

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

한국해양공학회지

제30권 제2호 (통권 제129호)

2016년 4월

Journal of Ocean Engineering and Technology



Vol. 30, No. 2 (Serial Number 129)
April 2016

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

최윤락 울산대학교

허동수 경상대학교

편집위원

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

나원배 부경대학교

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

송창용 목포대학교

신성원 강원대학교

엄원석 연세대학교

윤현규 창원대학교

이기영 해군사관학교

이종현 제주대학교

이탁기 경상대학교

정동호 한국해양과학기술원

최형식 한국해양대학교

국제자문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

Sime Malenica, Bureau Veritas

T. Hanabusa, The University of Tokushima

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

Yoon Rak Choi, University of Ulsan, 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, Kangwon National University, Korea

Won Suk Ohm, Yonsei University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Kiyoung Lee, Korea Naval Academy, Korea

Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea

Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea

Dongho Jung, KRISO, Korea

Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Sime Malenica, Bureau Veritas, France

T. Hanabusa, The University of Tokushima, Japan

Research and Ethics Boards

Chief

Sung-Bu Suh, Donggeui 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-Keun 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).

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).

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.

© 2016 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 April 30, 2016 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제30권 제2호 (통권 제129호)

2016년 4월

<학술논문>

파랑관통형 고속활주선 선형개발에 관한 연구 정우철 · 이동건 · 정기석	69
해상크레인을 이용한 다양한 해저 장비의 설치 작업 시 상하운동응답특성에 관한 모형 시험 연구 최영명 · 남보우 · 김남우 · 박인보 · 홍사영 · 김종욱	75
부유식 풍력-파력발전 플랫폼과 탑재된 파력발전기와의 단방향 연성 운동 해석 이혜빈 · 배윤혁 · 조일형	84
복합 외력환경 중 원형 단면 세장체의 탄성응답에 관한 실험적 연구 박지원 · 이승재 · 조효제 · 황재혁 · 한성훈	91
해양플랜트 탑사이드용 고압 볼밸브에 대한 구조 안전성 평가 오정식 · 김유일 · 정낙신 · 김상명	100
철근의 영향과 앵커 충돌각도를 고려한 유연콘크리트 매트리스의 손상평가 류연선 · 조현만 · 김서현	109
스트레인 게이지를 이용한 C-type LNG Mock-up 탱크 내조 실 변형 거동 측정 정원도 · 김태욱 · 김정현 · 이도영 · 전민성 · 이제명	117
가변형 이중 날개를 갖는 수직축 수류터빈에 대한 연구 김도형 · 안병권	125
잠수함의 종동요각 한계예측 알고리즘 설계 박종용 · 김낙완 · 신용구	134
<기술보고 및 자료>	
유인플랫폼에서의 수중로봇 운용을 위한 진수 및 회수 체계 고찰 이기영	141

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 30, Number 2

April, 2016

<Original Research Articles>

- Study of Hull Form Development of Wave-Piercing-Type High-Speed Planing Boat
Uh-Cheul Jeong, Dong-Kun Lee and Ki-Seok Jung 69
- Experimental Study of Heave Responses of Subsea Equipment during Installation Operation Using Offshore Crane
Young-Myung Choi, Bo Woo Nam, Nam Woo Kim, In Bo Park, Sa Young Hong and Jong Wook Kim 75
- One-way Coupled Response Analysis between Floating Wind-Wave Hybrid Platform and Wave Energy Converters
Hyebin Lee, Yoon Hyeok Bae and Il-Hyoung Cho 84
- Experimental Study on Elastic Response of Circular Cross-section Slender Body to Forced Oscillation,
Waves, and Current
Ji-won Park, Seung-Jae Lee, Hyo-Jae Jo, Jae-Hyuk Hwang and Sung-Hoon Han 91
- Strength Assessment of High-Pressure Ball Valve for Topside Process Unit
Jeong-Sik Oh, Yooil Kim, Nakshin Jeong and Sangmyung Kim 100
- Damage Evaluation of Flexible Concrete Mattress Considering Steel Reinforcement Modeling and
Collision Angle of Anchor
Yeon-Sun Ryu, Hyun-Man Cho and Seo-Hyun Kim 109
- Measurement of Real Deformation Behavior in C-type Lng Mock-up Tank using Strain Gage
Won-Do Jung, Tae-Wook Kim, Jeong-Hyeon Kim, Do-Young Lee, Min-Sung Chun and Jae-Myung Lee 117
- Study on Vertical Axis Water Turbine with Movable Dual Blades
Do-Hyung Kim and Byoung-Kwon Ahn 125
- Design of Pitch Limit Detection Algorithm for Submarine
Jong-Yong Park, Nakwan Kim and Yong-Ku Shin 134
- <Technical Note and Data>**
- Consideration of Launch and Recovery Systems for Operation of Underwater Robot from Manned Platform
Ki-Young Lee 141

Study of Hull Form Development of Wave-Piercing-Type High-Speed Planing Boat

Uh-Cheul Jeong*, Dong-Kun Lee** and Ki-Seok Jung***

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Korea

***Department of Ocean System Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Korea

파랑관통형 고속활주선 선형개발에 관한 연구

정우철* · 이동건** · 정기석***

*인하공업전문대학 조선해양과

**목포해양대학교 조선해양공학과

***목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과

KEY WORDS: Wave piercing type high speed planing boat 파랑관통형 고속활주선, Hull form development 선형개발, Side fin 선측날개, Model test 모형시험 Deadrise angle 선저경사각, Resistance performance 저항성능

ABSTRACT: A new wave-piercing-type high-speed planing boat without a chine was developed, and its basic performance was investigated in a model test, including the resistance, trim, and sinkage. The maximum speed of the developed ship was 35 knots. The hull form was developed by combining a VSV (very slender vessel) and TH (transonic hull), which have large deadrise angles at the bow. The main dimensions were estimated by a statistical approach using actual ship data. The effect of a side fin attached at the stern near the water line was investigated from a resistance point of view. It was found that the developed hull form showed the possibility of a new concept for a high-speed planing hull without a chine, and the side fin played an important role in increasing the resistance performance by controlling the trim and sinkage in the high-speed range.

1. 서 론

최근 초기 레저활동에 널리 사용되고 있는 모터보트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국, 유럽 등 해외 레저보트 선진국들은 오랫동안 다양한 선형과 디자인을 갖는 고속 레저보트를 개발하여 왔으나, 우리나라는 그 역사가 비교적 짧은 편이다.

국내에서 진행된 주요 연구로, Jeong et al.(2004)은 Niwa(2002)가 제시한 통계자료를 활용하여 연안용 레저보트의 초기선형을 설계하여 그 성능을 수조시험을 통하여 분석하였으며, Jeong et al.(2008)은 선속 24knots(12.3m/s) 이상, 전장 20m 이하의 고속활주선 80여척을 분석하여 초기선형 개발에 활용할 수 있는 새로운 통계자료를 제시하였다. 또한 Kwon et al.(2012)은 고속 활주선의 종 방향 자세 안정성을 향상시키기 위한 소형 선측날개(Side fin)를 개발하였고, Jeong et al.(2012)은 알루미늄합금을 이용한 전장

9.5m급 고속선을 개발하여 그 성능을 동급 FRP(Fiber reinforced plastic) 보트와의 비교 연구를 수행한 바 있다. 이러한 연구들은 전통적인 활주선을 대상으로 하고 있어 내파성능이 불리하고, 선저에 작용하는 선저충격(Slamming)이 크게 발생한다는 문제를 가지고 있다.

기존 활주선의 문제를 극복하기 위하여 최근에는 VSV(Very slender vessel)(Thompson, 1997), TH(Transonic hull)(Calderon and Hedd, 2011) 등 신개념 선형들이 제안되었고 일부는 실용화 되고 있으나, 아직까지 이러한 선형에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. VSV의 경우 활주선과 유사한 차인(Chine)을 가지고 있으며, 선수부가 쇄기형으로 뾰족하고 선미부는 활주형 선박이다. 반면, TH의 선수부는 VSV와 유사한 뾰족한 형상이나, 선미부에서의 선저경사각(Deadrise angle)이 극단적으로 작은 상자모양과 유사한 형상이고, 차인이 없는 배수량형 선형

Received 16 December 2015, revised 16 March 2016, accepted 11 April 2016

Corresponding author Dong-Kun Lee: +82-61-240-7322, dklee@mmu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper revised edition based on proceedings of KSOE 2015 in Jeju.

을 갖고 있다. 이러한 선박들은 선수부 선저 경사각이 극단적으로 크다는 공통점이 있다.

Kihara and Ishii(1986)와 Kim et al.(2013)의 활주선에 대한 모형시험 결과에 따르면 선수부 선저경사각이 커질수록 속도성능은 다소 떨어지지만 파랑 중 선수 상하 가속도가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 결과에 따르면 VSV와 TH 역시 일반적인 활주선에 비하여 우수한 내파성능을 갖고 있을 것으로 예상되나, 침수표면적 증가와 추진효율 감소로 속도성능은 다소 불리할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 VSV와 TH개념을 접목하여 차인이 없는 새로운 파랑관통형 고속활주선 선형을 개발하였다. 개발선은 전장 8m급 소형선으로 최대속도 35knots(18m/s)이며, 모형시험을 통해 저항성능과 항구 시 자세변화를 분석하였다. 또한 선측 부가물을 부착하여 항구자세 변화에 따른 저항 성능 개선 가능성을 검토하였으며, 최종 도출된 선형에 대하여 실선 소요마력을 추정하였다.

2. 선형개발

2.1 선형계획

본 논문에서 개발하고자 하는 선박은 전장 8m 레저용 고속선으로, 선외기 추진으로 최대속력은 35knots(18m/s)이다. 승선인원은 최대 4~5명으로 계획하였고, 선체 재질은 대량생산에 적합한 FRP이다. 파랑관통형 활주선은 통상적인 활주선에 비하여 국내외 연구 실적이 풍부하지 않은 관계로 통계적인 접근 방법에 의하여 주요제원을 추정하기에는 다소 어려움이 있다.

본 연구에서는 VSV개념의 소형 레저보트를 제작하고 있는 독일 Felleryachting 사(<http://www.felleryachting.de>)의 실적선을 참고로 초기제원을 추정하였다. Felleryachting사에서 시판 중인 VSV 개념의 레저보트 주요제원을 Table 1에 나타내었다.

실적선의 주요제원을 토대로 도출한 개발선의 길이-폭 비는 약 2.8~3.3 정도이고, 8m급 보트의 배수량은 약 2.0~2.5ton 내외가 될 것으로 추정된다. 본 개발선의 초기 추정된 주요제원은 Table 2와 같다.

본 연구의 개발선과 같은 파랑관통형 고속선에 적합한 마력

Table 1 Principal dimensions of Felleryachting boats

Spec.	Dymax p1	Dymax Express Cruiser	Dymax Voltage	Dymax Evolution	Tender
Length overall [m]	5.30	5.45	6.50	8.50	7.50
Beam [m]	1.80	1.85	2.00	2.60	2.65
Draft [m]	0.25	0.24	0.60	0.40	0.48
Depth [m]	0.8	0.8	1.0	1.30	1.75
Dead weight [kg]	554.5	549.5	1150	2115.75	3500
Speed [knots] (m/s)	40 (20.5)	40 (20.5)	25 (12.8)	40 (20.5)	40 (20.5)

Table 2 Estimated dimensions of initial hull form

Item	Dimension
Length overall [m]	8.0
Beam [m]	2.0~2.5
Displacement [ton]	2.0~2.5

추정 방법은 아직 제시된 사례가 없다. 본 연구에서는 Niwa (2002)가 제시한 고속활주선에 대한 통계식을 근거로 초기마력을 추정하였다.

$$BHP \approx 0.1 \cdot V^2 \cdot \Delta^{(5/6)} \tag{1}$$

식 (1)은 $V/\Delta^{(1/6)} > 20$ 범위에서 유효한 활주선에 대한 추정식으로 V는 선속(Knot), Δ 는 배수량(Ton)이다. 본 개발선은 비록 완전한 활주선은 아니나 $V/\Delta^{(1/6)} = 30$ 정도로 식 (1)을 초기 마력추정에는 사용 가능하다고 판단된다. 식 (1)에 따르면 본 개발선 목표속도인 35knots(18m/s) 달성을 위해서는 배수량 2.0ton의 경우에는 약 220HP(164kW), 2.5ton의 경우 약 260HP (193kW) 엔진이 필요할 것으로 추정된다.

2.2 선형설계

일반적인 활주선은 선형개발을 위한 풍부한 실적을 가지고 있다. 그러나 파랑관통형 활주선의 경우, 이러한 실적자료가 충분하지 않은 관계로 설계자의 경험에 의하여 반복적인 시행오차를 통하여 설계를 수행하여야 한다. 본 연구에서는 기존 활주선 설계 개념을 토대로 초기 선형을 설계하고 선수부 형상을 파랑관통형으로 수정하는 방법을 적용하였다.

일반적인 활주선의 경우 활주성능에 민감한 영향을 미치는 종 방향 부심위치는 선미부에서 수선길이의 40% 내외가 적당하고(Niwa, 2002; Clement, 2004), 선저경사각은 선체 중앙부에서 20~30°, 선미부에서 추진효율을 고려하여 10~15°내외가 적당하다고 알려져 있다(Kihara and Ishii, 1986).

Alberto and Calderon(2005)는 TH의 경우에도 일반적인 활주선과 마찬가지로 종 방향 부심위치를 선미부로부터 선체 길이 방향으로 40% 내외에 위치할 것을 제안하였다. 따라서 본 개발선도 종 방향 부심위치를 40% 내외에 위치하도록 배수량 분포를 조정하였다.

일반적으로 선폭이 증가하면 횡 방향 안정성이 증가하는 장점이 있으나, 배수량이 증가하여 저항성능이 나빠질 위험성이 존재한다. 본 개발선은 선외기 엔진 및 탑승자의 위치와 무게를 고려하여 선미부에서 최대 폭을 2.2m, 배수량은 2.0ton으로 결정하였고, 전반적인 수선면 형상은 부드러운 곡면을 갖도록 하였다. 선미부에서의 선저경사각은 15°내외로 하되, 낮은 흘수로 인하여 크게 발생할 위험성이 있는 선미파를 억제하기 위하여 선미부 흘수선을 선미부 너클라인(Knuckle line)에 걸치도록 하였으며, 단면형상은 U자 형상으로 설계하였다. 또한 선저경사각과 흘수선 형상 등을 조정하면서 배수량을 2.0ton으로 유지하여 Fig. 1과 같은 최종 형상의 개발선 선형을 설계하였다.

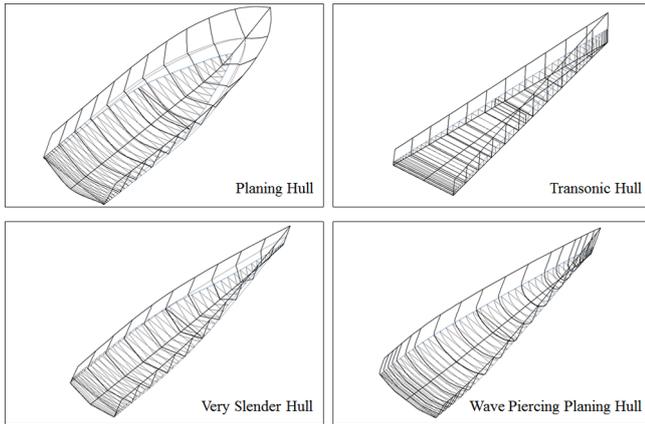


Fig. 1 Comparison of hull shape

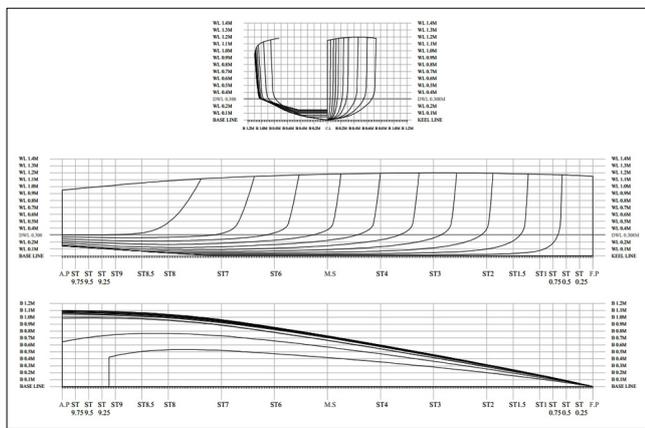


Fig. 2 Lines of final hull form

Table 3 Principal dimensions of final hull form

Item	Dimension
Length between perpendicular [m]	8.0
Beam [m]	2.2
Draft [m]	0.3
Depth [m]	1.2
Displacement [ton]	2.0
Block Coefficient	0.39
Longitudinal Center of Buoyancy [from A.P., % of Length]	39
Design speed [knots] (m/s)	35 (18)

모형시험 결과를 토대로 항주트림과 저항성능을 확인 후 적절한 부가물을 결정하기 위하여 본 개발선형에는 차인을 고려하지 않았다. 개발선의 최종 선도와 주요제원을 Fig. 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

2.3 정복원성 평가

본 개발선은 일반적인 활주선에 비하여 내항성능을 우수할 수 있으나 선폭이 좁아 복원성이 좋지 않을 것으로 예상된다. 이에

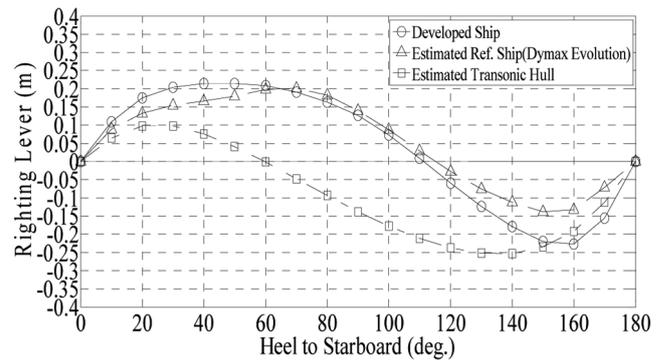


Fig. 3 Comparison of righting lever curves

Table 4 Stability analysis of final hull form

Roll angle	Required value [m · rad]	Calculated value [m · rad]
0°~30°	0.055	0.069
Small angle among 30°~40° or seawater inflow angle	0.030	0.036
Small angle among 0°~40° or seawater inflow angle	0.090	0.105

본 연구에서는 복원성 확보를 중요한 설계변수 중 하나로 고려하여 복원성 기준에 부합하도록 선폭을 증가시키며 설계를 수행하고, 동일 유사 실적선인 실적선 선형(Dymax evolution)과 TH 선형을 모델링하여 각각의 복원성을 추정하고 개발선과 비교하였다.

Fig. 3은 본 개발선과 실적선과의 복원성을 비교한 결과를 보이고 있다. 30°를 기준으로 실적선 Dymax evolution과는 약 50%(0.05m)의 개선을, TH 선형과는 약 100%(0.1m)의 복원성 개선을 확인하였다. 또한 해양수산부 선박복원성기준에 의하여 개발선의 복원성을 검토한 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 모든 조건에서 복원성 기준을 만족하는 것으로 확인하였다.

3. 모형시험

3.1 시험조건

개발선의 저항성능은 서일본유체기술연구소(West Japan Fluid Engineering Laboratory)의 고속회류수조(길이×폭×깊이=24.5m×3.5m×6.5m, 최대속도 6.0m/s)에서 모형시험을 통하여 분석하였다.

시험모형의 수선 간 길이(Length between perpendicular)는 0.8m이며 하드우레탄으로 제작하였고, 속도는 실선기준 10knots(5.1m/s)~35knots(18m/s) 범위에서 시험을 수행하였다.

Park et al.(2002)과 Jeong et al.(2004), Jeong et al.(2008)에 의하면 연안어선과 고속레저보트에 선측날개(Side fin)를 부착하여 모형시험을 한 결과, 일정 속도 이상에서 선측날개는 항주트림을 변화시켜 저항성능 개선에 기여한다고 밝힌바 있다. 이에 본 연

Table 5 Model test conditions

Test case	Hull shape
Case-1	Bare hull
Case-2	Bare hull + Side Fin-1
Case-3	Bare hull + Side Fin-2
Case-4	Modified hull + Side Fin-2

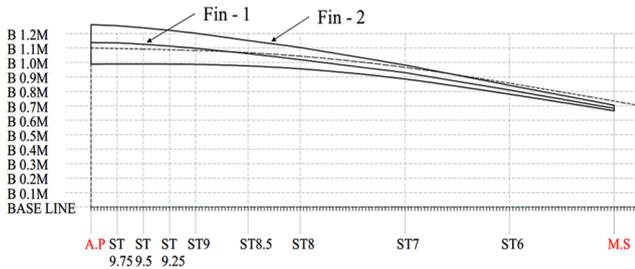


Fig. 4 Dimensions of side fin



(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3



(d) Case-4

Fig. 5 Case types of test model

구에서는 일반적인 활주선이나 VSV선형에 부착된 차인 대신 선측날개를 부착하여 그 영향을 함께 분석하였다.

모형시험은 Table 5에서 보는 바와 같이 모두 네 가지 조건에서 수행하였다. Case-1은 나선상태이고, Case-2는 선미부에서 선체중앙부까지 실선기준 0.1m 폭을 갖는 선측날개(Fin-1)를 부착한 경우이다. Case-3은 Fin-1을 폭 방향으로 두 배 증가시킨 날개(Fin-2)를 부착한 경우이고, Case-4는 선미형상을 U형상에서 V형상으로 개조하고 Fin-2를 부착한 경우이다.

선측에 부착한 날개(Fin-1와 Fin-2)는 선미부에서 수면 아래로 실선기준 약 2.5cm에 위치하고 수선과 10°각도 하향으로 부착하였다. 모든 날개는 선체중앙부에서 폭이 거의 0m가 되도록 삼각형 형상을 갖도록 하였다. 선측날개의 형상제원과 시험모형을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

3.2 시험결과

네 가지 시험조건에 대한 성능을 비교하여 Table 6과 Fig. 6 ~ Fig. 8에 나타내었다. Table 6과 Fig. 6은 고속선에서 중요한 성능지표인 배수량 톤당 저항성능을 나타내고 있으며, Fig. 7과 Fig. 8은 트림과 선체부상량을 각각 0부터 설계속도까지 변화를 나타내고 있다. 배수량 톤당 저항성능을 비교하면 나선상태(Case-1)보다 소형 선측날개를 부착함으로써 저항성능이 개선됨을 알 수 있다(Table 6, Fig. 6). 이때 선측날개의 크기가 상대적으로 작은 Case-2의 저항성능이 가장 우수하나, 그 차이는 그리 크지 않다.

본 개발선의 항주트림은 일반적인 활주선과 다른 특성을 보인다(Fig. 7). 일반적인 활주선은 저중속영역에서 선미트림이 급격하게 증가하다가 속도가 증가할수록 선미부가 부상하면서 안정된 활주상태에 도달하면서 트림이 감소하는 특성을 갖는다(Jeong et al., 2012).

그러나 본 개발선의 경우, 이러한 급격한 트림변화는 나타나지 않고 있다. 즉, 속도가 변화여도 안정된 항주자세를 갖고 있다고 판단된다. 특히 날개를 부착함으로써 전반적으로 트림이 감소하고 있으며, 선측날개의 폭이 클수록 그 영향이 큰 경향을 보인다. 이는 선측날개에 작용하는 양력에 의하여 모멘트가 발생하고 이로 인해 트림이 억제되는 것으로 판단된다. 선미형상을 V형상으로 개선하고 Fin-2를 부착한 Case-4의 경우, 선미부력이 추가적으로 발생함에 따라 항주트림이 감소하고, 고속영역에서 가장 안정된 특성을 보이고 있다.

Table 6 Comparison of resistance performance(R_t/Δ)

Speed [knots] (m/s)	Case-1 [R_t/Δ]	Case-2 [R_t/Δ]	Case-3 [R_t/Δ]	Case-4 [R_t/Δ]
10 (5.1)	0.10	0.11	0.12	0.12
15 (7.7)	0.17	0.19	0.20	0.19
20 (10.2)	0.25	0.21	0.21	0.21
25 (12.8)	0.31	0.24	0.24	0.23
30 (15.4)	0.34	0.28	0.27	0.27
35 (18.0)	0.38	0.33	0.35	0.35

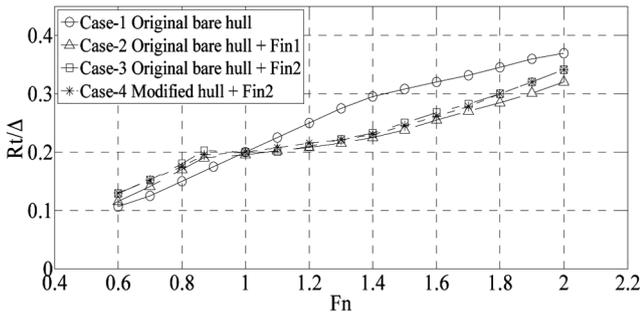


Fig. 6 Comparison of resistance performance (R_r/Δ)

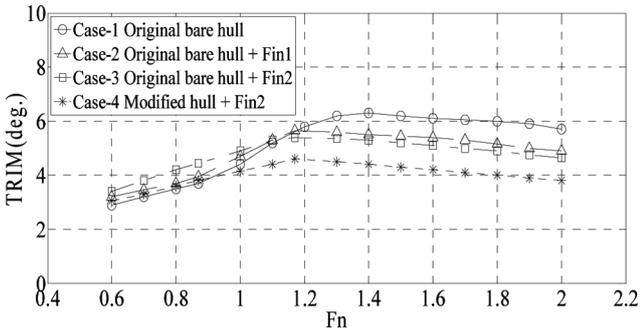
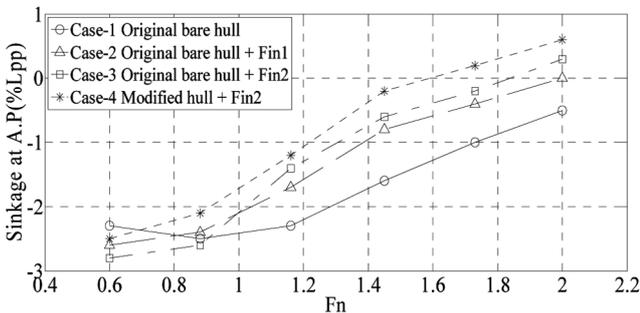
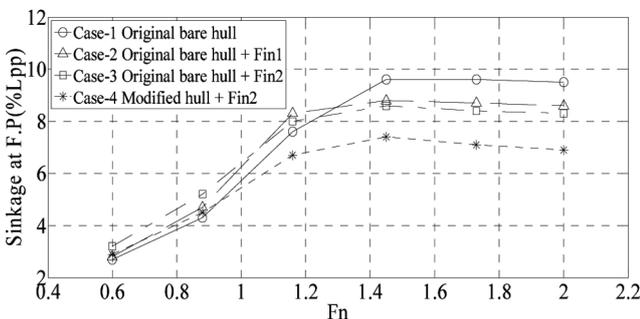


Fig. 7 Comparison of trim angle (degree)



(a) A.P.



(b) F.P.

Fig. 8 Comparison of sinkage

선미부의 선체부상량은 모든 경우에 있어서 속도가 증가할수록 지속적으로 증가하는 특성을 보인다. 그러나 선수부의 선체

부상량은 일정 속도 이상에서 큰 변화는 나타나지 않고 있다 (Fig. 8). 나선상태 보다 날개를 부착한 경우, 그리고 날개의 폭이 클수록 날개에 작용하는 동적 힘에 의하여 선체부상량은 증가하고 있다. 선미형상을 V형상으로 개선하고 Fin-2를 부착한 Case-4의 경우, 선미부의 부력이 추가적으로 발생함에 따라 선체부상량이 가장 크고 이 때문에 항주트림이 가장 작은 결과를 보이고 있다.

몇 가지 속도에서 나선상태(Case-1)와 Case-4의 파형을 Fig. 9 ~ Fig. 12에 나타내었다. 이에 따르면 전 속도영역에서 선측날개를 부착함으로써 선미트림이 억제되고 선미파가 크게 감소함을 확인할 수 있다. 또한 선체 표면을 따라 흐르는 유체입자가 선측날개에 의하여 옆으로 분리되고 있음을 확인할 수 있는데 이 현상이 선측날개를 부착함으로써 저항이 감소된 주 이유라고 판단된다. 이를 통해 본 개발선 선미부에 부착한 소형날개는 안정된 항주트림을 유지할 수 있을 뿐 아니라, 선체를 따라 흘러가는 유체입자를 선체로 부터 분리시키고, 선미파를 억제함으로써 저항 감소에도 기여할 수 있다는 것을 확인하였다.



(a) Case-1

(b) Case-4

Fig. 9 Wave patterns, $V = 10.3\text{m/s}$ (20 knots)



(a) Case-1

(b) Case-4

Fig. 10 Wave patterns, $V = 12.9\text{ m/s}$ (25 knots)



(a) Case-1

(b) Case-4

Fig. 11 Wave patterns, $V = 15.4\text{ m/s}$ (30 knots)



(a) Case-1

(b) Case-4

Fig. 12 Wave patterns, $V = 18.0\text{ m/s}$ (35 knots)

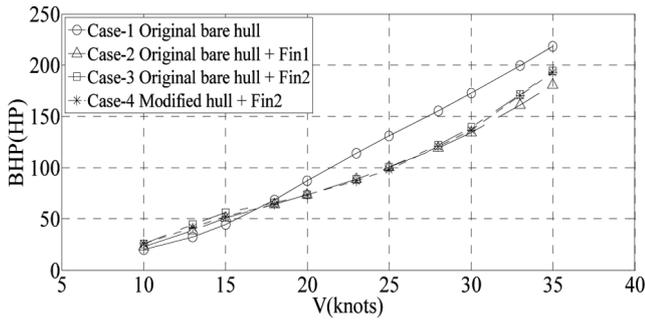


Fig. 13 Power estimation

모형시험을 통하여 추정된 실선의 소요마력은 Fig. 13과 같다. 이 때, 전달효율(η)은 0.6으로 추정하였다. 이 전달효율 값은 Shinata(1992)와 Simizu and Sunamaya(1996)가 고속 보트용 선외기 성능시험에서 제시한 프로펠러 효율을 바탕으로 추정하였다. 선측 날개가 부착된 경우, 35knots(18m/s) 속력을 위하여 약 200HP(149kW)(15% Sea margin 고려 약 230HP(171kW)) 선외기가 필요할 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적인 활주선에 VSV와 TH개념의 선형을 접목한 새로운 파랑관통형 활주선형을 개발하였다. 개발선의 전장은 8.0m, 배수량은 2.0ton이며 최대설계속력은 35knots(18m/s)이다. 초기 주요제원은 실적선을 바탕으로 도출하였으며, 개발된 선형의 선수는 파랑관통형 형상을 갖고 있으며 차인이 없는 선형이다. 개발선의 모형시험 분석결과를 통해 선측날개와 선미형상에 의해 자세가 크게 변화함을 확인하였으며, 선미선저형상은 V형상으로 선미부 선측 일부에 날개를 부착함으로써 항주트림이 개선되고 저항성능도 설계속도에서 7.8% 향상된 것을 확인하였다. 200HP(149kW)급 선외기로 정수 중 35knots(18m/s) 달성이 가능할 것으로 판단된다.

향후 파랑 중 선수변위 및 상하가속도를 계측하여 유사한 규모의 활주선과 비교하는 연구를 수행하고, 선측 날개의 크기 및 위치 등에 따른 영향을 분석하고자 한다.

후 기

본 연구는 해양수산부 미래해양산업기술개발사업 “글로벌 해양레저시장 진출을 위한 파랑 안정형 고속 레저보트 개발” 과제(20140112)와 교육부 및 한국연구재단 지역혁신창의인력양성사업(2015H1C1A1035813) 지원으로 수행되었습니다.

References

Alberto, A., Calderon, F., 2005. Patent No. 6843193 B1. United States Patent.

Calderon, A., Hedd, L., 2011. Theoretical and Experimental Investigation on Resistance of Transonic Hulls. Proceeding of 9th HSMV, Naples, 25-27.

Clement, E.P., 2004. The Plum Hulls. Boat Builder, 88, 82-95.

Jeong, U.C., Park, J.W., Jeong, S.H., 2004. Hull Form Development of a Small-Size High-Speed Coastal Leisure Boat. Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(1), 80-84.

Jeong, U.C., Park, J.W., Kim, K.S., 2008. Hull Form Development of 32-ft Class Leisure Boat by Statistical Analysis of Actual Ship. Journal of Ocean Engineering and Technology, 22(3), 58-63.

Jeong, U.C., Kim, D.J., Choi, H.S., 2012. Study on Hull Form Development and Resistance Performance of High Speed Aluminum Leisure Boat. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(6), 14-18.

Kim, D.J., Kim, S.Y., You, Y.J., Rhee, K.P., Kim, S.H., Kim, Y.G., 2013. Design of High-speed Planing Hulls for the Improvement of Resistance and Seakeeping Performance. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5(1), 161-177.

Kwon, S.Y., Jeong, U.C., Hong, K.S., Lee, H.J., Na, H.J., 2012. Study on Development of Control Fin of Longitudinal Position for High Speed Leisure Boat. Proceeding of KAOSTS, Daegu Korea, 1189-1192.

Kihara, K., Ishii, T., 1986. A New Method of Initial Design for High Speed Craft(2). Transition of West Japan Society of Naval Architecture, 72, 293-300.

Niwa, S., 2002. Engineering of High Speed Boat (Resistance and Propulsion). A Foundation of Ship and Ocean (in Japanese).

Park, J.W., Jeong, U.C., Park, C.W., Kim, D.J., 2002. A Study on the Resistance Performance of 6.67 G/T Class Fishing Vessel in Low and Middle Speed Ranges. Proceedings of the Korea Committee for Ocean Resources and Engineering Conference, 89-93.

Shinata, Y., 1992. Prior Research for High Speed of SZ Drive. Yanmar Technical News, 12, 5-10.

Simizu, T., Sunamaya, Y., 1996. Research into the Propeller Strut for High Speed Outboard Motors. Suzuki Technical Review, 22, 72-78.

Thompson, A., 1997. Patent No. 6116180. United States Patent.

Experimental Study of Heave Responses of Subsea Equipment during Installation Operation Using Offshore Crane

Young-Myung Choi*, Bo Woo Nam*, Nam Woo Kim*, In Bo Park*,
Sa Young Hong* and Jong Wook Kim**

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

**Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

해상크레인을 이용한 다양한 해저 장비의 설치 작업 시 상하운동응답특성에 관한 모형 시험 연구

최영명* · 남보우* · 김남우* · 박인보* · 홍사영* · 김종욱**

*선박해양플랜트연구소

**현대중공업(주)

KEY WORDS: Subsea equipment installation 해저 장비 설치, Installation operation 설치 작업, Heave response 상하 운동 응답, Offshore crane 해상 크레인, Added mass 부가 질량

ABSTRACT: An experimental study on a subsea installation using an offshore crane was conducted. Concrete blocks, suction piles, and manifolds were considered in this study. Free decay tests were conducted to investigate the fluid characteristics of the subsea structures. The added masses of the structures were estimated. The motion response amplitudes of the subsea structures were compared for different structures and water depths. In addition, the dynamic tension transfer function of the crane wire was investigated. The root mean square values of the heave motion and the dynamic amplification factor of the wire tension were investigated in irregular waves.

1. 서 론

최근 들어 심해로의 유전의 개발이 확대됨에 따라 심해 해양 플랜트 설치기술에 대한 중요성이 대두되고 있다. 심해 해양 플랜트 설치기술은 해저 생산 장비, URF(Umbilical, Riser, Flowline) 시스템 등을 원하는 위치에 안전하고 경제적으로 설치하기 위한 일련의 작업흐름을 설계 및 해석하는 기술을 일컫는다. 심해 설치 시 설치 공법의 선정 및 평가 기술, 설치 선단과 설치 장비를 선정 및 운용 기술, 해저 장비 또는 구조물을 설치선으로부터 해저에 안정적으로 하강시키는 기술, 해저 장비를 해저 연약 지반에 지지하기 위한 기술 등이 요구된다. 심해저 설치 시 주로 해상 크레인을 이용하여 심해저 장비를 설치하게 된다. 이러한 설치 공법은 대상 수심이 깊어짐에 따라 해저 구조물의 상승 및 하강 문제(Lifting and lowering), 하중 제어 및 위치 유지

(Load control and positioning) 그리고 해상 조건에 따른 작업 조건 요건(Metoccean effects and weather window requirement) 과 같은 공학적인 문제들이 고려되어야 한다(Rowe et al., 2001). 특히, 심해 설치 작업 시에는 크레인 와이어의 길이가 길어지게 됨에 따라 특정 깊이 조건에서 설치구조물과 크레인 와이어의 상하 공진응답이 발생할 수 있다. 이러한 과도한 상하 공진응답은 구조물간 또는 해저면과의 충돌을 유발할 수 있으며 또한 크레인 와이어에 큰 장력을 가하게 되어구조물의 소실과 같은 사고로 이어질 수 있다.

해상 설치와 관련한 최근 연구로는 Clauss et al.(2000)이 부유식 해상 크레인의 작업과 관련하여 크레인선과 매달려 있는 구조물간의 비선형 연성 문제에 관한 연구를 수행하였으며, Cha et al.(2009)는 다물체 동역학을 기반으로 하여 해상크레인을 이용한 블록 Lifting 작업에 관한 시간영역 해석을 수행한 바 있

Received 10 December 2015, revised 12 February 2016, accepted 22 April 2016

Corresponding author Sa Young Hong: +82-42-866-3930, sayhong@kriso.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE 2015 in Daejeon.

다. Kimiaei et al.(2009)는 해저설치구조물에 작용하는 유체력과 관련하여 단순화된 수치 모델링을 제시한 바 있다. Nam et al.(2013)는 해저 장비의 하강 작업 시 Heave compensator의 유효성에 관한 수치해석 연구를 진행한 바 있으며 Nam et al.(2015)는 해저 장비설치 모형 시험을 수행하였으며 Passive heave compensator의 효율에 대해 검토한 바 있다.

본 연구에서는 해상 크레인을 이용한 심해저 설치 모형 시험을 수행하였으며 해저 설치 구조물 종류에 따른 부가 질량 및 설치 수심에서의 공진 주기, 수직 운동 응답 및 크레인 와이어 동적 장력 전달함수를 살펴보았다. 또한 설치 수심에 따른 결과를 비교 고찰하였다. 심해저 설치를 위해 3가지 종류의 해저 설치 구조물이 고려되었으며 심해저 설치 모형 상사를 위한 모형 시험 기법을 고안하였다. 또한 수면 하 구조물의 운동을 계측하고자 수중 카메라를 이용하여 모형 시험을 수행하였다.

2. 모형 시험

2.1 시험 모델

본 연구에서는 KT서브마린사가 보유한 “세계로호”를 대상선으로 활용하였다. 본 선박은 해상크레인(Offshore crane)과 에이프레임(A-frame)을 선미부에 장착하고 있으며, 다양한 해저 케이블 설치용 장비 등을 보유하고 있다. Fig. 1은 1/30의 축척비로 제작된 모형선박의 모습을 보여주고 있다. 대상 선박의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of model ship

Items	Unit	Prototype	Model
Model ratio	[-]	1	30
Displacement	[m ³]	7,779	0.288
L_{BP}	[m]	95.6	3.187
Breadth	[m]	20.0	0.667
Depth	[m]	10.0	0.333
Draft	[m]	6.0	0.200



Fig. 1 Model Vessel

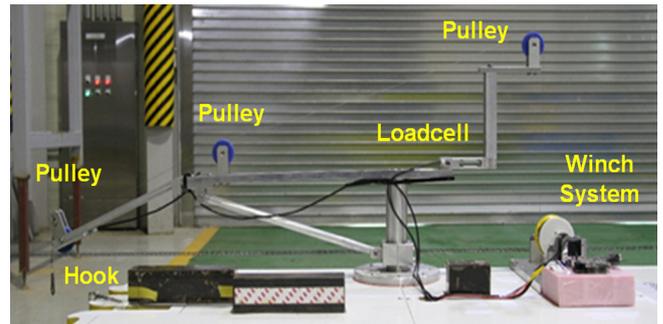
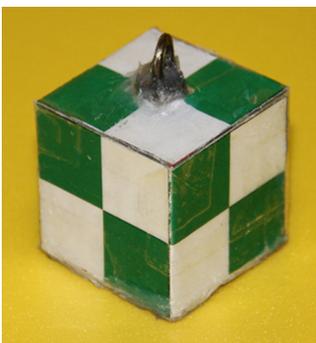


Fig. 2 Offshore crane model

심해 설치를 위해 사용된 해상 크레인은 모형 선박의 좌현 선미부에 위치하고 있으며, Fig. 2는 모형시험을 위해 축소 제작된 크레인의 모습을 보여주고 있다. 모형 크레인은 크레인 자체의 진동을 최소화하기 위해 알루미늄 재질로 견고하게 제작하였으며, 소형 모터가 장착된 윈치 시스템을 적용하여 설치 구조물의 상승 및 하강 작업이 가능하도록 구성하였다. 또한 크레인 와이어가 통과하는 도르래를 2축 로드셀에 연결하여 크레인 와이어에 작용하는 장력을 계측할 수 있는 시스템을 고안하였다.

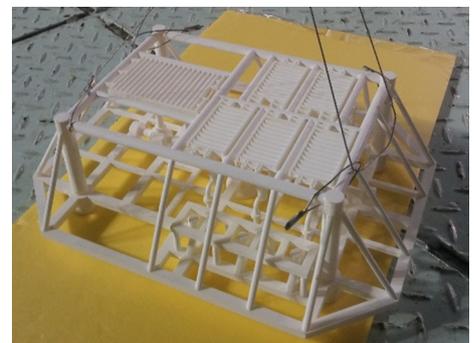
본 모형시험에서는 3가지 해저 설치 구조물, 즉 콘크리트 블록 (Concrete block), 석션 파일(Suction pile), 매니폴드(Manifold)을 고려하였다. Fig. 3은 축소 제작된 해저 설치 구조물의 모습을 보여주고 있으며, Table 2는 수중 및 공기 중에서 계측된 대상 구조물의 무게를 실선 기준으로 나타내었다.



(a) Concrete Block



(b) Suction Pile



(c) Manifold

Fig. 3 Subsea Equipment

Table 2 Underwater weight of subsea installation objects

Object	Measured (in air)	Measured (in water)
	[Ton]	[Ton]
Concrete block	5.130	3.094
Suction pile	7.560	3.972
Manifold	100.1	77.80

2.2 절단 심해 설치 모형 시험 기법

선박해양플랜트연구소의 해양공학수조(L×B×d : 68.8×37.0×3.2m)의 중심에 깊이 15m, 직경 5m의 피트(Pit)가 존재하지만 실제 심해저 설치 수심인 1,000~3,000m에 대응하는 수심조건을 확보하기 어려우며, 또한 실제 크레인 와이어의 축 강성 및 단위 길이 당 질량 등을 모형 축소비로 상사하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해 절단 심해 설치 모형

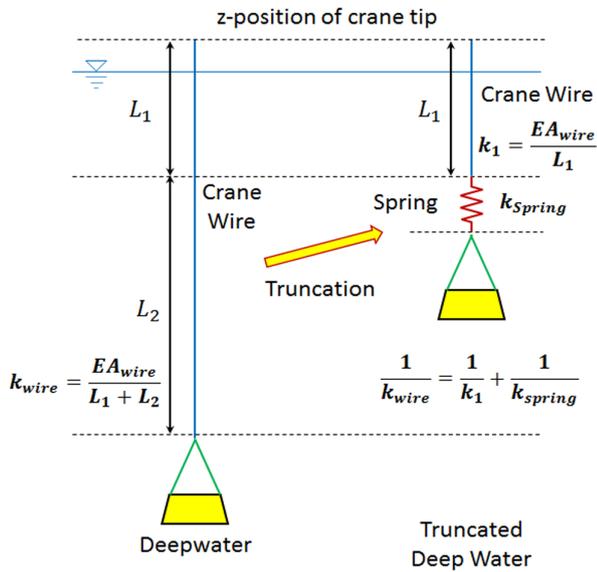


Fig. 4 Schematic view of an truncated deep water installation experiment technique

Table 3 Crane wire and truncated spring stiffness

Item	Dimension	Value
Wire axial stiffness (Target)	[kN]	9,398
Wire axial stiffness (Experiments)	[kN]	23,962
Depth 1000m spring	[kN/m]	9.359
Depth 700m spring	[kN/m]	13.426
Depth 400m spring	[kN/m]	23.495

시험 기법(Truncated deep water installation experiment technique)을 도입하였다(Nam et al. 2015). 이 기법에서는 실제 설치 수심 조건에 대한 크레인 와이어의 축강성을 상사하고자, 모형수조 깊이를 초과하는 부분의 크레인 와이어에 대해 부가적인 스프링으로 대체하여 권송시스템의 전체 수직 강성을 상사하게 된다. 이 기법에 대한 도식적인 설명은 Fig. 4에 나타내었다.

심해 해저 설치 시 고려된 크레인 와이어의 축 강성 및 모형 시험에서 사용된 와이어의 축 강성 및 절단된 와이어의 강성에 해당하는 스프링을 강성을 실선 기준으로 Table 3에 나타내었다.

