 비율의 적용은 횡방향 팽창 변형을 유발시켜 지지점 사이의 부재에 대하여 길이가 증가하는 방향으로 내력을 발생시켜서 편평도가 악화되는 블록 변형을 유발 할 수 있음을

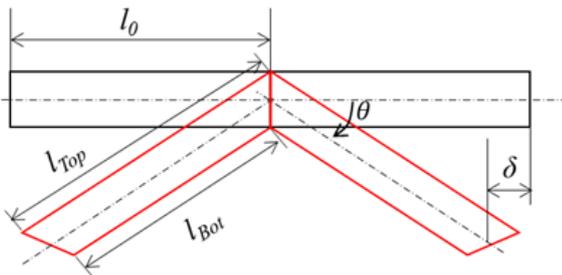
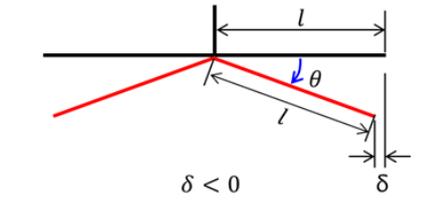
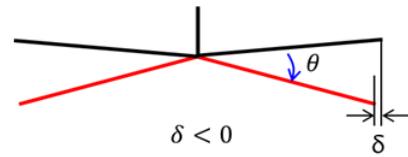


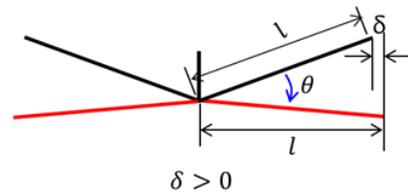
Fig. 6 Block sectional deformation by back-heating



(a) Back-heating deformation without reverse setting



(b) Back-heating deformation by proper reverse setting



(c) Back-heating deformation by over reverse setting

Fig. 7 Mechanism of back heating deformation

보이고 있다. 실제 생산에서도 과도한 역세팅 적용에 따른 블록 편평도가 악화되는 문제가 수차례 발생되었다. 따라서 최적의 역세팅 값을 구하기 위해서는 경험이나 이론식에 의한 결정은 어려운 것으로 판단되며, 블록의 형상과 변형 발생 경로를 고려하여 최적의 역세팅량을 예측하는 것이 필요하다.

#### 3.2 변형도법과 리메싱을 이용한 역세팅 형상예측

Fig. 8은 역세팅 형상예측 기술의 작업 순서를 보이고 있는데, 대상 블록 모델 선정 후, Step 1에서는 작업장 기준 백히팅 공정 해석을 통해서 용접 후에 적용되는 곡직 변형을 예측한다. 이는 Fig. 3의 변형된 모습을 예측하는 것이다. Step 2에서는 구해진 백히팅 변형량의 역방향 변위에 일정한 비율을 곱한 값을 새로운 절점의 좌표로 적용하여 리메싱을 수행하여 초기 블록의 역

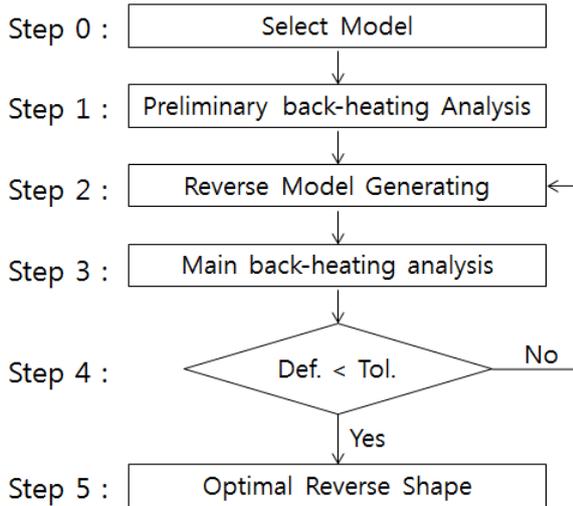


Fig. 8 Prediction of Reverse setting shape.

형상 모델을 구성한다. 이는 Fig. 5와 같은 역세팅 형상을 생성하는 것이다. Step 3에서는 Step 2에서 구성한 역형상 모델을 이용하여 백히팅 변형 해석을 재 수행하고 예상되는 백히팅 후의 블록 형상을 구한다. 해석에 적용된 백히팅 해석의 수행은 고유 변형도법에 기반한 열변형 해석 기술을 적용하며, 기준이 되는 경로 혹은 부재의 전체 변형값을 구하여 설계 기준치 미만의 변형이 발생하는지 판단한다. 만일 기준 이상의 변형을 얻는 역세팅 형상이 예상되면 Step 2의 역세팅 비율을 재조정하여 백히팅 해석을 반복하며, 기준 이하의 변형이 예상되는 역세팅 비율이 결정되면 역세팅 형상을 최종 결정하고 해석을 종료한다.

개발된 역세팅 예측 해석 기술의 적용성을 검토하기 위하여 대조립 블록의 형태를 단순하게 만든 Fig. 9와 같은 표준 모델을 구성하였으며, 모델은 1개의 횡방향(Transverse) 보강재와 10개의 종방향(Longitudinal) 보강재로 구성하였고, 각 보강재는 1.3m 간격으로 배치하였다.

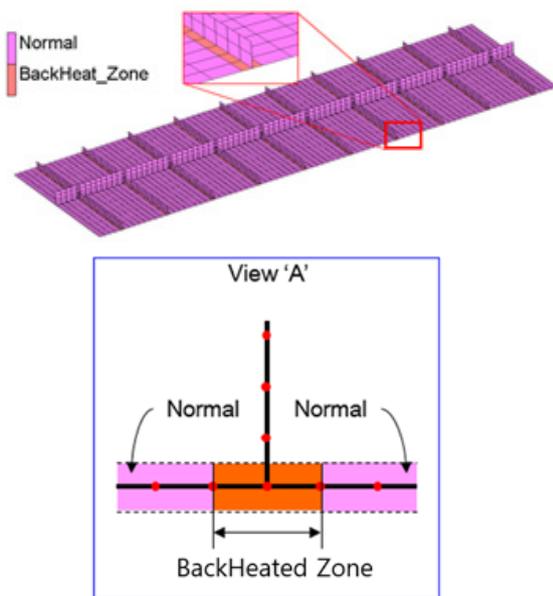
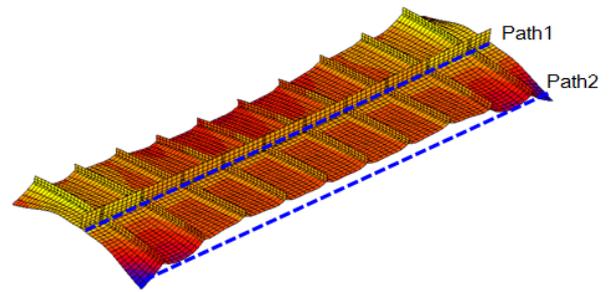


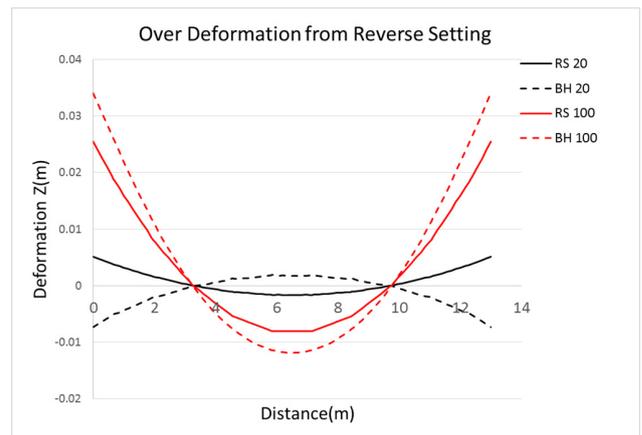
Fig. 9 Finite Element Model of Standard block

삼각형 및 사각형 Shell 요소를 사용하였으며, 종 및 횡 방향 보강재의 용접 효과를 모사하기 위해 일반 및 백히팅 구간으로 구분하여 기계 및 열적 물성값을 적용하였으며, 해석은 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 MSC.Marc 2013 (MSC.Software, 2013)을 사용하였다.

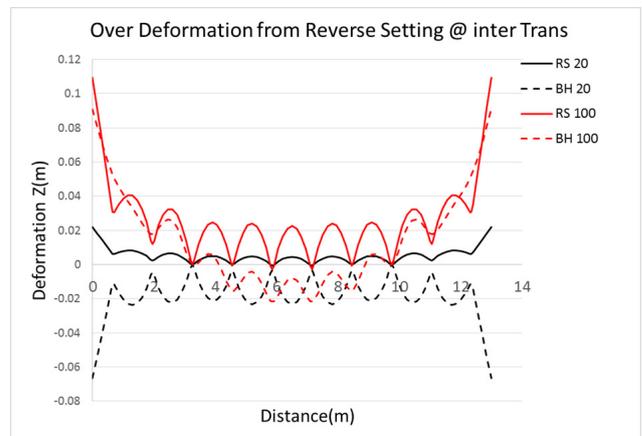
역세팅 비율에 따른 블록의 변형량을 파악하기 위하여 역세팅 비율을 0%부터 100%까지 10% 간격으로 증가시키고 백히팅 해석 결과에 대하여 Fig. 10 (a)와 같이 블록의 센터(Path1)와 끝단(Path2)을 비교하였다. Fig. 10 (b)-(c)에서 RS 20과 RS 100은 역세팅 비율이 20%와 100%인 경우를 의미하며, BH 20과 BH 100은 역



(a) BackHeating distortion : 100 X Scaled



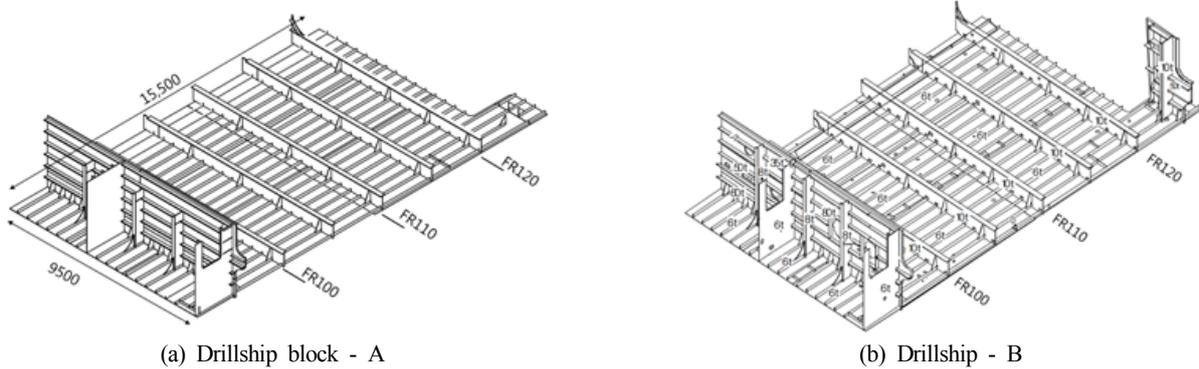
(b) BackHeating distortion at path1



(c) BackHeating distortion at path2

Fig. 10 Back-heating deformation with Reverse setting shape of standard block





(a) Drillship block - A

(b) Drillship - B

Fig. 13 Drillship Block shape.

적용의 검증은 반복 수행한 결과로 볼 수 있다. 2개의 블록에 적용하기 위해 계산된 역세팅량( $\delta$ )와 실제 적용한 역세팅량, 그리고 최종 측정된 값을 Table 1에 정리하였다. 계산된 최적 역세팅 비율과 역세팅 형상( $\delta$ )이 적용된 대부분의 결과는 평탄도(Level)가 1mm 이내로 매우 양호한 상태의 최종 블록 형상을 얻을 수 있었다. 블록B의 FR110 경로에서는 조립 작업자의 휴먼에러로 인하여 예측된 역세팅 형상(-2.3mm)보다 많은 양의 역세팅(-6mm)이 적용되어 평탄도가 원하는 수준으로 나오지는 않았으나, 목표로 했던 절대치수(2.3mm)와 유사한 3mm의 Global 변형이 상쇄되는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

블록의 글로벌 변형을 개선하기 위해서 역변형 형상으로 블록을 셋팅하여 조립하는 역세팅 기술을 개발하고 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 블록을 구성하는 부재 치수, Plate 두께, 용접 방향 등에 따라 최적 역세팅 형상을 예측하는 기술을 유한요소법을 활용한 고유변형도 변형해석법과 리메칭 기술을 접목하여 개발하였다.

(2) 표준 블록을 이용한 블록의 백히팅 변형 분석을 통하여 역세팅 비율, 블록의 형상 및 곡직 변형 경로에 따라서 블록의 평탄도가 개선 혹은 악화될 수 있음을 검토하였으며, 이는 최적 역세팅 비율은 블록 형상, 강성 및 백히팅 조건을 동시에 고려하여 결정되어야 하는 것을 의미함을 확인하였다. 특히, 과도한 역세팅의 적용은 오히려 블록의 평탄도를 악화시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 개발된 기술을 실제 Drillship 블록의 조립에 적용하여 블록의 글로벌 변형이 개선됨을 확인하여, 개발된 최적 역세팅 형상 예측 기술의 신뢰도가 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 삼성중공업(주)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Ha, Y.S., 2008. Development of Thermal Distortion Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(1), 93-100.
- Ha, Y.S., Jang, C.D., 2007. An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel. *International Journal of Offshore and Polar Engineers*, 17(2), 139-144.
- Ha, Y.S., Jang, C.D., 2004. Development of Inherent Strain Method Considering Phase Transformation of Mild Steel in Line Heating. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(6), 65-74.
- Ha, Y.S., Jang, C.D., Kim, J.T., 2007. Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on the Inherent Strain. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 8(4), 56-62.
- Jang, C.D., Ha, Y.S., Ko, D.E., Moon, S.C., 2002. Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(1), 82-89.
- Jang, C.D., Kim, T.H., Ko, D.E., Lamb, T., Ha, Y.S., 2005. Prediction of Steel Plate Deformation due to Triangle Heating using the Inherent Strain Method. *Journal of Marine Science Technology*, 10(4), 211-216.
- MSC.Software, 2013. MSC.Marc 2012 Release Note.