2.3 해저 설치 구조물 운동 계측 시스템

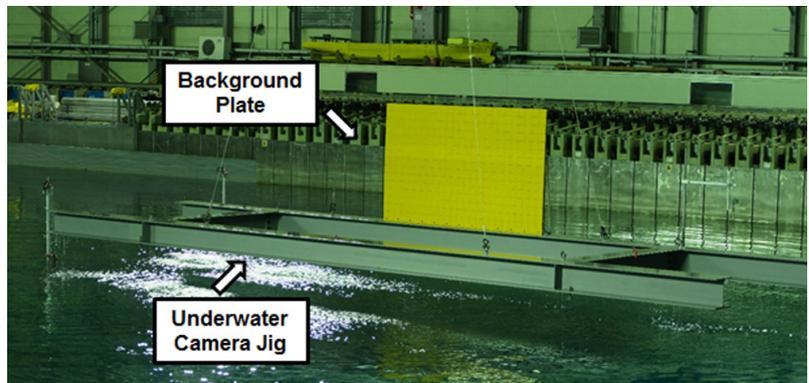
수중에서 해저 설치 구조물의 운동을 계측하기 위해 영상 기반 운동 추출 기법을 도입하였으며 모형 시험에서 사용된 수중 카메라 및 수중 카메라 취부 장치를 Fig. 5에 나타내었다. 수중 카메라로부터 취득된 영상의 예를 Fig. 6에 나타내었다. 취득된 영상으로부터 수중에서 거동하는 물체의 운동 시계열을 추출하기 위해 영상 기반 운동 추적 프로그램을 사용하였다. 이 때 해저 구조물에 추적이 가능한 구 형태의 추적 점을 부착하였으며 모형 시험 중 수중 카메라 촬영을 통해 얻어진 영상을 후처리 프로그램을 사용하여 운동 시계열을 추출하였다.

2.4 환경 조건

모형 시험에서는 규칙파, 백색잡음파 그리고 불규칙파가 고려되었으며 각각의 환경 조건을 Table 4에 정리하였다. 이 때 입사파는 파향 180°, 즉 선수파만을 고려하였다.



(a) Underwater camera



(b) Underwater camera jig

Fig. 5 Underwater camera system

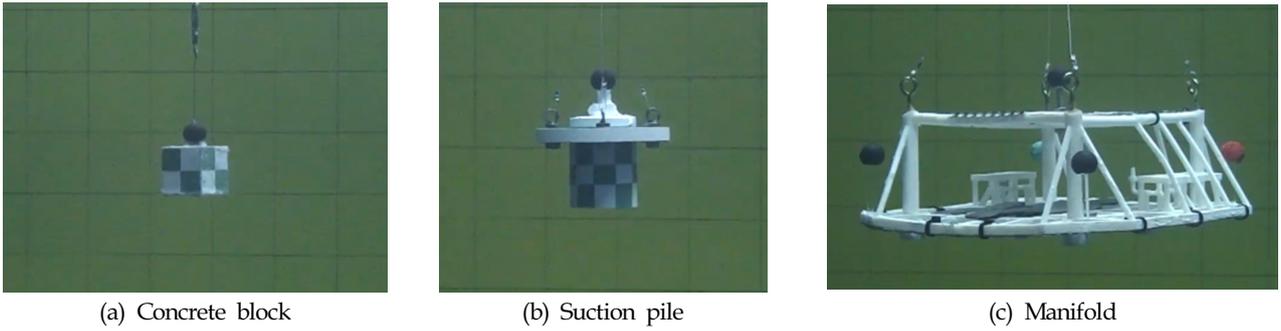


Fig. 6 Acquired underwater camera video

Table 4 Environmental conditions

	Regular	White noise	Irregular waves
Wave amplitude	0.5 m	2.0 m	[Hs] 1.0 m
Period	4, 5, ..., 10, 12 s	$T \in [5 \ 20]$ s	[Tp] 6.0, 7.5, 9.0, 10.5, 12.0
Remarks	-	-	$\gamma=1.00$

3. 모형 시험 결과 및 해석

3.1 자유 감쇠 시험

수중에서 거동하는 설치 구조물의 특성을 파악하기 위해 자유 감쇠 시험을 수행하였다. 자유 감쇠시험은 설치 구조물을 일정한 속도로 하강시키다가 갑자기 정지하도록 윈치 시스템을

제어함으로써 수행하였다. 각각의 구조물에 따라 3번의 반복시험이 수행되었으며 Fig. 7은 자유 감쇠 시험에서의 구조물의 상하운동 및 크레인 와이어 장력 시계열을 보여주고 있다. 이 때 크레인 와이어의 길이는 설치 수심 1,000m 조건에 맞추어진 상태이며 구조물 무게와는 상관없이 동일한 강성의 크레인 와이어가 사용되었다고 가정하였다. 상대적으로 무게가 가벼운 콘크리트 블록의 경우 짧은 주기로 상하운동을 하며 오랜 시간 동안 운동이 지속되는 것을 볼 수 있다. 반면 석션 파일의 경우 콘크리트 블록보다 약 2배가량의 긴 주기로 상하운동을 하며 감쇠비도 크게 증가하였다. 매니폴드의 경우 임계감쇠의 경향을 보이며 빠르게 정적 평형위치로 수렴해 가는 모습을 볼 수 있다. 이는 매니폴드의 복잡한 구조물 형상이 상대적으로 큰 감쇠효과를 야기했기 때문이다.

Table 5는 자유 감쇠 시험으로부터 구한 상하 운동 고유 주기 및 그로부터 추정된 각 구조물의 부가질량 값을 요약하였다. 콘

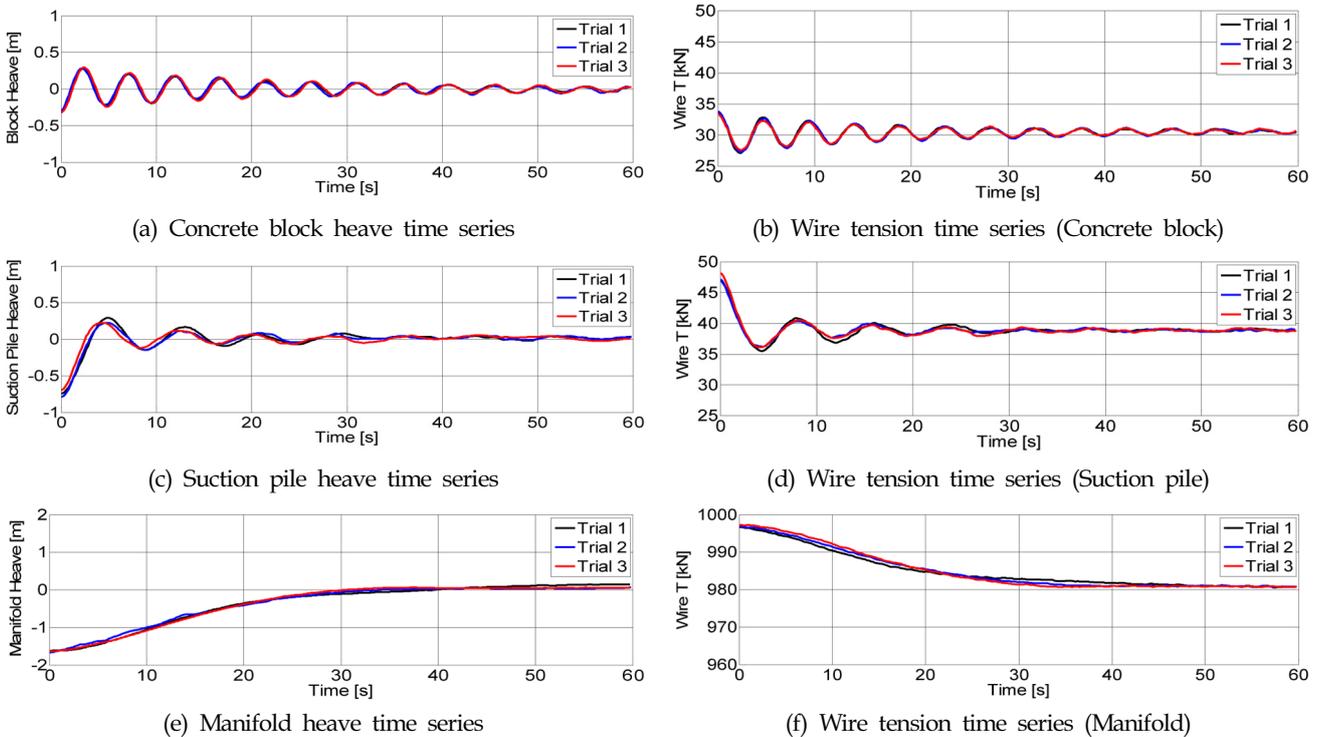


Fig. 7 Heave and wire tension time series (Free decay test on subsea equipment; Depth 1000 m spring)

Table 5 Natural periods and added mass of subsea equipment

Equipment	Natural period [s]	Added mass [Ton]
Concrete block	4.762	2.271
Suction pile	7.927	10.928
Manifold	-	-

크리트 블록의 경우 추정된 부가질량이 자중의 약 70%에 해당하며 반면 석션 파일의 경우 부가질량이 자중의 2.7배에 해당하였다. 이는 석션 파일의 윗면이 막힌 원통형 구조로 인한 것으로 윗면이 막힌 원통이 수중 거동 시 많은 유체를 동반하면서 큰 부가질량 효과를 나타내었다(Rowe et al. 2001)

3.2 규칙파 및 백색잡음파 실험

설치 수심 1,000m 조건에서 콘크리트 블록의 전후 및 수직 운동의 전달 함수를 백색잡음파와 규칙파 실험으로부터 구한

결과를 비교하여 Fig. 8에 도시하였다. 시스템의 선형성이 유지된다면 두 실험결과는 동일한 전달함수를 보여주어야 하며 Fig. 8에서 두 시험의 결과는 대체로 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 콘크리트 블록의 전후 운동은 저주파수로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 파 주파수 0.5rad/s 이상에서는 입사파고의 30% 이하의 작은 응답특성을 보여주었다. 반면 콘크리트 블록의 수직운동은 설치선의 중동요 공진주파수, 즉 파주파수 0.7 근방에서 가장 크게 발생하였다. 이 때 입사파고 대비 2배 이상의 크기로 콘크리트 블록이 수직방향 거동을 하였다. 크레인 와이어의 축강성으로 인한 콘크리트 블록의 상하 공진주기 조건인 파주파수 1.3 rad/s 근방에서도 블록의 수직운동이 다소 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 9는 3가지 설치구조물의 주파수에 따른 운동응답 특성을 비교하여 보여주고 있다. 구조물의 전후방향 운동은 구조물의 종류에 상관없이 거의 동일한 경향을 가지나 구조물의 수직방향 운동은 구조물에 따라 매우 다른 양상을 보여주고 있다. 석션 파일의 경우 가장 큰 수직방향 운동 응답을 보여주었으며,

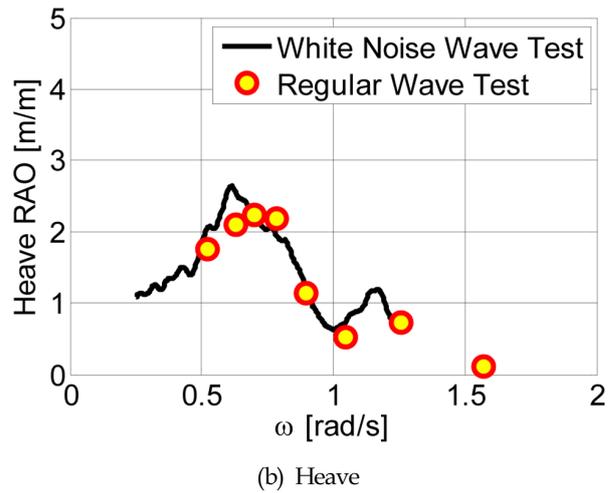
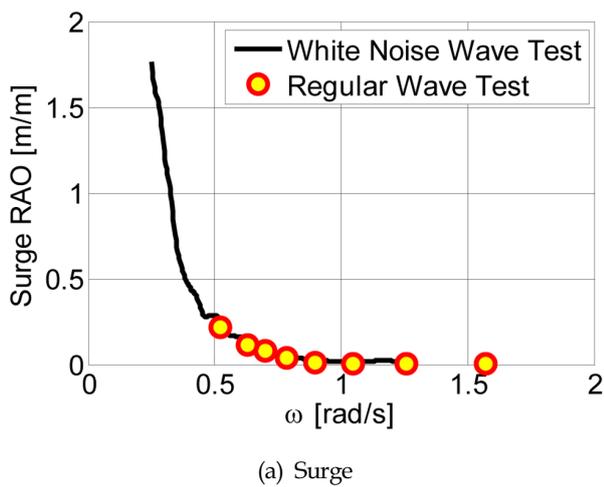


Fig. 8 Surge and heave motion of concrete block (depth = 1,000 m)

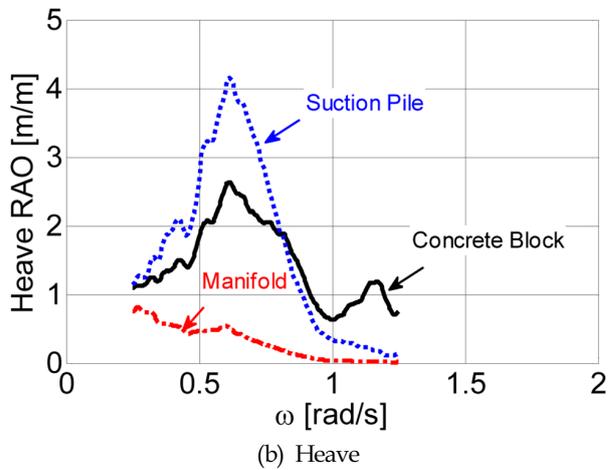
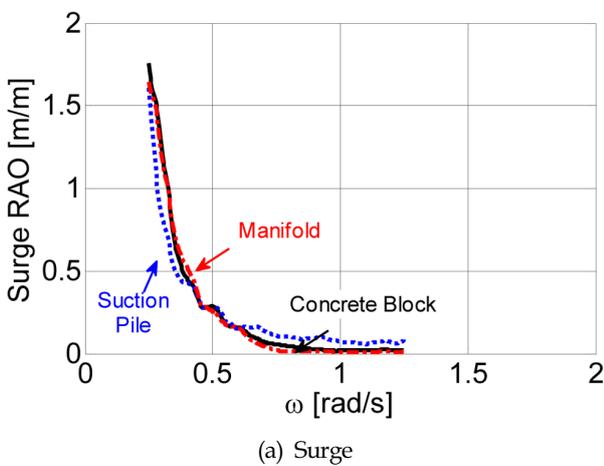


Fig. 9 Comparison of motion transfer functions of three different structures

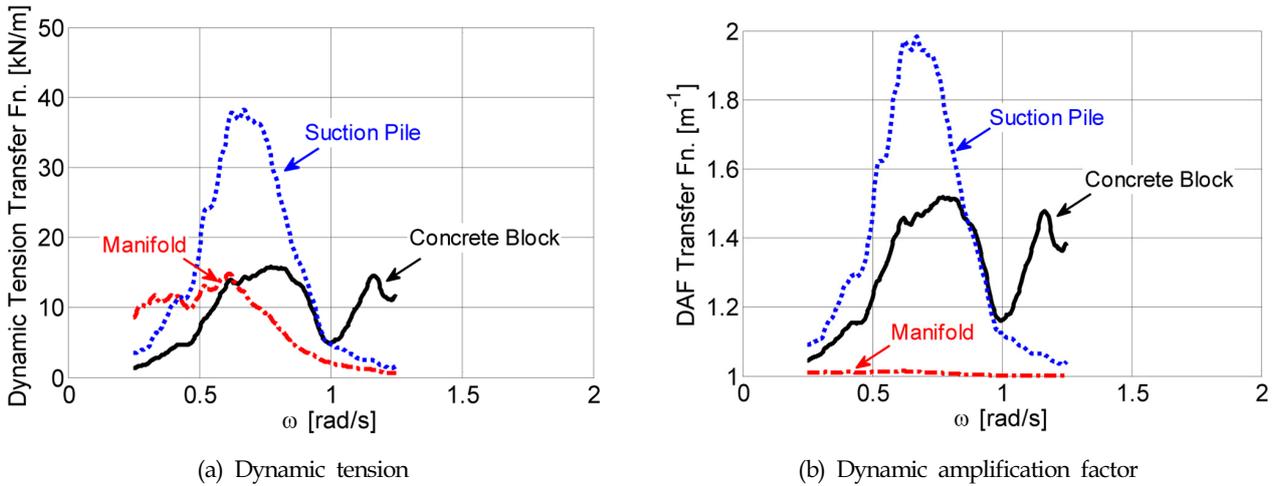


Fig. 10 Comparison of dynamic tension on the crane wire (water depth : 1,000 m)

파주파수 0.65rad/s 근방에서 입사파고 대비 약 4배에 해당하는 수직운동 응답을 보여주었다. 이는 콘크리트 블록과는 다르게 권송시스템의 질량-스프링 공진주파수(약 0.8rad/s)가 설치선의 종동요 공진주파수 근방에 위치함에 따라 석션 파일 수직 운동 응답을 더 증폭시킨 것으로 이해할 수 있다. 반면 매니폴드의 경우 상대적으로 자중이 크고, 입계감쇠에 가까운 큰 감쇠력이 운동 시 발생하기 때문에 구조물의 수직운동응답이 다른 두 구조물에 비하여 매우 작은 것을 볼 수 있다. 특히 설치선의 종동요 공진주파수 근방에서도 크레인 끝단의 수직 운동보다도 오히려 매니폴드의 수직 운동이 더 작은 경향을 보여주었다.

Fig. 10은 크레인 와이어에 작용하는 동적인 장력 응답 특성을 구조물에 따라 비교하여 보여주고 있다. Fig. 10 (a)는 계측된 장력을 차원화된 값으로 직접 도시하였으며 Fig. 10 (b)는 크레인 와이어의 전체 장력 중 동적 장력의 비율을 알 수 있도록 동적 증폭 인자(DAF, Dyanmic amplification factor) 값을 식 (1)의 정의를 이용하여 표시하였다. 본 연구에서는 구조물의 수면 하 자중(Weight in water), W 를 이용하여 DAF 값을 계산하였다.

$$DAF = \frac{T_{total}}{T_{static}} = 1 + \frac{T_{dynamic}}{W} \quad (1)$$

최대 동적 장력은 가장 큰 수직운동을 보인 석션 파일 조건에서 발생하였으며, 단위 파고 당 약 39kN의 동적 장력이 발생하였다. 콘크리트 블록과 매니폴드는 단위 파고 당 약 18kN의 동적 장력이 유발되었으며, 매니폴드는 저주파수 영역에서 상대적으로 큰 장력이 발생하였다. DAF 값을 기준으로 보았을 때에도 석션 파일이 가장 큰 값을 보여주고 있으며 상대적으로 매니폴드는 자중이 크기 때문에 DAF 값이 매우 작았다. 파 주파수 0.7~0.8rad/s 근방에서 석션 파일은 약 2.0의 DAF 값을 가지며 콘크리트 블록은 파 주파수 0.7~0.8rad/s 및 1.2rad/s 근방에서 약 1.5의 DAF 값을 보여주었다.

이러한 구조물의 운동 및 크레인 와이어의 동적 거동 특성은 설치 수심, 즉 크레인 와이어의 길이에 따라 영향을 받게 된다. 설치 수심이 깊어질수록 설치 구조물 설치를 위해 크레인 와이어의 길이가 증가하게 되는데, 크레인 와이어의 강성은 길이에 따

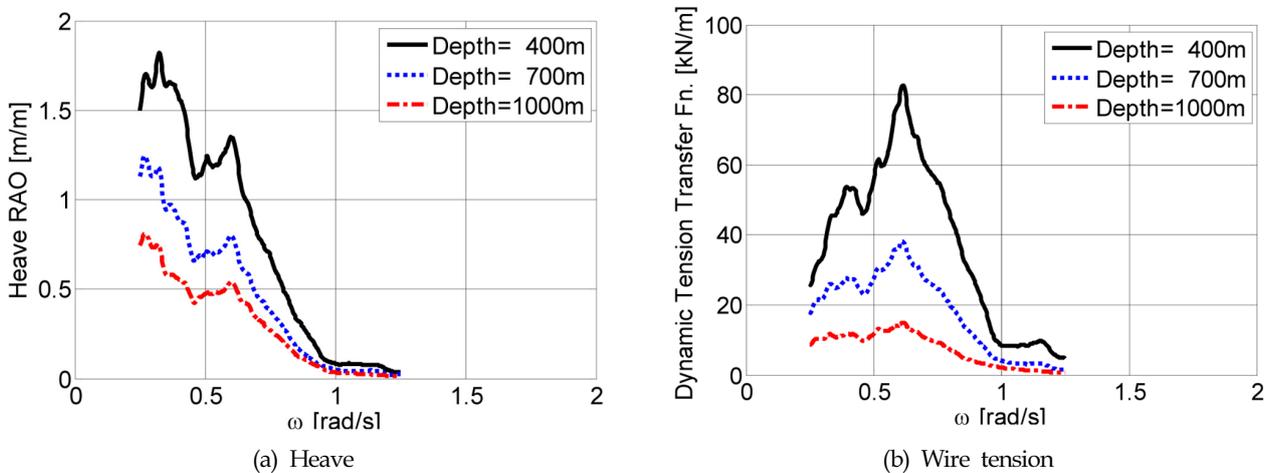


Fig. 11 Effect of water depth on vertical motion and dynamic tension (Manifold)

라 선형적으로 감소한다. 따라서 수심이 깊어짐에 따라 권송 시스템의 질량-스프링 공진주기는 장주기 쪽으로 이동하게 된다. Fig. 11은 매니폴드가 3가지 설치수심에서 수직거동과 동적 장력 특성이 어떻게 변화하는 지를 보여주고 있다. 수심이 낮아질수록 매니폴드의 수직방향 운동은 점차 증가하는 경향을 보여 주고 있으며, 그로 인하여 크레인 와이어에 작용하는 동적 장력도 크게 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이는 수심이 얕아짐에 따라 크레인 와이어에 의한 축강성이 강해지고, 공진주기가 점차 고주파수영역으로 이동함에 따라 매니폴드의 거동이 증가한 결과이다.

3.3 불규칙파 시험

불규칙파 중 수심 조건 1,000m에서 계측된 콘크리트 블록의 종방향 및 수직 운동 시계열을 불규칙파 주기에 따라 비교하여 Fig. 12에 도시하였다. 시계열을 비교하여 보았을 때 단주기 불규칙파 조건에서 운동 시계열이 상대적으로 장주기에 비해 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 각각의 구조물에 대해 불규칙파 시험을 수행하였으며 계측된 해저 구조물의 상하운동의 RMS(Root mean square)와 크레인 와이어 DAF 값을 비교하여 Fig. 13에 도시하였다. 석션 파일의 상하 운동의 RMS 및 DAF

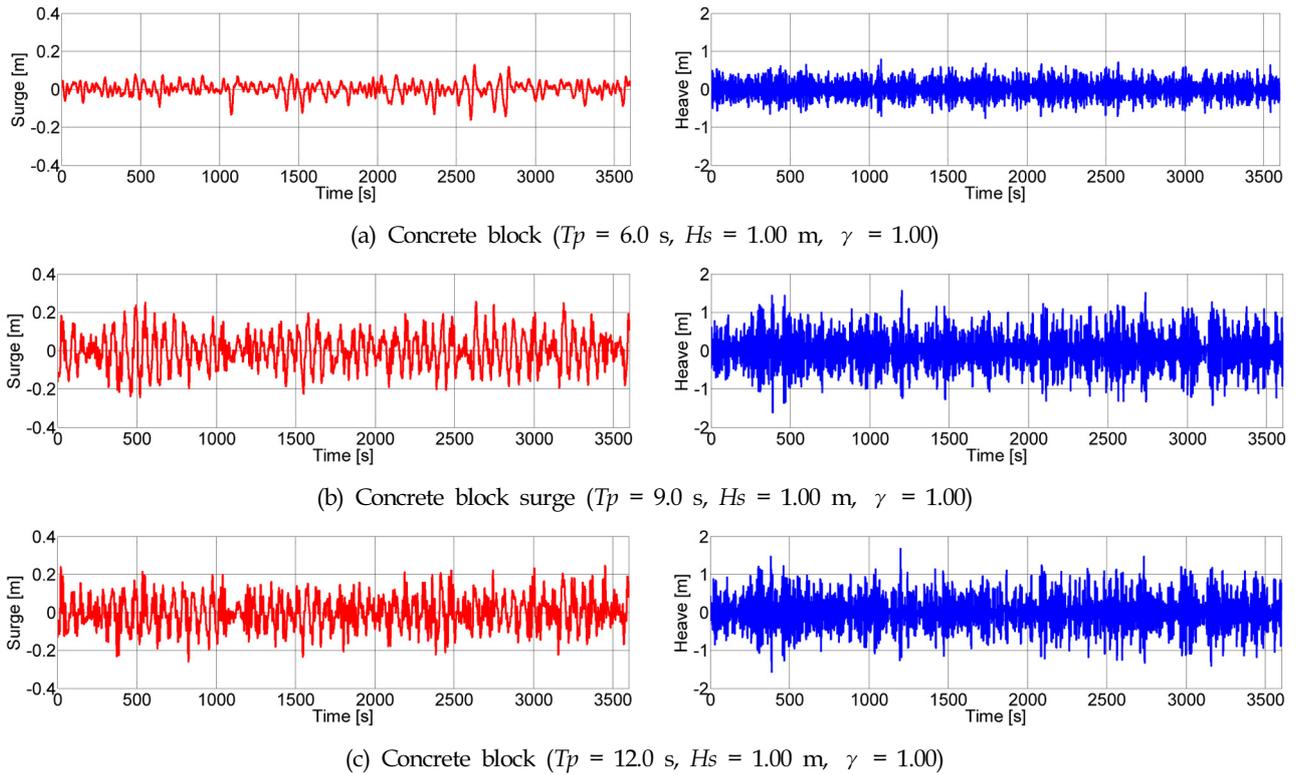


Fig. 12 Surge and heave time series of concrete block in irregular waves (Water Depth = 1,000 m)

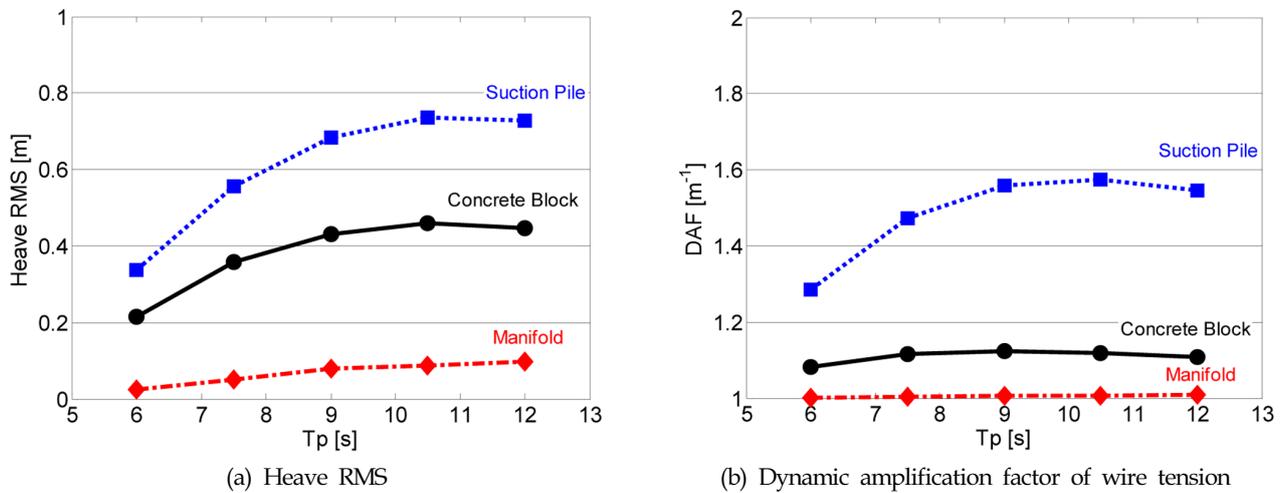


Fig. 13 Comparison of the heave RMS and DAF in irregular seas (Water Depth = 1,000 m)

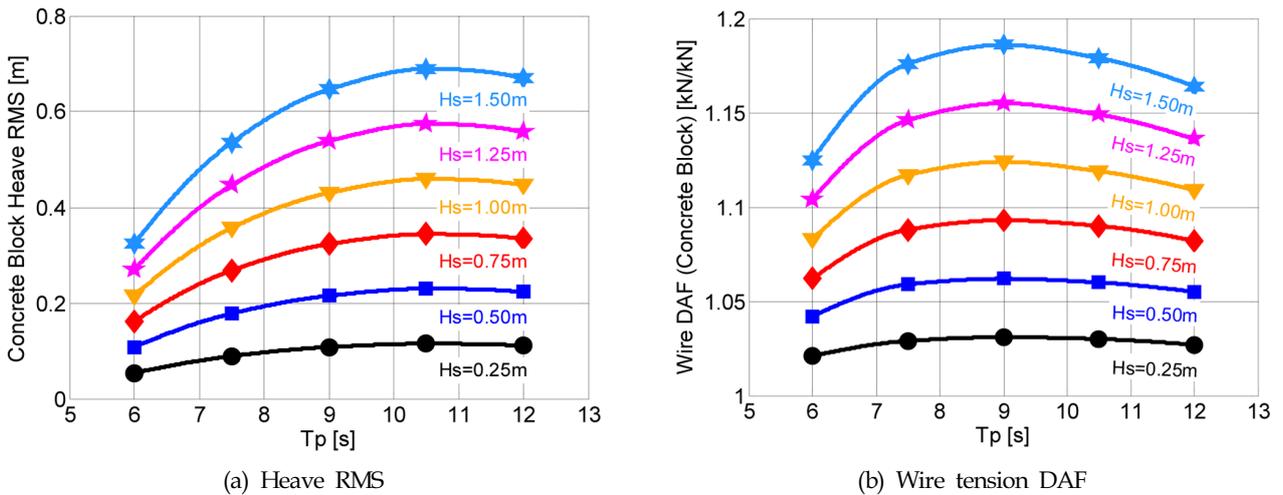


Fig. 14 Heave RMS and wire tension DAF of the concrete block installation in irregular waves

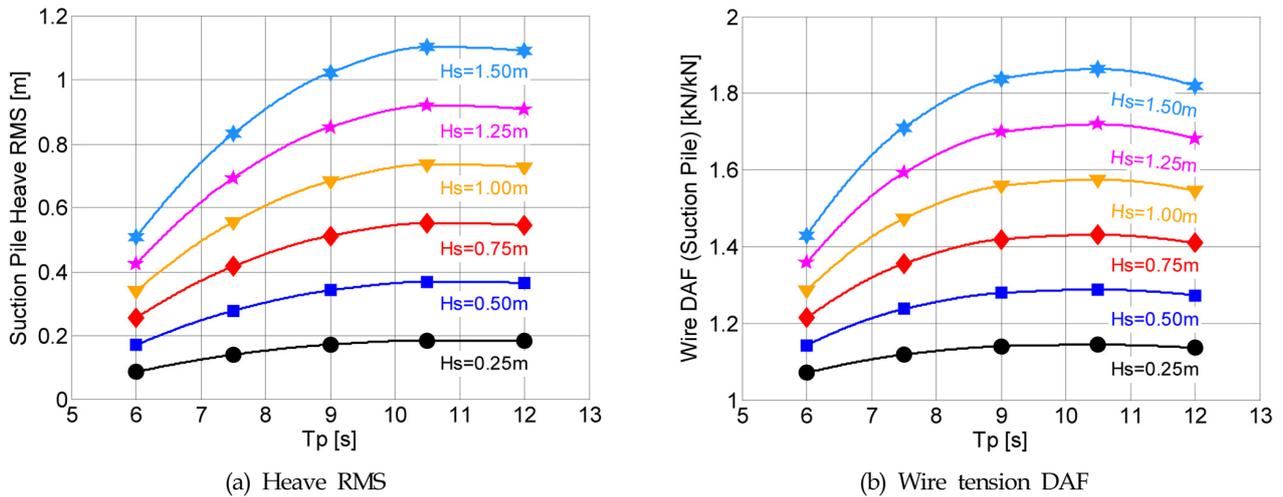


Fig. 15 Heave RMS and wire tension DAF of the suction pile installation in irregular waves

값이 다른 해저 구조물보다 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞선 자유감쇠시험에서 관찰한 것처럼 석션 파일의 공진 주기가 실험이 수행된 파주기 영역에 가깝기 때문인 것으로 이해된다.

불규칙파 중 계측된 콘크리트 블록 및 석션 파일의 상하 운동 RMS 및 DAF 값을 파고에 따라 Figs. 14~15에 도시하였다. 이때 여러 파고의 응답은 파고 1m를 기준으로 하여 선형을 가정하여 계산한 값이다. 전반적으로 장주기의 불규칙파 조건에서 두 구조물의 상하동요가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 석션 파일의 상하 운동 RMS 값이 콘크리트 블록보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 와이어 장력 DAF의 경우 상하 운동에 비해 큰 차이를 가지는 것을 확인할 수 있었으며 특히 석션 파일의 경우 DAF 값이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 부가 질량에 의한 것으로 생각된다. 본 실험 결과로부터 각각의 구조물의 질량이 비슷한 값을 가지더라도 수중 설치 시 상하 운동 및 와이어 장력 DAF 값이 크게 변화한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 파 주기 및 파고에 따른 상하 운동 및 와이어

장력 DAF 등고선 그래프를 통해 해상 작업 시 설치 가능 유무성을 판단할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 다양한 해저 구조물 설치 작업에 대한 모형 시험을 수행하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 설치 모형 시험을 수행하기 위해 절단 심해 설치 모형 기법을 도입하였으며, 수중 카메라를 설치하여 수중에서 거동하는 설치 구조물의 운동을 계측하였다. 다양한 설치 구조물에 대해서 자유 감쇠시험을 수행하여 해당 설치 수심에서 고유 주기를 계측하고, 이로부터 구조물의 부가질량을 추정할 수 있었다. 콘크리트 블록의 경우 자중 대비 약 70%의 부가질량이 발생하였으며, 석션파일의 경우 자중의 약 2.7배에 해당하는 큰 부가질량을 가짐을 확인할 수 있었다. 매니폴드의 경우 복잡한 형상으로 인해 임계 감쇠에 가까운 감쇠력을 가지며 이러한 감쇠력으로 인해 부가 질량 추정

이 어려움 또한 확인하였다. 규칙과 및 백색잡음과 시험을 통해 파 주파수에 따른 각 구조물의 수중 운동 및 와이어 장력을 비교하였다. 구조물의 수중 운동 및 장력의 경우 설치 선의 운동 뿐만 아니라 구조물-와이어 시스템의 응답 또한 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 또한 수심에 따른 영향을 검토하여, 수심이 깊어짐에 따라 와이어 강성 변화가 발생하고 이로 인하여 구조물의 상하 운동 및 장력이 변화하는 것을 확인하였다. 또한 불규칙과 시험을 통해 파 주기 및 파고에 따른 구조물의 상하 운동 및 와이어 장력 DAF 등고선 그래프를 통해 해상 작업 시 설치 유무성을 판단할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 수행중인 산업통상자원부 산업원천기술개발사업 “심해자원 생산용 해양플랜트 시장진출을 위한 해저장비 및 URF 설치용 3,000m급 심해설치 공사기술개발” (PNS2410) 과제의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Cha, J.H., Lee, K.Y., Ham, S.H., Roh, S.H., Park, M.L., Suh, H.W., 2009. Discrete Event/Discrete Time Simulation of Block Erection by a Floating Crane Based on Multibody System Dynamics. Proc. of the 19th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 1, 678-685.
- Clauss, G.F., Vannahme, M., Ellermann, K., Kreuzer, E., 2000. Subharmonic Oscillations of Moored Floating Cranes. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC 11953.
- Rowe, S.J., Mackenzi, B., Snell, R., 2001. Deepwater Installation of Subsea Hardware. Proceedings of the 10th Offshore Symposium, Houston USA, 1-9.
- Kimiaei, M., JiaJing, X., Yu, H., 2009. Comparing the Results of a Simplified Numerical Model with DNV Guidelines for Installation of Subsea Platforms. Proceedings of the 28th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, OMAE2009-79356, 319-326.
- Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, Y.S., Kim, J.W., 2013. Effects of Passive and Active Heave Compensators on Deepwater Lifting Operation. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 23(1), 33-37.
- Nam, B.W., Kim, N.W., Choi, Y.M., Hong, S.Y., Kim, J.W., 2015. An Experimental Study on Deepwater Crane Installation of Subsea Equipment in Waves. Proc. of the 25th Int. Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, Hawaii, 1279-1283.

One-way Coupled Response Analysis between Floating Wind-Wave Hybrid Platform and Wave Energy Converters

Hyebin Lee*, Yoon Hyeok Bae** and Il-Hyoung Cho**

*Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University, Jeju, Korea

**Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

부유식 풍력-파력발전 플랫폼과 탑재된 파력발전기와의 단방향 연성 운동 해석

이혜빈* · 배운혁** · 조일형**

*제주대학교 풍력특성화협동과정

**제주대학교 해양시스템공학과

KEY WORDS: Wave energy converter 파력발전장치, Wind turbine 풍력터빈, Floating platform 부유식플랫폼, Coupled analysis 연성해석

ABSTRACT: In this study, a six degree-of-freedom motion analysis of a wind-wave hybrid platform equipped with numerous wave energy converters (WECs) was carried out. To examine the effect of the WECs on the platform, an analysis of one-way coupling was carried out, which only considered the power take-off (PTO) damping of the static WECs on the platform. The equation of motion of a floating platform with mooring lines in the time domain was established, and the responses of the one-way coupled platform were then compared with the case of a platform without any coupling effects from the WECs. The hydrodynamic coefficients and wave exciting forces were obtained from the 3D diffraction/radiation pre-processor code WAMIT based on the boundary element method. Then, an analysis of the dynamic responses of the floating platform with or without the WEC effect in the time domain was carried out. All of the dynamics of a floating platform with multiple wind turbines were obtained by coupling FAST and CHARM3D in the time domain, which was further extended to include additional coupled dynamics for multiple turbines. The analysis showed that the PTO damping effect on platform motions was negligible, but coupled effects between multiple WECs and the platform may differentiate the heave, roll, and pitch platform motions from the one without any effects induced by WECs.

1. 서 론

풍력에너지는 신재생 에너지의 중요성이 대두되는 가운데 가장 유망하고 촉망받는 에너지 중 하나이다. 풍력 에너지를 통해 전기 에너지를 생산하는 풍력 발전기는 그동안 육상 설치를 중심으로 활발한 연구가 진행이 되었다. 육상 풍력 발전기는 설치나 이송이 비교적 쉽지만, 바람의 질이 해양에 비해 좋지 않아 상대적으로 에너지 효율이 낮고, 자연 경관 훼손이나 발전기에서 발생하는 소음이 주변 마을에 미치는 영향 등의 문제가 발생하기 때문에 최근에는 해안이나 외해에 설치하는 해상 풍력 발전기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Shin and Kim, 2011).

이와 함께 풍력 발전기가 해상에 설치되면서 해상에서 얻을 수 있는 다른 해양 에너지를 함께 이용하여 발전하는 복합 발전의 개념이 제안되고 있다. 파 에너지를 이용한 파력발전장치 (Wave energy converter, WEC)나 조류를 이용한 발전장치를 해상 풍력 발전기의 하부구조물에 설치하여 함께 발전하게 되면 단위 면적 당 에너지 발생 효율이 증가하고, 이는 곧 생산 단가에 직접적인 영향을 미치게 되므로 경제성이 향상된다 (Lakkoju, 1996). 특히 플랫폼에 WEC를 부착하면 파력 에너지를 추출함으로써 플랫폼 운동이 저감되어 플랫폼의 안정성 향상에 기여하게 된다. 이를 통해 더욱 안정적으로 풍력 발전이 가능하게 되어 시스템이 전체적으로 안정되게 된다.

Borg et al.(2013)은 가상의 WEC 한 개를 부유식 해상 풍력

Received 2 December 2015, revised 14 March 2016, accepted 22 April 2016

Corresponding author Yoon Hyeok Bae: +82-64-754-3485, yh.bae@jejunu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceeding of KAOST 2015 in Jeju.

터빈에 부착하여 터빈의 운동을 저감시키는 WEC의 최적의 감쇠계수 및 복원력 계수를 찾아내었다. 수학적 모델을 정립하기 위하여 터빈의 형상을 이용하여 주파수 영역에서 운동 응답을 해석한 결과로부터 파기진력, 동유체력과 복원력 계수를 구하고, 이를 이용하여 시간 영역에서 해석을 진행하였다. Liao et al.(2013)은 부유식 해상 풍력 발전 플랫폼의 두 기둥에 각각 WEC를 설치하여 에너지를 추출함과 동시에 플랫폼 운동을 저감시키는 장치로 사용하는 연구를 하였다. 이 연구에서는 2차원으로 모델을 단순화 시키고 선형 시스템으로 가정하여 시스템의 연성에 대한 수학적 모델을 정립하였다. 다수의 WEC를 부착한 플랫폼에 대한 연구 역시 진행되었는데, Taghipour and Moan(2008)은 반잠수식 플랫폼에 21개의 WEC를 부착하여 주파수 영역에서 다물체 동역학 및 동수력학 상호작용에 대해 연구를 하였다. 특히 이 연구에서는 WEC에 의한 PTO(Power take-off) 메커니즘에 의한 효과가 WEC의 운동뿐만 아니라 플랫폼의 운동에도 큰 영향을 미침을 보였다.

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 제안한 부유식 해상 풍력-파력 복합발전 플랫폼의 운동을 해석하고, 특히 다수의 WEC와 플랫폼 간의 연성 효과로 인한 플랫폼 운동의 변화에 대해 알아보았다. 부유식 복합발전 플랫폼은 다수의 풍력발전기가 설치된 하부 구조물에 에너지 발생 효율을 높이기 위하여 다수의 WEC를 탑재시킨 플랫폼으로써 정확한 운동 해석을 위해서는 풍력발전기, 파력발전기, 하부구조물, 계류시스템 등 플랫폼을 구성하고 있는 모든 시스템 간의 연성 효과를 고려하여야 한다. 앞서 Lee et al.(2016)은 초기 연구로써 본 플랫폼에서 풍력발전기의 운동은 고려하지 않고, 단순히 등가의 풍하중만을 작용시켜 다수의 WEC에 의한 플랫폼 운동 변화에 대해 연구하였다. 본 논문에서는 초기 연구를 바탕으로 플랫폼에 설치된 다수 풍력발전기의 동역학까지 함께 포함하여 다수 WEC와 플랫폼 간 연성 효과가 플랫폼의 운동에 미치는 영향을 알아보았다. 이 때, 플랫폼-계류 시스템의 연성도 함께 고려하여 해석하였다.

2. 플랫폼의 운동 성능 해석 방법

2.1 부유식 풍력-파력 복합발전 플랫폼

본 연구의 대상인 부유식 복합발전 플랫폼은 Fig. 1과 같이

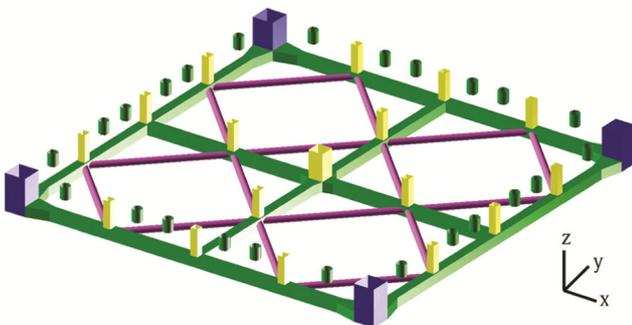


Fig. 1 Platform CAD geometry

Table 1 Specifications of hybrid platform

Item	Value
Overall platform displacement [kg]	26,848,000
Column span [m]	150
Draft [m]	15
WEC system load [kg]	1,777,000
Mooring load [kg]	353,000
Center of gravity above keel [m]	13.67
Roll radius of gyration about CM [m]	58.59
Pitch radius of gyration about CM [m]	58.65
Yaw radius of gyration about CM [m]	78.44

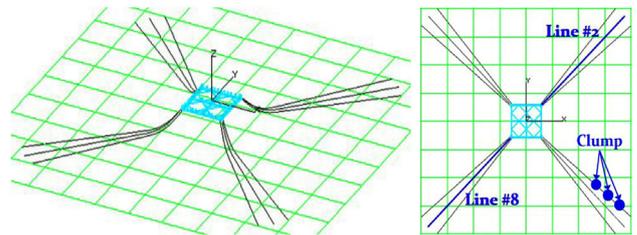


Fig. 2 Mooring line arrangements

Table 2 Specifications of mooring system

Item	Value
Number of mooring lines [ea]	12
Length [m]	600
Depth to anchors below MWL [m]	80
Depth to fairleads below MWL [m]	13
Mooring line dry mass density [kg/m]	322.6
Mooring line wet mass density [kg/m]	280.6
Mooring line extensional stiffness [MN]	1,300
Chain moornig drag coefficient	2.4
Number of clumps per each line [ea]	3
Clump starting point from fairlead [m]	400
Each clump's mass in air [kg]	19,000

세장체로 구성된 반잠수식 하부구조물의 4개의 주기둥 위에 각 1기의 풍력발전기, 그리고 플랫폼의 4면마다 각 6기의 WEC가 설치되어 있는 시스템이며, Fig. 2와 같이 12개의 현수선으로 계류되었다. 계류선은 체인으로 구성되어 있으며, 각 계류선마다 플랫폼의 위치 복원성 향상을 위한 3개의 클럼프(Clump)가 50m 간격으로 체결되어있다. 설치 해역의 수심은 80m이며, 플랫폼 및 계류시스템의 제원 및 특성은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

2.2 플랫폼 운동 해석 케이스 선정

본 연구에서는 다수의 WEC가 플랫폼의 운동에 미치는 영향

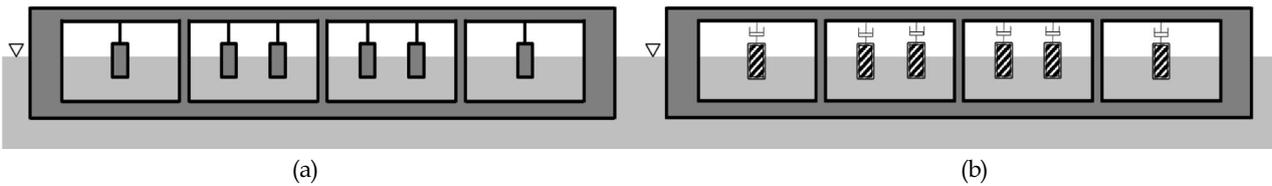


Fig. 3 Simulation case configurations (left: single body, right: multi-body)

을 보고자 크게 두 가지의 경우에 대한 해석을 진행하였다. 극한 환경 조건에서는 WEC가 플랫폼에 완전히 고정되어 작동을 멈추게 되는데, 이 경우에 대해 다수의 WEC와 플랫폼을 단일체(Single body)로 가정하여 해석을 진행하였다(Fig. 3(a)). 일반 환경 조건 하에서는 다수의 WEC가 플랫폼에 부착되어 있는 축을 따라 플랫폼의 운동과는 독립적인 상하 운동을 하게 된다. 이 경우에 대해서 WEC와 플랫폼을 다물체(Multi-body)로 가정하여 해석을 진행하였다(Fig. 3(b)). 다물체로 가정을 할 경우, WEC와 플랫폼 간의 상대운동으로 인해 전기에너지가 생산되기 때문에 PTO 매커니즘이 작용하게 된다. 따라서 Fig. 3(b)와 같이 WEC와 플랫폼 사이에 PTO 감쇠력만큼의 댐퍼(Damper)가 연결된 것과 같이 표현할 수 있다. 다물체로 해석을 진행할 경우, 플랫폼과 WEC의 상대 운동이 허용되기 때문에 운동 방향에 따라 다수의 WEC가 플랫폼에 고정되어 단일체로 운동하는 경우와 비교하였을 때 질량, 동유체력, 복원력, 파기진력 등의 변화를 고려하여야 한다. WEC-플랫폼 간 연성효과를 모두 고려하기 위해서는 WEC가 플랫폼의 운동에 미치는 영향과 플랫폼이 WEC의 운동에 미치는 영향을 모두 고려해야 하지만, 본 논문에서는 플랫폼이 WEC의 운동에 미치는 영향은 배제하고 WEC가 플랫폼의 운동에 미치는 영향만을 고려하는 단방향 연성 해석을 진행하였다. 단방향 연성 해석을 위하여 WEC의 상하운동은 플랫폼의 운동과 상관없이 구속하여 WEC가 수면에서 평형상태를 유지하도록 설정하였다. 이와 같이 WEC가 일방적으로 플랫폼의 운동에 미치는 영향만을 고려하여 해석을 수

행한 단방향 연성기법은 플랫폼과 WEC의 양방향 상호작용을 고려하지 못하는 단점이 있으나, 단일체로 가정하여 해석하는 경우보다 WEC의 PTO 감쇠력이 플랫폼의 운동에 미치는 영향을 제한적으로 해석에 포함시킬 수 있게 된다.

3. 플랫폼의 운동 성능 해석 결과

3.1 플랫폼 운동 응답 해석 결과

플랫폼과 다수의 WEC의 잠긴 부분에 대한 파기진력과 동유체력 계수는 포텐셜 이론을 근거로 한 3차원 회절/방사 프로그램인 WAMIT(Wave analysis at MIT)을 이용하여 계산하였다. 플랫폼의 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 선수동요(Yaw)의 경우, 플랫폼과 다수 WEC를 다물체로 가정하여도 WEC가 플랫폼에 단단히 고정된 것과 같이 함께 운동하므로 단일체로 가정하는 경우와 다물체로 가정하는 경우 사이에 부가질량, 방사감쇠 계수들의 값이 동일하다. 또한 WEC와 플랫폼 간의 상대 운동이 발생하지 않기 때문에 PTO 감쇠력이 포함되지 않는다. 그러나 상하동요(Heave), 횡동요(Roll), 종동요(Pitch)의 경우 플랫폼의 운동은 WEC와 분리되어 발생할 수 있으므로 부가질량 및 방사감쇠 계수들이 단일체로 해석할 경우와 다물체로 해석할 경우 차이가 발생한다. 특히 다수 WEC와 플랫폼의 상대 운동으로 인해 발생하는 PTO 감쇠력 또한 운동방정식의 추가적인 외력으로 고려되어야 한다(Lee et al., 2015).

Fig. 4 ~ Fig. 5는 WAMIT에서 계산된 플랫폼의 상하동요 및

Table 3 Platform damping

Item	Viscous damping	PTO damping	PTO/Viscous ratio
Heave [kg/s]	6,951,352	290,160	4.17 %
Pitch [kg·m ² /s]	14,089,072,479	999,948,032	7.09 %

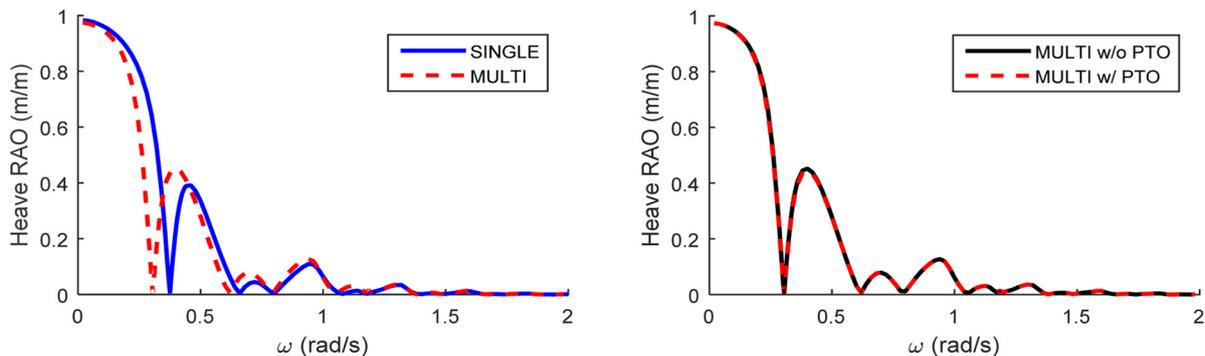


Fig. 4 Platform heave RAOs (left : multi-body effect, right : PTO damping effect)

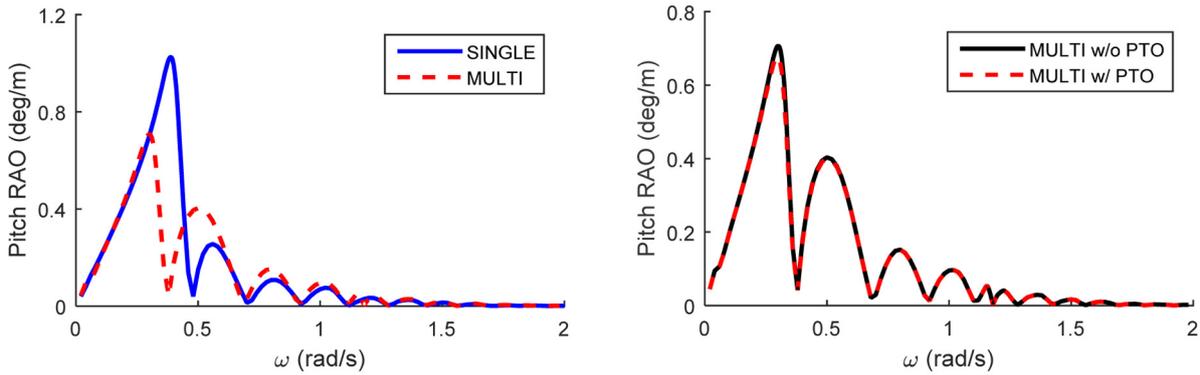


Fig. 5 Platform pitch RAOs (left : multi-body effect, right : PTO damping effect)

중동요의 RAO(Response amplitude operator)이다. 본래 점성감쇠는 비선형항이므로 RAO 계산 시 고려하기 어렵지만, PTO 감쇠와의 상대적인 영향을 보고자 선박해양플랜트연구소(KRISO)가 수행한 플랫폼의 자유감쇠실험으로부터 도출되는 무차원 감쇠 계수를 이용하여 점성 감쇠력을 선형화 한 후 WAMIT 해석에 적용시켰다. 계산 결과, 플랫폼과 WEC의 연성효과를 고려하였을 때(다물체 해석)의 상쇄주파수(Cancelation frequency)가 단일체 해석의 경우에 비해 약 0.1rad/s 감소한 결과를 보였는데, 이는 주로 정적 복원력(Hydrostatic restoring coefficient) 차이에서 기인한 것이다. 단일체 해석과 다물체 해석 사이에 질량 및 부가질량의 차이는 10% 이하이나 상하동요의 정적 복원력을 결정하는 수선면적의 경우 단일체 해석에서는 약 770m², 다물체 해석의 경우 약 469m²로 상쇄주파수 이동을 야기하는 주된 요소로 파악된다. 중동요의 경우도 동일한 이유로 중복원력 차이에 따라 상쇄주파수의 이동이 발생한 것으로 사료된다. 한편 PTO 감쇠를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 상하동요 및 중동요 RAO의 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 PTO 감쇠가 플랫폼의 운동에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이는 Table 3에서와 같이 플랫폼의 점성감쇠가 지배적으로 작용하여 PTO 감쇠에 의한 효과는 상대적으로 적게 나타나기 때문이다.

부유식 다수 풍력발전기의 공력-유체력-탄성력-제어-부유체-계류선의 복합적인 요소를 고려한 시간영역 운동응답을 구하기 위하여 FAST-CHARM3D를 활용하였다(Tahar and Kim, 2003;

Bae and Kim, 2014). 계류에 의한 복원력이 고려된 부유식 플랫폼의 시간영역 운동 방정식은 다음과 같다(Cummins, 1962).

$$[M + A(\infty)]\ddot{\xi}(t) = f_e(t) - \int_{-\infty}^t g_r(t-\tau)\dot{\xi}(\tau)d\tau - \rho g C\xi(t) + f_m(t) + f_{turbines}(t) = f_{PTO} \quad (1)$$

M은 질량 및 질량 관성 모멘트, A는 부가 질량, f_e 는 파기진력, $g_r(t)$ 과 $g_r(\tau)$ 는 메모리 함수, C는 복원력 계수, f_m 은 계류 복원력, $f_{turbines}$ 는 다수풍력발전기로부터 발생하는 힘, f_{PTO} 는 다물체 모델의 경우 발생하는 PTO 감쇠력을 나타낸다. ξ , $\dot{\xi}$, $\ddot{\xi}$ 는 각각 플랫폼의 운동 변위, 속도, 가속도를 나타낸다. 외부 환경조건으로는 파도, 바람, 조류를 고려하였으며, Fig. 1에서 플랫폼을 기준으로 x축을 따라 입사하도록 설정하였다. 불규칙파의 생성은 JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 사용하였으며, 제주도 서쪽 수심 80m 해역을 대상으로한 설계 환경 조건 중 재현주기 1년의 해상환경으로써 유의파고(Significant wave height)는 5.93 m, 피크주기(Peak period)는 10.81초, 첨두 상승계수(Peak shape parameter)는 2.2를 적용하였다. 바람은 공간상에 x, y, z 방향의 속도 성분을 모두 가지는 전 풍황장(Full field) 데이터를 IEC (International Electrotechnical Commission) 스펙트럼에 맞추어 생성하여 적용하였다. 허브 높이에서의 평균 풍속은 13m/s를 적용하였다. 조류의 경우, 해당 해역의 재현주기 1년의 해상환경에

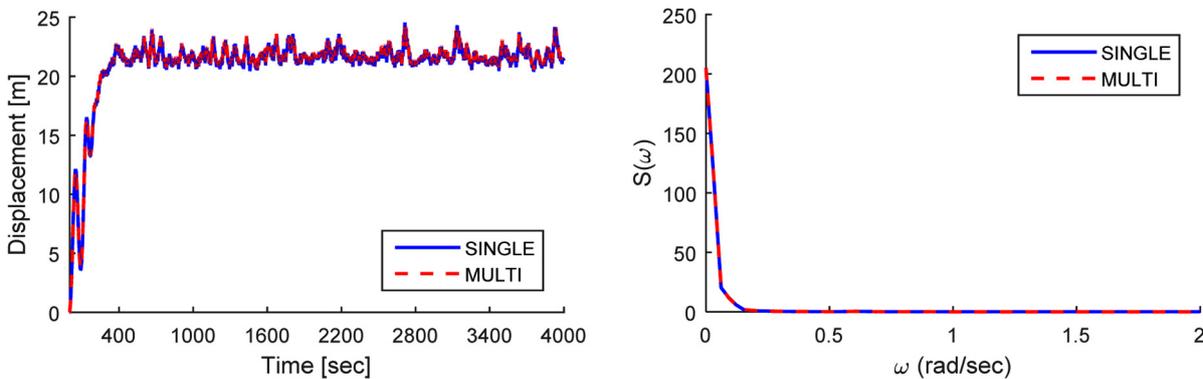


Fig. 6 Platform surge motion (left) and spectra (right)

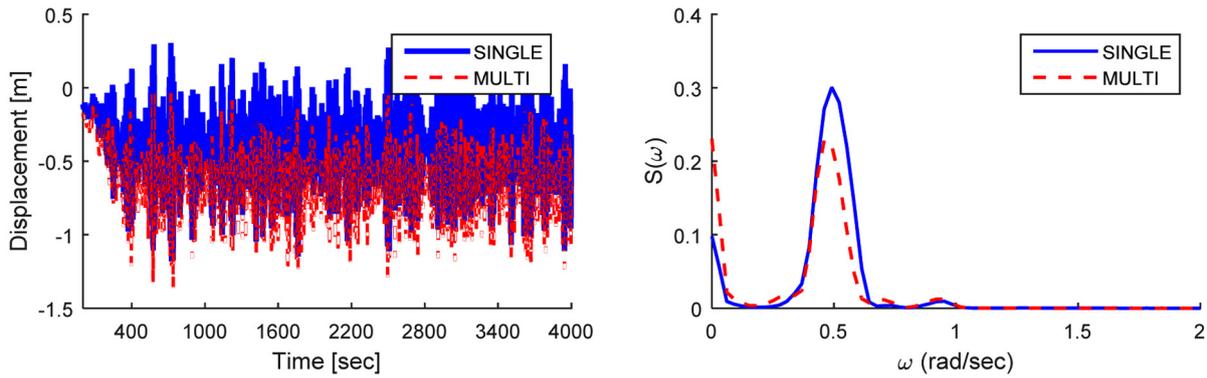


Fig. 7 Platform heave motion (left) and spectra (right)

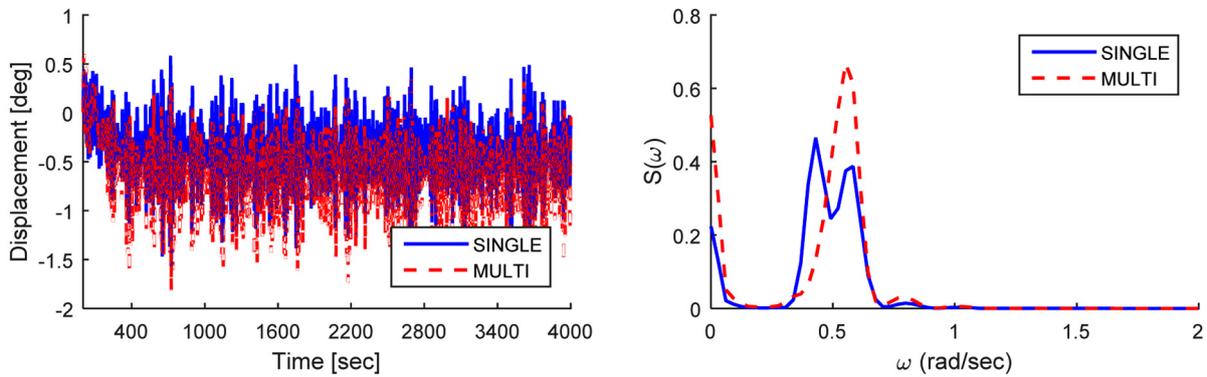


Fig. 8 Platform pitch motion (left) and spectra (right)

맞추어 표면에서의 속도가 1.75m/s이고, 수심에 따라 1/7 멱법칙 (1/7th power law)을 이용하여 수면 하부의 조류 속도를 적용하였다. 시간 영역의 해석은 초기 과도 응답을 감소시키기 위하여 400초 까지 점진적으로 외력을 증가시켰으며 이후 3,600초(1시간) 동안 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 플랫폼의 전후동요 운동 결과이며, 단일체 해석 결과와 다물체 해석 결과 간의 차이가 미미함을 알 수 있다. 반면에 플랫폼의 상하동요 및 종동요 운동은 Fig. 7 ~ Fig. 8과 같이 단일체로 해석한 경우와 다물체로 해석한 경우, 결과에 차이가 발생하게 된다. 이는 주파수 영역에서 해석 결과에서 확인한 바와 같이 PTO 감쇠에 의한 차이보다 플랫폼의 운용 환경에 따른 단일체 모델과 다물체 모델의 차이에서 기인한 것으로 해석 할 수 있다. Table 4는 플랫폼의 운동에 대한 통계값을 보여준다. 통계 수치는 400초부터 4,000초 까지의 결과를 이용하였다. 상하동요의 경우, 다물체 해석을 한 결과 표준편차가 단일체 해석

을 한 결과의 표준편차에서 약 13% 가량 감소함을 알 수 있다. Fig. 7 ~ Fig. 8에서 상하동요 및 종동요의 평균값의 변화는 단일체와 다물체 해석 시 동일한 초기장력을 가진 계류선을 적용하였기 때문에 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 다물체 해석의 경우 WEC의 배수량 감소분만큼 계류선 최상부의 초기 장력도 적절히 감소시켜 해석을 수행하게 되면 평균값의 차이는 거의 발생하지 않을 것으로 보이나, 계류선의 조건을 동일하게 하기 위하여 그 특성은 변화시키지 않았다. Fig. 8의 종동요 응답의 경우 단일체 모델에서 0.4rad/s 부근에서 나타나는 공진현상이 다물체 모델에서는 나타나지 않는데, 이는 다물체 모델의 고유주파수가 Fig. 5에서와 같이 0.3rad/s 근방으로 파랑에너지가 거의 없는 영역에 위치해 있기 때문이다.

3.2 플랫폼 계류 시스템의 장력 해석 결과

플랫폼의 12개의 계류선 중 Fig. 2에 표시된 것과 같이 2개의

Table 4 Platform motion statistics

Mode	Single body				Multi-body			
	Maximum	Minimum	Mean	STD	Maximum	Minimum	Mean	STD
Surge [m]	24.5500	20.4200	21.7276	0.6164	24.5900	20.5200	21.8117	0.6082
Heave [m]	0.3038	-1.1800	-0.4307	0.2348	-0.0234	-1.3630	-0.6674	0.2044
Pitch [deg]	0.5827	-1.5610	-0.4371	0.3113	0.4014	-1.8120	-0.6707	0.3305

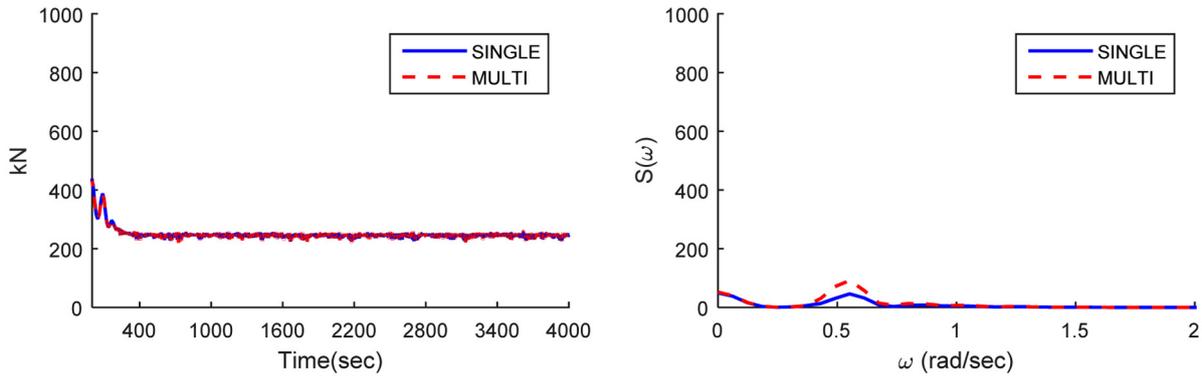


Fig. 9 Top-tension time histories (left) and spectra (right) of Line #2

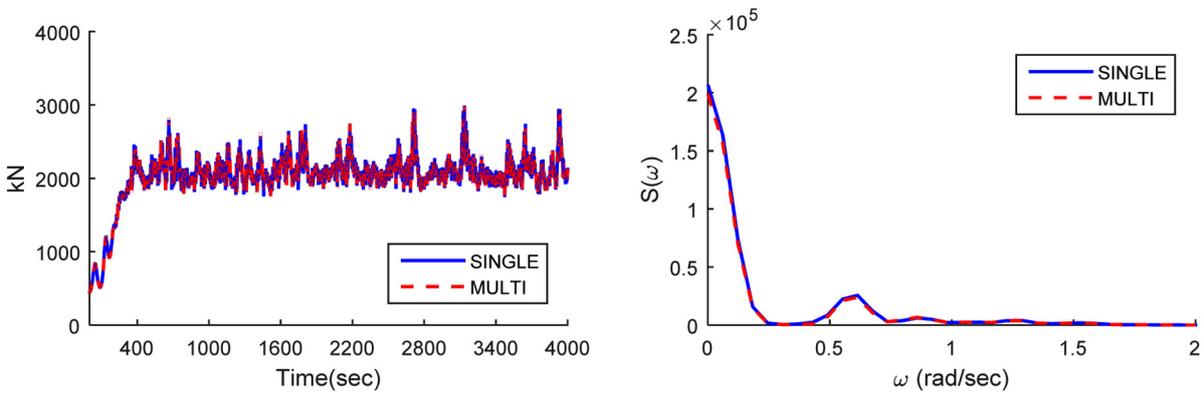


Fig. 10 Top-tension time histories (left) and spectra (right) of Line #8

Table 5 Mooring line top tension statistics

Line	Single body				Multi-body			
	Maximum	Minimum	Mean	STD	Maximum	Minimum	Mean	STD
#2	257.87	223.69	244.77	4.07	260.29	218.86	244.78	5.17
#8	2988.70	1744.20	2111.00	170.49	3033.30	1744.60	2100.80	166.51

계류선을 선정하여 각 계류선 최 상부에 작용하는 장력을 확인 하였다. 외부 환경 조건(파도, 바람, 조류)에 대해 플랫폼의 계류선은 x축에 대칭으로 위치해 있기 때문에 입사파를 기준으로 플랫폼의 뒤편인 풍하측(Lee side)에 위치한 2번 계류선과 플랫폼에서 입사파가 처음 도달하는 면인 풍상측(Weather side)에 위치한 8번 계류선을 선정하였다. Fig. 9 ~ Fig. 10은 각각 2번 계류선과 8번 계류선의 장력과 스펙트럼을 나타낸다. Table 5는 각 계류선에 미치는 장력의 통계값이다. 각 계류선마다의 평균 값은 WEC와 플랫폼을 단일체로 해석한 경우와 다물체로 해석한 경우에 대해 큰 차이를 보이지 않았다.

다물체 해석에서 2번 계류선에 걸리는 장력의 표준 편차는 단일체 해석에서의 표준 편차보다 27% 증가한 것으로 나타났다. 다물체의 경우 종동요 고유 주파수가 단일체에 비해 상대적으로 낮으며 Fig. 8과 같이 파랑에너지 영역에서 단일체 모델보다 운동이 더 크게 나타나므로 이에 따라 계류선의 운동이 더

증가하기 때문이다. 풍상측에 위치한 계류선인 8번 계류선의 경우, 풍하측에 위치한 계류선에 미치는 장력과는 달리 플랫폼의 전후동요 운동으로부터 큰 영향을 받을 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다수의 풍력발전기와 파력발전장치(WEC)가 탑재된 부유식 플랫폼의 운동을 해석하였다. 이 때 WEC와 플랫폼 간의 연성효과를 알아보기 위하여 WEC가 플랫폼에 단단히 고정되어 있는 단일체로 가정한 경우와 플랫폼이 WEC와는 독립적인 운동을 하는 다물체로 가정한 두 가지 경우에 대하여 운동 해석을 진행하여 차이점을 알아보았다. 단방향 연성 효과, 즉 다수의 WEC가 플랫폼의 운동에 미치는 영향만을 보고자 WEC는 플랫폼의 운동과는 독립적으로 항상 수면에 위치한 것으로 가정하였다. 이로 인해 플랫폼과 다수의 WEC 간의 상대운

동이 발생하면서 전기 에너지가 추출된다.

다수의 WEC가 플랫폼에 단단히 고정된 부유체에 대한 경우와 다수 WEC와 플랫폼을 독립적으로 고려한 경우에 대해 동유체력 계수 및 파 기진력을 얻기 위하여 주파수 영역 해석 프로그램인 WAMIT을 이용하였다. 주파수 영역에서의 플랫폼의 상하동요 및 종동요 RAO 확인 결과, 다수 WEC와 플랫폼 간의 상대운동으로 인해 발생하는 PTO 감쇠력은 플랫폼의 운동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

또한 환경 하중과 다수 풍력발전기의 공력-유체력-탄성력-제어-부유체-계류선의 복합적인 요소를 고려한 시간영역 해석은 확장된 FAST-CHARM3D 코드를 이용하였다. 해석 결과, 전후동요, 좌우동요, 선수동요 운동의 경우에는 단일체에 대한 해석이나 다물체에 대한 해석에서 플랫폼의 운동에 차이가 없었으나, 상하동요, 횡동요, 종동요 운동의 경우 차이가 발생하였다. 이는 PTO 감쇠력에 의해 야기된 차이가 아니라 플랫폼과 WEC가 독립적으로 상하 운동하는 정상 작동 상태, 또는 극한 환경 조건에서 WEC의 파손을 방지하기 위해 WEC를 플랫폼에 고정시켜둔 상태와 같이 플랫폼의 운동 특성 변화에 따른 차이에서 발생한 것이라 할 수 있다. 이에 따르면 부유체가 다수의 독립적인 운동을 허용하는 내부 부유체 요소를 포함할 경우에 내부 요소의 운동 여부에 따라 전체 부유체의 운동 응답 특성이 변화하게 되므로 설계 단계에서 다양한 해석 시나리오에 따른 운동 특성 분석이 필요함을 알 수 있다. 본 연구에서는 다수의 WEC가 플랫폼에 미치는 일방적인 영향만을 고려하여 해석을 진행하였으나 추후 WEC와 플랫폼의 양방향 상호작용을 고려한 다자유도 운동 시스템에 대한 해석을 진행하면 더욱 정확한 운동 해석이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발” 및 제주특별자치도와 한국남부발전(주)의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bae, Y.H., Kim, M.H., 2014. Coupled Dynamic Analysis of Multiple Wind Turbines on a Large Single Floater. *Ocean Engineering*, 92, 175-187.
- Borg, M., Collu, M., Brennan, F.P., 2013. Use of a Wave Energy Converter as a Motion Suppression Device for Floating Wind Turbines. *Energy Procedia*, 35, 223-233.
- Cummins, W.E., 1962. The Impulse Response Function and Ship Motions. *Schiffstechnik*, 9, 101-109.
- Lakkoju, V.N.M.R., 1996. Combined Power Generation with Wind and Ocean Waves. *World Renewable Energy Congress*, Denver, 9(1), 870-874.
- Lee, H., Bae, Y.H., Cho, I.H., Kim, K.H., Hong, K., 2015. One-way Coupled Dynamic Analysis of Floating Platform with Wave Energy Converters. *Proceedings of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona, USA, 1, 881-887.
- Lee, H., Bae, Y.H., Cho, I.H., 2016. One-way Coupled Dynamic Analysis of Floating Platform with Wave Energy Converters. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 3(1), 53-60.
- Liao, K., Hu, C., Sueyoshi, M., 2013. Development of WEC as a Floating Platform Motion Suppression System. *International Research Exchange Meeting of Ship and Ocean Engineering*, Osaka, Japan.
- Shin, H.-K., Kim, K.-M., 2011. Motion Analysis of 5-MW Floating Offshore Wind Turbine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(5), 64-68.
- Taghipour, R., Moan, T., 2008. Efficient Frequency-Domain Analysis of Dynamic Response of the Multi-Body Wave Energy Converter in Multi-Directional Waves. *Proceedings of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, Canada, 1, 357-365.
- Tahar, A., Kim, M.H., 2003. Hull/mooring/riser Coupled Dynamic Analysis and Sensitivity Study of a Tanker-based FPSO. *Applied Ocean Research*, 25(6), 367-382.

Experimental Study on Elastic Response of Circular Cross-section Slender Body to Forced Oscillation, Waves, and Current

Ji-won Park*, Seung-Jae Lee**, Hyo-Jae Jo**, Jae-Hyuk Hwang** and Sung-Hoon Han**

*Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

복합 외력환경 중 원형 단면 세장체의 탄성응답에 관한 실험적 연구

박지원* · 이승재** · 조효제** · 황재혁** · 한성훈**

*한국해양대학교 해양과학기술융합학과

**한국해양대학교 조선해양시스템공학부

KEY WORDS: Slender cylinder 원통형 세장체, Model test 모형실험, Forced oscillation 강제동요, Regular wave 규칙파, Uniform flow 균일류

ABSTRACT: The global demand for oil and natural gas has increased, and resource development is moving to the deep sea. Floating and flexible offshore structures such as semi-submersible, spar, and FPSO structures have been widely used. The major equipment of floating structures is always exposed to waves, currents, and other marine environmental factors, which cause structural damage. Moreover, flexible risers are susceptible to an exciting force due to the motion of the floating body. The inline and transverse responses from the three-dimensional behavior of a floating structure occur because of various forces. Typical risers are made of steel pipe and applied in the oil and gas development field, but flexible materials such as polyethylene are suitable for OTEC risers. Consequently, the optimal design of a flexible offshore plant requires a dynamic behavior analysis of slender bodies made of the different materials commonly used for offshore flexible risers. In this study, a three-dimensional motion measurement device was used to analyze the displacements of riser models induced by external force factors, and forced oscillation of a riser was linked to forced oscillation under a steady flow and regular wave condition.

1. 서 론

전 세계적으로 석유 및 천연가스 등의 화석연료에 대한 수요가 증가하고, 연안역의 자원이 고갈되어 감에 따라 자원 개발 영역이 심해역으로 이동하고 있다. 수심이 얇은 해역에서 주로 사용되어온 고정식 구조물은 설치 수심이 깊어지면서 건조 비용이 상당히 증가하였으며, 이로 인해 경제적 문제 뿐만 아니라 안정성에 대한 문제도 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 반잠수식 구조물, 시추선(Drill-ship), 부유식 원유생산, 저장 및 하역설비(Floating production storage offloading, FPSO) 등과 같은 부유식 또는 유연식 해양구조물의 수요가 증가하게 되었다(Jung, 1999; Patel, 1989).

유연식 해양구조물의 주요 장비는 직경에 비해 길이가 매우 긴 세장체로 구성되어 있으며, 현재 이에 대한 연구가 활발히

진행되고 있다. 세장체 구조물에는 심해역의 원유 탐사 및 생산에 사용되는 라이저(Riser), 계류선(Mooring line), 그리고 해양 온도차 발전설비(Ocean thermal energy conversion, OTEC)에서 사용되는 라이저 등 다양하다. 세장체 구조물은 파랑, 조류 등의 해상환경에 의한 환경 하중을 받으며, 또한, 부유체의 운동으로 인한 가진력을 받는다. 이로 인해 유연식 구조물은 흐름 방향(Inline) 응답과 흐름에 직각방향(Transverse) 응답이 발생하는 3차원 운동을 하게 된다(Chucheepsakul et al., 1995; Park et al., 2002; Lee et al., 2013; Jung, 1999). 세장체의 동역학적 거동해석을 위해서는 실험적 연구가 동반되어야 한다. 그러나 세장형 구조물의 모형실험을 수행하는데 있어 기하학적, 동역학적 상사를 만족시키는 것은 매우 어렵기 때문에 다양한 실험 기법이 연구되고 있다(Hong and Koterayama, 2004; Hong et al., 2002).

Received 21 September 2015, revised 10 February 2016, accepted 22 April 2016

Corresponding author Seung-Jae Lee: +82-051-410-4309, sjzest@gmail.com

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

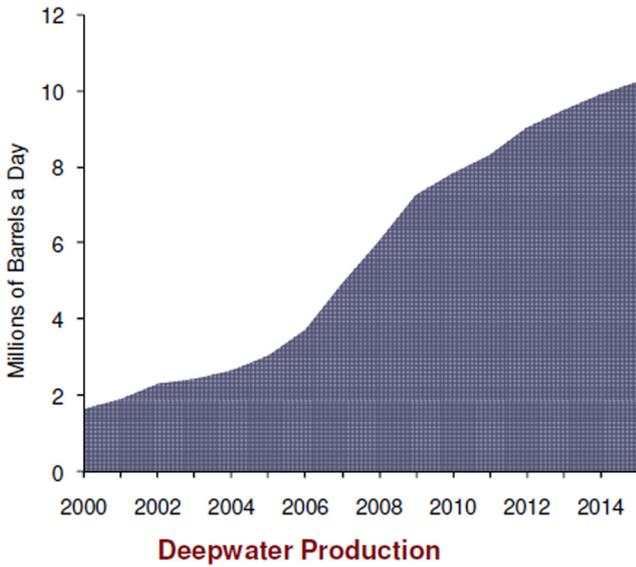


Fig. 1 Trend of deepwater production about oil (John, 2009)

일반적으로 석유자원이나 가스 개발에 사용되는 라이저는 강관으로 구성되지만, 해양심층수를 취수하기 위한 라이저는 양질의 해양심층수를 공급할 수 있어야 하기 때문에 석유 및 가스를 운반하는 강관을 사용할 수 없고, 폴리에틸렌과 같은 유연한 재질을 사용해야 한다. 사용 목적에 따라 여러 종류의 라이저를 사용해야 하는 유연식 해양구조물의 특성상 다양한 재질로 만들어진 세장체의 동역학적 거동 해석 및 해양구조물의 최적 설계에 관한 연구가 필요하다(Chen et al., 2009; Jung et al., 2004). 본 연구에서는 탄성 계수가 서로 다른 아크릴(Acryl), 폴리프로필렌(Polypropylene, P.P), 테플론(Teflon) 세 가지 재질로 모형 제작하여 강제동요, 규칙파, 균일류와 같은 다양한 외력환경 중 세장체의 흐름방향 및 횡방향 탄성응답을 분석하였다. 또한, 모형의 고유 주파수와 와류방출 주파수(Vortex shedding frequency)의 관계가 탄성응답에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 외력환경과 모형의 재질에 따라서 탄성응답의 크기가 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 목표 해역의 해상 상태에 적합한 재질을 이용하여 해양 구조물을 설계한다면 안정성 측면에서 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

세장형 구조물을 설계 시, 목표 해역의 해상 상태를 고려하여 그에 따라 적절한 탄성을 갖는 재질을 사용하면 해양구조물을 가동하는데 있어 안정성과 경제성 측면에 있어 유리할 것으로 사료된다.

2. 이론적 배경

2.1 모형의 고유 주파수

다양한 외력 환경 중 발생하는 세장형 구조물의 탄성응답 분석을 위해 모형의 고유 주파수를 이론 계산 값과 가진 실험을 통하여 얻은 데이터 값을 비교하였다. 실험에 사용된 세장체 모형의 1st mode 고유주파수는 식 (1)과 같다.

Table 1 Natural frequency of models by theoretical calculations & experimental measurements

	Acryl	P.P	Teflon
ω_{C1} [rad/s]	18.97	14.06	7.34
ω_{E1} [rad/s]	15.07	11.08	5.52
Frequency difference rate [%]	20.5	21.2	24.8

$$\omega_1 = 1.875^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \tag{1}$$

여기에서 ω_1 은 원형 부재의 고유 원 주파수, E 는 모형의 탄성계수, I 는 실린더의 관성 모멘트, L 은 모형의 길이, $m = (m_c + m_a)/L$, m_c 는 모형의 질량, $m_a (= \rho \pi r^2 l)$ 는 부가질량, l 은 모형이 유체에 잠긴 길이를 뜻한다. 자유수면이 존재하는 경우 m_a 는 주파수의 함수이지만, 본 연구에서는 모형의 단면적에 비해 세장체의 운동 변위가 크기 때문에 부가질량의 주파수 의존성이 낮다고 보아 $\rho \pi r^2 l$ 과 같은 상수값을 사용하였다. 식 (1)을 이용하여 계산한 값과 실험을 통해 얻은 각 모형의 고유 원 주파수를 Table 1에 나타내었다. ω_{C1} 은 각 모형의 계산된 고유 원 주파수, ω_{E1} 은 실험을 통해 구한 고유 원 주파수를 의미한다. Table을 보면, 자유수면 효과, 부가질량의 영향 및 실험 중 발생하는 에러로 인해 두 값은 다소 차이가 있지만, Teflon 모형에서 값이 가장 작게 나타나는 경향은 똑같은 것을 볼 수 있다.

2.2 Vortex shedding effects

Vortex shedding 현상은 실린더형 구조물 주위 유동의 비대칭성에 의해 구조물의 후류에서 발생한 Vortex가 구조물로부터 떨어져 나가는 현상을 말한다. Vortex shedding에 의한 구조물의 진동 현상을 와유기 진동(Vortex induced vibration, VIV)이라 하며, 이는 유연식 해양구조물의 설계에 있어 매우 중요한 설계 인자이다.

Reynolds number(Re)와 Keulegan-Carpenter number($K.C$)는 Vortex shedding 현상이 발생할 수 있는 외력환경인지 판단하는데 쓰일 수 있으며, Re 는 다음과 같다.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \tag{2}$$

본 연구에서의 실험조건 중 Re 는 1500~6000 범위에 있으며, 해당 구간에서는 Vortex shedding 현상이 나타나기 때문에 흐름방향에 대한 횡방향 운동이 발생하는 것을 확인할 수 있다(Blevins, 1990).

$K.C$ 수는 Vortex shedding 현상 발생 유무를 판단할 수 있게 하며, 그 정의는 다음과 같다.

$$K.C = \frac{U_{max} T}{D} \tag{3}$$

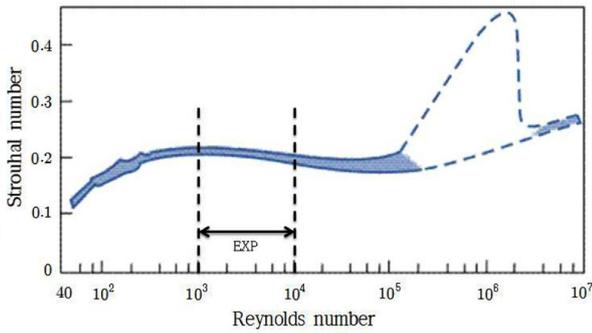


Fig. 2 Strouhal & Reynolds number relationship for circular cylinders (Sarpkaya and Isaacson, 1981)

여기에서 U_{max} 는 유체입자의 흐름방향 최대속도, T 는 주기, 그리고 D 는 모형의 직경이다. 실험환경에 대한 KC 수는 15~30 범위에 있으며, 이 구간에서는 Vortex shedding 현상으로 양력이 발생하고 횡방향 응답이 나타나는 것을 볼 수 있다(Chakrabarti, 1987).

Vortex shedding 현상을 분석하기 위해서는 Vortex shedding frequency를 파악할 필요가 있으며, Shedding frequency와 모형의 Natural frequency가 일치하거나 그의 배수가 될 때, 공진 현상(Lock-in)이 발생하고, Vortex shedding frequency는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \tag{4}$$

여기에서 f_s 는 Vortex shedding frequency, S_t 는 Strouhal number, U 는 유체 흐름의 속도, D 는 실린더의 직경이다. S_t 와 Re 는 Fig. 2와 같은 관계가 있으며, 실험 조건에 대한 S_t 의 범위는 그림에 나타낸 바와 같다.

3. 실험방법 및 모형

3.1 실험장비

본 실험은 한국해양대학교 해양시스템연구실 내에 위치한 2차원 조파수조 (25m(L)×1m(B)×0.8m(D))에서 수행되었고, 조파



Fig. 3 2-Dimensional wave tank



Fig. 4 Forced oscillation device

기는 피스톤 형식으로 파 주기 0.5~3.0sec, 파고 0.03~0.3m까지 구현 가능하다.

실험에 사용된 강제동요장치는 종방향(X 방향), 횡방향(Y 방향), 상하방향(Z 방향), Rolling방향(θ 방향)의 4축을 동시 또는 개별적으로 제어할 수 있는 장치이고, 실험은 모형을 강제동요 장치에 고정시켜 놓은 상태에서 수행하였다.

2차원 조파수조 내에 설치된 흐름발생장치의 유속은 최대 0.4m/s까지 생성할 수 있으며, 펌프 회전수를 제어함으로써 유속을 조정할 수 있다.

실험에 사용된 서보식 파고계는 수면 측정지점에 놓인 바늘 전극과 접지 전극이 접하고 있어 파고계와 파랑간 간섭이 없기 때문에 보다 정확한 파고를 계측할 수 있다.

유속 측정을 위해 Acoustic doppler velocimetry(ADV)를 사용하였고, 측정 가능한 유속 범위는 0.001~2.5m/s이며, 오차 범위는 $\pm 1\%$ 이다.

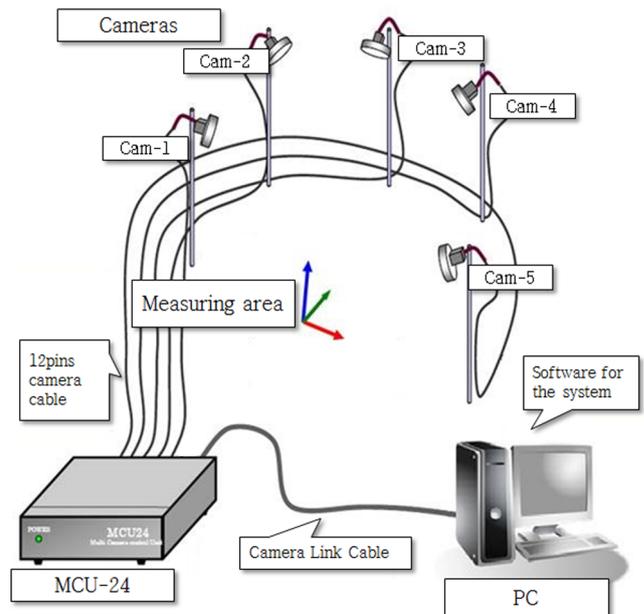


Fig. 5 Three-dimensional motion measuring device

세장체 모형의 탄성응답 분석을 위해 일본의 ‘Ditect’사에서 제작된 3차원 운동계측 장비를 사용하였다. 광학적계를 이용한 이 장비는 실험 대상에 부착된 반사 마커의 운동을 5대의 CCD(Charge-coupled device)카메라가 실시간으로 계측 가능하도록 설정되어 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 각 카메라들과 연결된 ‘MCU-24’장치는 카메라에서 계측된 정보를 종합하여 각 마커의 X, Y, Z축 변위 데이터를 PC로 전송한다. PC로 전송된 데이터에서 발생할 수 있는 반사 마커간의 오차와 교란현상의 보정을 위해 ‘DIPP-Motion’프로그램을 이용하였으며, 오차는 0.7mm 미만이다.

3.2. 실험 모형

모형은 Fig. 6과 같이 두께 0.01m의 얇은 원반형 판과 세장체로 구성되고 서로 다른 탄성계수를 갖는 아크릴, 폴리프로필렌, 그리고 테플론 재질로 제작되었으며, 모형의 제원은 Table 2와 같다. 세장체에는 길이방향에 대해 0.04m 간격으로 반사테이프가 부착되었고, 얇은 비닐재질로 구성된 반사테이프를 이용함으로써 모형의 탄성 특성에 미치는 영향을 최대한 줄이고자 하였다. 반사체가 부착된 각 지점에 대한 변위를 계측하여 탄성응답을 분석하였다.