# An Experimental Method for Analysis of the Dynamic Behavior of Buoys in Extreme Environment ← (영문제목)

Gil-Dong Hong\*, Gil-Dong Kim\*\* and Gil-Dong Lee\*\* ← (영문이름)

\*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea ← (영문소속: 소속명/지역명/국가)  
yundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

# 극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동\* · 김길동\*\* · 이길동\*\* ← (한글이름)

\*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부 ← (한글소속)  
\*\*현대중공업(주) 구조설계부

**KEY WORDS:** Buoy motion 부표운동, Mooring tension 계류삭 장력, Extreme environment 극한환경, ← (영문 국문)

**ABSTRACT:** An experimental method to investigate the dynamic characteristics of buoys in extreme environmental condition is established. Because the buoy model requires a reasonable size for accurate experiment, the test condition in model basin that satisfies the similarity law is hardly compatible with capability of test facilities. .... (중략) .....

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

## 1. 서론

해양에서 다양한 목적으로 사용되는 부표의 효과적인 운용을 위해서는 부표의 안정성 및 적절한 운동성능의 확보가 필수적이며, 이들 성능의 평가를 위해서는 운동특성 및 계류장력의 파악을 위한 수조모형시험이 요구된다. .... (중략) .....

## 2. 극한조건의 상사

### 2.1 파랑조건의 상사

파랑특성은 파고 및 파주기에 의해 정의되며, 모형 축척비를  $\lambda$  ← (수식편집기사용) 라고 할 때, 파고의 축척비는  $\lambda$ , 파주기의 축척비는  $\sqrt{\lambda}$  ← (수식편집기사용) 가 된다. 시험수조에서 생성 가능한 파랑의 크기는 한정되어 있으며, 전세계적으로도 대형수조에 속하는 KRISO 해양공학수조의 파랑생성 범위는 파주기 0.5~5.0sec, 최대파고 80cm 이다(Hong, 2001; Kim and Lim, 2002; Park et al., 2003; Mike, 2004; Jordan and Brewerton, 2005; Brown et al., 2006).

Received 00 March 2012, revised 00 April 2012, accepted 00 April 2012

Corresponding author Gil-Dong Hong: +82-111-222-3333, gdhong@kriso.re.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2010 in Jeju. ← (논문투고규정 또는 Guide for authors 참조: 학술지 이외에 학술대회 논문, 연구보고서, 학술기사 등 모든 기발표 원고도 투고가 가능하나 투고원고에 상기와 같이 출처를 반드시 밝혀야 함.)

## 2.2 바람조건외의 상사

부표의 상하동요, 종동요, 횡동요의 3자유도 운동은 부표의 체적에 비례하는 복원력에 의해 일어나며, 복원력이 상사되기 위한 풍력의 상사는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$F_M = F_P / \Lambda^3 \quad \leftarrow (\text{수식편집기사용}) \quad (\text{번호표시}) \Rightarrow (1)$$

여기서 첨자  $M$   $\leftarrow$  (수식편집기사용) 과  $P$  는 모형과 실부표를 각각 나타낸다.

힘의 작용점을 상사시키고, 식 (1)에 따라 풍력을 상사시키면 상하동요, 종동요의 ..... (중략) .....

## 3. 표준형 등부표 모형시험

수심과 파고에서 모형 상사조건과 수조시험 조건이 상이한 것은 해양공학수조의 물리적 환경과 조파능력의 한계에 기인한다. 수심의 경우에는 실험 수심 20m에 상사하는 계류사의 중량을 수조시험 수심조건에 균일하게 분포시키고, 계류사의 강성을 스프링을 이용하여 상사시킴으로서(Jordan and Brewerton, 1982) 서로 다른 수심 조건의 차이를 극복하였다. .... (중략) ..... 모형시험에 사용된 부표의 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

**Table 1** Computed wind and current forces on buoy models

Buoy	Wind		Current	
	Force [Kgf]	Center [m]	Force [Kgf]	Center [m]
LL-26(M)	5.714	0.588	5.508	0.536
LL-30	6.587	0.682	6.450	0.608
LS-35	3.796	0.395	4.131	0.159
LNBY-100	2.563	0.516	2.729	0.140

$\leftarrow$  (Table은 영문으로 작성, 표기되는 기호는 수식으로 작성)

$\leftarrow$  (Table은 설명내용과 분리하지 말고 원고 속에 설명내용에 이어서 삽입)

## 4. 모형시험 결과 및 해석

부표의 축대칭 특성에 기인하여 직선운동은 전후동요와 상하동요가 ..... (중략) ..... 크게 나타나는 것이 일반적이다. 주 운동인 전후동요, 상하동요, 종동요의 최대값(Maximum value)을 구하여 Fig. 1에 도시하였다. .... (중략) .....

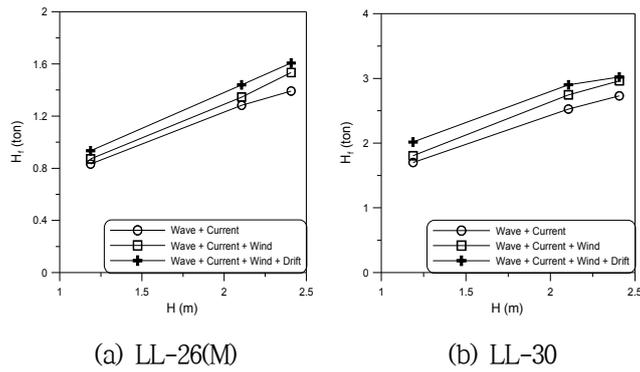


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (그림은 영문으로 작성)

≡ (Figure는 설명내용과 분리하지 말고 원고 속에 설명내용에 이어서 삽입)

## 5. 결 론

본 논문에서는 모형시험에서 부표의 동력학적 거동과 함께 계류삭의 장력을 조사하였으며, 모형시험 결과를 확장하여 극한 …중략… 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 조류력, 풍력 및 파랑표류력 성분에 대한 상사성을 만족하고, 이상으로 … (중략) … 추정할 수 있다.
- (2) LNBY-100을 제외하고는 설계와 시험 파랑조건의 차이가 커서 부표의 동력학적 거동을 추정하기 위한 외삽 시 대체로 과대 평가하는 경향이 있다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부와 현대중공업(주)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

All references should be listed at the end of the manuscripts, arranged in English Alphabet order. The exemplary form of listed references is as follows :

- 1) Single author : (Kim, 1998)
- 2) Two authors: (Kim and Lee, 2000)
- 3) Three or more authors: (Kim et al., 1997)
- 4) Two or more paper: (Lee, 1995; Ryu et al., 1998)

References, including those pending publications in well-known journals or pertaining to private communications, not readily available to referees and readers will not be acceptable if the understanding of any part of any part of the submitted paper is dependent upon them. Single or two authors can be referred in the text; three or more authors should be shortened to the last name of the first author, like smith et al.

- ① Write the reference in order of English alphabet 「a,b,c…」 (작성순서는 영어 알파벳 순)
- ② Do not drop all of authors involved. (관련저자(총 저자명)는 빠뜨리지 말고 모두 기입)
- ③ Refer to below examples (아래의 예제를 참조)
- ④ Journal names should not be abbreviated.

(example for proceedings) ⇒

Aoki, S., Liu, H., Sawaragi, T., 1994. Wave Transformation and Wave Forces on Submerged Vertical Membrane. Proceedings of International Symposium Waves - Physical and Numerical Modeling, Vancouver Canada, 1287-1296.

(example for journals) ⇒

Cho, I.H., Kim, M.H., 1998. Interactions of a Horizontal Flexible Membrane with Oblique Waves. Journal of Fluid Mechanics, 356(4), 139-161.

(example for books) ⇒

Schlichting, H., 1968. Boundary Layer Theory. 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.

(example for websites) ⇒

International Association of Classification Societies (IACS), 2010a. Common Structural Rules for Bulk Carriers. [Online] (Updated July 2010) Available at: <<http://www.iacs-data.org.uk/>> [Accessed August 2010]. ⇐ web document

Anglia Ruskin University, 2001. Anglia Ruskin University Library. [Online] Available at: <<http://libweb.anglia.ac.uk/referencing/harvard.htm>> [Accessed 12 Dec. 2012]. ⇐ website

참고문헌은 일반인이 접근할 수 있는 문헌이어야 함(예를 들어 사기업보고서는 외부인의 열람이 불가능하므로 참고문헌이 될 수 없음).

### <주>

1. 모든 원고는 한글(Ver. 2005이상)과 MS Word(Ver. 2003이상)로 작성
2. 원고의 언어는 국문과 영문으로 한정 (기타 언어는 사용불가)
3. 국문 및 영문 원고양식 동일

# General Information for Authors

## Requirement for Membership

One of the authors who submits a paper or papers should be member of KSOE, except a case that editorial board provides special admission of submission.

## Publication type

Manuscript is made up of scholarly monographs, technical reports and data. The paper should have not been submitted to other academic journal. Conference papers, research reports, dissertations and review articles can be submitted to JOET. When part or whole of a paper was already published to conference papers, research reports, dissertations, and review articles, then corresponding author should note it clearly in the manuscript. After published to JOET, the copyright of manuscript belongs to KSOE. (example) It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2010 in Jeju.

## Manuscript submission

Manuscript should be submitted through the on-line manuscript website (<http://www.joet.org>). The date that corresponding author submits a paper through on-line website is official date of submission. Other correspondences can be sent by an email to the Editor in Chief, Prof. Yun-Hae Kim, Division of Mechanical & Materials Engineering, Korea Maritime University, 1 Dongsam-dong, Youngdo-ku, Busan 49112, Korea (Tel: +82 51 410 4355, Fax: +82 51 410 4350, e-mail: [yunheak@kmou.ac.kr](mailto:yunheak@kmou.ac.kr)). The manuscript must be accompanied by a signed statement that it has been neither published nor currently submitted for publication elsewhere. The manuscript should be written in English or Korean and a minimum standard of the proficiency in the English or Korean language should be met before submission to the editorial office.

Ensure that online submission or submission by e-mail text files are in a standard word processing format (Hangul or MS Word are preferred). Ensure that graphics are high-resolution. Be sure all necessary files have been uploaded/attached.

## Submission checklist

See 'Authors' checklist' for details.

## Research and Publication Ethics

### *Authorship of the paper*

Authorship should be limited to those who have made a significant contribution to the conception, design, execution, or interpretation of the reported study. All those who have made significant contributions should be listed as co-authors. Where there are others who have participated in certain substantive aspects of the research project, they should be acknowledged or listed as contributors.

The corresponding author should ensure that all appropriate co-authors and no inappropriate co-authors are included on the paper, and that all co-authors have seen and approved the final version of the paper and have agreed to its submission for publication.

### *Hazards and human or animal subjects*

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any unusual hazards inherent in their use, the author must clearly identify these in the manuscript. If the work involves the use of animal or human subjects, the author should ensure that the manuscript contains a statement that all procedures were performed in compliance with relevant laws and institutional guidelines and that the appropriate institutional committee(s) has approved them. Authors should include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human subjects. The privacy rights of human subjects must always be observed.

### *Fundamental errors in published works*

When an author discovers a significant error or inaccuracy in his/her own published work, it is the author's obligation to promptly notify the journal editor or publisher and cooperate with the editor to retract or correct the paper. If the editor or the publisher learns from a third party that a published work contains a significant error, it is the obligation of the author to promptly retract or correct the paper or provide evidence to the editor of the correctness of the original paper.

## Article structure

Manuscript must consist of as follow : (1)Title, (2)Author's name, (3)Key word, (4)Abstract, (5)Nomenclature description, (6)Introduction, (7)Body (analysis, test, results and discussion, (8)Conclusion, (9)Acknowledgements, (10)Reference, (11)Appendix, etc.

### *Abstract*

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract should be written in around 300 words and is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

### *Keywords*

Immediately after the abstract, provide a maximum of 5 or 6 keywords.

### *Unit*

Use the international system units(SI). If other units are mentioned, please give their equivalent in SI.

### *Equations*

All mathematical equations should be clearly printed/typed using well accepted explanation. Superscripts and subscripts should be typed clearly above or below the base line. Equation numbers should be given in Arabic numerals enclosed in parentheses on the right-hand margin. They should be cited in the text as, for example, Eq. (1), or Eqs. (1)-(3).

### *Tables*

Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Each

table should be typed on a separate sheet of paper and be fully titled. All tables should be referred to in the text.

### **Figures**

All the illustrations should be of high quality meeting with the publishing requirement with legible symbols and legends. In preparing the illustrations, authors should consider a size reduction during the printing process to have acceptable line clarity and character sizes. All figures should have captions which should be supplied on a separate sheet. They should be referred to in the text as, for example, Fig. 1, or Figs. 1-3.

### **Reference**

All references should be listed at the end of the manuscripts, arranged in order. The exemplary form of listed references is as follows :

- 1) Single author : (Kim, 1998)
- 2 )Two authors: (Kim and Lee, 2000)
- 3) Three or more authors: (Kim et al., 1997)
- 4) Two or more paper: (Lee, 1995; Ryu et al., 1998)

References, including those pending publications in well-known journals or pertaining to private communications, not readily available to referees and readers will not be acceptable if the understanding of any part of any part of the submitted paper is dependent upon them. Single or two authors can be referred in the text; three or more authors should be shortened to the last name of the first author, like smith et al.