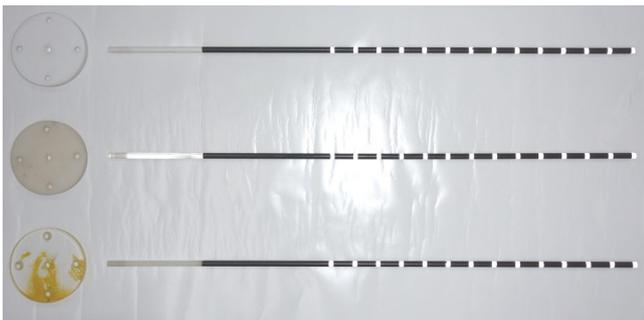


Fig. 6 Slender body models

Table 2 Characteristics of Models

Parameter	Model I	Model II	Model III
Material	Acryl	P.P	Teflon
Length [m]	0.9	0.9	0.9
Diameter [m]	0.01	0.01	0.01
Mass per length in air [kg/m]	0.01019	0.00804	0.0188
Young’s Modulus [Gpa]	2.943	1.57	0.491

3.3 실험방법 및 조건

2차원 조파수조에서 탄성계수가 서로 다른 세장체 모형을 Fig. 7과 같이 강제동요장치에 고정시켜 놓은 상태에서 실험을 실시하였다. 실험은 강제동요, 규칙파, 균일류가 단일·합성된 외력조건에서 수행하였으며, 각각의 외력이 안정적으로 발생할 수 있는 조건하에서 실험을 실시하였다. 단일외력의 실험 환경은 Table 3과 같다.



Fig. 7 Slender body model test in regular waves

Table 3 Experimental conditions for a single external force

Material of the model	Acryl, P.P, Teflon				
Forced oscillation	Period [sec]	3.0	4.0	5.0	
	Amplitude [mm]	250			
Regular waves	Period [sec]	0.8	1.0	1.5	2.0
	Wave height [mm]	80	100		
Uniform flow	Velocity [mm/s]	150			

3.4 데이터 계측 및 처리

모형의 각 지점에서의 변위데이터로 3차원 운동경향을 파악하고, 흐름방향(X방향)과 횡방향(Y방향)에 대한 탄성응답을 분석하였다. Fig. 8에 보이는 것처럼 모형 상단 및 하단에 부착된 Point 1과 13의 X축 방향 변위차이를 이용하여 흐름방향 탄성응답을 분석하였다. 횡방향 탄성응답도 같은 방법으로 Y축 방향의 변위를 이용하여 나타내었다.

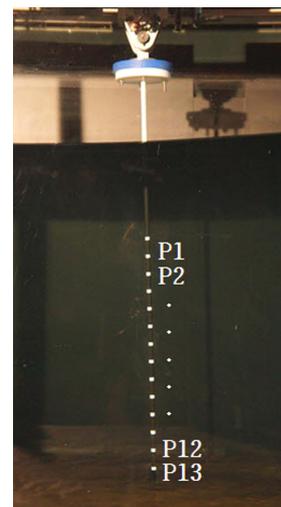


Fig. 8 Reflecting markers attached on a model for displacement measurement

4. 연구결과 및 고찰

흐름방향 및 횡방향 탄성응답 분석을 수행하기 위해 여러 실험조건에 대한 모형의 3차원 변위 데이터를 계측하여 비교·분석하였다.

Fig. 9는 테플론 모형에 강제동요 주기 3.0sec, 진폭 250mm의 외력이 가해진 것에 대한 변위 그래프를 나타낸 것이다. 그래프는 모형에 부착된 반사체의 운동을 3차원적으로 보여주고 있다. 또 한, 이 운동을 XY, XZ, YZ면에 투영시켜 나타내었으며, 이를 이용하여 흐름방향 및 횡방향 응답을 분석하였다.

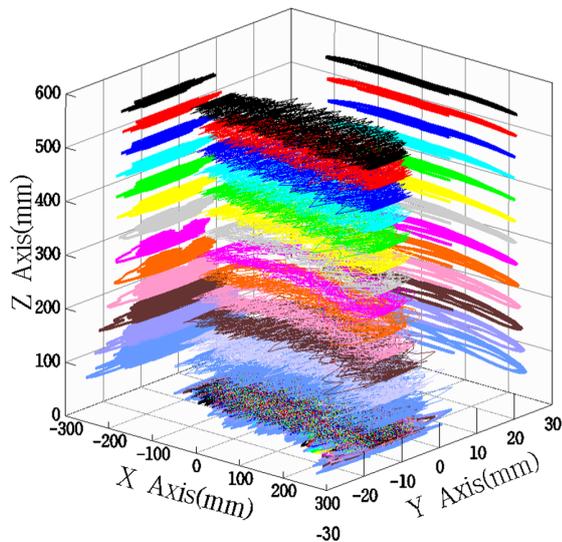


Fig. 9 Three-dimensional displacement data of the Teflon model in the forced oscillation (Forced oscillation period: 3.0 sec, amplitude: 250 mm)

4.1 단일 외력환경에 대한 탄성응답분석

본 절에서는 아크릴, 폴리프로필렌, 테플론 모형에 강제동요, 규칙파와 균일류가 가해지는 각 조건들에 대한 모형의 흐름방향 및 횡방향 탄성응답을 분석하였다.

Fig. 10(a)는 강제동요에 대한 흐름방향 탄성응답을 나타낸 것으로 '+'방향과 '-'방향의 값이 상하 대칭되는 것을 볼 수 있고, 모형의 강성이 작고 강제동요 주기가 짧을 때, ±17cm 정도로 응답이 가장 크게 나타난다. Fig. 10(b)를 보면, 횡방향 응답은 강제동요 주기와 모형의 강성에 따라 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 주기 3.0sec에서는 강성이 가장 작은 테플론 모형의 응답이 4.1cm로 가장 크게 나타나지만, 주기가 긴 5.0sec인 경우 중간 강성을 갖는 폴리프로필렌 모형이 3.3cm로 제일 크게 나타난다.

Fig. 11은 규칙파 중 탄성응답을 나타낸 것으로 Fig. 11(a)를 보면 주기가 길어지고 강성이 작을수록 흐름방향 탄성응답이 크게 나타난다. Fig. 11(b)의 횡방향 탄성응답은 주기가 길어지면 전체적으로 커지며, 모형별 재질에 따라서는 강성이 큰 아크릴 모형과 강성이 작은 테플론 모형보다 중간 강성을 갖는 폴리프로필렌 모형에서 최대 3cm로 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 균일류 조건에 대한 탄성응답 그래프이고, 그래프의 X축은 흐름방향, Y축은 횡방향 탄성응답을 의미한다. 그래프를 보면, 흐름방향 응답은 강성이 작을수록 증가하고, 횡방향 응답은 중간 강성을 갖는 폴리프로필렌 모형에서 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

단일 외력환경에 대한 탄성응답 분석결과, 모형의 탄성과 외력 조건에 따른 탄성응답이 다르게 나타나기 때문에 세장형 해양구조물을 설계할 때, 설치 해역의 외력환경에 따라 재질을 선정할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

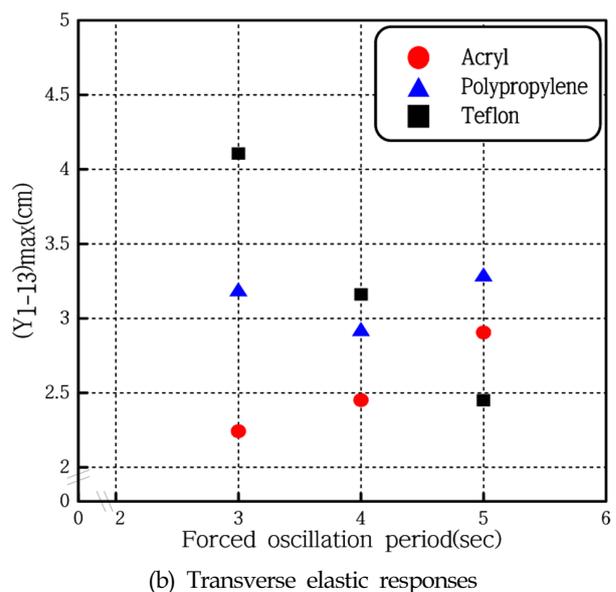
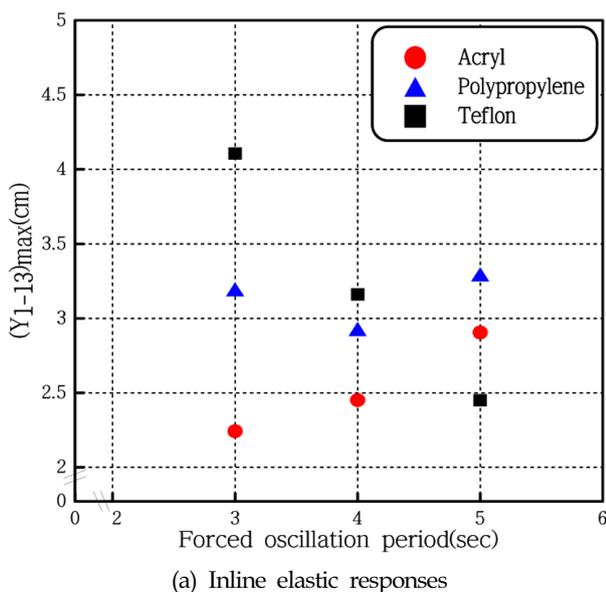
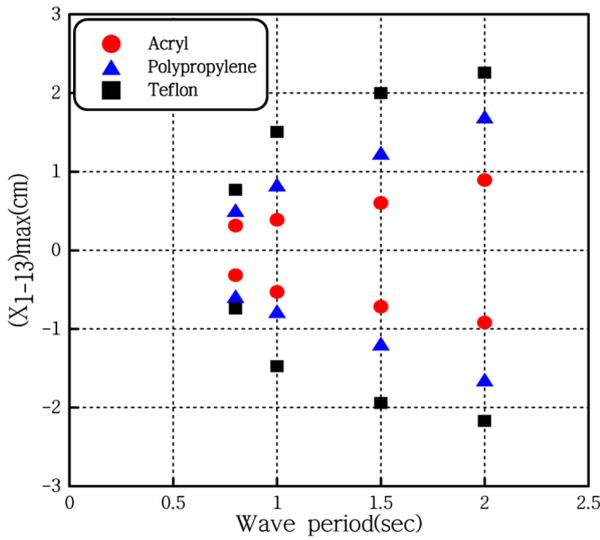
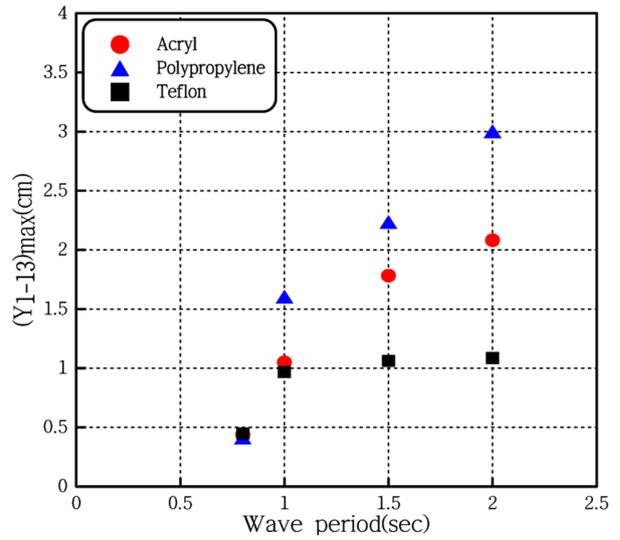


Fig. 10 Elastic responses under the forced oscillation for three(3) models



(a) Inline elastic responses



(b) Transverse elastic responses

Fig. 11 Elastic responses under the regular waves for three(3) models

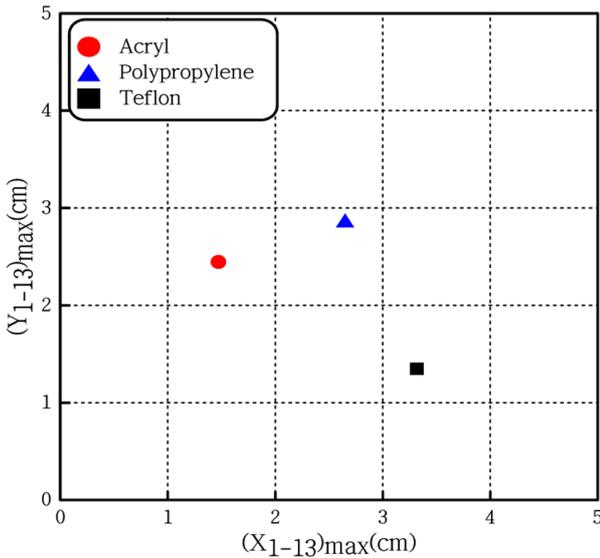


Fig. 12 Inline & transverse elastic responses under the uniform flow for three(3) models (Flow velocity: 150 mm/s)

다음으로 균일류가 가해질 때 모형 제일 하단 지점인 Point 13의 횡방향 운동 데이터를 통해 얻은 Shedding frequency의 실험 값을 계산 값과 비교·검증하였다. 그리고 각 모형별로 발생하는 현상을 Fig. 13에 나타난 것과 같이 주파수 영역 해석을 통해 분석하였다. 실험조건(Flow velocity: 150mm/s)에 대해 계산된 Shedding frequency는 약 3Hz이지만, 아크릴과 폴리프로필렌 모형의 경우, 실험을 통해 얻은 주파수는 약 2.7Hz로 계산 값과 다소 차이가 있다. 하지만, 두 값의 오차는 약 8%로 실험적 오류를 고려하면 신뢰할 수 있다고 볼 수 있다. Fig. 13을 보면, 아크릴 모형은 두 지점에서 최대 값을 보이는데, 이는 강성

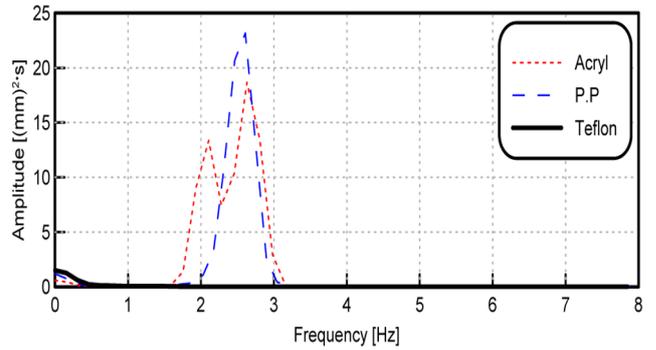


Fig. 13 Analyzing frequency domain relative to transverse elastic responses of each slender model

이 커 횡방향 운동이 크게 나타나는 것과 모형의 고유주파수가 같이 맞물리면서 발생하는 것으로 보인다. 테플론 모형은 저주파수 영역에서 Shedding frequency가 나타났는데, 이는 강성이 작아 흐름방향의 운동이 횡방향 운동보다 상대적으로 커 장주기 운동을 유발하는 것으로 생각된다.

4.2 합성된 외력 환경에 대한 탄성응답분석

본 절에서는 실험환경의 한계 및 가장 유연한 재료의 응답특성을 중점적으로 보고자 테플론 모형을 이용하여 실험을 수행하였으며, 합성된 외력이 가해질 때 발생하는 모형의 흐름방향 및 횡방향 탄성응답을 분석하였다. 크게 3가지 경우에 대해 실험을 수행하였는데, 첫 번째는 강제동요와 규칙파가 합성된 경우, 두 번째는 규칙파와 균일류가 합성된 경우, 마지막 세 번째는 모든 외력이 합성된 조건이고, 그에 대한 외력조건은 Table 4와 같다. 강제동요와 규칙파가 합성된 경우에는 추가로 3가지 위상차를 주어 실험을 수행하였다.

Table 4 Experimental conditions for synthesized external forces

Material of the model		Teflon
Forced oscillation	Period [sec]	3.0
	Amplitude [mm]	250
Regular waves	Period [sec]	1.0 1.5
	Phase difference	Phase-I, Phase-II Phase-III
	Wave height [mm]	50, 100
Uniform flow	Velocity [mm/s]	150

4.2.1 강제동요와 규칙파 중 탄성응답분석

Fig. 15는 강제동요와 규칙파가 합성된 외력과 각 단일외력에 대한 탄성응답을 나타낸 그래프이고, 두 외력간의 위상차를 Fig. 14와 같이 3가지로 주어 위상차가 탄성응답에 미치는 영향

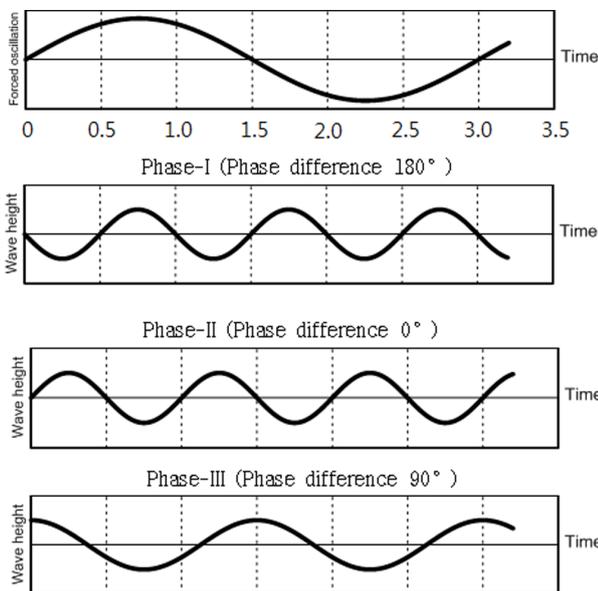
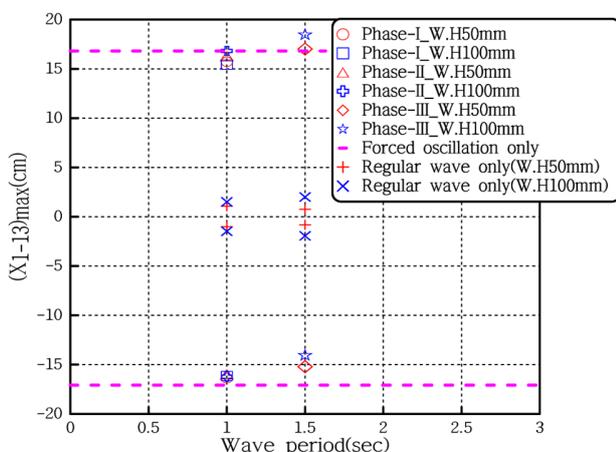


Fig. 14 Phase difference under the forced oscillation & regular waves



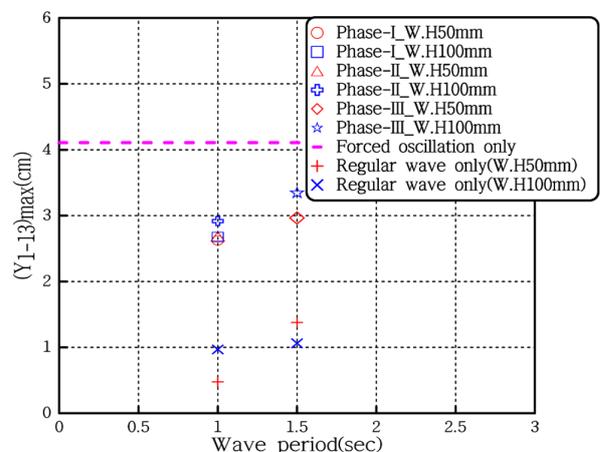
(a) Inline elastic responses

을 파악하였다.

Fig. 15에서 짧은 점선은 단일 강제동요에 대한 응답, '+'와 'x'기호는 단일 규칙파의 응답을 의미하고, 나머지 기호들은 그래프에 나타나있는 바와 같다. Fig. 15에서와 같이 강제동요와 규칙파가 합성되면 위상에 따른 상호작용(Interaction)의 영향으로 '+' 및 '-'방향 응답의 크기가 달라진다. Fig. 15(b)를 보면, 파주기 1.5sec에서는 파고가 커짐에 따라 응답이 3cm 가량 증가하는데, 이는 파랑에 의한 상호작용이 나타난다고 볼 수 있다. 하지만, 파주기 1.0sec에서는 파고의 증가에 따른 응답의 크기 변화가 많지 않기 때문에 파랑에 의해 탄성응답이 증가한다고 보기 어렵다. 그래서 두 외력이 조우하는 위상에 따라 상호작용이 달라질 수 있기 때문에 그에 대한 응답도 바뀔 수 있다. 외력이 합성된 경우에 대한 횡방향 탄성응답은 점선으로 표시된 단일 강제동요 응답의 크기보다 최대 1.5cm 정도 더 작게 나타나는데, 이는 두 외력간의 상호작용으로 인해 발생하는 것으로 볼 수 있다.

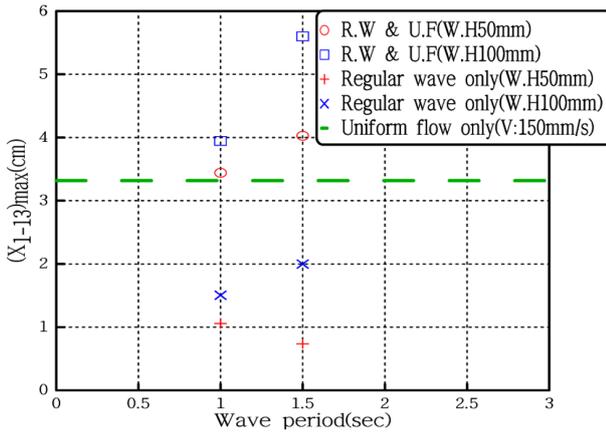
4.2.2 규칙파와 균일류 중 탄성응답분석

Fig. 16은 규칙파(Regular wave, R.W)와 균일류(Uniform flow, U.F)가 합성된 외력에 대한 흐름방향 및 횡방향 탄성응답 그래프이다. 그래프에서 원형과 사각형 기호는 합성외력에 대한 탄성응답을 나타내고, '+'와 'x'기호는 단일 규칙파의 응답, 긴 점선은 단일 균일류에 대한 응답을 의미한다. Fig. 16(a)를 보면, 합성외력에 대한 흐름방향 탄성응답은 파 주기가 길어지고 파고가 높아질수록 전체적인 응답이 커지며 최대 6cm 가까이 계속되었고, 이와 같은 경향은 두 외력간의 상호작용으로 인해 나타난다고 볼 수 있다. Fig. 16(b)에서 단일 규칙파만 가해진 경우의 횡방향 응답은 파주기가 길어짐에 따라 증가하는 양상이 나타나지만 균일류와 합성된 외력환경 하에서의 응답은 파주기가 짧고 파고가 높으면 커지는 것을 볼 수 있고, 이러한 현상은 두 외력의 상호작용으로 발생한다고 볼 수 있다. 즉, 단일 규칙파와 두 외력(R.W & U.F)이 합성된 경우에 대한 횡방향 탄성응답을 비교해보면 서로 다른 파랑 조건에서 탄성응답이

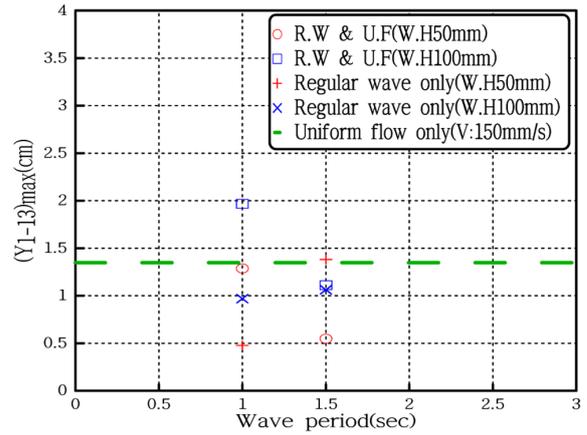


(b) Transverse elastic responses

Fig. 15 Elastic responses under the forced oscillation & regular waves for a Teflon model



(a) Inline elastic responses



(b) Transverse elastic responses

Fig. 16 Elastic responses under the regular waves & uniform flow for a Teflon model

커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 유연식 구조물을 설치하고자 하는 해역의 파랑환경과 중점을 두고자하는 응답을 고려하여 설계할 필요가 있다.

4.2.3 강제동요, 규칙파, 균일류 중 탄성응답분석

Fig. 18(a), (b)는 강제동요, 규칙파와 균일류가 합성된 외력환경에 대한 흐름방향 및 횡방향 탄성응답 그래프이고, 강제동요와 규칙파의 위상차를 Fig. 17과 같이 3가지로 주어 실험하였다.

Fig. 18에서 짧은 점선은 단일 강제동요에 대한 응답, ‘+’와 ‘×’ 기호는 단일 규칙파의 응답, 긴 점선은 단일 균일류에 대한 응답을 의미하고, 나머지 기호들은 그래프에 나타나있는 바와 같다. Fig. 18(a)에서 합성된 외력환경의 흐름방향 탄성응답을 보면, 세 외력간의 상호작용으로 인해 파 주기와 파고간의 응답 차이는 크지않고, 그 응답은 +24cm에서 -10cm로 대부분 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 이 응답은 각 외력에 대한 응답(‘+’, ‘×’, 점선 기호)이 선형 중첩되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 18(b)에서 합성 외력에 대한 횡방향 탄성응답은 세 외력들

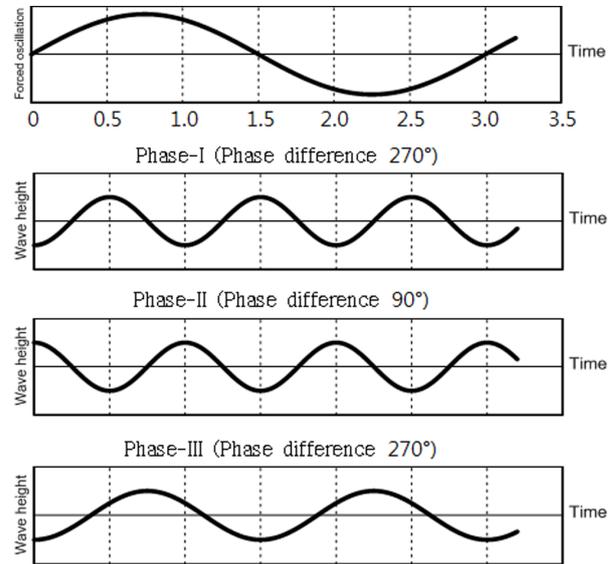
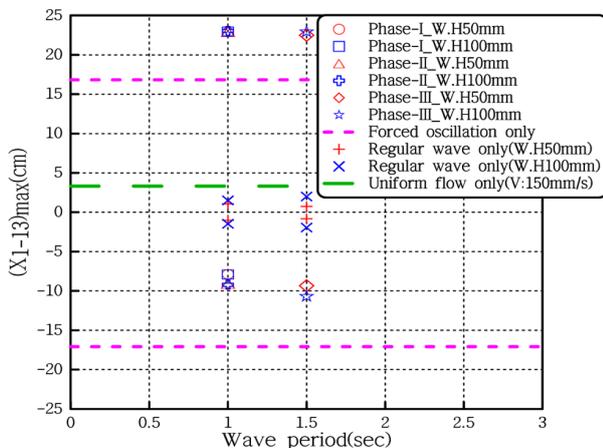
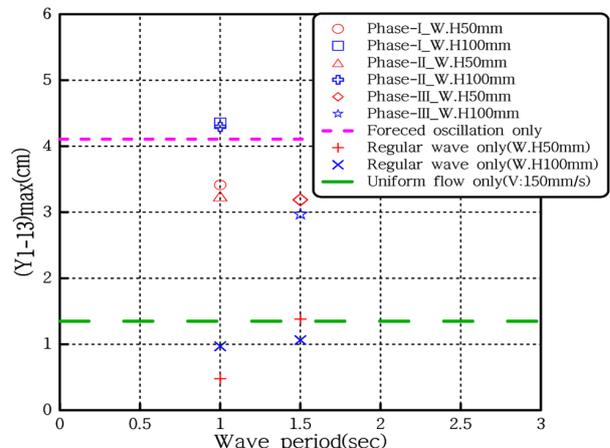


Fig. 17 Phase difference under the forced oscillation & regular waves



(a) Inline elastic responses



(b) Transverse elastic responses

Fig. 18 Elastic responses under the forced oscillation & regular waves & uniform flow for a Teflon model

간의 상호작용으로 인해 전체적으로 작아지고, 흐름방향 응답과 달리 선형 중첩되는 경향이 나타나지 않는다.

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 외력환경 중 강성이 서로 다른 재질로 제작된 세장형 모형의 탄성응답을 비교·분석하였다.

(1) 단일 외력 환경에 대해 흐름방향의 탄성응답은 주로 모형의 강성이 작고, 외력의 주기가 길고, 운동 진폭이 클수록 증가하는 경향이 나타난다. 응답의 최대 값은 강제 동요주기 3.0sec의 경우에서 테플론 모형이 약 17cm 정도 발생하였고, 폴리프로필렌 모형은 10cm 그리고 아크릴 모형은 약 6cm로 예측되었다.

(2) 단일 외력 환경에 대해 횡방향 응답은 모형의 재질과 외력간의 공진관계 유무에 따라 크고 작게 발생한다. 여러 외력 환경 중 규칙과 조건에서 보면, 세 모형의 횡방향 탄성응답은 파주기 0.8sec에서 0.5cm로 비슷하게 나타났다. 그리고 파주기 2.0sec에서 폴리프로필렌 모형의 횡방향 응답은 3cm, 아크릴 모형은 약 2cm 그리고 테플론 모형은 약 1cm가 발생하였다.

(3) 강제동요와 규칙파가 합성되면 흐름방향 응답은 외력의 상호작용에 의해 ‘+’방향으로 중첩되어 +15~19cm 정도로 나타나고, 합성된 외력에 대한 횡방향 탄성응답은 단일 강제동요 중 응답보다 1cm 가량 작은 +2.5~3.5cm가 발생하였다.

(4) 세 외력이 합성된 경우, 흐름방향 탄성응답은 선형 중첩되어 전체적으로 비슷하게 나타난다. 반면 횡방향 탄성응답은 외력간 상호작용으로 인해 불특정 조건에서 증가 및 감소하는 복합적인 현상이 나타나고 1cm 이상 차이가 발생한다.

(5) 세장형 구조물을 설계 시, 목표 해역의 해상 상태를 고려하여 그에 따라 적절한 탄성을 갖는 재질을 사용하면 해양구조물을 가동하는데 있어 안정성과 경제성 측면에 있어 유리할 것으로 사료된다.

References

- Blevins, R.D., 1990. Flow-Induced Vibration. 2nd Edition. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Chakrabarti, S.K., 1987. Hydrodynamics of Offshore Structures. 1st Edition, CBI Industries, Plainfield.
- Chen, Y., Chai, Y.H., Li, X., Zhou, J., 2009. An Extraction of the Natural Frequencies and Mode Shapes of Marine Risers by the Method of Differential Transformation. Computers and Structures, 87, 1384-1393.
- Chucheepsakul, S., Huang, T., Laohapotjanart, P., 1995. Effect of Axial Deformation on the Equilibrium Configurations of Marine Cables. Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, Hague Netherlands, 224-248.
- Hong, Y.P., Koterayama, W., 2004. An Experimental and Numerical Study on Dynamics of a Flexible Marine Riser. Proceedings of the Annual Autumn Meeting - The Society of Naval Architects of Korea, Sancheong Korea, 652-661.
- Hong, Y.P., Nakamura, M., Koterayama, W., 2002. An Experimental and Numerical Study on Dynamics of Flexible Free Hanging Riser. Proceedings of The Fifth International Society of Offshore and Polar Engineers Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Daejeon Korea, 131-137.
- John W., 2009. Global Offshore Prospects. [Online] Available at: <<http://www.offshorecenter.dk/log/filer/ymmeeting09/09ocdpp-ym-dw-dr1.pdf>> [Accessed 27 Jan. 2014].
- Jung, D.H., 1999. A Study on Three Dimensional Structural Analysis for Marine Rigid Riser by Finite Element Method. Master's thesis, Busan Korea.
- Jung, D.H., Kim, H.J., Park, H.I., 2004. A Study on the Behavior of Flexible Riser for Upwelling Deep Ocean Water by a Numerical Method. Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(4), 15-22.
- Lee, S.J., Kang, D.H., Jo, H.J., Shin, D.R., 2013. A Study of Behavior of Slender Bodies in Waves. Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(3), 29-35.
- Park, H.I., Hong, Y.P., Nakamura, M., Koterayama, W., 2002. An Experimental Study on Transverse Vibrations of A Highly Flexible Free-Hanging Pipe in Water. Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu Japan, 199-206.
- Patel, M.H., 1989. Dynamic of Offshore Structure. 1st Edition, Butter worths, London.
- Sarpkaya, T., Isaacson, M., 1981. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures. 1st Edition, Van Nostrand Reinhold, New York.

Strength Assessment of High-Pressure Ball Valve for Topside Process Unit

Jeong-Sik Oh*, Yooil Kim*, Nakshin Jeong** and Sangmyung Kim**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Seoul, Korea

해양플랜트 탑사이드용 고압 볼밸브에 대한 구조 안전성 평가

오정식* · 김유일* · 정낙신** · 김상명**

*인하대학교 조선해양공학과

**대우조선해양 특수성능연구소

KEY WORDS: Ball valve 볼밸브, Sealing 실링, Seat retainer 시트 리테이너, High pressure closure test 고압 폐쇄 시험, Finite element analysis 유한요소해석

ABSTRACT: A high-pressure ball valve was developed, and both the structural strength and sealing performance were assessed based on a nonlinear finite element analysis. Different parts were modeled with solid elements and assembled, taking into account both contact and sliding effects. Three different loading scenarios were analyzed, including a high-pressure closure test and fire and shell test conditions. The structural safety of each part was checked under each loading condition, and the sealing performance was also investigated to validate the performance of the valve.

1. 서 론

일반적으로 볼 밸브는 2개 이상의 배관(Pipe)에 연결되어 배관에 연결된 직선 유로를 폐쇄 요소의 1/4 회전에 의하여 유체(Fluid)의 흐름을 정지 또는 개시하는 단순 개폐용 회전밸브로서 널리 사용되고 있다. 볼 밸브는 유로를 개폐하기 위하여 밸브 몸체 내부에 2개 이상의 유로와 연결되는 챔버 내에 구형의 폐쇄 요소인 볼 부재가 유로에 직각인 축을 중심으로 회전하도록 설치되어, 볼 부재의 회전에 의하여 유로를 선택적으로 개폐하도록 작동된다. 이러한 볼 밸브는 전체 해양 플랜트 탑사이드에 설치되는 밸브의 80%를 차지하고 있으며 이들 중 대부분이 해외 밸브 업체로부터 수입되고 있다. 그러나 해외 업체로부터의 밸브 수입은 고비용 문제, 납기 지연을 야기하며, 전체 해양 플랜트 건조 일정 지연에 주요한 원인이 되고 있다. 해양플랜트는 주문주에서 허가를 내린 업체들만이 제품을 납품 할 수 있는 시스템을 가지는데 이를 위해서는 상당히 높은 수준의 품질이 요구된다. 최근 국내에서 수행된 일부 프로젝트의 경우 소수의 국내 밸브 업체들이 납품한 이력이 있기도 하지만 대부분의 오일 메이저들의 경우 여전히 국내 밸브 업체에 납품 허가를

하지 않고 있다.

국내에서 수행된 볼 밸브 연구는 구조해석을 통한 밸브의 변형량, 응력, 안전계수 도출, 용접 결함과 열영향부를 고려한 밸브 구조 연구(Kim, 2013), LNG(Liquefied natural gas)선용 극저온 볼 밸브의 응력 및 변형 해석(Kim et al., 2007, Kim and Kim, 2013) 등 강도 측면에서의 접근이 많으며, 혹은 유량 제어용 볼 밸브에 대한 유량 특성 분석 등 학술적인 접근이 주를 이루고 있다. 이외에도 여러 가지 관련 연구가 있지만 볼 밸브의 기능을 파악하고 이를 개선시키는 활동은 저조한 실정으로, 토크 감소를 목적으로 한 최적화 연구(Ha et al., 2014) 사례가 있으나 그 이전에는 화재 시 볼 밸브의 기밀성 유지를 위한 시트 리테이너 구조 개발 연구가 거의 유일한 것으로 보인다. 최근들어 해양플랜트 기자재 국산화에 대한 수요가 급증하면서 탑사이드(Topside)용 볼밸브에 대한 연구가 국내 조선소를 기반으로 활발히 이루어지고 있기도 하다(Park et al., 2015)

고압용 볼밸브의 설계는 볼밸브를 구성하는 구조체들의 구조적 안전성과 더불어 볼과 시트 간의 접촉으로 구현되는 수밀의 구현이 매우 중요한 설계 인자 중의 하나이다. 특히 볼과 시트 간의 접촉에 의해 구현되는 수밀에 대한 검토는 금속 간의

Received 10 March 2016, revised 1 April 2016, accepted 22 April 2016

Corresponding author Yooil Kim: +82-32-860-7347, yooilkim@inha.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

마찰 및 접촉에 대한 정교한 구조해석을 요구하며 접촉면에 발생하는 접촉 압력 및 구와 시트의 제작 공차 등에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 또한 밸브가 열린 상태에서는 고압의 유체가 상부의 스템(Stem)을 밀어 올려 분출(Blow out)이 발생할 소지가 있으므로 스템을 지지하는 연결부의 구조 안전성에 대한 검토가 필수적으로 이루어질 필요가 있다. 접촉 및 마찰 현상은 물체의 경계조건이 변형에 따라 변화하는 전형적인 비선형 문제로서 여타의 비선형성에 비해 해의 수렴성이 떨어짐으로 인해 해석에 사용되는 요소의 수에 따라 방대한 계산량을 요구하게 된다. 볼밸브를 구성하는 다양한 부품들에 대한 구조적 안전성을 검토하기 위해서는 부품의 강도를 평가할 수 있을 만큼의 조밀한 요소분할과 접촉/마찰에 대한 고려를 동시에 하여야 함으로 인해 매우 난해한 작업이 아닐 수 없다. 본 연구에서는 시트와 볼 간에 발생하는 접촉 및 마찰의 효과를 고려한 비선형 구조해석을 통해 운영조건에서의 볼밸브의 수밀 성능에 대한 평가를 수행하고, 동시에 분출과 연관된 스템의 연결구조 및 기타 부품의 구조강도를 평가하여 볼밸브의 수밀성능 및 구조적 안전성에 대한 검토를 수행하고자 한다.

2. 볼밸브의 구조

Fig. 1에 도시된 볼 밸브는 원통형의 유로를 가지는 볼을 90° 회전시켜 유동의 흐름을 개폐한다. 스템은 볼을 회전시키는 막대기로 볼 상단에 연결되어 볼에 토크를 전달한다. 시트 리테이너는 볼과 접촉하여 유동이 유로 밖으로 누수되지 않도록 1차

적인 실링을 형성한다. 볼과 시트 리테이너 사이의 접촉은 주로 고무, 플라스틱 재질의 인서트를 통해 이루어지나 유체에 모래와 같은 고체 입자가 포함되어 있는 경우 고체 입자가 연한 재질의 인서트에 손상을 가할 수 있기 때문에 실링성능을 보호하기 위해 금속 간 접촉을 이용한다. 볼 서포트는 볼의 상하방면에 두 개 설치되며 고압 환경 속에서도 볼이 밀리지 않고 위치를 유지하도록 돕는다. 바디와 플랜지는 볼, 시트 리테이너, 볼 서포트를 감싸는 껍질로 파이프 내압을 지탱한다. 이 외에도 내압에 의한 스템의 분출을 막는 스템커버와 기어박스의 설치를 위한 오퍼레이터 플랜지가 주요 구성부품을 이루고 있다.

본 연구에서는 개발된 볼 밸브의 안전성 및 성능을 검증하기 위해 밸브의 작동상태를 모사한 고압 폐쇄 조건, 화재 조건, 셀 시험 조건 등의 3가지 하중 시나리오에 대한 해석을 수행하였다.

3. 유한요소 모델

3.1 볼밸브의 재료

볼밸브를 구성하는 다양한 부품들은 각자의 역할에 따라 서로 다른 재료로 구성되어 있다. 금속 간의 접촉을 통해 실링을 구현하는 볼 및 시트는 비교적 강도가 낮은 A105N으로 제작되는 반면, 밸브가 닫힌 상태에서 볼에 작용하는 고압에 의해 발생하는 볼의 밀림을 막아주는 역할을 수행하는 서포트의 경우 비교적 높은 강도의 재료로 제작된다. Table 1은 볼밸브의 구성요소와 해당재료의, 항복응력, 인장강도, 탄성계수 및 포아송 비를 나타낸다.

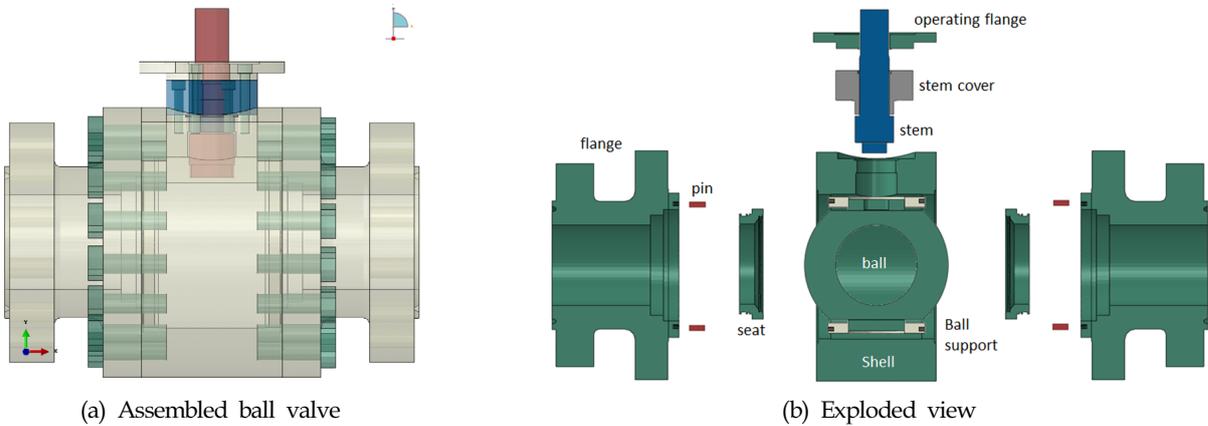


Fig. 1 Configuration of a ball valve

Table 1 Material properties of ball valve components

Item	Material	Yield strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio
Ball, Seat retainer, Body, Closure	A105N	250	485	207	0.3
Stem	A564 630 H150D	517	793	197	0.272
Ball support	A564 630 H150D	517	793	197	0.272
Ball support pin	AISI 4140	415	655	200	0.29
Stem cover	B446 NO6625	690	827	208	0.3

밸브에 작용하는 과도한 압력으로 인해 구조적 불연속부 및 하중이 집중적으로 작용하는 부분에 대한 강도를 평가하기 위해 비선형 탄소성 해석을 수행할 필요가 있다. 재료의 항복 후 거동에 대한 정확한 정보의 부재로 인해 모든 재료는 탄성-완전소성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 탄성-완전소성체의 가정은 국부적으로 소성 변형이 발생하는 경우 더 이상 하중에서 저항하지 못하고 지속적인 변형이 발생함을 의미하며 이는 소성 변형의 입장에서 상대적으로 보수적인 관점이 결과로 이어질 것이다. A105N의 경우 정적 인장 재료시험이 수행되었으며, 탄성-완전소성 모델과 더불어 항복 후 경화가 발생하는 탄성-등방경화 모델에 대한 해석을 별도로 수행하였다.

3.2 유한요소 모델링

볼밸브 구성요소는 대부분 15×15(mm) 및 8×8(mm)의 크기를 가지는 육면체 요소로(C3D8R) 분할하였다.

또한 응력집중 및 접촉압력이 발생하는 구성요소의 경우에는 응력집중에 크게 나타나지 않는 구성요소보다 약 1/3정도 작은 4×4(mm) 격자의 크기로 요소분할을 하여 국부적인 응력 집중을 보다 정확하게 구현할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 고압 폐쇄 조건에서의 볼밸브의 각 구성요소에 대한 격자의 형상을 나타낸다. 이 경우 시트와 볼의 접촉, 볼과 서포트의 접촉부가 관심 대상이므로 조밀한 격자 분할을 해당 부분에 적용하였다. Fig. 3은 볼밸브의 대칭 모델로써 Fig. 2에 보인 부품을 결합한 전체 모델을 나타낸다.

Fig. 4는 스티드 및 스크류가 고려된 볼밸브 모델의 격자형상으로 쉘 테스트 조건의 해석을 위한 모델을 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4에 보이는 것처럼 응력집중 및 접촉압력이 발생하는 구성요소의 경우에는 격자의 크기를 작게 요소분할 하였음을 확인할 수 있다.