Examples:

#### **Reference to a journal publication:**

Cho, I.H. and Kim, M.H., 1998. Interactions of a Horizontal Flexible Membrane with Oblique Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 356(4), 139-161.

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., and Lupton, R.A., 2010. The Art of Writing a Scientific Article. *Journal of Science Communication*. 163, 51-59.

#### **Reference to a book:**

Strunk, W. and White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, 4<sup>th</sup> Edition, Longman, New York.

Schlichting, H., 1968. *Boundary Layer Theory*. 6th Edition, McGraw-Hill, New York.

#### **Reference to a proceeding:**

Aoki, S., Liu, H. and Sawaragi, T., 1994. Wave Transformation and Wave Forces on Submerged Vertical Membrane. *Proceedings of International Symposium Waves - Physical and Numerical Modeling*, Vancouver Canada, 1287-1296.

#### **Reference to a website:**

International Association of Classification Societies (IACS), 2010a. Common Structural Rules for Bulk Carriers. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].

### **Journal abbreviations**

Journal names should not be abbreviated.

### **Revised manuscripts**

Manuscripts reviewed that require revision should be revised and uploaded with a response to the reviewer's comment at JOET editorial manger within two months. Otherwise, the manuscript will be considered as a new manuscript when and if it is resubmitted.

### **Proofs and reprints**

Galley proofs will be provided as a PDF file to the author with reprint order and copyright transfer form. The author should return the corrected galley proofs within a week with the signed reprint order and copyright transfer form. Attention of the authors is directed to the instructions which accompany the proof, especially the requirement that all corrections, revisions, and additions be entered on the proofs and not on the manuscripts. Proofs should be carefully checked and returned to the JOET editorial office by e-mail if the changes are minimal. If the changes are extensive, proofs should be returned by fax only. Substantial changes in an article at this stage may be made at the author's expense. The reprint request form must be returned with the proof. Reprints should be made at the author's expense.

### **Peer review**

Every manuscript received is circulated to three peer reviewers. The author's name and affiliation is not disclosed during review process to reviewers. The review process can be repeated till three times if the request of revision is suggested by reviewers. If the re-review is repeated more than three times, it may not be considered for publication. If two reviewers do not agree to accept the journal, it may not be also considered for publication. Usually the first review process ends within one month. Statistical Review: If there are any complicated statistical analyses in the manuscript, it may be reviewed by statistical editor.

Manuscript Editing: The finally accepted manuscript will be reviewed by manuscript editor for the consistency of the format and the completeness of references. The manuscript may be revised according to the opinion of the manuscript editor.

### **Page charge**

The charge per a paper for the publication is 150,000KRW (Express review service : 300,000KRW) up to 6 pages. Extra rate, 30,000KRW per page, will be charged for more than 6 pages. Page charge include forty copies of offprints. Offprints in color pages or extra copies of offprints will require actual expenses. The charge per a paper for the paper review is 40,000KRW. Rate for the express review service is 240,000KRW.

### **Editing checklist**

See 'Authors' checklist' for details.

### **Transfer of copyright**

Transfer of copyright can be found in submission homepage (<http://www.joet.org>).

# Authors' Checklist

The following list will be useful during the final checking of an article prior to sending it to the journal for review. Please submit this checklist to the KSOE when you submit your article.

## < Editing checklist >

- I checked my manuscript has been 'spell-checked' and 'grammar-checked'.  
나의 원고에 오타 및 문법적 오류가 있는지 확인하였습니다.

One author has been designated as the corresponding author with contact details such as

- E-mail address
  - Phone numbers
- 최소한 한명의 저자는 교신저자로 지정되었으며, 다음의 연락처가 표기되었습니다.
- 이메일 주소
  - 전화 번호

I checked abstract 1) stated briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions, 2) was written in around 300 words, and 3) did not contain references (but if essential, then cite the author(s) and year(s)).

- 나는 초록이 1) 간결하게 연구의 목적, 주요 결과 및 결론을 포함하고 있음을 확인하였으며, 2) 300단어 내외의 단어로 구성되었음을 확인하였으며, 3) 참고문헌을 포함하고 있지 않음을 확인하였습니다 (꼭 필요시 참고문헌 삽입 가능).

- I provided 5 or 6 keywords.  
나는 5-6개의 키워드를 사용하였습니다.

I checked manuscript consisted of as follow: 1) Title, 2) Author's name, 3) Key word, 4) Abstract, 5) Nomenclature description, 6) Introduction, 7) Body (analysis, test, results and discussion), 8) Conclusion, 9) Acknowledgements,

- 10) Reference, 11) Appendix, etc.  
나는 원고가 다음의 순서로 구성되었음을 확인하였습니다: 1) 제목, 2) 저자명, 3) 키워드, 4) 초록, 5) 기호, 6) 서론, 7) 본문 (해석, 실험, 결과, 검토), 8) 결론, 9) 후기(사사), 10) 참고문헌, 11) 부록, 등.

I checked color figures were clearly marked as being intended for color reproduction on the Web and in print, or to be reproduced in color on the Web and in black-and-white in print.

- 나는 모든 컬러 그림이 컬러 웹이 또는 컬러(또는 흑백) 인쇄물에 잘 나타날 수 있도록 선명한 그림을 사용하였음을 확인하였습니다.

- I checked all table and figure captions were written in English.  
나는 원고의 모든 표 제목과 그림 제목은 영문으로 작성되었음을 확인하였습니다.

- I checked all table and figure numbered consecutively in accordance with their appearance in the text.  
나는 본문에서 나타나는 순서대로 표 번호 및 그림 번호가 지정되었음을 확인하였습니다.

I checked abbreviations were defined at their first mention there and used with consistency throughout the article.

- 나는 영문 약자를 원고의 첫 번째 사용에서 정의하였으며, 이후 원고에서는 동일한 약자를 사용하였음을 확인하였습니다.

- I checked that references were in the correct format for the journal (See 'Guide for Authors' for details).  
나는 모든 참고문헌이 본 저널의 참고문헌 표기법(저자 가이드 참조)에 따라서 작성되었음을 확인하였습니다.

I checked all references mentioned in the Reference list were cited in the text, and vice versa.

- 나는 'References'에 존재하는 모든 참고문헌은 원고 본문에서 언급되었으며, 반대로 원고 본문에 언급된 모든 참고문헌은 'References'에 표기되었음을 확인하였습니다.

- I checked I used the international system units (SI) or SI-equivalent engineering units.  
나는 SI 단위계 또는 공학적으로 인정되어지는 단위계를 사용하였음을 확인하였습니다.

< **Submission checklist** >

- I checked the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis).  
나는 본 원고의 내용이 초록, 단행본, 학위논문 등을 제외한 타 저널 등에 게재된 사실이 없음을 확인하였습니다.

- I checked when the work described has been published previously in other proceedings without copyright, it has clearly noted in the text.  
나는 본 원고의 내용이 판권이 없는 프로시딩에 게재되었던 경우 이를 원고에서 명시하였음을 확인하였습니다.

- I checked permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Web)  
나는 웹을 포함하여 판권이 있는 자료의 사용 허가를 득했습니다.

- I have processed Plagiarism Prevention Check through reliable web sites such as [www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr), <http://www.ithenticate.com/>, or <https://www.copykiller.org/> for my submission.  
나는 논문 표절 유사도 검사를 마친 후 투고하였습니다.

- I agree that final decision for my final manuscript can be changed according to results of Plagiarism Prevention Check by JOET administrator.  
나의 최종본 논문에 대한 JOET 자체적인 논문 표절 유사도 검토 결과에 따라 최종 판정이 변경될 수 있다는 사실에 동의합니다.

- I checked minimum one author is member of the Korean Society of Ocean Engineers.  
나는 저자 중 1인 이상이 한국해양공학회 회원임을 확인하였습니다.

- I agreed all policies related to 'Ethical Code of Research' and 'Research and Publication Ethics' of the Korean Society of Ocean Engineers.  
나는 연구출판정책과 연구윤리규정을 확인했으며, 준수할 것을 서약합니다.

- I agreed to transfer copyright to the publisher as part of a journal publishing agreement and this article will not be published elsewhere including electronically in the same form, in English or in any other language, without the written consent of the copyright-holder.  
나는 한국해양공학회지의 저작권 정책에 동의하며, 저작권 위임동의서를 제출하겠습니다.

- I made a payment for reviewing of the manuscript, and I will make a payment for publication on acceptance of the article.  
나는 심사료를 납부하였으며, 논문 게재 확정 후 게재료를 납부하겠습니다.

- I have read and agree to the terms of Author's Checklist.  
나는 저자 체크리스트 모든 조항을 검토하였으며, 모든 조항에 동의합니다.

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

※ Print and sign completed form. Fax(+82 51 759 0657) or E-mail scanned file to [ksoehj@ksoe.or.kr](mailto:ksoehj@ksoe.or.kr)

# Research and Publication Ethics

## Authorship of the paper

Authorship should be limited to those who have made a significant contribution to the conception, design, execution, or interpretation of the reported study. All those who have made significant contributions should be listed as co-authors. Where there are others who have participated in certain substantive aspects of the research project, they should be acknowledged or listed as contributors.

The corresponding author should ensure that all appropriate co-authors and no inappropriate co-authors are included on the paper, and that all co-authors have seen and approved the final version of the paper and have agreed to its submission for publication.

## Hazards and human or animal subjects

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any unusual hazards inherent in their use, the author must clearly identify these in the manuscript. If the work involves the use of animal or human subjects, the author should ensure that the manuscript contains a statement that all procedures were performed in compliance with relevant laws and institutional guidelines and that the appropriate institutional committee(s) has approved them. Authors should include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human subjects. The privacy rights of human subjects must always be observed.

## Fundamental errors in published works

When an author discovers a significant error or inaccuracy in his/her own published work, it is the author's obligation to promptly notify the journal editor or publisher and cooperate with the editor to retract or correct the paper. If the editor or the publisher learns from a third party that a published work contains a significant error, it is the obligation of the author to promptly retract or correct the paper or provide evidence to the editor of the correctness of the original paper.

# Ethical Codes of Research

for The Korean Society of Ocean Engineers [1, Nov. 2008 amended]

All members of The Korean Society of Ocean Engineers, by observing the following codes of conduct and regulations regarding research in the field, will contribute to the development of ocean engineering and the security and prosperity of the society and the nation, thus holding our honesty, reputation and authority in the highest standards.

## A. Foundational Spirit

1. We make a contribution to mutual prosperity of mankind through ocean development, using the knowledge and technique in the field of ocean engineering.
2. We contribute to fostering the good spirit of citizenship by conducting responsible research.
3. We make efforts to enhance our authority and competitiveness as experts in ocean engineering.

## B. Fundamental Canons

1. We consider the public security and welfare as a top priority and conform to the principle of sustainable use of ocean in conducting our research.
2. We promote professional development through performing proper research and provide young researchers with the opportunities to develop professionally.

3. We respect the public values such as honesty, accuracy, efficiency and objectivity in offering services such as providing expertise or disclosing research results.
4. We do not have unfair competitions with others and solve problems with objective information and processes when there is a clash of interests.
5. We raise common issues only through objective and fair methods.

### **C. Practical Platforms**

1. We consider the public security and welfare as a top priority and conform to the principle of sustainable use of ocean in conducting our research.
  - (a) We must acknowledge the fact that the life, security, health and welfare of the public have an absolute reliance over our products such as structures, equipments and machines that are given thought to and made into decision by engineers.
  - (b) We must not propose or approve research plans which cause harm to the public health and welfare.
  - (c) We must conform to the principle of sustainable use of ocean to enhance the quality of the public life and endeavor to improve the ocean environment.
2. We promote professional development through performing proper research and provide young researchers with the opportunities to develop professionally.
  - (a) As we build our career, we must continue to acquire new knowledge and promote intellectual development by keeping track of research results, organizing research methods and raising necessary issues voluntarily.
  - (b) We must be thoroughly honest to the contributions from cooperators, competitors and predecessors and utilize them for our professional development.
  - (c) We, as administrators, must supervise young researchers in a fair manner and, as their advisors, must assist them sincerely to grow into socially recognized members.
3. We respect the public values such as honesty, accuracy, efficiency and objectivity in offering services such as providing expertise or disclosing research results.
  - (a) When we offer service under our responsibility that involves providing professional knowledge, we must act according to professionalism as a commissioner, trying to prevent waste of resources and reporting objective facts, trustworthy data and accurate research results.
  - (b) We prohibit any fraudulent acts in conducting research such as fabrications, forgeries and plagiarism.
  - (c) We must admit our mistakes or errors when they are verified and must not try to justify them by distorting facts or data.
4. We do not have unfair competitions with others and solve problems with objective information and processes when there is a clash of interests.
  - (a) We must not distort the professional, academical qualifications of ourselves and coworkers. We must not fabricate or exaggerate our positions or authorities of the past achievements.
  - (b) Our papers must contain facts and no exaggeration that are contributed to media sources. When publishing a paper or a report which involves multiple researchers, we must allocate authors based on their levels of contributions and mention every person and institution that is concerned and provided assistance.
  - (c) We must not criticise others' achievements in an irresponsible manner by intentionally distorting their professional reputation, prospects and character in both direct and indirect ways.
  - (d) When a clash of interests occur, we must organize a committee composed of authoritative experts in the field and fairly solve the problem based on objective facts and data.
5. We raise common issues only through objective and fair methods.
  - (a) We must be thoroughly objective and honest when submitting expert reports or policy proposals and include relevant, sufficient and appropriate information.

- (b) When addressing public issues through open debates or forums, we must provide opinions based on objective facts and data and must not cause harm to the public interest by making groundless argument or being involved in private interests with others.
  - (c) We must be honest when explaining our business and its advantages, and must not try to meet our interests by damaging professional honor and coordination with coworkers.
6. All members of The Korean Society of Ocean Engineers must abide by the ethical codes of research stated above.