시트와 볼과 같이 구성요소 간의 접촉으로 인해 접촉압력 및 응력집중이 발생하는 구성요소의 경우에는 면기반의 강-접촉조건(Surface based hard contact)을 적용하였다. 면기반의 접촉 모델은 점점-면 기반의 접촉 모델에서 발생 가능한 접촉압력의 불균일함을 제거해 줌으로 시트와 볼 간에 발생하는 접촉압력

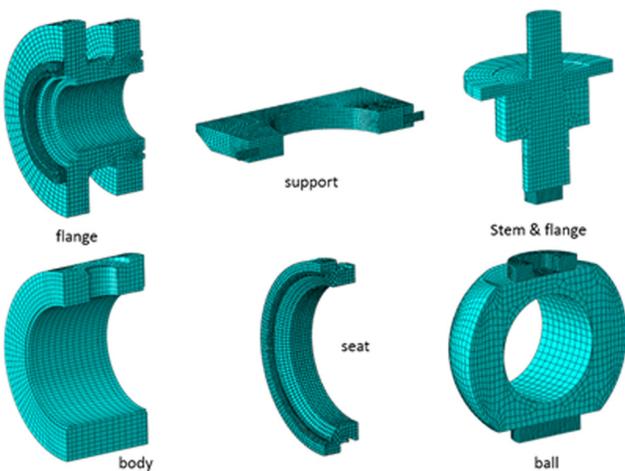


Fig. 2 Finite element mesh of components

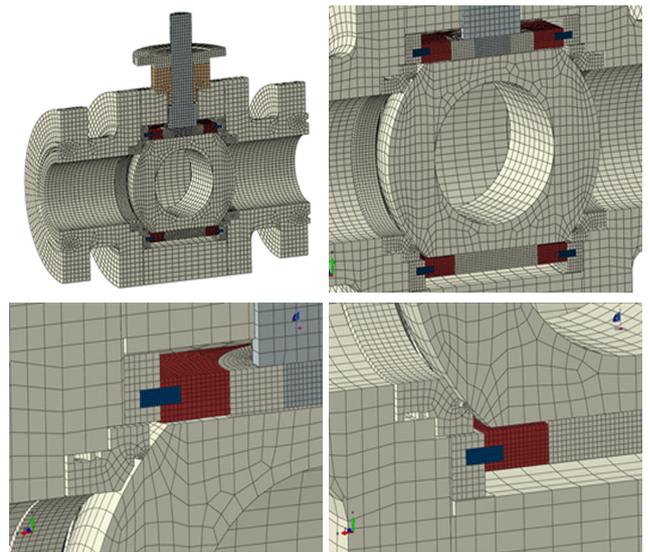


Fig. 3 FE model for high pressure closure condition

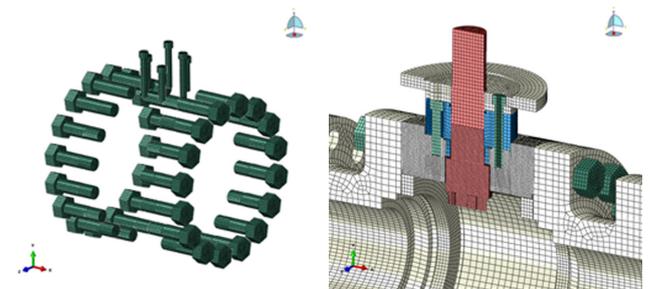


Fig. 4 FE model for shell test condition

의 검토에 매우 유용한 기법으로 알려져 있다(ABAQUS, 2011). 해석에 적용된 프로그램은 ABAQUS Ver.6.11이다.

4. 유한요소 해석 결과

4.1 고압 폐쇄 조건

볼밸브의 볼이 밸브의 내부를 막고 있는 상태에서 플랜지의 내부와 볼 및 그 밖의 구성요소의 일부에서 유체로 인한 내압을 받는 경우이다. 밸브 내부에 28.5MPa의 내압이 작용하고 있으며, 플랜지의 양쪽 끝에 완전 구속 조건을 부여하였다. 고압 폐쇄 조건의 경우 볼밸브의 모델이 서로 대칭을 이루고 있기 때문에 절반의 볼밸브를 모델링한 후 대칭조건을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 5는 유한요소 모델에 적용된 내압 및 경계조건을 보여주고 있다. 여기서 초록색으로 표시된 부분은 볼밸브에 적용된 내압 및 경계 조건을 의미하며, 진한 회색으로 표시된 부분은 대칭조건을 의미한다.

밸브 내부에서 한 쪽에서 28.5MPa의 내압을 받을 경우, 볼밸브는 평균적인 응력분포는 43.1MPa이다. 또한 시트와 볼이 접촉되면서 Seat에서는 밸브에서 나타나는 응력분포 보다 더 큰 86.2MPa의 응력이 발생하며 Seat와 볼의 접촉으로 인하여 볼과 볼 서포트에 접촉하는 부근에서 응력집중이 나타난다. 응력집

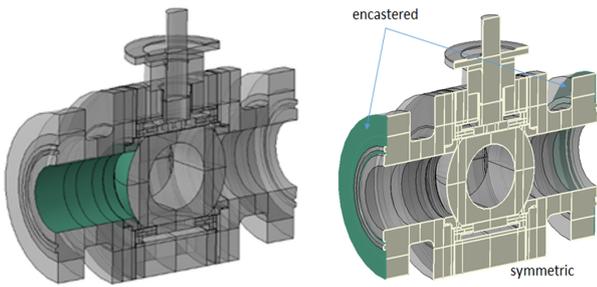


Fig. 5 Load and BC for high pressure closure condition

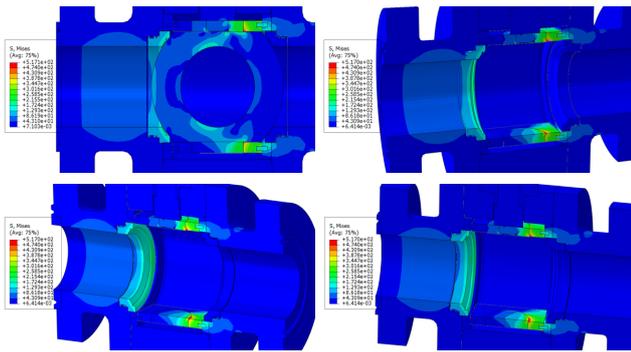


Fig. 6 Mises Stress for high pressure closure test (Elastic-perfectly plastic model)

중은 볼의 상/하단을 지지하고 있는 볼 서포트에서 나타나며 볼 서포트에서 발생하는 최대 응력은 517.2MPa이다. Fig. 6은 볼밸브에서 내부에서 발생하는 응력의 분포를 나타낸다.

응력집중이 발생하는 볼과 볼 서포트의 항복을 확인해본 결과, 볼 서포트에서는 항복이 발생하지 않았으나 볼의 상/하단 일부분에서는 항복이 나타남을 확인하였다. 볼에서 나타난 항복은 밸브의 운영에는 영향을 주지 않으나, 볼의 국부적인 변형에 기인할 것이다. Fig. 7은 밸브의 항복응력 분포를 나타낸다.

볼에 발생하는 항복의 양을 보다 정밀하게 검토하기 위해 A105재료에 대한 실험을 통해 얻어진 응력-변형률 선도를 직접 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8(a)에 보인 파란색 곡선은 정적 인장 실험을 통해 얻어진 응력-변형률 선도를 나타내며, 빨간색 곡선은 얻어진 탄성계수를 통해 수정한 응력-변형률 선도를 나타낸다. 해석에 직접 입력된 데이터는 Fig. 8(b)에 보인 응력-소성변형률 선도이다. 인장시험은 ASTM A370에 명기된 절차에 따라 환봉형 시험편을 이용하여 수행되었다.

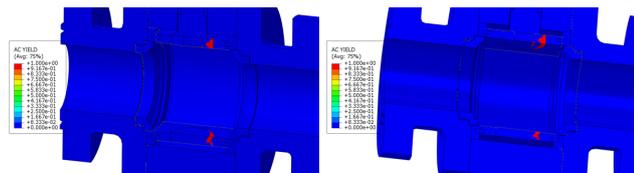


Fig. 7 Yield zone for high pressure closure test (Elastic-perfectly plastic model)

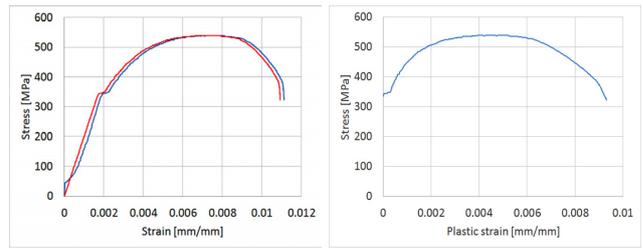
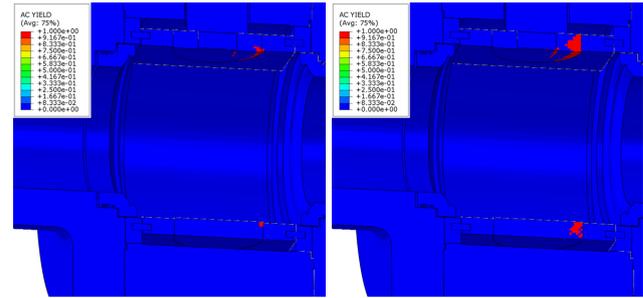


Fig. 8 Stress-strain curve of A105



(a) with hardening (b) without hardening

Fig. 9 Hardening effect on yield zone

Fig. 9는 실험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터에 기반을 둔 경화모델을 적용한 경우와 탄성-완전소성 모델을 적용한 경우에 있어 28.5MPa의 압력 하에서 발생한 소성영역의 분포를 나타낸다. 예상되었던 바와 같이 경화모델을 적용한 경우에 상대적으로 소성이 발생한 영역이 좁게 분포해 있음을 확인할 수 있으며, 이는 항복 후에 강성을 잃어버리는 탄성-완전소성 모델에 비해 항복 후에도 하중에 저항하는 경화모델의 특성에 의한 결과로 이해할 수 있다.

4.2 반복하중 조건

고압 폐쇄조건 중에 볼밸브에 발생하는 국부적인 소성변형이 이후 밸브의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 반복하중 조건에서의 해석을 수행하였다. 볼밸브의 모델 및 모델에 적용된 경계조건은 이전의 방법과 동일하며 하중조건은 28.5MPa, 0MPa, 3MPa 순으로 반복적으로 밸브 내부의 한 쪽에 내압을 가하였다. Fig. 10은 밸브의 내압이 28.5MPa에서 0MPa가 되었을 때, 밸브의 응력 분포를 나타낸다. 여기서 나타나는 응력은 가압 시 볼-서포트간의 접촉으로 인해 유발된 소성변형에 의해 유발된 밸브 내부에 존재하는 잔류응력을 의미한다. 밸브 내압이 0MPa일 때, 볼 및 Seat는 접촉하지 않아 밸브 내부에서의

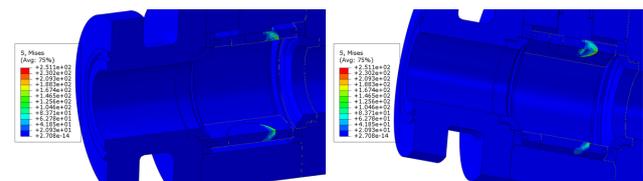


Fig. 10 Stress distribution after pressure release

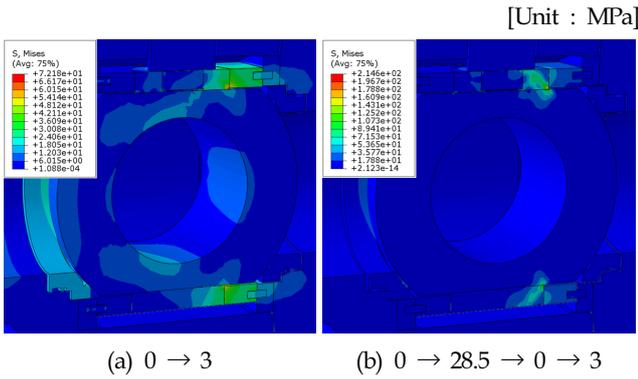


Fig. 11 Stress distribution over cyclic pressurization

응력은 거의 존재하지 않는다. 하지만 이전에 가해진 28.5MPa의 내압의 영향으로 볼에 주변에 소성변형이 발생한다. 볼의 소성변형으로 인해 볼의 상/하단 끝에서 잔류응력이 존재하며, 최대 잔류응력은 251.1MPa이다. 잔류응력은 또한 볼에 영구 변형에도 영향을 준다.

Fig. 11(a)는 0MPa → 3MPa로 가압한 경우의 응력분포를, Fig. 11(b)는 0MPa → 28.5MPa → 0MPa → 3MPa로 가압한 경우의 응력분포를 나타낸다. 두 경우 모두 볼의 상/하단 끝 지점과 볼 Support가 접촉하는 지점에서 응력집중이 나타난다. 잔류응력이 고려되지 않은 밸브의 경우에는 최대응력은 약 60MPa이며, 잔류응력이 고려된 밸브의 경우에는 최대응력은 214.6MPa이다. 최대응력 값의 차이가 약 3.6배 정도 차이가 나타남을 알 수 있으나, 구조물의 파단과 같은 현상을 발생하지 않는다.

Fig. 12는 잔류응력의 유무에 따른 시트-볼간의 접촉압력의 분포를 나타낸다. Fig. 12(a)는 초기 상태에서 3MPa로 가압한 경우이며, Fig. 12(b)는 28.5MPa가 가압 후 3MPa로 재 가압한 경우를 나타낸다. 두 경우에 시트-볼간의 접촉압력의 분포는 거의 차이가 나지 않음을 확인할 수 있으며, 초기 가압에 의해 발생한 국부적인 소성변형은 추후 밸브 동작 시의 시트-볼간의 기밀에 거의 영향을 주지 않을 것임을 기대할 수 있다.

Fig. 13은 볼과 시트의 접촉으로 인해 시트에서 나타나는 접촉압력의 분포를 접촉선을 따라 도시한 그림이다. 빨간선은 잔

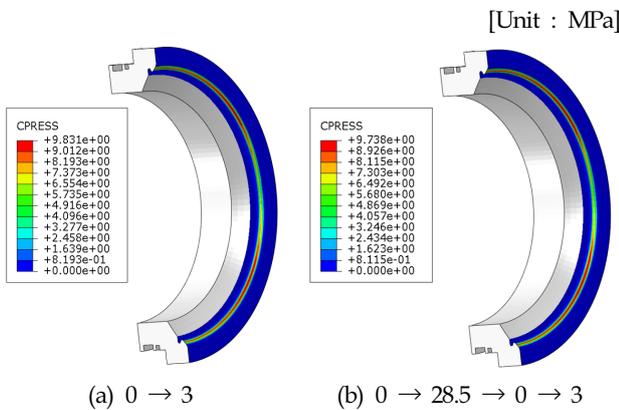


Fig. 12 Contact pressure distribution over cyclic pressurization

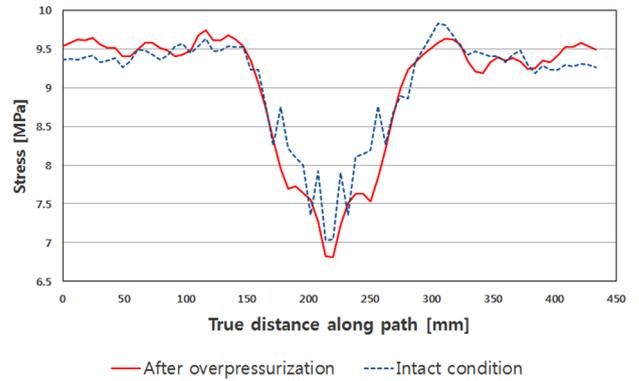


Fig. 13 Contact pressure variation along contact line

류응력이 고려된 경우의 접촉압력이며, 파란선은 잔류응력이 고려되지 않은 접촉압력이다. 잔류응력이 고려되지 않은 부분에서 좀 더 크게 접촉압력을 받지만, 전반적으로 접촉압력의 분포가 비슷하게 나타났다.

4.3 Fire 조건

화재 발생시, 온도의 상승으로 밸브 내부에서 나타나는 열응력이 발생하므로 이에 대한 상세한 검토를 위해 유한요소해석을 수행하였다. 외부에 발생한 화재에 의해 볼밸브에 열에너지가 지속적으로 유입이 되고 어떠한 경로로도 열손실이 발생하지 않는다는 가정 하에 밸브 전체가 균일한 온도로 상승함을 전제로 해석을 수행하였다. 밸브의 온도가 160℃까지 상승하게 되면 O-ring(오링)을 대신하여 그래파이트가 기밀의 역할을 하기 때문에, 볼 밸브 모델에서 그래파이트를 고려하여 모델링을 하였다. 플랜지와 접촉하여 접촉압력을 받는 그래파이트와 시트의 일부분은 격자의 크기를 작게 하였고 나머지 구성요소의 격자크기는 좀 더 크게 요소 분할을 하였다. Fig. 14는 그래파이트가 고려된 모델의 격자의 형상의 나타낸다. 여기서 짙은색으로 나타난 부분이 그래파이트를 의미한다.

기존의 볼밸브 모델과 동일하게 모델의 절반을 모델링 한 후, 절단면에 대칭 경계조건을 적용하였다. 플랜지 양 끝을 고정할 경우, 160℃인 고온에서 볼밸브의 변형을 정확히 구현 할 수 없기 때문에, 플랜지 한 쪽 끝만 구속조건을 부가하여 유로방향으로의 열팽창이 자유롭게 발생하도록 모델의 경계조건을 설정하

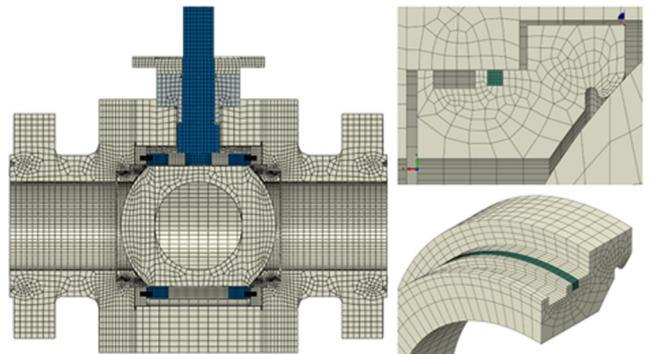


Fig. 14 FE model with graphite for fire condition

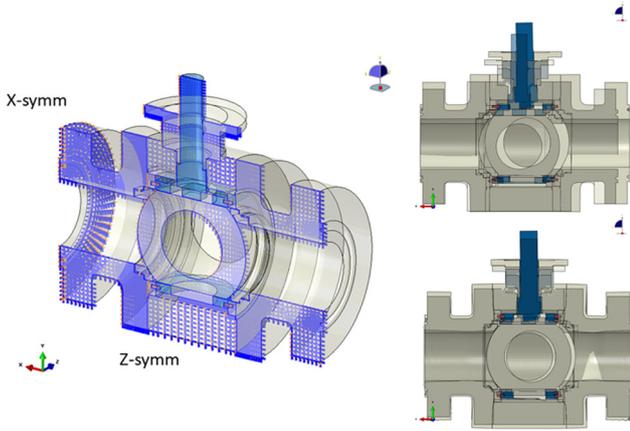


Fig. 15 Boundary conditions for fire condition

였다. Fig. 15는 볼밸브에 적용된 경계조건을 나타낸다. 여기서, Fig. 15의 왼쪽 그림은 밸브에 적용된 경계조건을 나타내며, 오른쪽 그림은 플랜지의 경계조건에 따른 밸브의 변형을 나타낸다. Fig. 15에서 확인할 수 있는 바와 같이 플랜지의 한쪽에 대칭조건을 적용한 경우 고온에서의 밸브 전체가 자유롭게 팽창함을 확인할 수 있다.

그래파이트는 이방성 재료로서 열팽창계수가 그래파이트의 두께방향 및 2개의 면내방향에 따라 달라 각 방향에 따라 그래파이트의 열팽창계수를 다르게 적용하였다. Fig. 16은 그래파이트의 이방성 재료 물성치를 위해 정의된 재료의 방향을 나타내며 Table 2는 해당 방향별 열팽창 계수를 나타낸다. 여기서, 1은 그래파이트의 두께방향을 의미하며, 2, 3은 2개의 면내방향을 의미한다.

온도가 160°C로 상승하는 경우 오링이 손실됨으로 인해 내압이 작용하는 범위는 상온의 경우와 달라진다. Fig. 17(a)는 상온에서 내압을 받는 영역을 표시한 것이며, Fig. 17(b)는 볼밸브전체가 160°C에 이르러 오링이 소실된 이후에 내압을 받는 영

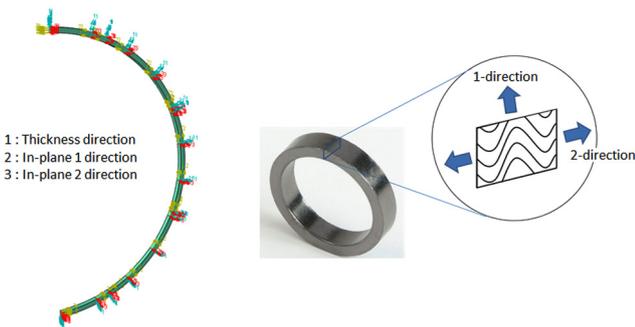


Fig. 16 Orthotropy of graphite

Table 2 Material properties of ball valve components

Direction	Coefficients [mm/°C]
1	2.7e-5
2	3.6e-7
3	3.6e-7

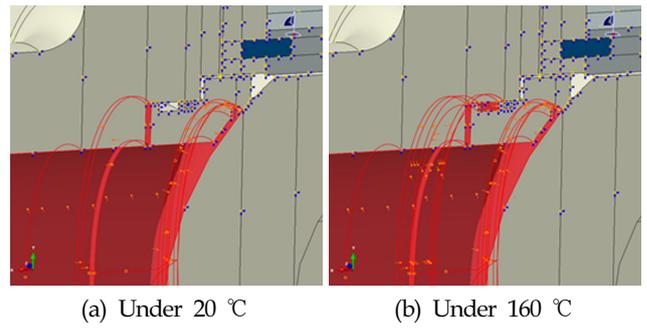


Fig. 17 Change of pressurized area

역을 표시한 그림이다. 온도가 상승하여 오링이 소실된 경우 오링이 위치한 홈 및 그래파이트의 홈일부와 그래파이트와 유체가 닿는 면까지 내압을 받는 영역이 확장되었음을 확인할 수 있다.

그래파이트의 두께는 5.00mm와 5.03mm인 두 경우에 대해서 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 18은 그래파이트의 두께가 5.03mm인 경우 20°C/28.5MPa상태에서의 시트와 그래파이트가 플랜지에 접촉하는 모습을 나타낸다. 밸브에 내압을 가하기 전인 초기 상태에서는 시트와 그래파이트는 플랜지 사이에 약간의 간격이 존재하지만, 밸브에 내압을 가한 후에는 시트의 변형으로 인해 플랜지와의 접촉이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 20°C/28.5MPa조건에서는 불과 시트에서 발생하는 접촉뿐만 아니라 시트/그래파이트와 플랜지간의 접촉도 동시에 발생함을 의미한다.



Fig. 18 Deformation with graphite

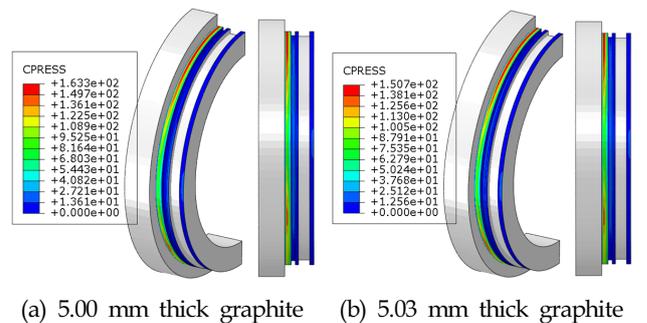


Fig. 19 Contact pressure on seat (20 °C / 28.5 MPa)

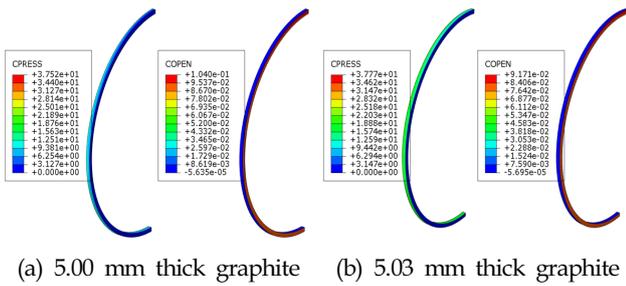


Fig. 25 Graphite contact pressure under fire condition

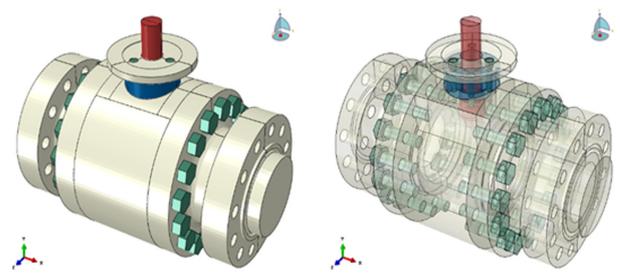


Fig. 27 Ball valve model with cap screw and stud bolt

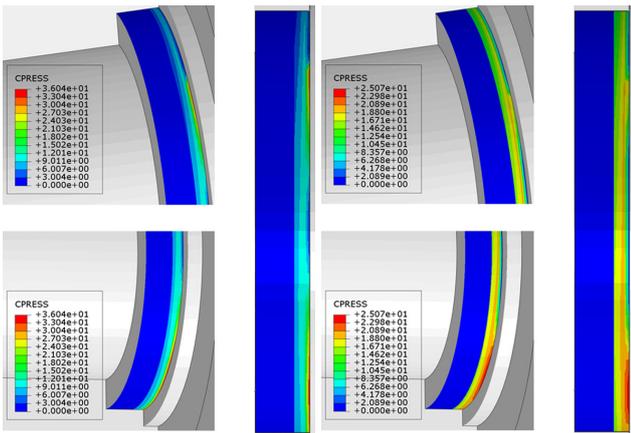


Fig. 26 Flange contact pressure under fire condition

45. 회전한 상태이므로 Fig. 27에 보인 볼밸브의 전체형상을 고려하여 모델링을 수행하였으며, 초기 인장응력을 고려한 스티드 볼트 및 캡스크류 또한 모델링에 포함하였다. 스크류/볼트 및 밸브의 격자형상은 Fig. 4에 도시된 바와 같다. 볼밸브의 셸, 스템커버 및 상부 플랜지는 볼트와 스크류에 의해 체결되므로 각각의 구성부품은 서로 간의 접촉 및 스크류/볼트와의 접촉으로 모델링 하였다. 밀폐된 공간 내부의 유체에 의한 압력이 가해지는 경우이므로 모델의 강체 운동을 막기 위해 강성이 낮은 스프링을 모델에 적용하였다. 셸 시험 조건에서의 해석은 볼트 및 스크류의 초기 인장력에 의해 주변 구조물에 발생하는 응력분포 해석 단계와 내압이 추가적으로 작용하는 단계로 나누어진다. 볼트 및 스크류에 작용하는 초기 인장력에 의한 단면의 인장응력은 137MPa로 주어졌으며 추가적으로 가해지는 내압은 38.5MPa이다. Fig. 28은 볼트 및 스크류에 가해진 초기 인장력에 의해 발생하는 응력분포를 도시한 그림이다. 볼트 및 스크류의 초기 인장력은 시공 시에 적용되는 일반적인 범위의 값이다.

Fig. 29는 스크류와 볼트에 추가적인 내압 38.5MPa가 작용하였을 때의 볼밸브에 발생하는 응력 분포를 나타낸다. 스템과 스템커버가 접촉하는 부분에서 응력이 집중됨을 확인할 수 있으며 최대 응력은 약 259MPa로 재료의 항복응력 대비 상대적으로 낮은 값을 보임을 확인할 수 있다.

그래파이트에 작용하는 압력으로 인해 홈과 접촉이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 26은 플랜지에서의 접촉압력 분포를 나타낸다. 그래파이트의 두께가 5.03mm인 경우 접촉압력의 분포가 보다 넓은 영역에 걸쳐 높은 값을 보임을 확인할 수 있으며 이는 기밀의 측면에 5.03mm의 두께를 가지는 그래파이트가 상대적으로 유리함을 입증하고 있음을 알 수 있다.

4.4 셸 시험(Shell test) 조건

볼 밸브내부의 볼이 45° 회전하는 경우 고압의 내부 유체가 셸에 직접 닿는 셸 시험 조건을 이룬다. 이 경우 볼, 볼 서포트, 핀, 시트 등과 같은 구성 요소들은 고압의 유체에 잠기게 되고 셸, 플랜지, 스템 및 스템커버 등에 압력이 작용하게 된다. 이때 고압을 받는 스템이 상방향으로 밀려 올라가게 되고, 이를 셸에 연결되어 있는 상부의 스템커버가 지지하는 상황이 발생한다. 셸 시험 조건에서의 스템커버의 구조적 안전성은 분출 등과 같은 치명적인 사고와 연관되어 있으므로 주의를 기울여 검토할 필요가 있다. 또한, 플랜지와 셸의 연결 및 셸과 스템커버의 연결 등은 초기 인장응력을 갖는 스티드 볼트 및 캡스크류로 연결되어 있으므로 이에 대한 안전성 평가도 필수적이다. Fig. 27은 스크류와 볼트가 고려된 밸브의 형상을 나타낸다.

Fig. 27에 보인 형상을 기반으로 셸 시험 조건에서의 볼밸브 안정성을 평가하기 위한 유한요소 해석을 수행하였다. 스템이

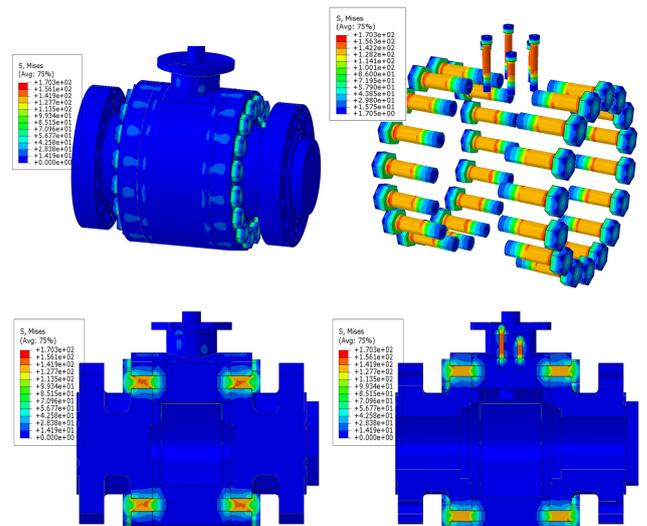


Fig. 28 Stresses induced by initial tension in bolts and screws

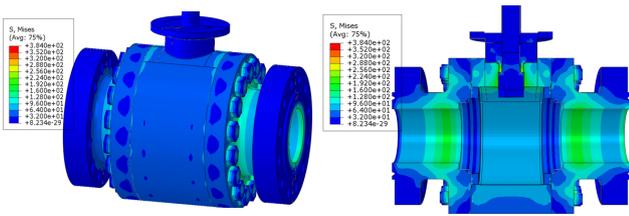
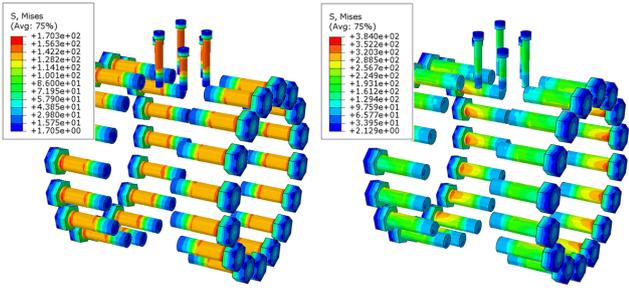


Fig. 29 Stress distribution under combined initial tension and internal pressure



(a) Initial tension (b) Init. tension+pressure

Fig. 30 Stresses on bolt and screw under different loading condition

Fig. 30은 하중조건에 따른 스크류 및 볼트에서의 응력분포를 나타낸다. Fig. 31(a)는 초기 인장력만 작용한 경우의 응력분포를 Fig. 31(b)는 초기 인장응력과 내압이 모두 작용한 경우의 응력분포를 나타낸 그림이다. 내압이 작용함으로 인해 볼트 및 스크류에 작용하는 응력이 증가함을 확인할 수 있으나, 볼트 및 스크류의 최대 인장응력에 비해 상대적으로 낮은 값을 가짐을 알 수 있다.

5. 결 론

고압용 볼밸브에 대한 비선형 구조해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 28.5MPa의 내압이 작용하는 고압 폐쇄 조건에서 밸브 서포트 일부가 소성영역에 도달함이 확인되었다. 재료 시험을 통해 얻어진 응력-변형률 선도를 적용한 경우 탄성-완전소성체가 정을 통해 얻어진 결과에 비해 소성영역의 크기가 상대적으로 작음을 확인하였으며, 국부적인 소성변형이 서포트의 구조적 붕괴로 이어지는 않음을 확인하였다.
- (2) 국부적인 소성변형의 영향을 파악하기 위해 반복하중 조건에서의 해석을 수행하여 시트와 볼 간의 접촉압력 변화를 살펴본 결과, 소성변형의 효과는 고압 폐쇄 이후 밸브의 수밀 성능에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다. 이는 과압 이후 작동압력 하에서의 볼-시트 간 접촉압력의 분포가 비손상 조건에서의 접촉압력의 분포와 큰 차이를 보이지 않았기 때문이다.

(3) 볼밸브 구조 전체가 균일하게 가열되는 Fire 조건에서의 응력분포는 상온의 경우와 큰 차이를 보이지 않았으며, 다만 오링의 소실로 인한 내압 영역의 변화 및 그래파이트의 열팽창으로 인해 국부적인 접촉압력의 변화를 야기하였다. 오링의 소실로 인한 내압 영역의 변화 및 그래파이트의 열팽창은 공히 그래파이트의 기밀 성능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그래파이트의 두께는 두꺼울수록 수밀 측면에 유리할 것으로 판단된다.

(4) 셸 시험 조건에서의 해석은 초기 인장력에 의한 응력분포 해석 단계와 추가적인 내압에 의한 응력분포 해석의 두 단계로 나누어 수행되었다. 초기 인장력에 의해 볼트 및 스크류 주변에 응력이 발생함을 확인하였으며 이때 볼트 및 스크류에는 초기 인장력에 상응하는 응력이 발생함을 확인하였다.

(5) 추가적인 내압 38.5MPa가 작용하는 경우 스템과 스템커버 간의 접촉이 발생하였으며 이때 스템커버에 발생하는 최대 응력은 약 259MPa로 나타났으며 볼트 및 스크류에 작용하는 응력도 최대 384MPa 정도로 증가하는 것으로 확인되었다. 셸 시험에서의 해석 결과를 통해 볼트 및 스크류의 과단에 의한 분출 현상을 발생하지 않을 것으로 판단된다.

후 기

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

References

ABAQUS, 2011. ABAQUS User's Manual. Dassault Systems.

Kim, C.G., 2013. Finite Element Analysis on the Sealing Behavior and Endurance Safety of O-rings with a V-groove, Journal of the Korean Institute of Gas, 17(1), 73-80.

Kim, D.S., Kim, M.S., 2013. Analysis and Design of Cryogenic Ball Valve. 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, September, Toyama, Japan.

Kim, J.K., Hahm, S.D., Ryu C.U., 2007. A Study on Structural Analysis of Ball Valve for LNG Carrier. Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, 9(4), 21-27.

Ha, S.H., Kim, S.J., Song, J.I., 2014. Structure Analysis and Torque Reduction Design of Industrial Ball Valve. Journal of the Kiorean Society of Manufacturing Process Engineers, 13(6), 37-45.

Park, M.S., Jeong, N, Kim, Y., Kim, Y.T., Hwang, I.S., Jo. S.W., Kim, S., Woo, I, 2015. A Study on Design of Seat Retainer for Improving Offshore Ball Valve Performance. Annual Spring Conference of SNAK, Jeju, Korea.

Damage Evaluation of Flexible Concrete Mattress Considering Steel Reinforcement Modeling and Collision Angle of Anchor

Yeon-Sun Ryu*, Hyun-Man Cho* and Seo-Hyun Kim*

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

철근의 영향과 앵커 충돌각도를 고려한 유연콘크리트 매트리스의 손상평가

류연선* · 조현만* · 김서현*

*부경대학교 해양공학과

KEY WORDS: Damage evaluation 손상평가, Collision analysis 충돌 해석, Flexible concrete mattress 유연 콘크리트 매트리스, Steel reinforcement 철근, Collision angle 충돌각도, Submarine cable protector 해저케이블 보호공

ABSTRACT: A flexible concrete mattress (FCM) is a structural system for protecting submarine power or communication cables under various load types. To evaluate its of protection performance, a numerical analysis of an FCM under an anchor collision was performed. The explicit dynamics of the finite element analysis program ANSYS were used for the collision analysis. The influences of the steel reinforcement modeling and collision angle of the anchor on the collision behavior of the FCM were estimated. The FCM damage was evaluated based on the results of the numerical analysis considering the numerical modeling and collision environment.

1. 서 론

해저케이블은 전기공급과 통신망 구축을 위해 사용되며, 최근에는 해양풍력발전과 같은 녹색에너지 개발에서 송전설비로도 활용된다. 남해와 같이 양식이나 조업으로 선박 왕래가 잦은 해역에서는 해저케이블은 손상위험에 노출되어있다. 실제로 2006년 해남과 제주도간의 해저 케이블의 파손으로 인해 제주지역에 광역 정전 사태가 발생한 경우도 있었다. 해저케이블의 손상 원인은 해양생물과 지형변화 등에 의한 해양환경적 요인과 조업도구나 선박 앵커에 의한 인위적 요인으로 구분되고, 이를 방지하기 위해 케이블 보호공법이 적용되고 있다(Woo, 2014). 이중 선박의 앵커 충돌이 가장 직접적이고 치명적인 원인으로 고려되고 있다. 케이블 보호공에는 케이블을 해저에 직접 매설하는 기본적인 방법과 구조물을 이용하는 방법이 있는데, 철근콘크리트 구조, 관형 구조, 망태형, 콘크리트 매트리스 등이 사용된다. 보호공의 형태로는 A-duct, U-duct, Rock-berm, Stone bag, 주철관, W-매트리스와 유연 매트리스 등이 있다(Ryu et al., 2015). Fig. 1은 케이블의 보호성능과 시공성 및 경제성이

우수한 공법으로 평가되고 있는 유연매트리스 공법의 예를 나타낸 것이다.

해저케이블 보호구조물에 대한 성능평가를 위해서는 모형 및 실증시험과 수치해석적 방법이 가능하다. 케이블 보호공법에 대한 실증시험이 실행되어 성능평가가 수행되고 있으나(Yoon and Na, 2013), 이는 시간과 경제적 요인으로 다양한 손상조건에 대한 평가에 제약이 있다. 수치해석적 방법에 의한 케이블보호구조물의 손상평가는 일부 연구자들에 의해 수행되었다(Cho et al., 2012). Woo and Na(2010)는 원통연결 보호구조물에 대해 앵커충돌 및 끌림 해석을 수행하였고, Ahn et al.(2012)은 해양생물환경을 고려한 다양한 덕트형 구조물에 대해 안정성을 평가하였으며, Woo(2014)는 낙하하는 앵커의 항력계수 및 중단 속도 평가와 A-duct의 앵커 충돌해석에 대해 연구하였고, Ryu et al.(2015)은 유연매트리스 구조물에 대해 콘크리트 재료모델에 따른 거동 특성을 평가 하였다. Woo et al.(2015b)와 Woo et al.(2015c)는 Rock-berm 형태의 보호구조물에 대해 앵커충돌에 대한 동적특성을 파악하고 안정성해석을 수행하였다. 또한 Woo et al.(2015a)은 터널형태의 A-duct형 보호구조물의 앵커충

Received 27 January 2016, revised 19 February 2016, accepted 23 February 2016

Corresponding author Hyun-Man Cho: +82-51-629-7382, oldsea@nate.com

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers



(a) FCM



(b) AS-FCM (Anchor resistant steel forced-FCM)

Fig. 1 Flexible concrete mattress

돌 해석을 통해 손상을 평가하였다. 이와 같이 다양한 형상과 재료를 가지는 보호공이 시공되고 있지만, 보호공의 구조거동 해석에 대한 기초자료가 부족하여 보호성능에 대한 평가가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 보호성능이 우수한 유연 콘크리트 매트리스(Flexible concrete mattress, FCM) 보호공의 앵커 충돌해석에 대한 수치모델링과 충돌환경에 대한 손상거동 평가의 기초자료를 제시하고자 한다. 이를 위해 FCM 보호공의 손상분포에 철근의 모델링이 미치는 영향을 분석하고, 수중 낙하환경에 따라 변화할 수 있는 앵커의 충돌각도에 따른 보호공의 손상영향을 산정하고자 한다. 충돌해석에 사용된 프로그램은 ANSYS explicit dynamics이고 비선형 동적해석을 수행한다.

2. 수치해석 모델

2.1 FCM 모델링

본 연구에서 대상으로 한 유연 매트리스 공법은 AS-FCM (Anchor resistant steel forced-FCM)으로 케이블 보호부분을 블록으로 보강한 형상이다(Fig. 1). AS-FCM은 케이블을 직접 보호하는 역할을 하는 중앙블록과 좌우의 날개 매트리스로 이루어져 있으며 중앙블록의 하부 홈에 케이블이 위치하고, 날개 매트리스 부분은 앵커 등의 끌림에 저항을 갖기 위해 배치된 것이다(New Technology of Electric Power, 2007). FCM 중앙블록 전체의 폭, 길이, 높이는 1,000mm, 1,005mm, 700mm이다.

앵커충돌의 손상을 방지하는 직접적인 역할을 하는 부분은 중앙블록이므로 본 연구에서는 이 부분만을 대상으로 Fig. 2와 같이 모델링을 하였다. 중앙블록의 유한요소모델은 절점 당 3개의 자유도를 가진 8절점 육면체 요소와 4절점 사면체 요소를 사용하여 구성하였다. 유한요소모델의 경계조건은 블록 하단면과 해저지반의 경계에 해당하는 절점의 자유도를 구속하여 설정하였다. 본 연구에서는 블록의 안정성만을 고려하므로 케이블은 모델링에서 제외하였다.

콘크리트 구조물의 충돌해석에 대한 대부분의 연구는 고속 접근하는 충돌체에 대한 것이고, 이와 관련하여 다양한 콘크리트 재료모델이 개발되었으나, 본 연구의 대상은 저속 충돌체에 대해 피충돌체의 안정성을 평가하는 것이다. Ryu et al.(2015)은

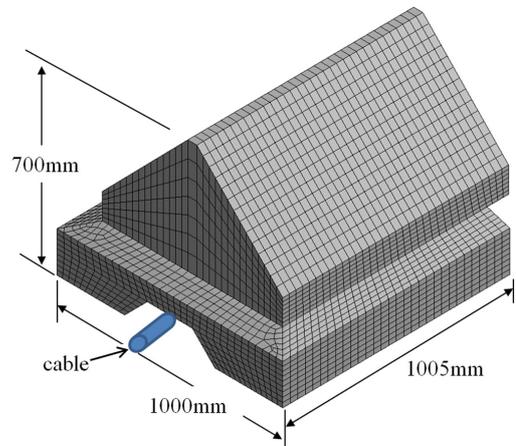


Fig. 2 Finite element model of the FCM

Table 1 Material properties and parameters of the RHT concrete model

Parameter	Value
Compressive strength	56 MPa
Tensile / compressive strength	0.1
Shear / compressive strength	0.18
Intact failure surface constant	1.6
Intact failure surface exponent	0.61
Tension /compression meridian ratio	0.6805
Brittle to ductile transition	0.0105
Hardening slope	2
Elastic / tensile strength	0.7
Elastic / compressive strength	0.53
Fracture strength constant	1.6
Fracture strength exponent	0.61
Compressive strain rate exponent	0.032
Tensile strain rate exponent	0.036
Maximum fracture strength ratio	1E+20
Damage constant	0.04
Damage constant	1
Minimum strain to failure	0.01
Residual shear modulus fraction	0.13

자유 낙하하는 앵커와 유연 매트리스 보호공의 해석에 있어서 콘크리트 재료를 탄성-완전소성, Drucker-Prager, RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma)의 세 가지 모델로 해석을 수행하여 비교하였다. 해석결과 Riedel et al.(1999)과 Riedel et al.(2009)에 의해 개발된 RHT 모델이 콘크리트 케이블 보호공의 해석에서도 가장 적합하다고 나타났으며, 본 연구에서도 동일한 재료모델을 사용한다. RHT 콘크리트 모델에 사용되는 계수는 주로 정적재하 실험, 관통 실험, 폭발하중 실험 등의 다양한 실험에 의해 결정되는데 기존의 연구결과(Ryu et al., 2015)에 산정된 변수값을 사용하였고 Table 1과 같다.

2.2 앵커 모델링

충돌체는 선박용 앵커 중 하나인 스톡앵커(2.16ton)를 고려하였고, 한국표준협회(Korean Standards Association, KSA)의 규격을 바탕으로 유한요소 모델링을 수행하였다. 요소는 절점당 3개의 자유도를 가지는 4절점 사면체로 구성하였다. 강제 앵커는 콘크리트 보호구조물에 비해 강성이 매우 크고, 충돌 시 손상은 고려치 않으므로 강체로 취급하였다. 앵커의 유한요소 모델은 Fig. 3과 같다.