#### **D. The Scope of Manuscript**

1. Manuscripts include papers, technical reports and commentaries, and papers must be the ones that are not released in other journals.
2. "Journals" are the ones that have an appropriate screening of submitted theses and that are published on a regular basis.
3. All manuscripts other than the ones stated in the previous clause can be submitted such as conference papers, research reports, diploma papers and academic articles, provided that their sources are stated according to the 3rd clause of The Regulations on Paper Submission in The Journal of the Korean Society of Ocean Engineers.

#### **E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research**

1. "Fraudulent acts in research" include all affairs that violates ethical codes of research: fabrications, forgeries, plagiarism, overlapping publications and unfair marking of writers which may occur in every phase of research process, such as in a proposal, conducting, a report or presentation of research results.
2. "Fabrication and forgeries" refers to an act of distorting the content or outcome of research by making up false data or results.
3. "Plagiarism" refers to an act of unfairly employing all research results, such as others' publications, research proposals, ideas, hypotheses and theories, without a fair approval or quotation.
4. "Overlapping publications" refers to two writings published in different media sources that are totally identical in their contents or share the major contents. It is also the case of overlapping publication where the paper published later contains a slightly different viewpoint, yet contains the same or slightly different analysis on the same data from the previous paper.
5. "Unfair marking of writers" refers to an act of unfairly gaining reputation by pretending to be a real author of a paper without any participation in research.
6. Fraudulent acts also include a behavior of intentionally disturbing investigations regarding assumed misconducts in research or inflicting an injury on an informant.
7. "Other fraudulent acts in research" refers to all affairs that are generally accepted as the violations to ethical codes of research in the academia.

#### **F. Screening System, Processing Criteria and Procedure**

1. Screening System
  - (a) Authors must submit a "consent form of delegation of copyright" which necessitates an author's confirmation on any violations to ethical codes of research.
  - (b) When inspectors raise question on any violations to ethical codes of research, The Committee of Ethical Codes of Research determines its/their compliance to the regulations after examining all materials concerned and giving the contributor a chance to defend him/herself.
  - (c) When any violations to ethical codes of research are found while screening or editing (after the insertion of a paper in an academic magazine), The Committee of Ethical Codes of Research determines its/their compliance to the regulations after giving the contributor a chance to defend him/herself.
  - (d) When any violations to ethical codes of research are called into question after a paper is published, The Committee of Ethical Codes of Research determines its/their compliance to the regulations after giving the

contributor a chance to defend him/herself.

## 2. Processing Criteria

- (a) All processing criteria regarding fraudulent acts in research follow the regulations and detailed rules for operation of The Committee of Ethical Codes of Research of this society.

## 3. Processing Procedure

- (a) When any affair is determined as a violation to the ethical codes of research in the phase of submission or screening, The Editing Commission should report it to The Committee of Ethical Codes of Research.
- (b) When any affair is determined as a violation to the ethical codes of research after the insertions of a paper in an academic magazine, The Committee of Ethical Codes of Research should immediately cancel its publication and notify the cancellation to the author/s

## **G. Ethical codes of Editing**

1. The editor must a strong sense of ethics regarding the codes of conduct in research and in publication. Also, he/she must not have any personal interests with others in the process of edition.
2. The editor must thoroughly keep security in all matters related to the contribution of manuscripts, screening and publication.
3. The editor must be well-informed about the violations to ethical codes of research and make a neutral and impersonal judgement when he/she found any violations.

## Supplementary Provisions

1. Regulations stated above are enacted after 1 Nov. 2008. For the manuscripts contributed in academic magazines before 1, Nov. 2008, the 3rd clause in “D” is not applied. Also, they are not interpreted as violations to the ethical codes of research even if they did not stated their source in the journal of this society.
2. Also, for the papers applicable to the clause “D” or “E”, the writer/s can take measures such as “cancellation of a paper” based on their judgement, or “rejection of screening” if the paper is under screening.

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

# Publishing Agreement

## Article details

Article :  
Corresponding author :  
E-mail address :  
DOI :

## YOUR STATUS

I am one author signing on behalf of all co-authors of the manuscript.

## ASSIGNMENT OF COPYRIGHT

I hereby assign to Korean Society of Ocean Engineers, the copyright in the manuscript identified above and any tables, illustrations or other material submitted for publication as part of the manuscript (the "Article"). This assignment of rights means that I have granted to Korean Society of Ocean Engineers the exclusive right to publish and reproduce the Article, or any part of the Article, in print, electronic and all other media (whether now known or later developed), in any form, in all languages, throughout the world, for the full term of copyright, and the right to license others to do the same, effective when the Article is accepted for publication. This includes the right to enforce the rights granted hereunder against third parties.

## SCHOLARLY COMMUNICATION RIGHTS

I understand that no rights in patents, trademarks or other intellectual property rights are transferred to the Journal owner. As the author of the Article, I understand that I shall have: (i) the same rights to reuse the Article as those allowed to third party users of the Article under the CC-BY-NC License, as well as (ii) the right to use the Article in a subsequent compilation of my works or to extend the Article to book length form, to include

**I have read and agree to the terms of the Journal Publishing Agreement.**

Corresponding author :

name

signature

Print and sign completed form. Fax(+82 51 759 0657) or E-mail scanned file to : ksoehj@ksoe.or.kr  
(Papers will not be published unless this form is signed and returned)

the Article in a thesis or dissertation, or otherwise to use or re-use portions or excerpts in other works, for both commercial and non-commercial purposes. Except for such uses, I understand that the assignment of copyright to the Journal owner gives the Journal owner the exclusive right to make or sub-license commercial use.

## USER RIGHTS

The publisher will apply the Creative Commons Attribution-Noncommercial Works 4.0 International License (CC-BY-NC) to the Article where it publishes the Article in the journal on its online platforms on an Open Access basis.

The CC-BY-NC license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>.

## REVERSION OF RIGHTS

Articles may sometimes be accepted for publication but later rejected in the publication process, even in some cases after public posting in "Articles in Press" form, in which case all rights will revert to the author.

2017년도 한 해 동안 한국해양공학회지에 투고된 원고를 심사하신 분들입니다.  
심사위원 여러분께 감사드립니다.