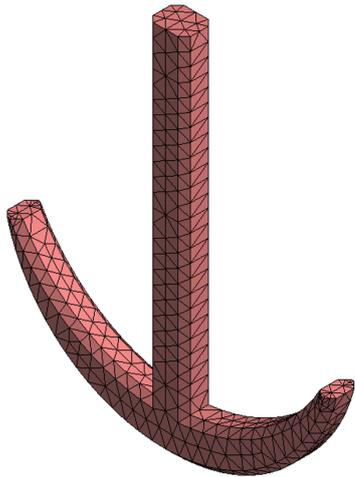


Fig. 3 Finite element model of the stock anchor

일반적으로 실증시험에서의 낙하높이는 10m이며, AS-FCM 현장낙하 시험에는 6m, 9m의 두 가지 케이스로 수행되었으며 (New Technology of Electric Power, 2007), 본 논문의 수치모델에서도 동일하게 적용하였다. Woo(2014)가 수행한 앵커충돌 시뮬레이션에서는 앵커의 수중에서의 종단속도를 이용하여 지상에서의 자유낙하 거리를 계산한 결과, 2ton의 스톡앵커와 스톡리스 앵커에 대해 각각 4.46m와 5.20m로 산정되었다. 따라서 낙하높이 6m와 1.5의 안전율을 고려한 9m는 비교적 합리적인 값이라고 생각된다. 실제 낙하높이를 수치해석으로 직접 구현할 경우에는 해석시간이 과도해지므로 콘크리트 보호공에서 50mm 떨어진 위치에서의 낙하속도로 모델링 하였다. 이를 위해 앵커의 운동에너지와 위치에너지의 총량이 보존된다는 조건으로 낙하속도를 계산하여 적용하였다(Ryu et al. 2015).

3. 철근 모델링에 대한 충돌해석 비교

3.1 철근 모델링

일반적으로 FCM은 철근 콘크리트 구조물로 제작된다. 수치 모델을 구성함에 있어 철근의 모델링이 충돌해석 결과에 미치는 영향을 계산하였다. 철근의 직경은 16mm로 가정하였고, 역학적 성질은 철근콘크리트 봉강의 산업규격(KS D3503)을 사용하였으며, 피복두께는 콘크리트 구조기준에 제시한 수중 콘크리트 규정을 적용하였다. 철근은 보요소를 사용했고 콘크리트와 완벽하게 부착된 것으로 가정하였다. 철근의 배치형상은 Fig. 4와 같다. 6m와 9m의 두 가지 낙하높이에 대해 각각 철근 모델링을 한 경우와 하지 않은 경우를 고려하여 4가지의 유한요소모델을 구성하여 해석을 수행하였다. 즉, 철근을 고려하지 않은 모델은 무근콘크리트로, 철근을 배근한 구조물은 철근콘크리트로 모델링 하였다.

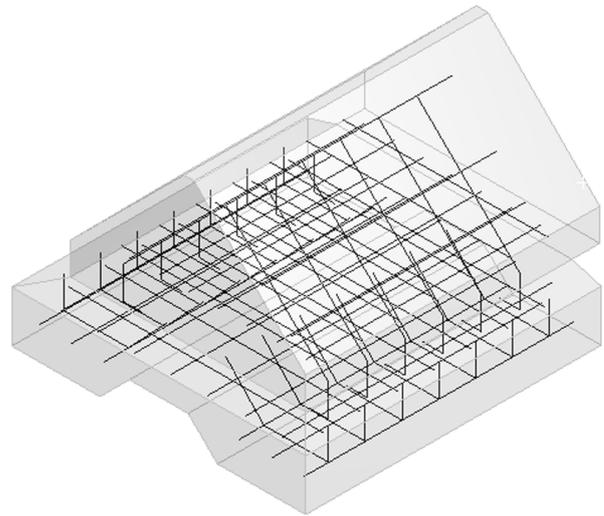


Fig. 4 Arrangement of reinforcing bars

3.2 해석결과

철근 모델링의 유무와 낙하높이에 따른 FCM 보호공의 충돌해석 결과로 손상 Contour를 Fig. 5~8에 나타내었다. 여기서, 손상은 RHT 재료모델에서 충격으로 인한 강도감소를 고려한 파괴변형률에 대한 소성변형률의 비로 계산되는 손상지수(Damage factor)를 나타낸다(Woo et al. 2015a).

FCM 보호공을 상부블록과 하부블록으로 명칭하고, 전체구조물의 손상과 두 부분에 대한 손상을 구분하여 비교하였다. 초기 충돌부는 상부블록의 윗부분이지만, 충돌부에서 하부블록으로의 손상의 전달정도를 알아보기 위해 두 부분으로 구분하여 결과를 나타내었다. 즉, 케이블을 마지막으로 보호하는 부분은 하부블록이고, 하부블록이 파손되지 않는다면 케이블은 안전하므로 상부블록보다는 하부블록의 손상이 케이블에 직접적 영향을 준다고 고려한다. Fig. 5와 6은 상·하부블록으로 구성된 보호공 전체에 대한 결과이고, Fig. 7과 Fig. 8은 보호공의 하부블록에 대한 손상 결과이다.

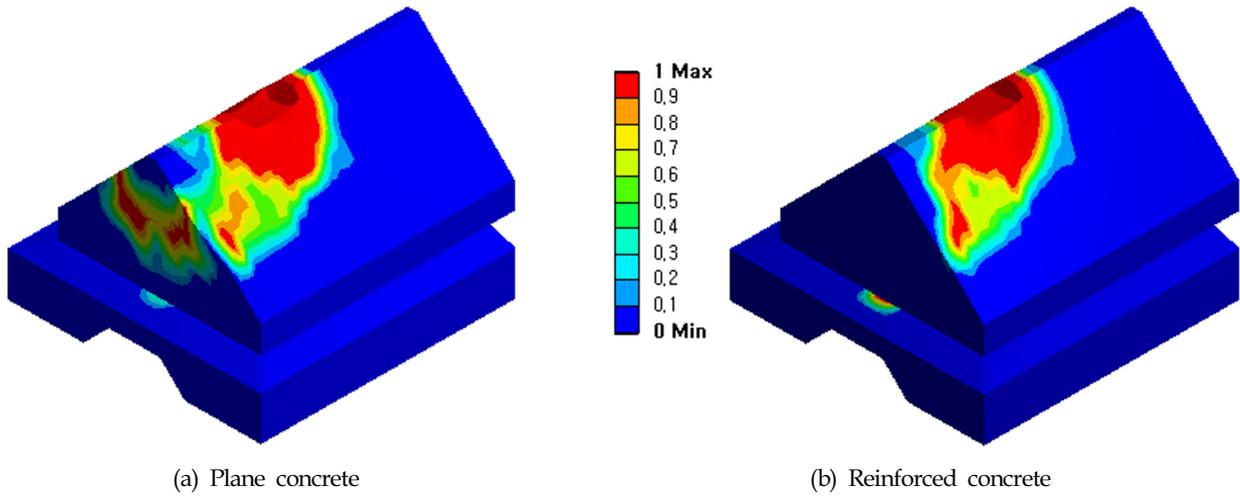


Fig. 5 Damage contours of the FCM (Falling distance: 6 m)

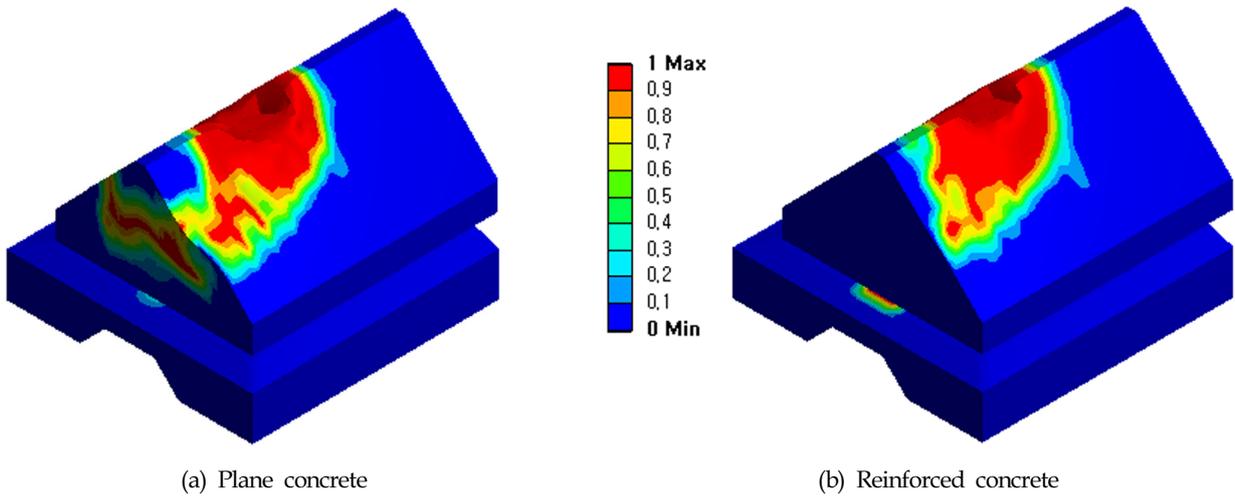


Fig. 6 Damage contours of the FCM (Falling distance: 9 m)

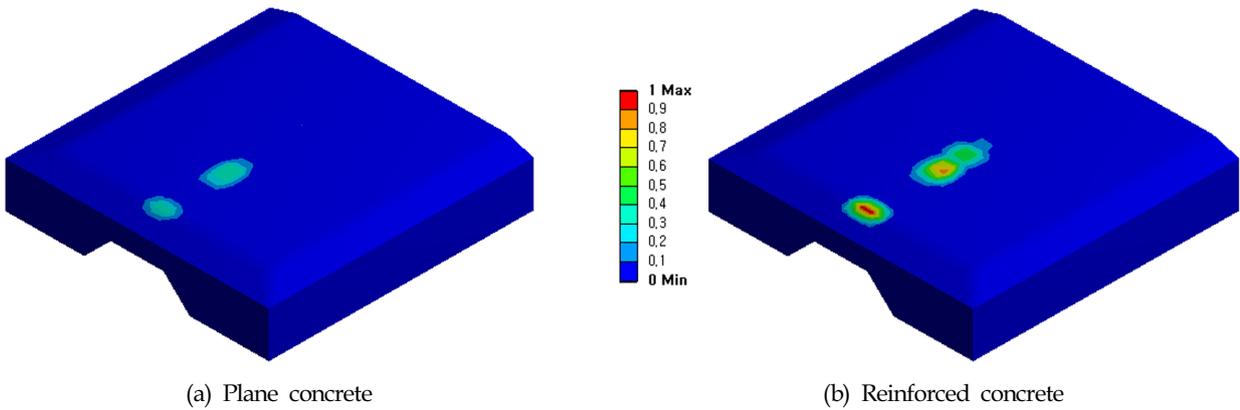


Fig. 7 Damage contours of the lower block (Falling distance: 6 m)

해석결과에서 낙하높이가 클수록 충돌부에 발생한 크레이터는 더 크게 발생하여 손상면적이 증가하였음을 볼 수 있었다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보면 무근 콘크리트에 비해 철근 콘크리트의 표면 손상부위가 전반적으로 감소하였고, Fig. 7과 Fig. 8에

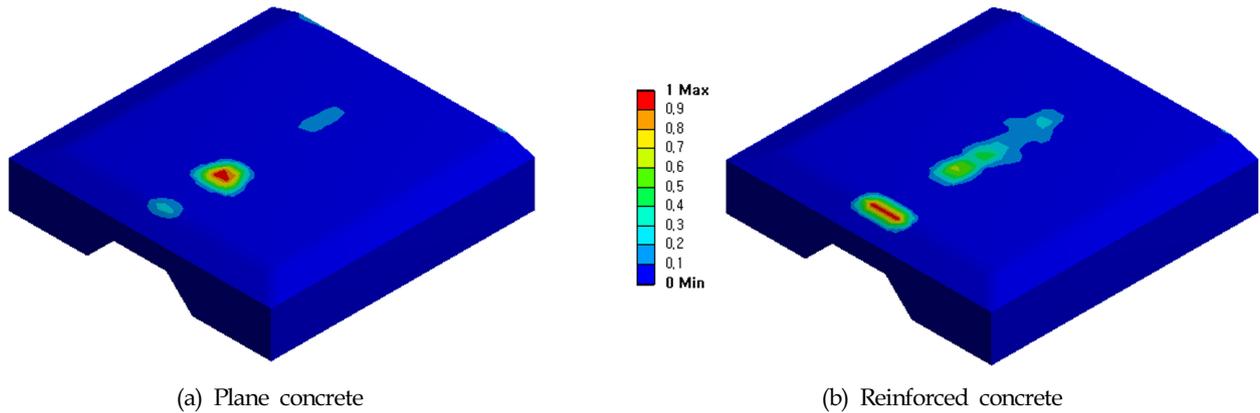


Fig. 8 Damage contours of the lower block (Falling distance: 9 m)

Table 2 Number of damaged nodes of upper and lower block

Damage	Case 1 (Plane concrete, 6 m)		Case 2 (Reinforced concrete, 6 m)		Case 3 (Plane concrete, 9 m)		Case 4 (Reinforced concrete, 9 m)	
	Upper block	Lower block	Upper block	Lower block	Upper block	Lower block	Upper block	Lower block
0.0 ~ 0.1	2,016	1,517	2,052	1,311	2,233	2,399	2,811	2,748
0.1 ~ 0.2	202	24	237	24	221	42	308	72
0.2 ~ 0.3	175	4	150	17	136	10	193	23
0.3 ~ 0.4	167	7	135	7	150	5	158	4
0.4 ~ 0.5	120	0	114	7	105	8	144	5
0.5 ~ 0.6	251	0	163	7	267	1	177	13
0.6 ~ 0.7	165	0	125	1	151	4	112	1
0.7 ~ 0.8	156	0	167	2	158	0	115	0
0.8 ~ 0.9	179	0	168	1	156	1	206	0
0.9 ~ 1.0	541	0	530	2	805	3	772	4
Total	3,872	1,552	3,841	1,379	4,382	2,473	4,996	2,870

서는 하부 블록에서의 손상 패턴이 달라지는 것이 확인되었다. 이는 철근을 모델링하는 것이 상부블록의 강성변화로 나타나 하부블록에 미치는 영향이 달라지는 것으로 판단된다.

상부블록과 하부블록의 손상에 대한 정량적 분석을 위해, 손상이 발생한 절점의 수를 손상정도에 따라 Table 2에 나타내었다. 여기서, Case 1은 낙하높이 6m에 무근콘크리트인 경우이고, Case 2는 6m에 철근콘크리트, Case 3은 9m에 무근콘크리트, Case 4는 9m에 철근콘크리트인 경우이다. Table 2에서 보면 낙하높이가 클수록 상·하부 블록 모두에 대해 손상절점의 수가 증가하였다. 낙하높이 6m인 경우에 앵커가 직접 충돌되는 상부블록에서는 철근 모델링의 영향으로 손상부위가 일부 감소하는 경향이 나타났고, 하부블록에서는 경우에는 철근을 모델링함에 따라 손상정도가 큰 절점의 수가 발생하는 경향이 확인되었다. 낙하 높이가 9m에서는 철근의 모델링 효과로 손상정도가 낮은 (0.5이하) 절점의 수는 대부분 증가하는 것이 나타났다. Fig. 9는 완전 손상(Damage=1.0)된 절점의 개수를 4가지 경우에 대해 비교한 것이다. Fig. 9에서 상부블록의 경우에는 철근의 모델링으로 인해 완전 손상된 절점의 수가 일부 감소하였지만, 하부블록의 경우에는 완전손상된 절점의 수가 매우 작지만 오히려 증가하는 경향이 나타났다.

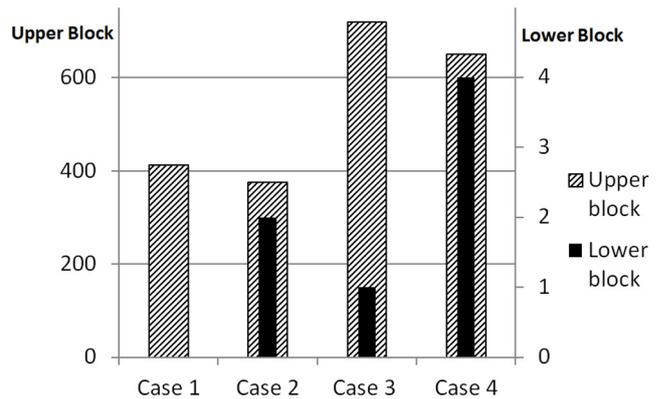


Fig. 9 The Number of perfectly damaged nodes of FCM

철근 모델링에 대한 결과를 보면 상부블록은 손상정도가 낮은 경우에는 철근을 모델링함에 따라 손상절점의 수가 증가하였고, 손상정도가 높은 경우에는 전반적으로 손상 절점의 수가 감소하였다. 해석결과를 보면 유한요소 모델링 시에 철근을 고려함에 따라 FCM 보호공의 손상거동은 차이가 발생하며, 정밀한 충돌 해석을 위해서는 철근콘크리트 모델링이 필요하다고 판단된다.

4. 앵커 충돌 각도에 대한 영향

앵커는 해류와 조류 및 수심 등의 수중 낙하환경에 영향을 받아 경사를 가지고 충돌할 수 있다. 남해의 경우 해저 케이블이 주로 설치되는 지역에서의 최대유속을 고려했을 때, 스톱앵커의 최대 기울기는 약 5°정도로 산정된 바 있다(Woo, 2009). 앵커의 충돌 지점과 각도를 Fig. 10과 같이 -5°, 0°, 5° 세 가지 경우에 대해 해석하였다. 충돌각도가 0°인 경우는 블록의 중앙으로 수직으로 낙하하는 경우이다. 낙하높이는 해류 및 조류의 영

향이 상대적으로 큰 9m인 경우만을 고려하였다. FCM 보호공은 철근 콘크리트 모델로 유한요소모델을 구성하였다.

충돌해석 결과로 손상 Contour를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11은 FCM 전체 블록에 대한 해석결과이고, Fig. 12는 하부블록의 결과이다. Fig. 11에서 보면 상부블록에 나타나는 크레이터의 크기는 충돌각도가 -5°, 0°, 5°로 갈수록 크게 나타났다. Fig. 12의 하부블록의 결과에는 분포양상이 충돌각도에 따라 일부 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

충돌각도에 따라 발생하는 손상절점의 수를 손상정도별로 Table 3에 나타냈다. 전반적인 손상절점의 수는 충돌각도가 5°인 경우가 가장 많고, 다음이 0°, -5°이다. 손상정도 높은 절점의 수는 상부블록의 경우 충돌각도가 5°인 경우가 가장 많았고, -5°인 경우가 가장 작았다. 하부블록의 경우에는 충돌각도가 0°경우에 손상정도가 높은 절점이 가장 많이 발생했다. Fig. 13은 상·하부 블록에 대해 완전 손상된 절점의 개수를 충돌각도별로 나타낸 것이다. 상부블록의 경우 5°에서 가장 많이 나타났으나, 세 가지 경우 모두에서 거의 유사하게 계산되었다. 하부블록의 경우에는 충돌각도 5°에서는 완전손상된 절점이 계산되지 않았고, 충돌각도 0°인 경우에서 가장 많이 발생하였다. 해석결과를 종합해 보면 보호공 전체의 충돌손상은 경사낙하 하는 것이 가장 크게 발생하나 케이블위에 위치한 하부블록의 보호성능을 고려하면 낙하각도가 없이 수직낙하 하는 경우가 가장 치명적임을 나타냈다.

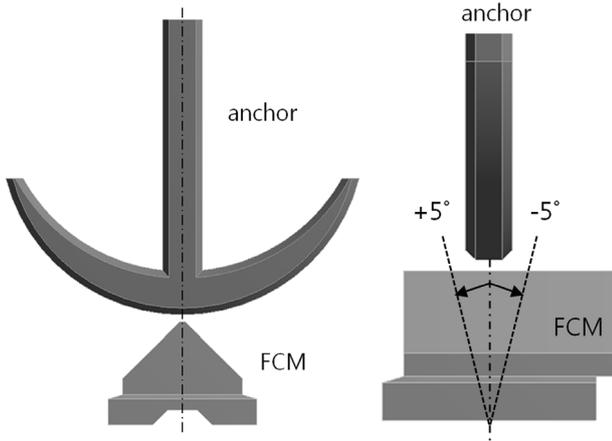


Fig. 10 Collision angle of the anchor

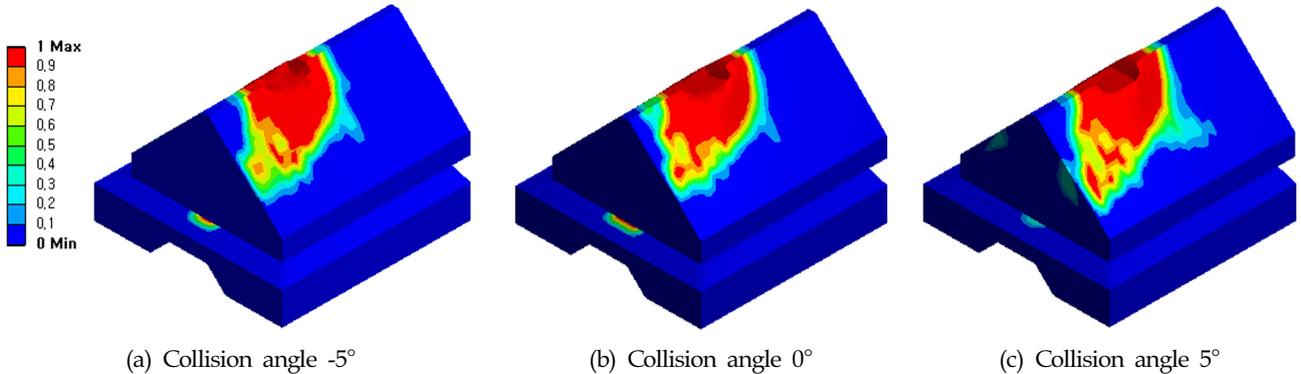


Fig. 11 Damage contours of the FCM with collision angle

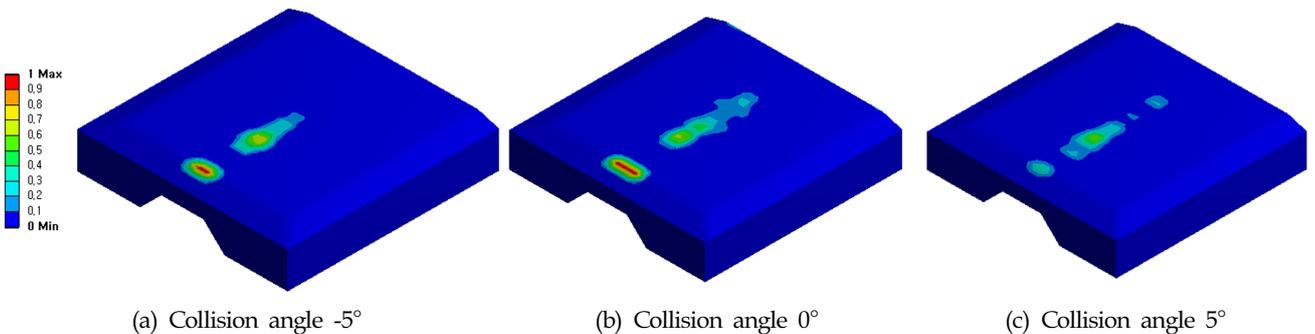


Fig. 12 Damage contours of the lower block with collision angle

Table 3 Number of damaged nodes of upper and lower block with collision angle

Damage	Collision angle -5°		Collision angle 0°		Collision angle 5°	
	Upper block	Lower block	Upper block	Lower block	Upper block	Lower block
0.0 ~ 0.1	2,660	2,339	2,811	2,748	3,459	3,750
0.1 ~ 0.2	307	32	308	72	384	44
0.2 ~ 0.3	194	15	193	23	270	15
0.3 ~ 0.4	134	13	158	4	173	5
0.4 ~ 0.5	163	3	144	5	139	1
0.5 ~ 0.6	213	5	177	13	204	3
0.6 ~ 0.7	122	4	112	1	161	0
0.7 ~ 0.8	134	1	115	0	183	0
0.8 ~ 0.9	186	0	206	0	200	0
0.9 ~ 1.0	761	2	772	4	786	0
Total	4,874	2,414	4,996	2,870	5,959	3,818

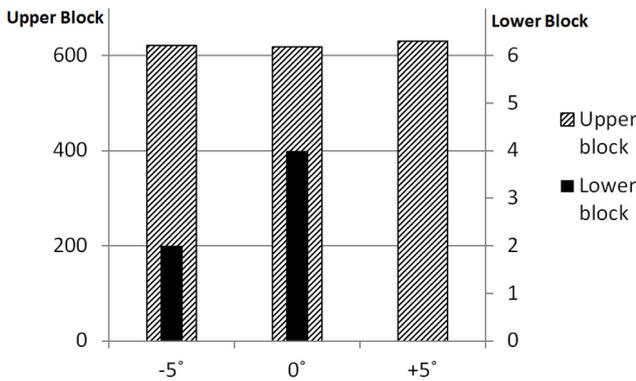


Fig. 13 The Number of perfectly damaged nodes of FCM with collision angle

5. 결 론

본 논문에서는 해저케이블 보호구조물의 하나인 FCM에 선박용 앵커가 충돌하는 것에 대한 거동해석을 수치해석을 이용하여 수행하였다. 충돌해석 위해 유한요소해석 프로그램을 사용하였고 비선형 동적해석을 수행하였다. 충돌체인 앵커는 한국 표준협회의 규격치수를 사용하여 강체로 모델링 하였고, 피충돌체인 FCM의 콘크리트 재료모델에는 RHT모델을 사용하였다. 유한요소모델을 구성함에 있어 철근의 모델여부가 충돌 해석결과에 미치는 영향을 두 가지 낙하 높이에 대해 분석하였다. 또한 해류나 조류 및 초기 낙하조건 등의 영향으로 발생하는 충돌각도의 변화에 대해 보호공의 충돌거동도 해석하였다. 앵커의 충돌각도는 -5°, 0°, 5°를 고려하였다. FCM을 초기 충돌부인 상부블록과 케이블 보호부인 하부블록으로 구분하여 충돌해석 결과를 분석하였고, 수치해석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 낙하 높이가 클수록 충돌부위에 발생하는 크레이터는 크게 나타나며 손상면적도 증가하는 것이 확인되었다.

(2) 철근 콘크리트로 모델링한 경우가 무근 콘크리트로 한 경우보다 콘크리트 표면의 충돌 손상부위가 전반적으로 감소되었고, 상·하부 블록의 손상 패턴도 다르게 나타났다.

(3) 철근을 모델링할 경우에 상부블록에서는 손상정도가 작은 절점은 증가하였고, 낙하높이가 큰 9m인 경우에 하부블록에서는 손상절점이 전반적 증가하였다. 충돌 에너지가 큰 경우일수록 철근의 모델링이 필요하다는 것으로 판단된다.

(4) 앵커의 충돌각도에 대해 충돌부의 크레이터와 손상면적은 다르게 발생하였는데, 상부블록의 초기 충돌부에서는 크레이터가 충돌각도가 5°인 경우에 가장 크게 나타났고, 다음이 0°, -5° 순이었다.

(5) 상부블록의 경우 완전 손상된 절점의 수가 충돌각도가 5° 경우에 가장 많이 발생했으나, 세 가지 모두 유사하게 계산되었다. 하부블록은 충돌각도가 0°인 경우에 손상정도가 높은 절점이 가장 많이 발생했다.

FCM의 수치해석을 위한 유한요소 모델에는 배근된 철근의 모델링이 필요함이 확인되었다. 특히 케이블 보호부위인 하부블록의 보호성능 평가에는 더 많은 영향을 미쳤다. 앵커충돌 각도는 FCM의 손상분포에 영향을 미쳤는데, 경사 낙하할 경우에 전반적인 손상부위는 증가하였지만, 구조물의 전체에서의 유의할 만한 손상과 하부블록에서의 완전손상을 고려한다면 수직 낙하하는 것이 보호성능에 가장 큰 영향을 미치는 경우라는 결론을 얻었다. 충돌해석에 대한 손상 분포특성과 손상 정도를 종합해 보면 보호구조물의 특성상 콘크리트 표면의 손상정도 보다는 보호대상 구조물의 보호성능에 초점을 맞추는 것이 필요하다고 생각된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- Ahn, S.H., Hue, H.K., Park, G.W., Hwang, S.B., Shim, W.I., 2012. Analysis of Echo-friendly Submarine Protection Duct. Proceedings of Joint Conference with Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Daegu Korea, 2383-2389.
- Cho, H.M., Kim, S.H., Ryu, Y.S., Kim, J.T., 2012. Numerical Simulation of Burial Submarine Cable Protector under Anchor Collision. Proceedings of Joint Conference with Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Daegu Korea, 1766-1770.
- New Technology of Electric Power, 2007. Assemble Type FCM(Flexible Concrete Mattress) for Submarine Cable Protection. [Online] (Updated August 2007) Available at: <<http://www.electricity.or.kr/>> [Accessed Jan. 2016].
- Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K., 2009. Numerical Assessment for Impact Strength Measurements in Concrete Materials. International Journal of Impact Engineering, 36, 283-293.
- Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E., 1999. Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes. 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, Germany, 315-322.
- Ryu, Y.S., Cho, H.M., Kim, S.H., 2015. Collision Behavior Evaluation of Flexible Concrete mattress Depending on Material Models. Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(1), 70-77.
- Woo, J., 2014. Behavior Characteristics of Submarine Power Cable Protectors under Anchor Collision. Doctoral dissertation, Pukyong National University.
- Woo, J., Na, W.B., 2010. Analysis of Maximum Response of Cylinders-connected Protector under Anchor Colliding and Dragging. Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(5), 81-87.
- Woo, J., Na, W.B., Kim H.T., 2009. Numerical Simulation of Arch-type Submarine Cable Protector under Anchor Collision. Journal of Ocean Engineering and Technology, 23(1), 96-103.
- Woo, J., Kim, D., Na, W.B., 2015a. Damage Assessment of a Tunnel-type Structure to Protect Submarine Power Cables during Anchor Collisions. Marine Structures, 44, 19-42.
- Woo, J., Kim, D., Na, W.B., 2015b. Application of Numerical Simulation of Submersed Rock-berm Structure Under Anchor Collision for Structural Health Monitoring of Submarine Power Cables. Smart Structures and Systems, 15(2), 299-314.
- Woo, J., Kim, D., Na, W.B., 2015c. Safety Analysis of Rock-berms that Protect Submarine Power Cables in the Event of an Anchor Collision. Ocean Engineering, 107, 204-211.
- Yoon, H.S., Na, W.B., 2013. Anchor Drop Tests for a Submarine Power-cable Protector. Marine Technology Society Journal, 47(3), 72-80.

Measurement of Real Deformation Behavior in C-type Lng Mock-up Tank using Strain Gage

Won-Do Jung*, Tae-Wook Kim*, Jeong-Hyeon Kim*, Do-Young Lee**,
Min-Sung Chun** and Jae-Myung Lee*

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

**Structure Research Part, Central Research Institute, Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Pangyo, Gyeonggi-do, Korea

스트레인 게이지를 이용한 C-type LNG Mock-up 탱크 내조 실 변형 거동 측정

정원도* · 김태욱* · 김정현* · 이도영** · 전민성** · 이제명*

*부산대학교 조선해양공학과

**삼성중공업 중앙연구소 구조연구

KEY WORDS: IMO C-type tank IMO C 타입 탱크, Mock-up test 목업 시험, Hydraulic test 수압 시험, Strain gage 스트레인 게이지, Structural strength 구조 강도

ABSTRACT: A C-type LNG mock-up tank was constructed to evaluate the durability of the tank and its structural safety. An experimental strain analysis system equipped with strain gages was designed to investigate the structural behavior of the inner tank at a high hydraulic pressure. In addition, the insulation used in the space between the inner tank and outer tank had a compressive strength and the inner tank thickness of the cylindrical shell and hemisphere was 4.0 mm, which was designed to be thinner than the existing rules. The strains on the inner tank were measured with increasing pressure, and these measurements were compared and analyzed at the strain gage attachment points.

1. 서 론

디젤유나 벙커C유를 이용하는 선박의 디젤기관은 높은 효율을 바탕으로 100여 년간 주 추진기관으로 이용되고 있다. 비록 액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG) 운반선의 경우에는, 운항 중 자연 발생하는 BOG(Boil-off gas)를 활용한 이중연료엔진이 적용되기도 하지만, 선박 추진기관에 대한 원유 의존성은 여전히 지배적이다. 최근 환경 문제로 인해 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)를 중심으로 MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) Annex VI에 의거한 선박 대기 오염물질 배출 규제가 강화되고 있는 추세이며, 그 결과 이미 북미 연안이나 유럽 지역과 같은 일부 ECA(Emission control area)에서는 0.1% 황산화물(SOx) 규제가 시행되었다. 뿐만 아니라 질소산화물(NOx) 배출량의 경우 2016년부터는 현재의 20% 수준인 Tier III를 만

족시켜야 한다. 이에 따른 대안으로 LNG를 연료로 사용하는 추진기관이 떠오르고 있으며, 액화과정을 거치면서 황 성분을 제거하기 때문에 IMO 오염물질 배출량 기준을 쉽게 만족시킬 수 있다. 또한 미국의 셰일가스 개발과 호주 해상가스전 천연가스 생산이 본격적으로 진행될 것으로 기대됨에 따라 연료비 절감 측면에서도 우위를 점할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 천연가스를 연료로 사용하는 LNG 추진선박이 가장 현실성 있는 대안으로 주목받고 있다(DNV, 2010; DNV, 2011).

LNG 추진선박에 적용 가능한 저장탱크로는 통합형 탱크인 멤브레인(Membrane) 타입과 독립형인 IMO A, B, C 타입 탱크로 분류할 수 있다(IMO, 2010). 이들 LNG 저장탱크를 LNG 추진선박에 활용함에 있어 멤브레인 타입 탱크의 경우 공간효율은 좋으나, BOG 처리를 위한 추가 장치가 요구되고 슬로싱(Sloshing)으로 인한 구조적 안전성 문제가 발생할 수 있다. 또한 LNG의 기밀과 수밀을 유지하기 위해서는 완전한 형태의 이

Received 28 October 2015, revised 18 April 2016, accepted 22 April 2016

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

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

차방벽이 요구되기 때문에 연료탱크로의 적용은 어려울 것으로 예상된다(Kim et al., 2008; Lee et al., 2014). 독립형 탱크인 IMO A, B 타입 탱크의 경우 탱크 내부에 강도 부재를 설치하여 슬로싱에 대한 대비를 할 수 있으나, LNG의 누설에 대비하여 부분적인 2차 방벽인 Drip Tray가 요구된다. 그리고 탱크 내부 압력이 제한적이기 때문에 BOG발생에 따른 별도의 추가적인 처리장치가 요구된다. 반면, Fig. 1에 나타나 있는 압력용기형상의 IMO C 타입 탱크는 압력탱크 기준으로 설계되어 탱크의 균열 및 누수가 발생하지 않는다는 것을 가정하고 있기에 이차방벽이 요구되지 않으며 슬로싱에 대한 구조부재 보강이 가능하다. 또한 높은 탱크 내부압력에 의하여 별도의 BOG 처리를 위한 부가장치가 필요하지 않으며 BOG 발생을 현저히 줄일 수 있다는 장점이 있다(Kim et al., 2012).

현재까지 LNG연료 추진 선박은 연료 소모량이 적고 상대적으로 적은 엔진마력을 요구하는 연안 용 페리(Ferry) 또는 소형 해양지원선 위주로 건조되어 왔다. 그러나 최근 컨테이너선과 LNG 운반선과 같은 대형 선박에서도 LNG연료 추진기관을 적용한 선박의 수주가 이뤄짐에 따라 담보상태에 접어든 국내 조선 산업에 새로운 패러다임의 변화가 기대된다. 또한 정부기관, 대형 조선소, 선사 및 LNG 관련 사업자를 중심으로 본격적인 대형 선박에 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부 선급에서는 LNG 연료 추진 시스템의 설계규정(Design guideline)을 제정하는 등 LNG 연료 추진 선박 개발에 박차를 가하고 있다(ABS, 2011; Kim et al., 2010). 그러나 LNG 연료 탱크의 설계 및 제작에 관한 규정은 아직 표준기준으로 제정되어 있지 않으며 연료탱크에 대한 설계 기술, 연료공급 및 기자제시스템의 효율성, 실제 운용시 안전성 확보에 대한 기술적 검토가 불가피하다(Kim and Yoon, 2009).

본 연구에서는 대형 컨테이너선 및 원유선 실적선 적용을 위한 단계로 IMO C-type mock-up 탱크를 제작하여 성능테스트를 진행하였다. 기존의 C 타입 LNG 탱크와는 다른 점으로는 내조를 지지하는 별도의 서포트(Support) 없이 부착된 단열재만으로 지탱 가능하도록 하였다. 기존 단열재인 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam)의 경우 실제 탱크 내에서 단열 성능만을 고려해 부착되는 것이 일반적이거나, 본 연구에서는 단열 성능이 외에도 압축 성능을 지니는 진공단열패널을 적용하여 내조 팽창을 수용하도록 하였다. 이를 바탕으로 기존 두께보다 내조를 얇게 설계할 수 있는 방안을 제시해 설계제작 비용을 줄이고자 하였다. 압력용기를 비롯한 대형 구조물의 구조거동을 파악하기 위해서는 다양한 구조 해석 프로그램을 사용하는 방법이 주

로 사용되고 있으나, 각종 물성치와 경계조건의 설정 등으로 이루어지는 해석만으로는 구조체의 내구성을 검증하기에는 부족하다. 따라서 실제 탱크 내조의 외벽에 스트레인 측정을 통해 압력에 따른 탱크 내부의 거동을 분석 하였으며, 한계 상태 이상의 압력을 가해 내구성을 평가하고자 한다.

2. 시험준비

2.1 Mock-up 탱크 제원 및 시공

본 연구에 제작된 Mock-up 탱크의 제원을 Table 1에 정리하였다. 탱크는 내조(Inner) 및 외조(Outer) 탱크로 구성되어 있으며, 전도 및 대류에 의한 열손실을 최소화하기 위해 내·외조 사이의 공간을 진공으로 유지시켰다. 또한, 복사열을 차단하기 위해 단열 공간 내부에 펄라이트(Perlite)를 충전 시킴으로써 진공성능을 향상시키고자 하였다. 탱크 내조 두께는 4mm, 외조 두께는 16mm로 제작되었으며 기존 IMO C 타입의 탱크 설계 압력인 0.3-0.5MPa보다 훨씬 높은 1.7MPa를 가하여 변형률 측정을 통한 내조의 내구성을 평가하고자 하였다. Mock-up 탱크는 압력용기 제작업체를 통해 실제 LNG 온도 환경(-196℃)에서 성능시험이 가능하도록 시공되었다. 압력용기제작기준·안전기준 및 검사기준에 따르면 압력용기는 제작 후 국부적인 팽창, 늘어남과 같은 특성과 내압성능을 확인하도록 명시되어있으며

Table 1 Specification for C-type LNG mock-up tank

Type	C-type LNG mock-up tank (Cylindrical shape)	
Dimension	Length [mm]	4953
	Breadth [mm]	2406
	Height [mm]	2803
Weight	Empty [kg]	11,000
	Test [kg]	21,000 (Water)
Pressure	Design [MPa]	1.7
	Operating	-
Insulation (Outer vessel inside)	Thickness [mm]	380 (Perlite)
	Volume [m ³]	270
	Internal volume [m ³]	10
	Storage volume [m ³]	9
	Test fluid	Water

Table 2 Material properties of SUS304

Temperature		0.2% Yield strength		Tensile strength		Elongation
°F	°C	psi	[MPa]	psi	[MPa]	Percent in 2 " or 51 mm
-423	-253	100,000	690	250,000	1725	25
-320	-196	70,000	485	230,000	1585	35
-100	-79	50,000	345	150,000	1035	50
70	21	31,200	215	73200	505	70



(a) Adhesion of strain gage on inner tank



(b) Docking process of inner tank in outer tank



(c) Completion of docking



(d) Covered outer tank

Fig. 1 Photograph of the tank construction

수압에 의한 내압시험을 하여 합격하여야 한다. 또한 실제 LNG 온도 환경(-196℃)과 시험 온도간의 차이를 보정하기 위해 최고 허용압력(또는 설계압력)의 1.5배의 압력에 다음 식과 같이 온도보정을 하여 압력을 가하도록 되어 있다.

$$P_a = P \times \frac{\sigma_n}{\sigma_a} \quad (1)$$

여기서 P_a 는 온도 보정된 내압시험압력이고 P 는 온도 보정전의 내압시험압력이며, σ_n 과 σ_a 는 각각 내압시험 시 온도의 재료 허용인장응력과 설계 온도에서의 재료 허용인장응력 값이다. Table 2에 내조를 구성하는 재질인 SUS304의 온도별 재료 인장물성치를 나타내었다. Fig. 1에 내조와 외조의 제작절차를 나타내었다. 내조와 외조를 따로 제작하고, 단열재를 외조에 부착 후 내조와 외조를 도킹하는 방식으로 진행되었다. 스트레인 게이지는 도킹 전에 내조 외벽에 부착을 완료하였으며, 도킹 과정에서 충전재와의 마찰로 인한 스트레인 게이지의 손상을 막기 위해 보호 코팅액(M-coat A protective coating)을 첨가한 후 와이어와 함께 밀봉 처리하였다.

2.2 스트레인 게이지

Mock-up 탱크 건설을 통해 확인하여야 할 사항으로 실제 LNG 저장에 따른 압력 상승으로 인한 내조의 변형 거동 및 내구성을 파악하는 것이다. 변형 거동을 파악하기 위하여 실제 거동을 측정할 수 있는 스트레인 게이지를 이용한 측정 시스템을 구축하였다(Kim et al., 2003). Fig. 2 (a)와 같이 압력상승에 따른 내조의 변화를 관찰하기 위하여 내조 외벽에 스트레인 게이지를 부착하였다. 스트레인 게이지 부착지점은 내조 외벽을 상단부, 하단부 및 측면부로 나누어 대칭성을 고려하여 결정하였으며 측정 점은 Rosette type 게이지 6개 총 18채널을 구성하였다. 또한 본 시험에서 사용된 접착제는 MM사의 M-Bond 200이며, 게이지와 납땀 부에 발생될 수 있는 외부 충격 및 습기 방지를 위해 코팅제(M-coat A)를 도포하였다.

스트레인 게이지를 통해 계측된 변형률은 주 변형률(Principal strain)계산에 사용되며, Fig. 2(b)에 표시된 두 개의 주 변형률을 계산하기 위한 식은 다음과 같다(Kang, 1993; Kim et al., 2004).

$$\varepsilon_h = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2 \cdot \varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c)^2} \quad (2)$$

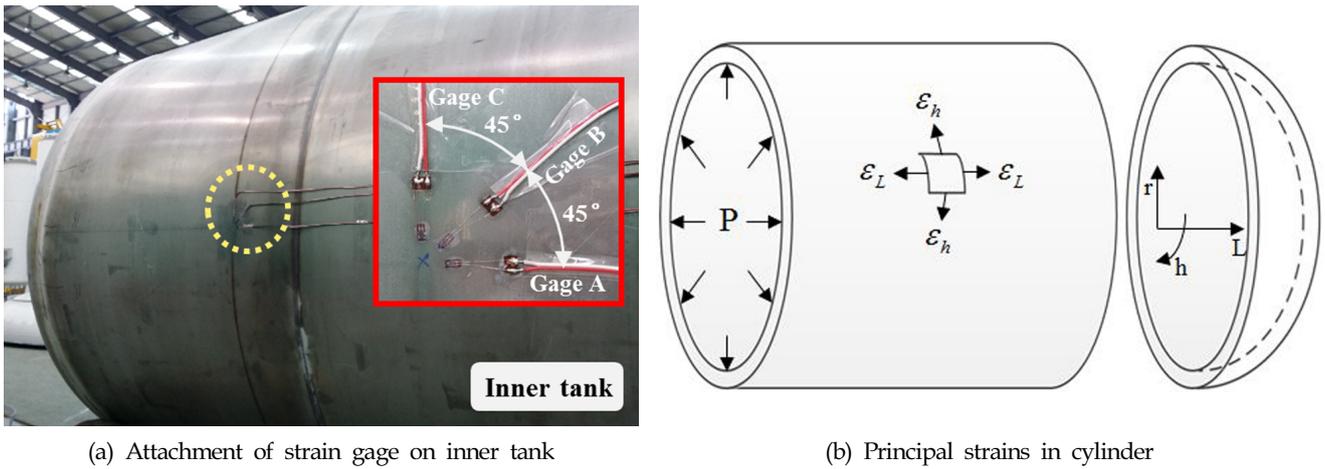


Fig. 2 Strain measurement of the C-type LNG tank

$$\epsilon_L = \frac{1}{2} \cdot (\epsilon_a + \epsilon_c) - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + (2 \cdot \epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c)^2} \quad (3)$$

여기에서 ϵ_h 는 원주방향 변형률, ϵ_L 는 길이방향 변형률, $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ 는 각각 게이지 A, B, C에서 측정된 변형률을 나타낸다.

2.3 측정구성

주변형률을 계산하기 위하여 내조 외벽에 부착된 스트레인게이지는 Rosette type으로 구성되어 있으며, 길이방향에 따라 탱크 중심(C)을 기준으로 좌(L)·우(R)로 나누어 각각 배치하였다. 또한 높이 별로 상단부(3), 측면부(2) 및 하단부(1)로 배치함에 따라 Rosette type 게이지는 Fig. 3과 같이 총 6개로 구성되어 있다. 이와 같이 구성된 게이지는 리드 와이어와의 연결을 통해 단열재를 거쳐 외조 밖으로 나오도록 구성하여 측정용 PC로 직접 연결하도록 하였다. 특히 내조와 외조 도킹과정 중에 단열재와의 마찰로 인한 리드 와이어의 손상을 최소화하기 위해 와이어를 감싸도록 테이핑을 수행하였으며, 리드 와이어의 노출이

내·외조 사이의 진공상태 유지에 영향을 미치지 않도록 글라스 울(Glass wool)로 채워 넣었다. 측정용 PC는 각 게이지로부터 나오는 데이터를 취합하여 측정 중 FFT(Fast fourier transform)나 히스토그램의 동시 분석 및 표시가 실시간으로 가능한 EDX-2000A(독일, KYOWA사)를 사용하였다. 수압은 터빈 펌프를 통해 압력을 조절하였으며 탱크 외부에 부착된 압력계 측기를 통해 탱크 내부의 압력을 확인 가능하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Strain-time 측정 분석

본 연구에서는 Mock-up 탱크에 스트레인 게이지를 부착하여 실제 변형을 측정 하였으며, 특히 내조의 경우 Mild steel로 제작된 외조와 달리 SUS304로 제작되어 실제 LNG의 극저온 환경을 고려하여 설계하였다(Kim et al., 2000). 이 때 SUS304의 탄성영역은 0.8MPa 이내로 탄성영역 외에도 그 이상의 압력을 가해 소성변형에서의 거동 분석 및 내구성을 평가하고자 하였

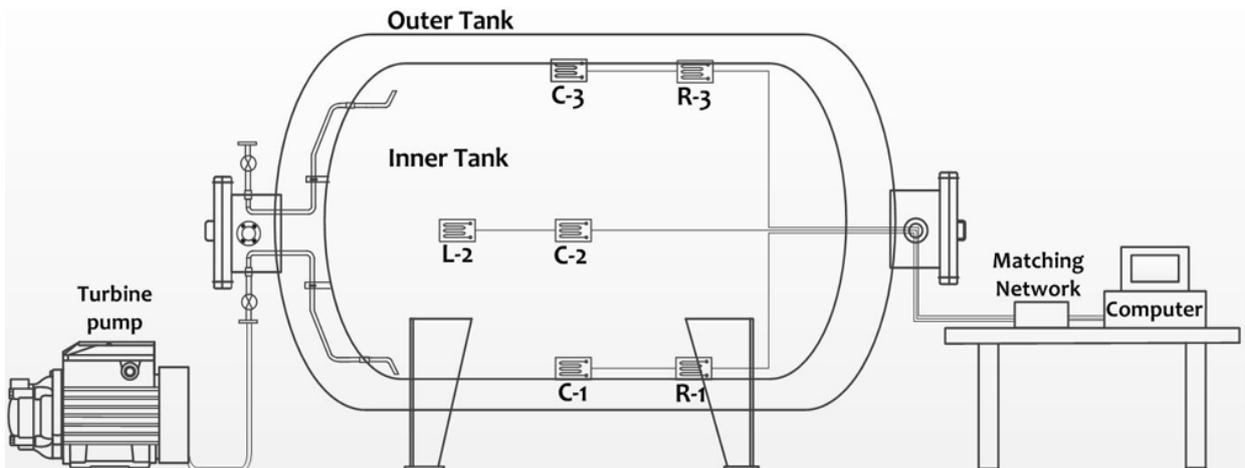


Fig. 3 Schematic view of Mock-up testing

Table 3 Pressure-time table

Pressure [MPa]	0.33	0.45	0.57	0.69	0.81	0.93	1.05	1.17	1.29	1.41	1.53	1.65	1.7
Time [s]	330	1080	1380	1680	1985	2280	2580	2866	3184	3493	3815	4396	4960

Table 4 Experimental results for various strains on inner tank

Pressure [MPa]	R-1		C-1		L-2		C-2		R-3		C-3	
	Hoop Strain [$\mu\text{m/m}$]	Longi. Strain [$\mu\text{m/m}$]	Hoop Strain [$\mu\text{m/m}$]	Longi. Strain [$\mu\text{m/m}$]	Hoop Strain [$\mu\text{m/m}$]	Longi. Strain [$\mu\text{m/m}$]	Hoop Strain [$\mu\text{m/m}$]	Longi. Strain [$\mu\text{m/m}$]	Hoop Strain [$\mu\text{m/m}$]	Longi. Strain [$\mu\text{m/m}$]	Hoop Strain [$\mu\text{m/m}$]	Longi. Strain [$\mu\text{m/m}$]
0.33	111.1	238.8	104.4	162.2	132.0	293.7	127.4	244.7	124.1	276.1	114.7	195.6
0.45	160.2	356.0	121.9	230.8	191.6	427.2	186.5	366.4	176.7	402.6	157.1	278.7
0.57	203.7	466.8	155.1	300.5	238.8	545.7	232.6	466.4	220.6	523.7	184.8	344.7
0.69	296.4	705.9	220.3	439.1	343.6	791.6	324.7	658.1	326.8	755.7	234.1	496.1
0.81	376.4	924.3	256.5	531.9	443.9	1047.4	399.5	826.0	415.6	996.2	275.4	602.7
0.93	440.0	1095.9	287.2	618.7	557.7	1321.1	466.3	989.5	513.5	1262.6	325.4	713.8
1.05	557.1	1415.0	316.3	714.4	741.8	1817.5	543.4	1223.1	687.4	1741.6	416.9	889.0
1.17	685.3	1791.0	329.0	800.0	979.3	2458.0	605.6	1461.8	891.2	2295.2	519.2	1070.5
1.29	1081.9	2822.8	366.7	1015.4	1515.4	4023.4	664.3	1920.6	1375.0	3687.5	577.1	1486.2
1.41					2507.5	7003.9	720.6	2714.8	2281.2	6380.0	693.5	2266.9
1.53					4267.9	12094.2	930.1	4534.0	3869.6	11126.1	793.7	4064.8
1.65					5826.6	17257.3	1620.6	7570.1			929.1	7029.7
1.70							5810.5	19575.0				

다. 각 시간에 따른 내조 내부에 작용하는 압력의 크기는 Table 3에 나타내었다. 수압을 통해 내부의 압력을 상승시킨 후 일정 시간동안 해당 압력을 유지하도록 하여 급격한 팽창에 따른 균열 등의 파손을 방지하고 측정값의 신뢰성을 확보하고자 하였다. Fig. 4는 탱크 내조에 부착된 6개 지점에서의 각 방향별 측정 변형 양상을 보여준다. (a)와 (b)는 내조 하단에 부착된 변형이며, (c)와 (d), (e)와 (f)는 각각 내조의 측면과 상단에서의 변형을 나타낸다. 각 지점에서의 변형은 탱크 내조에 가해지는 압력에 비례하여 선형적으로 나타나는 것을 알 수 있다(Lee et al., 2005). 또한 측정 결과에 따르면 탱크의 길이방향으로 부하되는 인장변형이 원주방향에 비해 작게 나타나는 것을 알 수 있으며, 길이방향에서 원주방향으로 갈수록 그 값이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 내압을 받는 압력탱크의 응력계산 시 원주방향의 응력(Hoop stress)이 축방향의 응력(Longitudinal stress)에 비해 값이 크다는 것을 나타낸다. 동일한 측정 위치 및 압력에서의 원주방향의 변형과 축방향의 변형간의 비를 살펴보면 탄성영역인 0.8MPa내에서는 2.1~2.4로 나타났으며, 소성영역에서 내조에 가해지는 압력이 커질수록 원주방향의 변형이 상대적으로 더 커지는 것으로 나타났다. 특히 길이방향의 중심에서 측정된 C-1, C-2 및 C-3 지점에서 길이방향 변형에 대한 원주방향 변형의 비가 가장 크게 나타났다. 또한 길이 방향의 중심(Fig. 4 (b), (d), (f))을 기준으로 좌·우에서(Fig. 4 (a), (c), (e))에서 더 큰 변형값이 측정되었으며, 중심부에서는 양측면의 팽창에 의해 상대적으로 작게 변형된 것으로 보인다. 내조의 하단에 부착

지점인 R-1과 C-1(Fig. 4 (a), (b))에서의 측정값은 1.29MPa까지 측정되어 측면이나 상단에 비해 낮은 압력까지 측정되었다. 이는 내조와 외조 도킹 중에 손상이 있었거나 서포트 없이 단열재만으로 내조를 지지하는 탱크의 특성상 변형 및 팽창으로 인한 단열재와의 직접적인 마찰이 스트레인 게이지 손상에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

3.2 Pressure-strain 분석

압력용기의 변형을 관찰하기 위해 Rosette type으로 부착된 스트레인 게이지의 측정값을 식 (1)과 (2)를 통해 탱크의 원주방향 변형률과 길이방향 변형률을 각각 계산하여 나타내었다. Fig. 5는 가수압에 따른 각 지점에서의 변형 양상을 보여준다. 또한 Fig. 5 (c)와 (d)를 통해 상단 및 하부에 비해 측면을 중심으로 변형이 진행되며 소성 변형으로 진행될수록 연신의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 연신이 특정 방향으로만 진행될 경우 응력 집중 현상이 유발될 수 있으므로 보강재와 지지대 배치를 통해 이러한 현상을 완화시키거나 기존의 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam)이 아닌 구조 강도를 지니는 단열재를 사용할 경우 충분한 압축 성능이 요구된다. 높이에 따른 변형의 정도는 측면부, 상단부, 하단부 순으로 나타났으며 상단에서는 내압의 방향과 탱크 내 물과 탱크 자체에 작용하는 중력의 방향이 서로 상쇄되기 때문에 상단에서의 변형이 측면에서 보다 적은 것으로 판단된다. 반면 하단부에서는 자중에 의해 테스트 초기부터 완전 밀착되었지만 그에 반해 측면부에서는

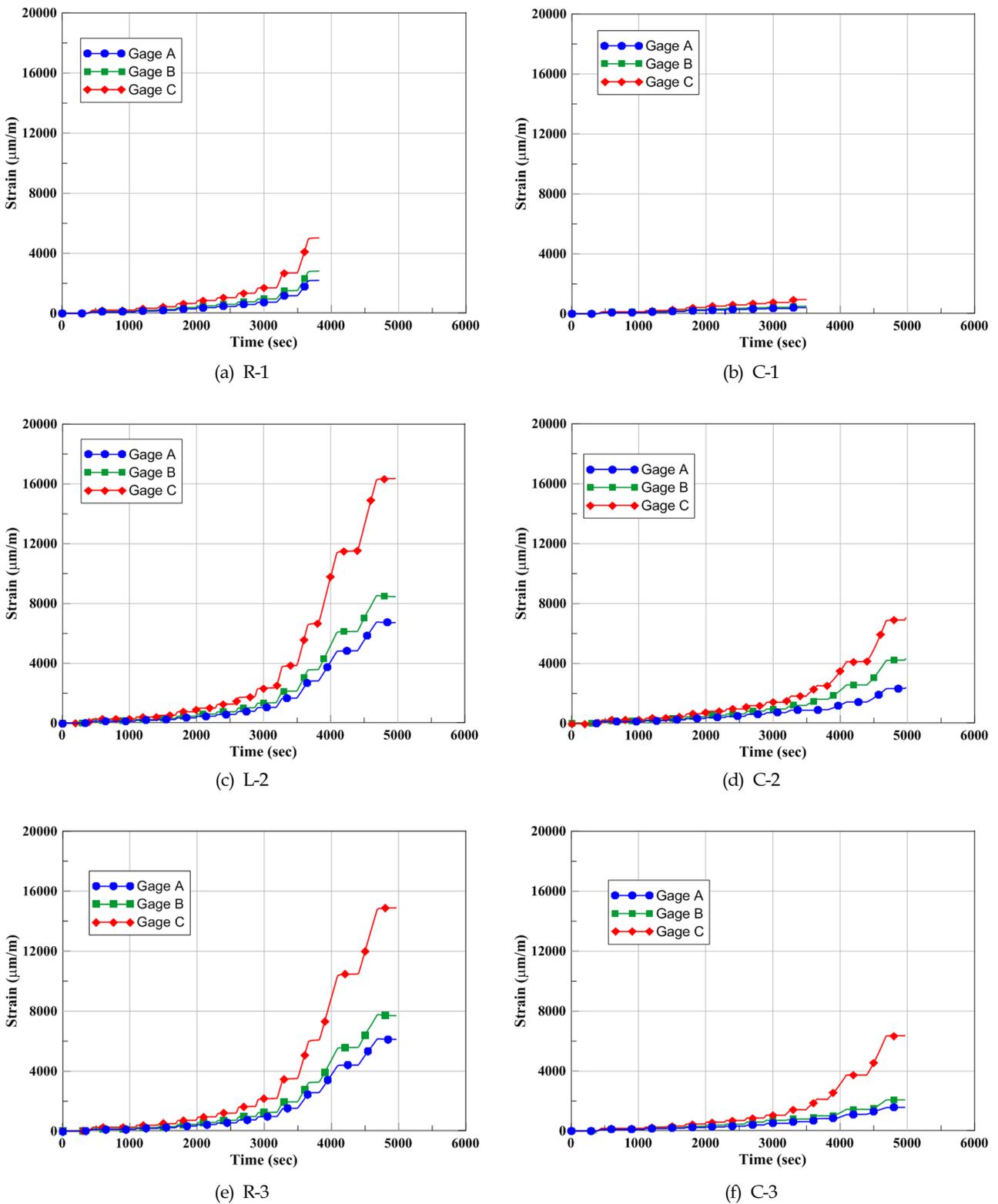
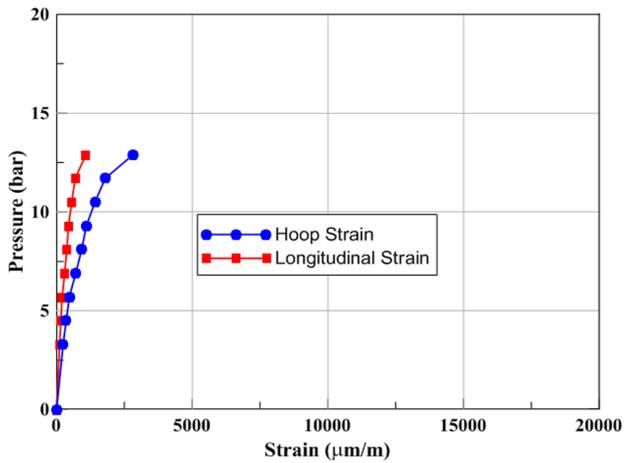


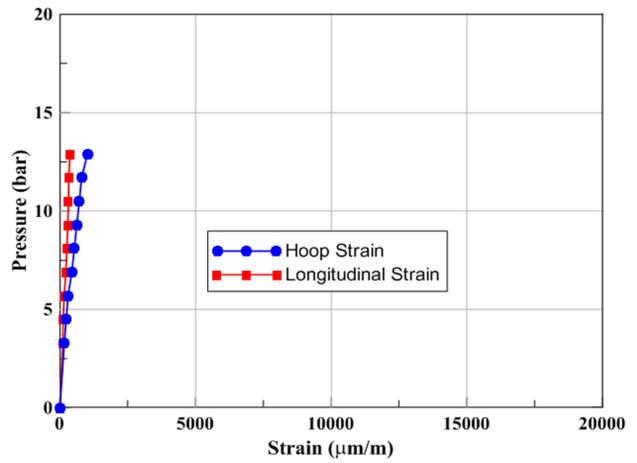
Fig. 4 Strains obtained for hydraulic test

비교적 변형할 공간적 여유가 있으므로 변형이 크게 얻어진 것으로 판단된다. 내조 제작에 사용된 SUS304는 항복이 비교적 낮으며 연신율이 큰 것에 반해 극한강도가 높은 특성으로 인해

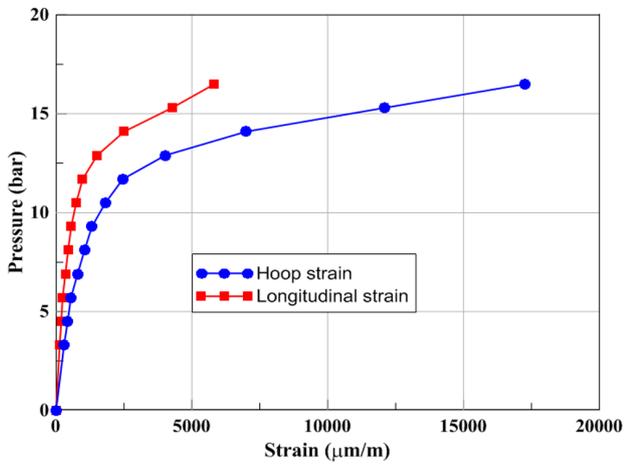
지속적으로 팽창만 하였으며, 시험 후 탱크 내조 해체 작업을 하여 파열로 인한 누수는 발생하지 않았음을 확인하였다(Yim et al., 2014).



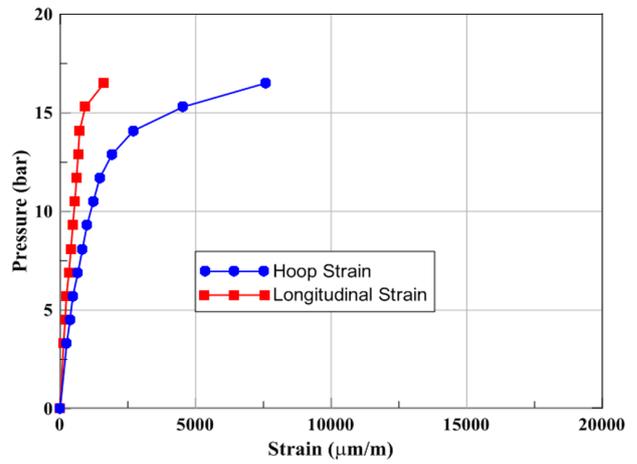
(a) R-1



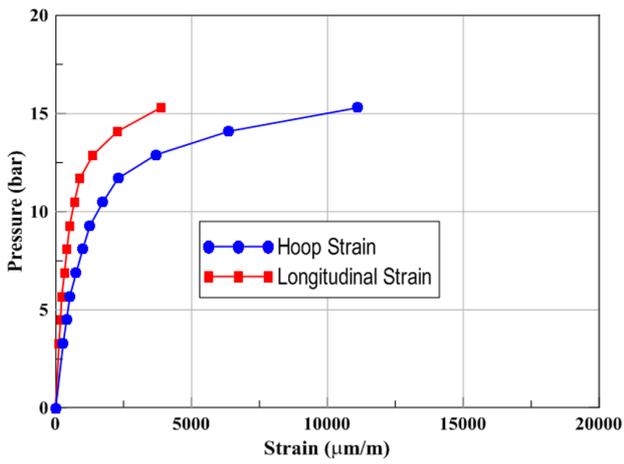
(b) C-1



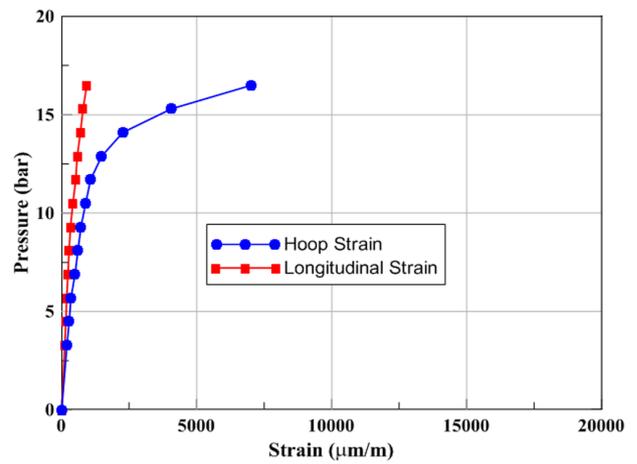
(c) L-2



(d) C-2



(e) R-3



(f) C-3

Fig. 5 Relationship between internal pressure and strain on inner tank

4. 결 론

본 연구에서는 LNG연료 추진 선박에 사용되는 IMO C 타입

탱크의 설계개념을 기본으로 하여 대형 컨테이너선 및 원유선으로의 실적선 확장 적용을 위한 Mock-up 탱크의 성능테스트를 진행하였다. 탱크 내조의 외벽에 스트레인 게이지를 부착하

여 압력에 따른 거동을 분석 하였으며 탄성영역 외에도 그 이상의 압력을 가해 소성변형에서의 내구성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 스트레인 게이지가 부착된 각 지점에서의 변형은 탱크 내조에 가해지는 압력에 비례하여 선형적으로 나타났다. 또한 탱크의 길이방향으로 부하되는 인장변형이 원주방향에 비해 작게 나타났으며, 길이방향에서 원주방향으로 갈수록 그 값이 크게 나타났다. 이는 동일한 내압을 받는 압력탱크의 응력계산 시 원주방향의 응력이 축방향의 응력에 비해 값이 크다는 것을 나타낸다.

(2) 동일한 측정 위치 및 압력에서의 원주방향의 변형과 축방향의 변형간의 비를 살펴보면 탄성영역인 0.8MPa내에서는 2.1~2.4로 나타났으며, 소성영역에서 압력이 커질수록 원주방향의 변형이 상대적으로 더 커지는 것으로 나타났다. 특히 길이방향의 중심에서 길이방향 변형에 대한 원주방향 변형의 비가 가장 크게 나타났다.

(3) 상단 및 하부에 비해 측면을 중심으로 변형이 진행되며 소성 변형으로 진행될수록 연신의 변화가 크게 나타났다. 높이에 따른 변형의 정도는 측면부, 상단부, 하단부 순으로 나타났으며 상단에서는 내압의 방향과 탱크 내 물과 탱크 자체에 작용하는 중력의 방향이 서로 상쇄되기 때문이며, 하단부에서는 자중에 의해 테스트 초기부터 완전 밀착되었지만 그에 반해 측면부에서는 비교적 변형할 공간적 여유가 있으므로 변형이 크게 얻어진 것으로 판단된다.

(4) 기존의 IMO C 타입 LNG탱크의 단열재로 적용되는 폴리우레탄 폼은 단열성능은 우수하나 내조의 팽창을 흡수하지 못하며 이를 보완하기 위해 충분한 내조 두께가 요구된다. 반면 본 연구에 적용된 단열재의 경우 압축 성능을 지니기 때문에 기존 탱크 내조 두께에 비해 얇게 제작될 수 있으며, 이는 탱크 제작비용 절감이라는 효과를 가져다 줄 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- American Bureau of Shipping (ABS), 2011. Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships.
- Det Norske Veritas (DNV), 2010. Greener Shipping in the Baltic Sea, Technical report.
- Det Norske Veritas (DNV), 2011, Greener Shipping in North America, Technical report.
- International Maritime Organization (IMO), 2010. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk.
- Kang, D.M., 1993. Stress Measurements Using Strain Gages. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 33(7), 661-670.
- Kim, J.H., Yoon, I.S., 2009. Stability Evaluation of Closed Mock-up Tank for Developing Korean LNG Carrier Cargo Containment System. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, 470-475.
- Kim, J.K., Kim, C.S., Kim, D.S., Yoon, I.S., 2000. Fatigue Crack Growth Behavior of Membrane Material for LNG Storage Tank at Low Temperature. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 14(1), 23-28.
- Kim, K.S., Boo, S.H., Park, C.Y., Cho, Y.G., Lee, J.S., 2008. An Experimental Study on the Tensile and Fatigue Strengths of SUS304L Lap Joint Weld at the Cryogenic Temperature. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(3), 96-102.
- Kim, T.W. Suh, Y.S., Jang, K.B., Chun, M.S., Lee, K.D., Cha, K.H., 2012. A Study and Design on Tank Container for Fuel Tank of LNG Fueled Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp. 504-511.
- Kim, Y.K., Yoon, I.S., Oh, B.T., Hong, S.H., Yang, Y.M., 2004. The Measurement of Real Deformation Behavior in Pilot LNG Storage Tank Membrane by using Strain Gage. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, 108-113.
- Kim, Y.K., Hong, S.H., Oh, B.T., Yoon, I.S., Kim, J.H., Kim, S.S., 2003. The Measurement of Membrane Deformation Behavior in Kogas Pilot LNG Storage Tank by the use of Mechanical/Electrical Sensor (I). *Proceedings of the Korean Institute of Gas Spring Conference*, 159-164.
- Kim, Y.K., Yoon, I.S., Oh, B.T., Woo, H.H., Yang, Y.M., 2010. Construction of KOGAS Closed Mock-up tank for LNG Carrier application. *Proceedings of the Korean Institute of Gas Autumn Conference*, 36-39.
- Lee, H.S., Yoon, J.H., Park, J.S., Yi, Y.M., 2005. A Study on Failure Characteristic of Spherical Pressure Vessel. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 882-888.
- Lee, J.H., Kim, Y.J. Hwang, S.Y., 2014. Numerical Model of Heat Diffusion and Evaporation by LNG Leakage at Membrane Insulation. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(6), 517-526.
- Yim, S.S., Jang, K.M., Lee, J.H., Choi, Y.R., Kim, K.B., 2014. A Study on the Propensity for the Deformation and Failure of a Small Pressurized Cylinder. *Journal of Energy Engineering*, 23(3), 146-149.

Study on Vertical Axis Water Turbine with Movable Dual Blades

Do-Hyung Kim* and Byoung-Kwon Ahn*

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

가변형 이중 날개를 갖는 수직축 수류터빈에 대한 연구

김도형* · 안병권*

*충남대학교 선박해양공학과

KEY WORDS: Renewable energy 신재생 에너지, Water turbine 수류 터빈, Vertical axis turbine 수직축 터빈, Dual blades 2중 날개, Numerical analysis 수치해석

ABSTRACT: In this paper, we propose a vertical axis water turbine with dual blades. A parametric study was conducted using numerical analyses. First, a two-dimensional finite-volume analysis with a commercial code was used to find the pitch angle of the main blade under different tip speed ratio conditions. Second, we developed a potential-based panel method to find the best configuration of the inner blades. Experimental tests were conducted at the circulating water channel of Chungnam National University. Various configurations of the dual blades were considered, and their performances were comparatively investigated. The results showed that the turbine with movable dual blades produces a constant torque and tip speed ratio at various flow rates.

1. 서 론

최근 화석연료 고갈에 따른 대체 에너지원 개발에 대한 국제적 관심이 높아지고 있다. 신·재생에너지는 지속 가능한 에너지 공급체계를 위한 미래에너지원을 그 특성으로 하며, 유가의 불안정과 기후변화협약의 규제에 대한 대응 등으로 그 중요성이 커지고 있다. 특히 지구온난화에 대해 세계적 공동 대처를 위해 체결된 기후변화협약의 후속조치로써 각국에 신재생에너지 사용 목표량이 할당되었으며, 이에 따라 국가별 신재생에너지 관련 목표달성을 위해 FIT(Feed in tariff)와 RPS(Renewable energy portfolio standard)를 시행하고 있다. 이 중 RPS는 발전사업자의 총 발전량과 판매사업자의 총 판매량의 일정비율을 신재생에너지원으로 공급 또는 판매하도록 의무화하는 제도이다. 500MW 이상의 시설을 보유한 발전 사업자에게 총 발전량에서 일정 비율을 신·재생에너지로 공급하도록 의무화하는 제도로 늘어나는 이산화탄소 배출량을 줄이고 신·재생에너지 시장을 키우기 위해 2000년 초반부터 영국, 스웨덴, 일본, 미국 등 전 세계적으로 도입하여 시행하여 왔고, 국내에서 2012년 1월 1일부터 시행되어 한전 발전자회사, 수자원공사 등 14개 대형 발전소를 공급의무자로 지정해 발전량의 일정부분을 신·재생에너지

로 생산하도록 의무화했다. 연도별 의무 공급량 비율은 2012년 신·재생에너지 공급 의무량을 2%로 시작해 2024년 이후에는 10%로 점점 그 비율이 늘어나도록 시행령에 명시되어 있으므로, 앞으로 신·재생 에너지 발전설비의 수요는 더욱 커질 전망이다.

본 논문에서는 발전 가능한 여러 신·재생에너지원 중 수력 발전에 초점을 맞추었고, 특히 발전소 방수로를 이용하고자 하였다. 국내 삼천포, 보령, 당진 등 화력 발전소 및 원자력 발전소에서 냉각수로 사용되고 방류되는 방수로에는 약 3000kW 이상의 수력에너지를 보유하고 있고, 유속이 2m/sec 이상의 고유량, 고유속의 유동 에너지가 존재하여 수력발전이 가능하며, 파랑 내습이 없고 해조류, 부유물 등의 충돌 문제가 발생하지 않아 해양조건보다 발전에 매우 유리한 조건이다. 국내 방수로 발전 사례로는 삼천포 화력발전소에서 수평축 방식의 프로펠러 터빈을 설치 시험하였으나 발전효율을 달성하지 못해 중단되었고, 화동 화력발전에서는 수직축 방식의 헬리컬 터빈이 설치 완료되어 추가설치를 진행 중에 있다. 그러나 방수로에 적합한 경제적이며 고효율적인 발전 시스템이 개발되지 않아 활용되지 못하고 있는 실정이며, 기술 국산화도 더딘 상태이다.

발전용 터빈은 유체의 흐름방향과 로터 축의 방향에 따라 크

Received 28 December 2015, revised 7 April 2016, accepted 22 April 2016
Corresponding author Byoung-Kwon Ahn: +82-42-821-6625, bkahn@cnu.ac.kr
© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

계 수평축 방식 터빈과 수직축 방식 터빈으로 구분된다. 수평축 방식의 터빈의 경우 유체의 흐름방향과 로터 축의 방향이 수평인 형태로서 요즘 흔히 볼 수 있는 풍력터빈이 대표적이다. 수직축 터빈의 경우 유체의 흐름방향과 로터 축의 방향이 수직인 형태로서 양력을 이용한 방식으로는 다리우스(Darrieus)터빈과 헬리컬(Helical)터빈을 들 수 있으며, 항력을 이용한 식으로는 사보니우스(Savonius)터빈이 있다. 사보니우스 터빈은 느린 유속에서 초기구동이 가능하고 큰 토크를 갖는 유리함이 있지만, 고속에서는 저항을 크게 받아 효율이 크게 감소하는 단점이 있다. 반면 다리우스 터빈은 유동 방향에 무관하게 작동되며 형상이 단순하여 중소형 터빈에 많이 사용되고 있으나, 초기 구동과 효율 측면에서 약점을 갖고 있다. 다리우스 터빈에 대한 연구는 파라메트릭 스테디를 통한 설계연구(Han et al., 2010), 캠형 상에 따른 공력특성(Kim et al., 2010) 등의 이론 연구가 진행되어 있다. 실험 연구로는 능동형 가변피치를 갖는 수직축 터빈에 대한 실험(Hantoro et al., 2011), 사보니우스와 다리우스를 같은 축에 설치한 Hybrid타입에 대한 실험 연구(Alam and Iqbal., 2009) 등 다양한 형태의 단일 날개를 갖는 터빈에 관한 실험이 이루어졌다. 반면 이중날개를 갖는 터빈에 대해서는 작동 종류 및 방법에 관한 이론적 특히는 상당 수 있으나, 이를 검증하는 실험 연구는 부족한 상황이다.

본 연구에서 개발하고자 하는 터빈은 다리우스 터빈과 사보니우스 터빈의 장점을 갖도록 하고자 하였다. 이를 위해 기존의 다리우스 터빈에 회전 위치마다 각도가 달라지는 내부 날개를 추가 설치 함으로써, 다양한 유속 범위에서 운용이 가능하고 높은 효율을 갖는 이중 날개 터빈 개발을 목표로 하였다. 수치 해석을 통해 터빈 시스템의 초기설계를 수행하고, 모형실험을 통해 성능과악에 중점을 두었다.

2. 설계변수 도출 및 평가

2.1 기본 설계 변수 도출 및 평가

수직축 터빈의 주요 설계변수는 터빈의 날개수(N), 솔리디티(Solidity, σ), 코드길이(C), 피치각 등이 있다. 먼저 터빈의 날개수가 적을수록 효율의 절대 값이 크지만 동력계수의 변화폭이 커지며, 날개수가 많아지면 반대되는 현상을 보인다(Han et al., 2010). 본 연구에서는 최대 효율 값이 크며 일반적으로 발전용 터빈에 많이 사용되는 날개수 3개를 선정하였다. 솔리디티는 날개회전 면적에 대한 블레이드면적의 비율로서 코드길이(C), 날개수(N), 터빈지름(D)을 이용하여 무차원화 한 식 (1)과 같다.

솔리디티는 동력계수와 TSR(Tip speed ratio)의 관계에 영향이 있다. 이때 TSR은 터빈의 각속도와 유입속도의 비로 나타나는 무차원 값으로 λ 로 표현한다(식 (2)). 솔리디티가 높을수록 최대 효율을 갖는 TSR이 낮아짐을 확인할 수 있으며 터빈이 회전하기 시작하는 속도인 초기 구동속도(Cut in speed) 또한 낮아진다(Lee and Lim., 2013). 본 연구에서 사용된 터빈은 내부 날개를 갖는 이중날개의 형태로서 기존 다리우스 터빈에 비해 높은 솔리디티 값을 갖는다. 이는 최대효율이 상대적으로 낮은 TSR에서 구동됨을 의미하고, 초기 구동속도 또한 낮게 형성되

는 특성이 있다.

$$\sigma = \frac{NC}{\pi D} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_0} \quad (2)$$

직경-스팬비는 터빈 날개의 스패길이(H)와 직경(D)의 비율을 나타낸다. 본 연구에서는 직경 0.6m을 갖고 외부날개 스패길이 0.5m, 내부날개 스패길이 0.3m로 선정하였다. 스패-코드비는 터빈 날개의 스패길이(H)와 코드길이(C)의 비율을 나타내며 이는 수치해석 시 3차원 영향을 고려하는 주요 변수가 된다. 하지만 다리우스 터빈의 경우 코드길이에 비해 스패길이보다 상당히 길며, 형상의 특별한 변화가 없는 경우, 대부분 2차원 해석이 가능하며 기존 연구되었던 결과를 토대로 2차원 해석에 보정값을 통한 3차원 예측도 가능하다(Li et al., 2010).

2.2 회전위치에 따른 상대속도 및 국부 영각 평가

Fig. 1에 회전하는 수직축터빈의 회전위치(Azimuth position, θ)에 따른 상대속도와 국부 영각(Angel of attack, α)를 도식화 하였으며, 식 (3)과 (4)에 국부영각과 터빈 날개에 작용하는 상대속도를 구하는 식을 나타내었다.

터빈 날개에 작용하는 상대속도(Relative velocity)는 유입 속도(V_0)와 회전속도(ω)의 합 벡터로 표현된다.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta + \lambda}\right) \quad (3)$$

$$V_R = V_0 \sqrt{1 + 2\lambda\cos\theta + \lambda^2} \quad (4)$$

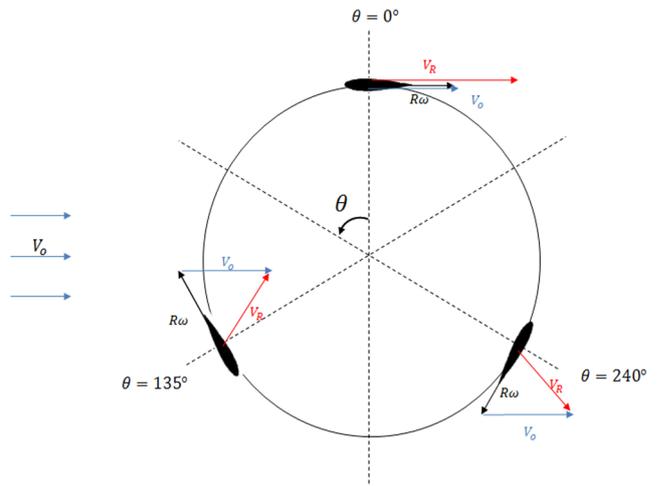


Fig. 1 Schematic of azimuthal position and velocity triangle

Fig. 2는 회전위치에 따른 국부 영각을 나타내며, TSR이 높을수록 국부 영각의 변화폭이 작아짐을 확인할 수 있다. 국부 영각은 터빈 날개의 토크 값 변화에 큰 영향을 주는 중요한 변수 중 하나이다. 너무 낮은 TSR은 회전 위치 당 날개의 받음각 변

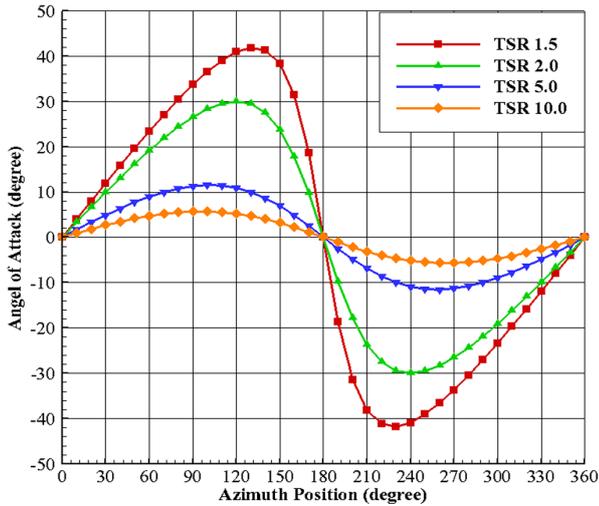


Fig. 2 Azimuth Position versus Angle of attack

화가 심하여 실속이 발생하게 되어 토크 감소가 일어나게 된다. 반대로 너무 높은 TSR은 스트럿과 샤프트 등 부가물에 의한 저항이 심할 뿐만 아니라 낮은 국부 영각을 갖기 때문에 원하는 토크를 얻을 수 없다. 국부 영각의 변화는 날개 주위의 유동에 큰 영향을 미치고 나아가 토크 값에 영향을 끼쳐 터빈효율을 심하게 변화시키므로 적절한 터빈 단면과 각도를 결정하는 것이 중요하다.

즉, 날개 형상과 피치각의 변화는 양력과 항력을 변화시켜 최종적으로 토크 및 터빈 효율에 영향을 미침으로서 터빈을 제작함에 있어 중요한 요소가 된다.

날개의 양항비를 높이기 위해 비대칭으로 설계할 경우, 특정 위치에서 대칭인 형상보다 높은 양력 값을 얻을 수 있고 이로 인한 토크 값의 향상을 얻을 수 있다. 하지만 터빈이 회전함에 따라 국부영각의 방향이 바뀌게 되어 불안정한 토크 값을 얻게 된다. 이는 여러 실험적인 수행과 수치해석적인 계산결과에서 확인할 수 있으며 대칭인 경우가 비대칭인 경우보다 전체적인 측

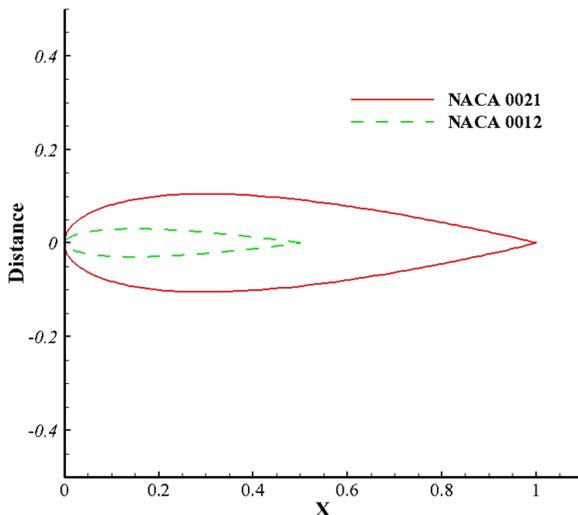


Fig. 3 NACA0012 (solid line) & NACA0021 (dotted line)

면에서 더 높은 효율을 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용한 날개는 캠버가 없는 대칭형상으로써 내부날개 NACA0012와 외부날개 NACA0021을 사용하였으며 형상정보는 Fig. 3에 비교하였다.

2.3 수치 해석을 통한 상세 설계

2.3.1 점성 수치 해석

다리우스 터빈 외부 날개의 피치각도에 대한 성능을 평가하기 위해 유동해석 상용프로그램인 ANSYS사의 FLUENT 15.0을 사용하여 2차원 터빈의 성능해석을 수행하였다. 계산 영역은 Fig. 4에 나와 있으며, Sliding mesh 구역의 지름(D)을 기준으로 터빈 전방과 측면으로 4D, 후방으로 10D로 설정하였고, 유입 속도는 1m/s로 설정하였다. 경계조건으로는 터빈 전방에는 Velocity Inlet, 후방에는 Pressure Outlet조건을 주었고, 터빈 회전을 구현하기 위해 Sliding mesh 기법을 이용하여 터빈날개부분에 회전 도메인 영역과 회전 도메인을 둘러싸고 있는 고정도메인 영역을 설정 하였다. 복잡한 유동을 갖는 터빈날개 주위에서 첫 번째 격자점의 거리는 난류모델에 적절한 $y^+ = 5$ 로 설정하였다. 격자는 ANSYS Workbench를 이용하여 자동격자로 나누었고, 격자수는 회전도메인이 약 3만개, 고정도메인이 약 8만개로 총 11만개 이다.

TSR에 따른 효율을 측정하기 위해 Sliding mesh 구역의 회전 시간을 TSR 1부터 TSR 3까지 0.5간격으로 변화를 주었다. 각각 TSR에 해당하는 각속도와 RPS(Revolution per second)을 계산한 뒤 2°회전 시에 걸리는 시간에 대한 계산 결과를 Table 1에 나타내었다.

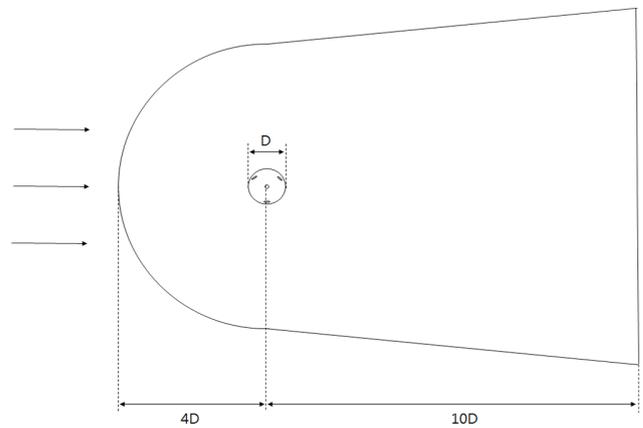


Fig. 4 Domain mesh

Table 1 Analysis parameter

TSR	ω [rad/s]	RPS [s]	2° Rotation time [s]
1	3.3	1.9	0.0106
1.5	5.0	1.3	0.0072
2	6.6	0.9	0.0056
2.5	8.3	0.8	0.0044
3	10	0.6	0.0034

점성 수치 해석의 기본 방정식은 Navier-Stokes 방정식이며 이산화 방식은 유한체적법으로 3차원 비압축성 비정상 유동조건하에서 해석이 수행된다. 비정상 유동조건에 지배방정식은 Newton유체 조건에서 다음 식 (5), (6)의 연속방정식과 운동량 방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \tag{6}$$

난류 모델은 복잡한 회전체 유동영역 해석에서 정확성이 높다고 알려진 k- ω SST (Shear stress transport) 모델을 사용하였고, 추가적인 해석 기법은 Table 2에 정리 하였다. 시간에 따라 터빈주위의 유동장과 토크의 크기를 알기 위해 Transient 해석을 하였으며, 한 Time step당 20번의 반복해석을 하여 값을 수렴시켰다.

Table 2 Numerical modeling parameters

Variable	Method
Pressure velocity coupling scheme	SIMPLE
Gradient	Green-gauss node based
Pressure	Second order
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy	Second order upwind
Specific dissipation	Second order upwind
Transient formulation	Second order implicit

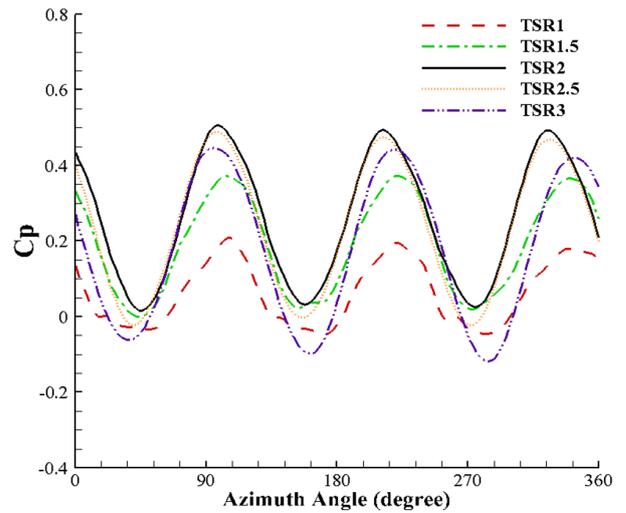
피치각이 없는 0도를 기준으로 하여, +5도와 -5도에 대해 수행하였고, 추가적인 +9도의 경우에 대해 계산하였다. 양의 방향은 터빈회전 반경을 기준으로 바깥을 의미한다.

터빈 효율은 식 (7)과 같이 토크계수와 TSR의 곱으로 정리할 수 있다. Fig. 5는 외부 날개의 피치각 변화에 따른 효율 특성을 보여주며, 피치각이 커짐에 따라 효율의 변화폭이 커지는 것을 확인하였으며, 각각의 피치각도에 대해 TSR=2인 경우 가장 높은 효율이 나타났다.