강동훈	경상대학교	박준범	한국해양대학교	이우동	경상대학교
강태순	지오시스템리서치	박준수	경남대학교	이정훈	경상대학교
고대은	동의대학교	박진영	한국해양과학기술원	이제명	부산대학교
구본국	창원대학교	배윤혁	제주대학교	이주용	성균관대학교
구원철	인하대학교	백운경	부경대학교	이탁기	경상대학교
권순홍	부산대학교	변승우	한화탈레스	이형석	한중대학교
권식철	충북대학교	변승우	한화탈레스	임성우	POSCO
권오순	한국해양과학기술원	서대원	한국선급	임영섭	서울대학교
김건우	목포해양대학교	서유택	서울대학교	임채환	경운대학교
김경성	동명대학교	서정관	부산대학교	전봉환	한국해양과학기술원
김경환	한국해양과학기술원	성효경	경상대학교	정광효	부산대학교
김국현	동명대학교	손상영	고려대학교	정동호	선박해양플랜트연구소
김동준	부경대학교	송창용	목포대학교	정세민	조선대학교
김동희	한국해양대학교	신상용	울산대학교	정우철	인하공업전문대학
김성용	DNV GL	신성원	한양대학교	정준모	인하대학교
김영복	경남대학교	신성철	부산대학교	조석규	한국해양과학기술원
김영택	한국건설기술연구원	신승호	선박해양플랜트연구소	조성호	한국해양과학기술원
김영훈	경남대학교	심천식	목포대학교	조영대	SK케미칼
김용재	강원대학교	안석환	중원대학교	조일형	제주대학교
김유일	인하대학교	오정근	군산대학교	조현만	부경대학교
김윤해	한국해양대학교	우진호	부경대학교	주문갑	부경대학교
김종규	전남대학교	원종화	Foresys	차주환	목포대학교
김준영	한국해양대학교	유정수	울산대학교	최윤락	울산대학교
김진환	동의대학교	유창일	부경대학교	최형식	한국해양대학교
김현식	동명대학교	윤현규	창원대학교	추연욱	공주대학교
김현조	삼성중공업	윤현동	명지대학교	하태민	강원대학교
남기우	부경대학교	이귀주	조선대학교	허동수	경상대학교
남보우	선박해양플랜트연구소	이기영	한양대학교	허선철	경상대학교
류용욱	부경대학교	이병혁	현대중공업	허재경	DNV GL
박민수	한국건설기술연구원	이상근	군산대학교	현범수	한국해양대학교
박병원	선박해양플랜트연구소	이상무	동양대학교	현성근	인하대학교
박선주	경남대학교	이상필	동의대학교	황성철	선박해양플랜트연구소
박원준	강원대학교	이승래	한국과학기술원	황승현	선박해양플랜트연구소
박종용	서울대학교	이승재	한국해양대학교	황아름	거제대학교
박종천	부산대학교	이연원	부경대학교		

# (사)한국해양공학회 특별회원

한국해양공학회의 특별회원은 다음과 같으며, 귀사의 찬조에 진심으로 감사드립니다(순서: 입회순).

한국선급 / 현대중공업(주) / 대우조선해양(주) /  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 / (주)건일엔지니어링 /  
삼성중공업(주) / (주)케이티서브마린 / 대양전기공업(주) / (주)대영엔지니어링 /  
한국조선해양기자재연구원 / (주)동화뉴텍 / (주)스틸플라워/ 미래인더스트리(주) /  
한국조선해양플랜트협회 / (주)파나시아 / 한국가스공사 / 선보공업(주) /  
(주)멀티스하이드로



한국해양공학회의 특별회원 가입방법은 학회 홈페이지(www.ksoe.or.kr)의  
입회안내를 참고하시고, 기타사항은 학회 사무국으로 연락주시기 바랍니다.

# 한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2016. 10. 20 개정)

1. 본 학회지에 투고하고자 하는 사람은 한국해양공학회 회원임을 원칙으로 하며 공저인 경우에는 적어도 1인 이상이 회원이어야 한다. 단, 본 학회의 편집위원회가 특별히 인정한 사람은 예외로 한다.
2. 원고는 학술논문, 기술보고 및 자료를 포함하고, 학술논문의 경우 다른 학술지에 게재되지 않은 것이라야 한다. 학술지라 함은 투고 논문에 대한 적절한 심사체계와 주기적 발간이 이루어지는 저널(Journal) 등을 의미한다. 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구 보고서, 학위논문, 학술기사 등 모든 원고는 투고가 가능하다. 또한 본 학회지에 게재되면 본 학회 편집위원회의 서면승인 없이 타학술지에 전부 또는 일부가 동일형식으로 발표되어서는 안되며, 저작권은 학회에 귀속된다.
3. 투고논문 중 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구보고서, 학위논문, 학술기사 등의 경우는 각주를 통해서 아래 예와 같이 원고 전체 혹은 부분이 출판되었음을 명시하여야 한다.  
예) 본 논문은 2008년 제주도에에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.
4. 원고는 인터넷 상에서 WebReview 시스템을 이용하여 제출하여야 하며 이때 본 학회의 논문투고양식(template)에 맞도록 한글(Hangul) 또는 MS 워드(MS Word) 파일을 첨부로 제출하여야 한다. 원고접수 시 소정의 심사료를 납부하여야 한다. 또한 저작권 위임동의서를 학회 사무국으로 제출하여야 한다.
5. 원고가 인터넷 상에서 접수된 날을 접수일자로 한다.
6. 원고의 채택여부는 논문심사규정에 따라 정한다.
7. 학회지에 게재될 원고의 규정면수는 6면 이내이고, 규정면수를 초과할 때 저자는 소정의 게재료 이외에 초과분에 대한 게재료를 납부하여야 한다.
8. 논문원고의 체제는 다음을 원칙으로 한다. (1)제목, (2)저자명, (3)주요기술용어(Key Words), (4)영문초록, (5)기호설명, (6)서론, (7)본론(이론해석, 실험방법, 결과, 결과의 해석, 고찰), (8)결론, (9)후기, (10)참고문헌, (11)부록, 기타
9. 상세한 편집 방법은 한국해양공학회지(JOET) 템플릿을 따른다.
10. 원고에 포함될 도표 및 사진은 한글 또는 MS워드에서 처리가 가능하여야 하며 그 선명도에 대한 책임은 저자가 진다.
11. 원고 내용 및 탈오자의 책임은 저자가 진다.
12. 편집위원회는 본 학회의 논문투고규정을 따르지 않는 원고에 대하여 심사 및 게재를 거부할 수 있다.
13. 기타 본 규정에 명시되지 않은 사항(투고분야 포함)은 본 학회 편집위원회의 결정에 따른다.
14. 학회는 저자에게 별쇄본을 제공하지 않는 것을 원칙으로 하나, 필요한 경우는 저자가 실비를 부담하여야 한다.

## 한국해양공학회지

제31권 제6호(통권 제139호)

인쇄: 2017년 12월 26일

발행: 2017년 12월 31일

발행인: 조효제

편집인: 김윤해

발행소: 사단법인 한국해양공학회  
부산광역시 동구 중앙대로 180번길 13, 1302호 (초량동 프레지던트오피스텔)  
전화: (051)759-0656 FAX: (051)759-0657  
담당: 사무국 서은희  
E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr  
Homepage: www.ksoe.or.kr  
인쇄소: 한림원(주)  
서울특별시 중구 퇴계로51길 20 1303(오장동, 넥서스타워)  
전화: (02)2273-4201 FAX: (02)2179-9083  
E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr



사단법인 **한국해양공학회**

The Korean Society of Ocean Engineers