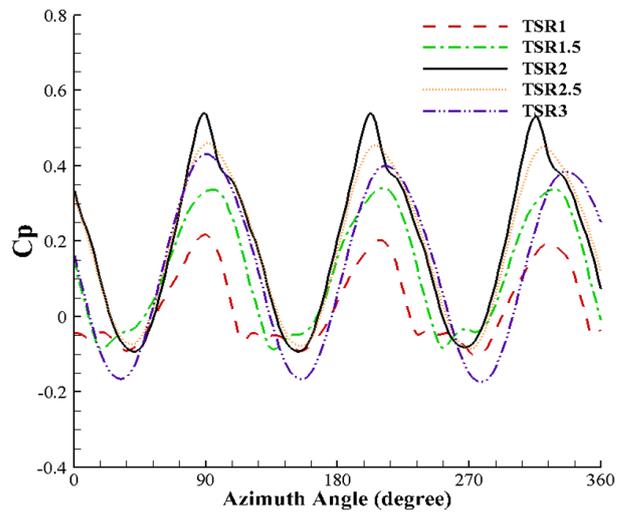
$$C_p = \frac{T\omega}{\rho H R V_0^3} = C_Q \cdot \lambda \tag{7}$$

여기서 C_p 는 터빈 효율계수, T 는 토크, ω 는 각속도, ρ 는 유체밀도, H 는 터빈 날개 스패ん 길이, R 는 터빈 반지름, V_0 는 유입 유속, C_Q 는 터빈 토크계수를 의미한다.

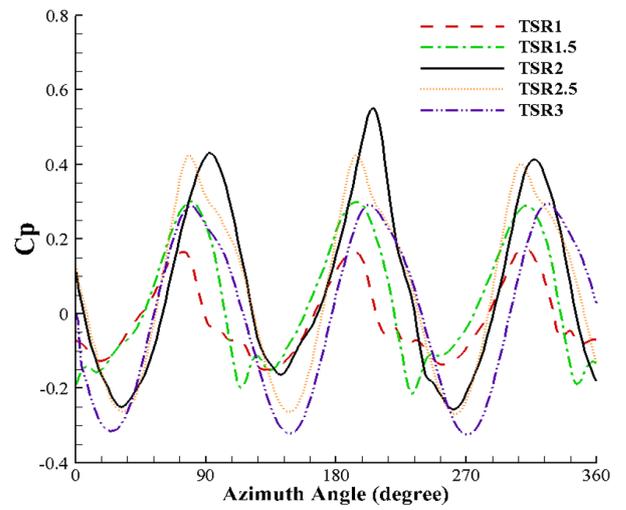
앞선 결과를 피치각 변화에 따른 TSR 대 평균 동력계수 값을 Fig. 6에 나타내었다. 터빈은 날개형상, 솔리디티 등에 따라 터빈시스템이 갖는 최적의 피치각도가 존재하게 되는데, 본 연구



(a) Pitch angle 0°



(b) Pitch angle 5°



(c) Pitch angle 9°

Fig. 5 Power coefficients with various pitch angles.

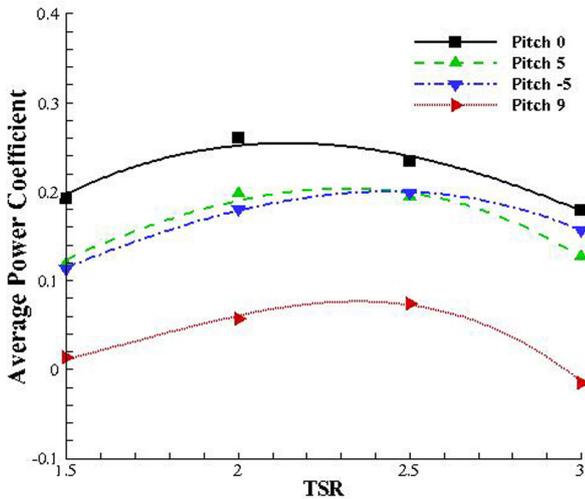


Fig. 6 Average Power Coefficient at various pitch angles

에서 설계된 터빈은 피치 각이 0도에서 가장 높은 효율을 갖는 것을 확인하였다.

2.3.2 비점성 수치 해석

내부 날개의 경우 형상, 코드길이, 외부 날개와의 거리 등 다양한 설계 변수를 고려해야 한다. 이를 위해 상대적으로 계산시간이 매우 짧은 비점성해석법(포텐셜 기반 패널법)을 사용하였다(Sakir Bal, 1997). 터빈날개에 작용하는 토크계수는 식 (8)로 날개가 갖는 양력 값과 항력 값에 영향을 받는 것을 알 수 있는데, 실속(Stall)이전에서는 양력이 주요변수로 작용하기 때문에 양력계수만을 비교하였다.

캠버가 없는 대칭형 단일 날개를 갖는 터빈의 경우 날개에 작용하는 상대속도에 대한 국부 영각이 회전함에 있어 방향이 바뀌어도 형상이 대칭이기 때문에 한 방향으로 해석이 가능하다(Fig. 1참조). 하지만 이중 날개의 경우 두 날개 사이에 간섭이 일어나 양력계수의 변화가 생기므로 회전함에 따라 받는 국부

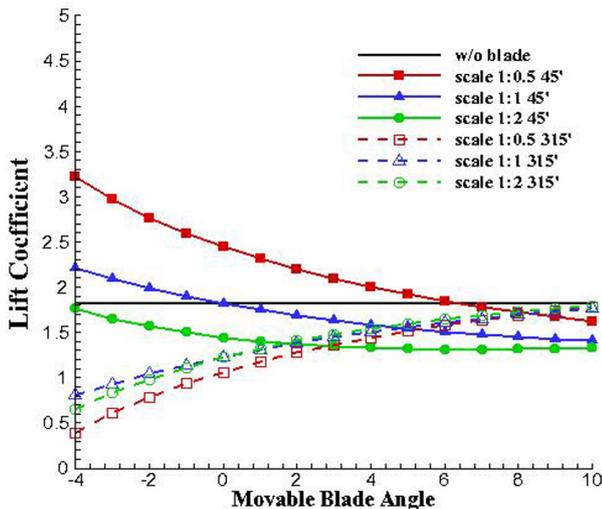


Fig. 7 Movable blade angle vs. lift coefficient for various scale

영각 방향을 고려해야 한다. 따라서 앞선 점성해석을 통해 얻은 최대효율을 갖는다고 판단한 TSR2조건일 때, 회전위치 45°와 315°에서 계산을 수행하였다. 각각 경우에 대해 내부날개의 크기와 이격 거리를 바꾸어 가며 양력계수를 계산 하였고, 이 결과를 토대로 효율을 평가하였다.

$$C_T = C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \tag{8}$$

$$L = \frac{d(\text{distance})}{c(\text{inner blade chord})} \tag{9}$$

먼저 내부 날개의 크기를 외부날개의 0.5, 1.0, 2.0 배로 변화시켜 가면서 계산된 양력계수 값을 Fig. 7에 비교하였다. 내부날개가 외부날개의 2배인 경우에는 단독(w/o blade) 일 때 보다 효율이 더 떨어지는 것을 확인하였으며, 0.5배인 경우에는 좌우 값의 변동이 크지만 전반적으로 단독일 때의 계수 값보다 큰 것을 확인 하였다. 이 결과를 토대로 내부날개의 크기는 외부날개에 비해 작은 것이 더 효율적이라 판단하였다.

내부날개의 크기를 결정한 상태에서 외부날개로부터 내부날개까지의 거리 변화에 대한 특성을 살펴보기 위해 Fig. 8과 같이 외부날개와 내부날개의 거리를(d) 내부날개의 코드길이(c)로 무차원한 L 값(식 (9))을 사용 하였다.

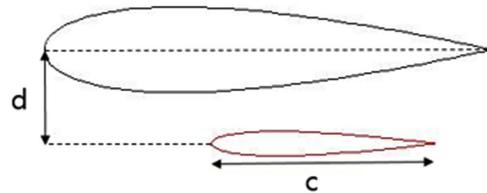


Fig. 8 Blade geometry

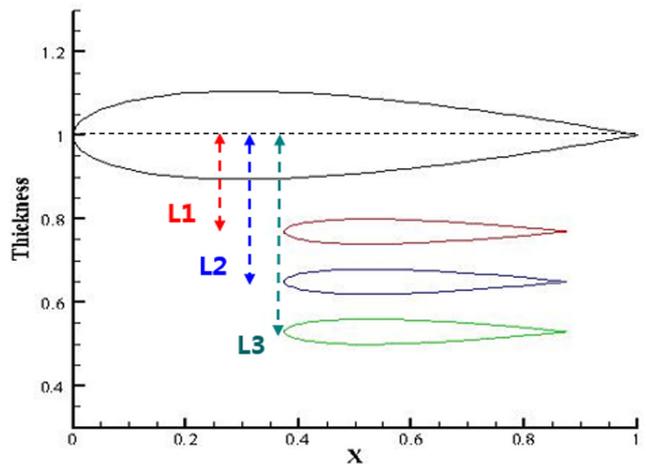


Fig. 9 Variable distance of inner blade

Table 3 Non-dimension distance

	L1	L2	L3
L	0.46	0.70	0.94

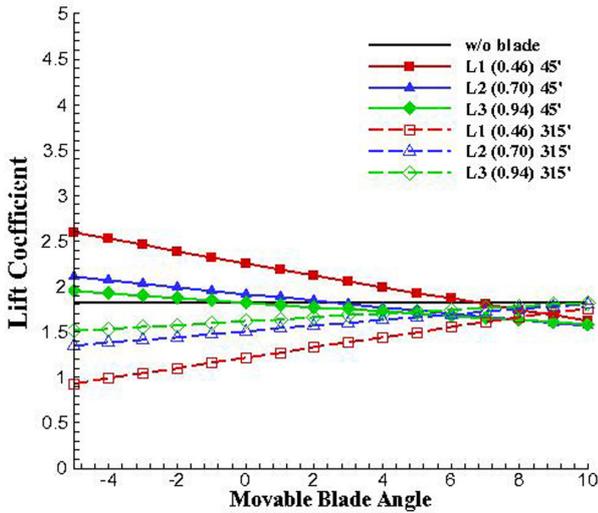


Fig. 10 Movable blade angle vs. lift coefficient

Fig. 9와 같이 3종의 이격 거리를 고려하였고, Table 3에 자세한 거리를 나타내었다. 각 이격 거리에 따라 내부날개를 -5°에서 10°까지 변화시켜 가며 양력계수를 구하였고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그래프의 실선은 45°, 점선은 315°에 대한 양력계수 값을 나타낸다. 그 결과, 내부날개의 각도에 따라 외부날개의 양력계수 값의 변화가 반대되는 경향이 확인 되었고, 각도에 따라 값이 크게 달라지는 특징을 볼 수 있었다.

45°에서는 날개 안쪽으로 들어간 -5°에서 간격이 좁을수록 큰 값을 갖지만, 315°에서는 바깥으로 벌어진 10°에서 간격이 멀수록 큰 값을 갖는 것을 확인하였다. 가장 큰 양력계수 값을 갖는 위치에서 내부날개가 없을 때(w/o blade)때와 비교해 보았을 때, 45°의 경우 가까운 위치 (1)에서 뚜렷하게 큰 값을 보이는 반면, 315°에서는 큰 차이가 나지 않았다. 이를 토대로 내부전체적인 효율을 따져 보았을 때 안정적인 값은 중간 (2)위치로 판단된다.

3. 실험 모형 및 장치

3.1 실험 모형

수치해석을 통해 얻은 결과를 토대로 개념 설계를 수행하였

Table 4 Specification

Item	Length [mm]
Turbine radius (R)	300
Outer blade span (H)	500
Outer blade chord (C)	100
Inner blade span (h)	300
Inner blade chord (c)	50

고, 이를 통해 도출된 개발 슈류터빈 모형의 주요 치수와 설계 모형은 Table 4와 Fig. 11 (a), (b)에 나타내었다. 터빈의 회전에너지 손실을 줄이기 위해 터빈 축 상하에 베어링을 설치하여 축의 흔들림을 제어하였고, 무게와 구조강도, 부식 등을 고려하여 알루미늄으로 제작하였다. 먼저 터빈의 단독성능 평가를 위해 외부날개만 있는 경우(Single), 내부 날개가 고정되어 있는 경우(Dual-fixed)와 가변하는 경우(Dual-movable)에 대해 실험을 수행하였다. 여기서 외부 날개로부터 내부 날개까지의 거리 변화에 대한 실험적 특성을 살펴보기 위해 L1, L2, L3 떨어져 있는 경우(Fig. 11 (c))에 대해 실험을 수행하였다.

3.2 실험 장치

모형실험 평가는 시험부 길이가 3m, 폭 1.2m, 깊이 1m인 충남대학교 회류수조(Fig. 12, Table 5)에서 실시하였고, 실험에 앞서 회류수조의 유속 정보에 대한 측정과 분석이 선행 되었다. 실험 유속은 0.1m/s 간격으로 1m/s까지 증가시키면서 토크, RPM(Revolution per minute)을 측정하여 분석하였다. 토크 측정은 10N-m급의 토크미터를 제작하여 HBM사의 MGCPlus를 통해 초당 50개의 데이터를 수집하였고, 타코미터로 RPM을 측

Table 5 CNU - CWC specifications

CNU - CWC specifications	
L × W × H	9.0 × 1.5 × 3.0 m
Test Section (L × W × H)	3.0 × 1.2 × 1.0 m
Flow speed	0.1 ~ 3.0 m/s
Depth (Max)	0.8 m

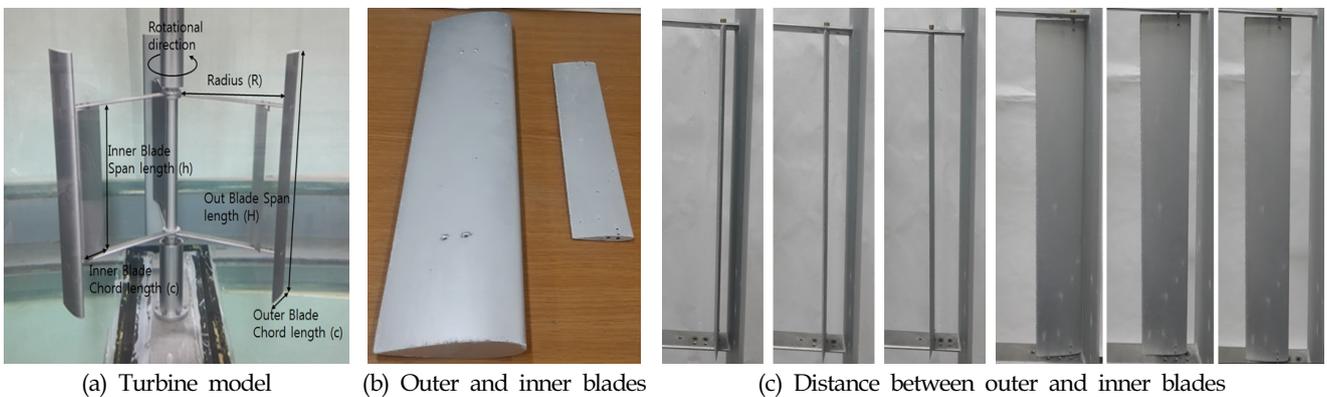


Fig. 11 Photographs of the turbine model (a), outer and inner blades (b), distance between outer and inner blades (c).

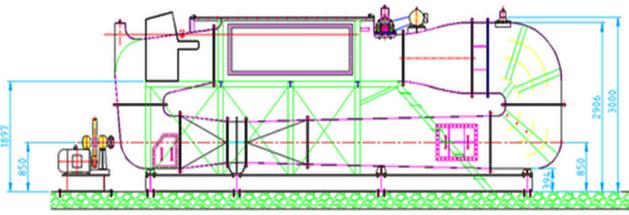


Fig. 12 Circulating water channel (CWC)



Fig. 13 Torquemeter and measuring equipments

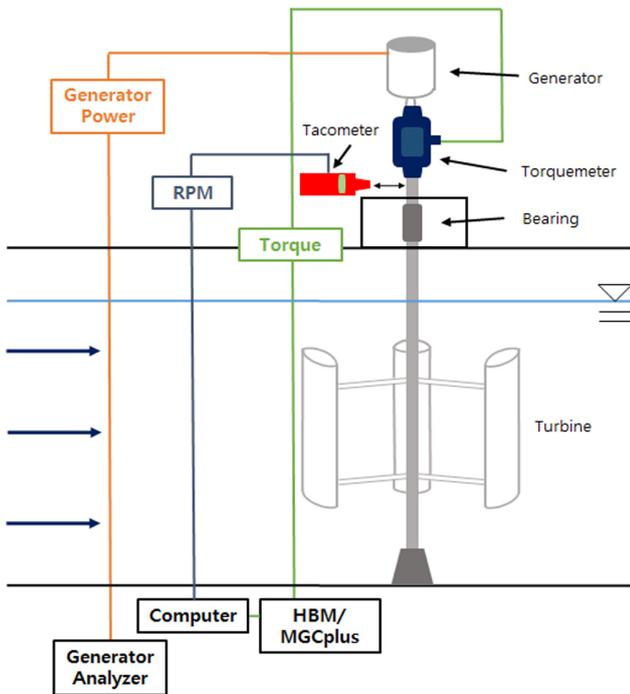


Fig. 14 Experimental apparatus

정하였다. Fig. 13은 토크미터와 실험측정 장비를 보여주며, Fig. 14는 실험 모형 및 계측 시스템 구성도를 보여준다.

4. 실험 결과 및 고찰

먼저 유속 변화에 따른 수류터빈의 회전수(RPM)를 측정하였다(Fig. 15). 시험 유속범위에서 외부날개 단독인 경우가 가장 높았으며, 내부날개 고정인 경우(Dual-fixed), 가변하는 경우(Dual-movable) 순으로 나타났다. 특히 내부 날개가 고정된 경우를 보면 외부날개 단독인 경우와 비슷한 회전수 증가를 보였

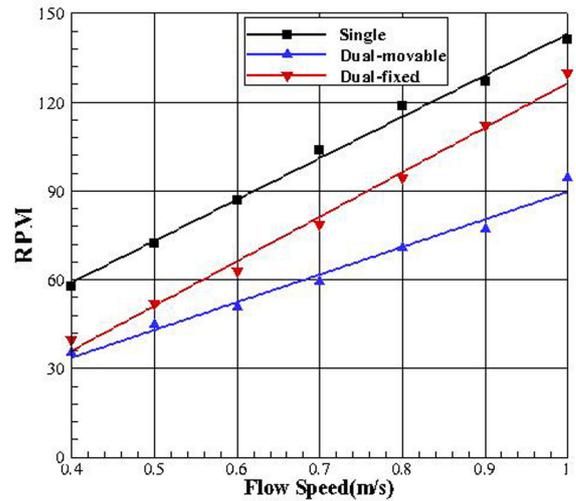
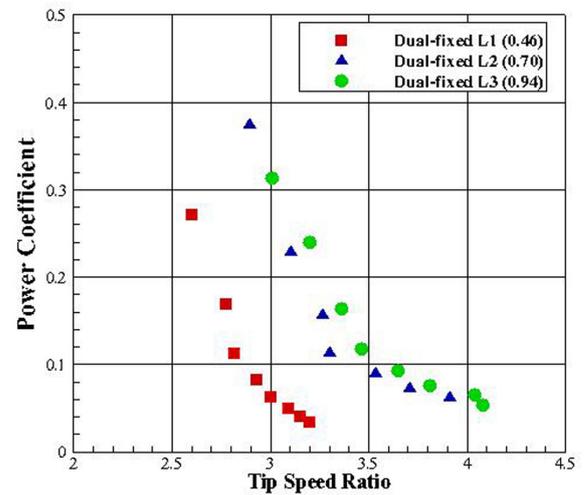
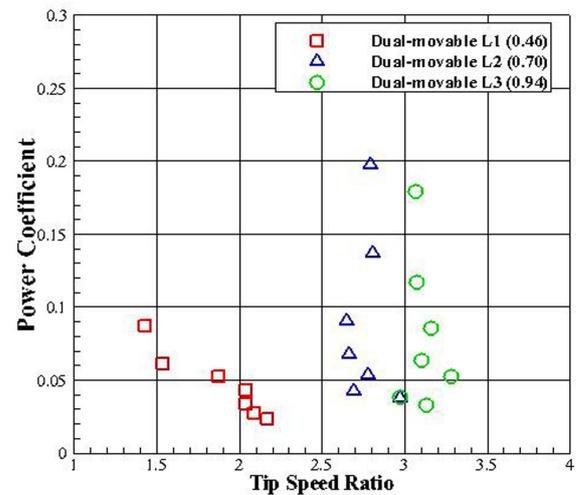


Fig. 15 Flow speed vs. RPM



(a) Dual-fixed blades



(b) Dual-movable blades

Fig. 16 Comparison of power coefficients

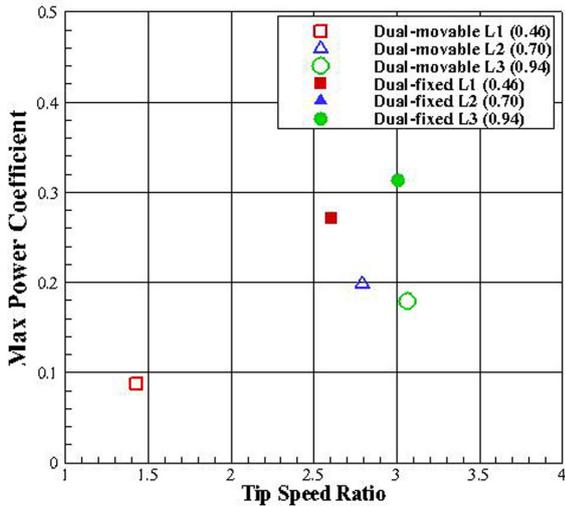


Fig. 17 Comparison of maximum power coefficients

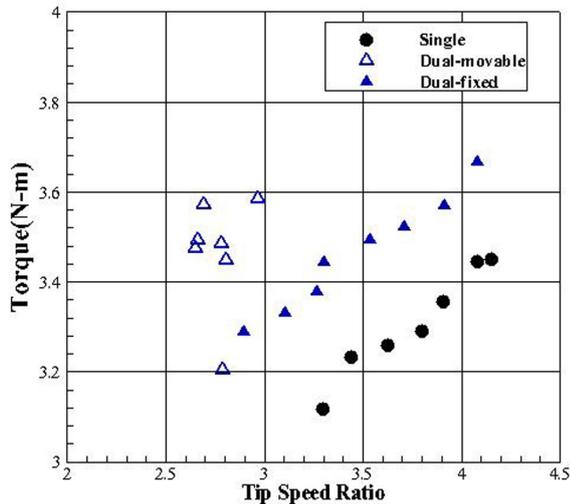


Fig. 18 Comparison of torque

지만, 내부 날개가 가변하는 경우에는 증가 비율이 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 16은 내부날개 고정인 경우, 가변하는 경우에 대해 내부 날개의 위치변화에 따른 효율특성을 TSR에 따른 터빈효율 (Turbine power coefficient)로 평가하였다.

먼저 Fig. 16 (a)는 내부날개 고정인 경우에 대한 TSR에 따른 터빈 효율 값으로 외부날개로부터 L2 위치에 내부날개가 설치된 경우 가장 큰 효율이 발생함을 알 수 있다. Fig. 16 (b)는 내부날개가 가변하는 경우로 고정된 경우에 비해 전체적으로 효율은 낮아지며, 특히 L2, L3인 경우 TSR의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 즉 가변하는 내부날개의 영향으로 시험유속 범위에서 일정한 TSR이 나타남을 알 수 있다. 특징적으로 두 경우 모두 이격 거리가 증가 할수록 높은 TSR에서 작동됨이 관측 되었다.

Fig. 17에 위 두 방식의 각 경우에 대해 최대 효율을 비교하

였다. 가변하는 경우에 비해 고정된 경우에서 더 큰 터빈 효율 값이 측정 되었고, 두 경우 모두 L2에서 가장 큰 효율을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 실험결과 최대 효율을 갖는 내부 날개 위치와 비점성 해석 결과를 통해 얻은, 효율이 안정적이라고 생각되는 내부 날개 위치가 일치 하는 것으로 나타났다.

Fig. 18은 최대 효율이 나타나는 외부날개 단독, 내부날개 고정과 가변인 경우에 대해 시험 유속 범위에서의 해당 TSR에서 예측된 토크 값을 보여준다. 먼저, 내부날개가 추가된 경우 외부날개 단독일 때 보다 더 큰 토크값을 갖는다는 것이 확인 되었고, 외부날개 단독인 경우와, 내부날개 고정인 경우 TSR이 증가하면서 토크 값도 함께 증가하는 것이 확인 되었다. 하지만 내부날개 가변의 경우 전체 유속범위에서 TSR과 토크 값이 일정하게 나타나는 것이 확인 되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 신재생에너지 의무할당제 제도에 적극 대응할 수 있는 수류터빈을 개발하기 위해, 저속에서 초기구동이 가능하고, 다양한 유속에서 일정한 토크를 갖는 다리우스 터빈과 사보니우스 터빈의 장점을 결합한 가변형 이중 날개를 갖는 수류터빈을 개발하고자 하였다.

먼저 내부날개의 자유도 여부에 상관없이 외부날개와의 이격 거리는 최대효율 특성에 영향을 미침을 확인하였다. 또한 내부 날개가 고정된 경우 상대적으로 낮은 유속에서 최대효율이 나타남을 확인하였고, 내부날개가 가변하는 경우에는 넓은 유속 범위에서 TSR과 작용하는 토크 값이 일정하게 나타남을 확인하였다. 이는 유속이 일정하지 않는 곳에서도 특정 TSR 부근에서 일정한 수준의 토크 값을 기대할 수 있음을 의미하고, 토크의 크기를 증가 시킬 수 있다면 넓은 유속범위에서 안정적인 발전을 기대 할 수 있다.

후 기

본 연구는 CNU학술연구진흥사업(2015-1340-01)의 지원으로 수행되었음.

References

Alam, M.J., Iqbal, M.T., 2009. Design and Development of Hybrid Vertical Axis Turbine. Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE'09. Canadian Conference on. IEEE. 1178-1183.

Han, J.S., Hyun, B.S., Choi, D.H., Mo, J.O., Kim, M.C., Lee, S.H., 2010. Study on Design of Darrieus-type Tidal Stream Trubine Using Parametric Study. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering. 3(4), 241-248.

Hantoro, R., Utama, I.K.A.P., Sulistyono, E.A., 2011. An Experimental Investigation of Passive Variable-Pitch

- Vertical-Axis Ocean Current Turbine. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 43(1), 27-40.
- Kim, J.W., Kim, S.W., Han, J.H., Lee, D.H., 2010. Aerodynamics Analysis for Camber Design of Vertical Wind Turbine Blade. Korean Fluid Machinery Association, 2010-098, 474-476.
- Lee, Y.T., Lim, H.C., 2013. Numerical Study on the Optimized Blade Shape of Darrieus Type Vertical-axis Wind Turbine. *Proceedings of 16th Wind Engineering Institute of Korea Symposium*, 183-188.
- Li, Y., Sander, M., Calisal, S.M., 2010. Modeling of Twin-turbine Systems with Vertical Axis Tidal Current Turbine : Part1-Power Output. *Ocean Engineering*, 37, 627-637.
- Sakir Bal., 1997. A Potential Based Panel Method for 2-D Hydrofoils. *Ocean Engineering*, 26, 343-361.

Design of Pitch Limit Detection Algorithm for Submarine

Jong-Yong Park*, Nakwan Kim* and Yong-Ku Shin**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering,
Seoul National University, Seoul, Korea

**Agency for Defense Development, Changwon, Korea

잠수함의 종동요각 한계예측 알고리즘 설계

박종용* · 김낙완* · 신용구**

*서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

**국방과학연구소

KEY WORDS: Submarine 잠수함, Safety operational envelope 안전운항영역, Envelope protection system 운항영역 보호시스템, Dynamic trim algorithm 동적 트림 알고리즘, Artificial neural network 인공신경망

ABSTRACT: An envelope protection system is a control system that allows a submarine to operate freely using its own operational envelope without exceeding the structural limit, dynamic limit, and control input limit. In this paper, an envelope protection system for the pitch angle of a submarine is designed using a dynamic trim algorithm. A linear quadratic regulator and artificial neural network are used for the true dynamics approximation. A submarine maneuvering simulation program developed using experimental data is used to validate the designed envelope protection system. Simulation results show the effectiveness of the designed envelope protection system.

1. 서 론

안전운항영역은 운동체가 안전하게 운항할 수 있는 영역을 의미하고 항공기나 잠수함 등의 다양한 운동체에 대하여 적용 가능한 개념이다. 잠수함의 경우 안전운항영역은 선속, 심도, 종동요각에 의해서 정의된다. 깊어질수록 증가하는 수압으로 인하여 발생할 수 있는 선체의 손상을 방지하기 위한 최대안전심도가 설정되고, 수면 근처에서 운항하는 경우 파 강제력 및 흡입력으로 인해 선체가 수면위로 끌리는 것을 방지하기 위하여 최소안전심도가 설정된다. 과도한 종동요각으로 인해 추진계통이 손상을 받게 되거나 다른 예기치 못한 손상을 입을 가능성이 있으므로 이를 방지하기 위해 종동요각 제한이 설정된다. 이러한 제한을 벗어나는 것을 방지하기 위하여 속도 별 운항가능심도에 대한 안전운항영역 도표를 작성하고 조타수에게 전달 및 숙지 시키거나, 심도변경 시 완만한 심도경로를 생성 한 후 이를 추종하도록 잠수함을 제어하는 방식으로 종동요각을 보호하는 등의 다소 수동적인 방법으로 제한된 변수(한계변수)들을

보호하고 있다.

운항영역 보호시스템은 운동체의 구조적 한계, 동역학적 한계, 제어입력의 한계를 초과하지 않고 고유의 운항영역 내에서 자유롭게 운항할 수 있도록 하는 시스템이다(Shin et al., 2010). 운항영역 보호시스템은 보수적으로 접근할 수 밖에 없는 운항영역의 경계를 넘지 않도록 보장함으로써 운항사고를 줄일 수 있고, 영역의 경계를 충분히 활용한 효율적인 임무수행을 가능하게 한다. 또한 제한되어야 하는 상태들을 모니터링 하고 제어해야 하는 조종사의 업무부담을 경감시킬 수 있다.

운항영역 보호시스템에 관한 연구는 주로 항공분야에서 활발하게 이루어졌다. 조종면이 유압장치를 통해 연결되어 있는 방식이었던 1980년대 이후 전기적 신호로 조종면을 제어하는 Fly-by-wire 방식으로 바뀜에 따라 자동제어 및 운항영역 보호에 대한 개념이 중요하게 부각되었다. 운항영역 보호 알고리즘으로는 Fixed horizon prediction, 동적 트림 알고리즘, Peak response estimation, Non-iterative adaptive limit estimation 등이 있다(Sahani, 2005). Fixed horizon prediction은 한계변수의 어떠한

Received 1 October 2015, revised 27 January 2016, accepted 22 April 2016

Corresponding author Nakwan Kim : +82-02-880-7293, nwkim@snu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on the proceeding of warship technology and weapons system seminar 2015 in Busan.

시간간격 후의 값을 예측하는 방법이다(Bateman, 1998). 미래의 한계변수 값을 예측하기 위해서 한계변수와 제어입력, 그리고 시간간격간의 관계식이 필요하다. 이 알고리즘은 1초 남짓한 미래의 값밖에 예측할 수 없다는 단점이 있다. 동적 트림 알고리즘은 Horn et al.(1998)이 제안한 개념으로, 준 정상상태에 대한 개념을 이용하여 한계변수가 한계점을 초과하게 되는 제어입력을 추정하는 방식이다. 다양한 운항 조건에도 적용할 수 있는 on-line training 방식의 인공지능망을 이용한 adaptive 동적 트림 알고리즘이 Horn et al.(2002), Unnikrishnan et al.(2003), Yavrucuk et al.(2002), Yavrucuk(2003)에 의하여 제안되었다. Peak response estimation은 과도응답을 갖는 동역학에 적합한 알고리즘이다. 이 알고리즘은 제어입력으로 인해 즉각 발생하는 과도응답의 고점을 추정하는 알고리즘으로, 로터 허브(Rotor hub) 모멘트와 플랩핑(Flapping)의 한계를 피하기 위한 알고리즘으로 사용되었다(Horn and Sahani, 2004). Non-iterative adaptive limit estimation은 adaptive 동적 트림 알고리즘에서 필요로 하는 반복계산을 제거한 알고리즘으로, Gursoy and Yavrucuk(2015)에 의해서 개발되었다. 위와 같은 알고리즘을 이용하여 설계된 운항영역 보호시스템이 고정익 항공기, 회전익 항공기, 무인항공기 등 다양한 항공기에 적용한 사례가 문헌에 다수 보고되고 있다(Yavrucuk et al., 2009; Shin et al., 2011; Falkena et al., 2011; Gursoy and Yavrucuk, 2013). 앞서 설명한 항공분야와 같이 능동적인 운항영역 보호시스템 설계 및 적용에 관한 사례는 잠수함의 조종 및 제어에 관련된 문헌에 보고된 바 없다.

본 연구에서는 중동요각에 대한 잠수함의 운항영역 보호시스템을 설계하기 위하여 중동요 운동을 모사하기 위한 추정모형을 만들고 오차 방정식을 구성하였다. 오차 방정식을 안정화시키기 위한 선형보상기는 Linear quadratic regulator(LQR)을 이용하여 설계하였다. 모델링 불확실성을 추정하기 위하여 인공지능망을 이용한 적응제어를 설계하였다. 한계예측 알고리즘은 제한하고자 하는 변수의 운동특성을 고려하여 설계하여야 한다. 잠수함의 중동요는 일정한 선미제어관각에 과도응답을 갖지 않고 정상상태로 수렴하는 경향을 갖고 있기 때문에 이러한 운동특성에 적합한 동적 트림 알고리즘을 이용하여 한계예측 알고리즘을 작성하였다. 잠수함의 심도제어 시뮬레이션에 설계된 운항영역 보호시스템을 적용시켜 그 성능을 확인하였다.

2. 운항영역 보호시스템 설계

운항영역 보호시스템은 한계예측과 한계회피로 구성할 수 있다. 한계예측은 잠수함의 상태와 제어입력을 바탕으로 운항영역 경계를 벗어나지 않도록 하는 제어입력의 한계 및 제어입력의 여유(Margin)를 계산한다. 한계회피는 한계예측에서 계산된 제어입력의 한계를 초과하지 않도록 하는 과정을 의미한다. Hard 운항영역보호(Hard envelope protection) 방식은 주로 오토파일럿으로 운동체를 제어하는 경우에 사용되는 방법으로, 심도제어기와 같은 하위제어기(Low level controller)에서 출력되는 제어입력 신호에 제한을 걸어주는 방법으로 한계를 회피하는 방법이다. Soft 운항영역보호(Soft envelope protection) 방

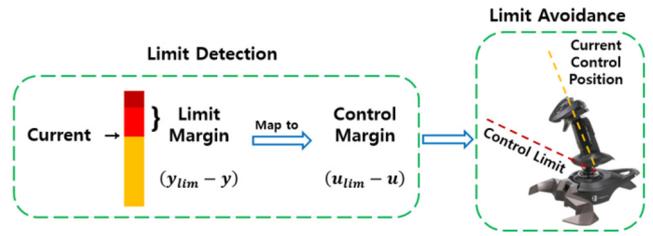


Fig. 1 Conceptual diagram of the envelope protection system

식은 조종사가 수동으로 운동체를 제어하는 경우에 사용되는 방법으로, 한계예측에서 계산된 제어입력의 여유를 바탕으로 스틱을 통한 진동신호나 시각 및 청각적인 신호를 통해 경고를 하여 조종사가 스스로 제한을 벗어나지 않도록 하는 방식이다. 따라서 soft 운항영역보호방식의 운항영역 보호시스템은 한계에측 알고리즘 설계까지를 운항영역 보호시스템 설계라고 정의할 수 있다. 본 연구는 조타수가 수동으로 잠수함을 제어한다고 가정하고 Soft 운항영역보호방식의 운항영역 보호시스템을 설계하였다. Fig. 1에 운항영역 보호시스템의 개념도를 도시하였다.

2.1 추정모형 및 오차방정식

한계예측을 하기 위해서 제한하고자 하는 변수의 실제동역학을 추정해야 한다. 본 연구에서 제한하고자 하는 변수는 중동요각이다. 잠수함의 중동요는 다음과 같은 일반적인 비선형 함수로 표현할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = f(\mathbf{x}, \delta_e) \tag{1}$$

여기서, θ 는 중동요각, \mathbf{x} 는 중동요에 영향을 미치는 상태벡터, δ_e 는 선미제어관각으로 잠수함의 중동요 운동의 제어입력을 의미한다. 식 (1)에서 표현된 비선형 함수는 모델링 된 항과 모델링 되지 않은 항으로 나눌 수 있다. 모델링 된 항을 선형동역학으로 가정하고 모델링 불확실성을 $\Delta(\mathbf{x}, \delta_e)$ 라 정의하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = -a_1\dot{\theta} - a_2\theta + b\delta_e + \Delta(\mathbf{x}, \delta_e) \tag{2}$$

식 (2)의 a_1, a_2, b 라고 표현된 계수는 잠수함 중동요 운동의 선형 유체력 미계수와 관련된다. 잠수함의 중동요를 추정하기 위하여, 식 (2)의 모델링 된 항으로 표현된 선형동역학을 근사함수 $\hat{f}(\hat{\mathbf{x}}, \delta_e)$ 로 설정하고 선형보상기신호 v_{dc} 와 적응제어신호 v_{ad} 를 더해준 추정모형을 구성하면 식 (3)과 같다.

$$\ddot{\theta} = \hat{f}(\hat{\mathbf{x}}, \delta_e) - v_{dc} + v_{ad} = -a_1\dot{\hat{\theta}} - a_2\hat{\theta} + b\delta_e - v_{dc} + v_{ad} \tag{3}$$

여기서, $\hat{\theta}$ 는 추정모형의 중동요각을 의미하고, $\hat{\mathbf{x}}$ 는 $[\hat{\theta} \ \dot{\hat{\theta}}]^T$ 를 의미한다. 식 (3)에서 식 (2)를 빼주면 식 (4)와 같은 오차동역학을 구성할 수 있다.

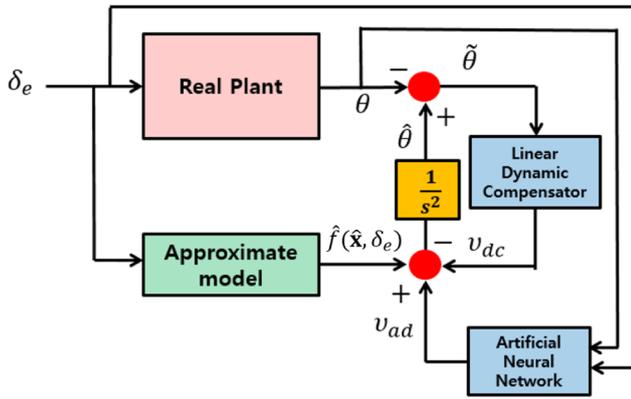


Fig. 2 Block diagram of the true dynamics approximation

$$\ddot{\theta} = -a_1 \dot{\theta} - a_2 \theta - v_{dc} + (v_{ad} - \Delta(\mathbf{x}, \delta_e)) \quad (4)$$

여기서 $\tilde{\theta}$ 는 추정모형과 잠수함의 중동요각 간의 오차로 $\hat{\theta} - \theta$ 를 의미한다. 식 (4)를 행렬식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} - Bv_{dc} + B(v_{ad} - \Delta(\mathbf{x}, \delta_e)) \quad (5)$$

여기서,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e} = [\tilde{\theta} \quad \dot{\tilde{\theta}}]^T, \quad B = [0 \ 1]^T$$

적용제어신호 v_{ad} 가 모델링 불확실성 $\Delta(\mathbf{x}, \delta_e)$ 를 완벽하게 보상하고 선형보상기 v_{dc} 가 오차방정식을 안정화 시키도록 설계가 되어있다면 오차는 0으로 수렴하게 되고, 결과적으로 추정모형의 중동요각이 실제 잠수함의 중동요각을 잘 추정하게 된다. 잠수함의 실제동역학을 추정하기 위한 알고리즘을 블록선도로 표현하면 Fig. 2와 같다.

2.2 선형보상기

선형보상기는 식 (5)에 표현되어 있는 오차방정식을 안정화시키기 위하여 필요하다. 만약 적용제어신호가 모델링 불확실성을 잘 추정한다고 가정하면, 식 (5)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} - Bv_{dc} \quad (6)$$

선형보상기의 성능은 식 (6)에서 표현된 오차벡터와 선형보상기신호의 크기로 판별할 수 있다. 최소화 시켜야 하는 두 변수를 이차식 형태로 표현한 성능지수를 식 (7)과 같이 설정해 보자.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{e}^T \mathbf{Q}\mathbf{e} + v_{dc}^T R v_{dc}) \quad (7)$$

\mathbf{Q} 와 R 은 각각 오차벡터와 선형보상기신호의 가중치 행렬이다. 본 연구에서는 위와 같은 이차식 형태의 성능지수를 최소화 시킬 수 있는 제어입력을 도출하는 알고리즘인 LQR제어기법을 사용하여 선형보상기를 설계하였다. 성능평가함수 J 가 최소가 되도록 하는 선형보상기신호는 식 (8)에 표현된 Riccati방정식을 풀어서 행렬 P_1 을 계산하고, 이를 식 (9)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}^T P_1 + P_1 \mathbf{A} - P_1 B R^{-1} B^T P_1 + \mathbf{Q} = 0 \quad (8)$$

$$v_{dc} = -(\mathbf{R}^{-1} B^T P_1) \mathbf{e} \quad (9)$$

2.3 적응제어기

적응제어기는 오차방정식에서 표현되어 있는 모델링 불확실성을 추정하기 위하여 사용된다. 인공신경망은 구조를 알 수 없는 함수를 주어진 입력 변수들 간 비선형 조합을 이용하여 근사화 하기 때문에 예측능력이 우수하다. 본 연구에서는 Park et al.(2015)의 연구를 참고하여 단일은닉층(Single hidden layer)을 갖는 인공신경망을 사용하여 적응제어기를 설계하였다. 적응제어기의 출력인 적응제어신호는 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{ad} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \mu) \quad (10)$$

여기서 μ 는 인공신경망의 입력값을 의미하며, 모델링 불확실성이 어떤 변수들의 함수가 될지 고려하여 설정해 주어야 한다. 본 연구에서는 심도변경 중 수평면 방향 운동은 거의 없다고 가정을 하여 중동요 운동에 영향을 미치는 변수를 식 (11)과 같이 설정하였다.

$$\mu = [u \ w \ q \ \theta \ \delta_e]^T \quad (11)$$

σ 는 활성화(Activation) 함수를 의미하며 본 연구에서는 시그모이드 함수가 사용되었다. \hat{V} 는 입력가중행렬을, \hat{W} 는 출력가중행렬을 의미하며 리야프노프 안정성 이론을 기반으로 유도된 적응제어법칙을 통하여 매 시간마다 업데이트된다. 본 연구에서는 Yavrucuk et al.(2002)의 연구를 참고하여 식 (12), (13)과 같은 적응제어법칙을 사용하였다.

$$\dot{\hat{V}} = -\Gamma_V [\mu \mathbf{e}^T P_2 B \hat{W}^T \sigma_z + \lambda \|\mathbf{e}^T P_2 B\| \hat{V}] \quad (12)$$

$$\dot{\hat{W}} = -\Gamma_W [(\sigma - \sigma_z \hat{V}^T \mu) \mathbf{e}^T P_2 B + \lambda \|\mathbf{e}^T P_2 B\| \hat{W}] \quad (13)$$

여기서 λ 는 적응제어신호가 발산하는 것을 방지하기 위해 사용되는 감쇠계수이다. Γ_V 및 Γ_W 는 적응제어신호의 이득이다. σ_z 는 σ 를 활성화함수의 변수로 편미분 한 값이다. P_2 는 식 (14)에 표현된 리야프노프 방정식의 해를 의미한다.

$$A^T P_2 + P_2 A + Q_2 = 0 \quad (14)$$

2.4 동적 트림 알고리즘

동적 트림 알고리즘은 준 정상상태에 대한 개념을 이용하여 제한되어야 하는 변수가 한계를 초과하지 않도록 하는 제어입력을 추정하는 방식이다. 준 정상상태에서는 종동요각의 시간에 대한 미분값이 모두 0이 된다. 이를 식으로 표현하면 식 (15)와 같다.

$$\dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0 \quad (15)$$

식 (15)와 같은 가정을 추정모형의 동역학을 표현한 식 (3)에 적용하면 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta}_{DT} = \frac{b\delta_e - v_{dc} + v_{ad}(\hat{\theta}_{DT}, \delta_e)}{a_2} \quad (16)$$

여기서 $\hat{\theta}_{DT}$ 는 동적 트림 가정을 적용한 추정모형의 종동요각을 의미한다. 정의에 따르면 제어입력한계는 동적 트림의 반응이 설정된 한계치와 같아질 때의 제어입력값을 의미한다. 종동요각 한계의 상한값을 θ_{lim}^{upper} , 하한값을 θ_{lim}^{lower} 로 정의하자. 식 (16)을 이용하여 종동요각 한계의 상한값과 하한값에 상응하는 제어입력의 상한값 $\delta_{e,lim}^{upper}$ 과 하한값 $\delta_{e,lim}^{lower}$ 을 표현하면 식 (17), (18)과 같다.

$$\delta_{e,lim}^{upper} = \frac{a_2 \theta_{lim}^{upper} + v_{dc} - v_{ad}(\theta_{lim}^{upper}, \delta_{e,lim}^{upper})}{b} \quad (17)$$

$$\delta_{e,lim}^{lower} = \frac{a_2 \theta_{lim}^{lower} + v_{dc} - v_{ad}(\theta_{lim}^{lower}, \delta_{e,lim}^{lower})}{b} \quad (18)$$

위의 식을 보면, 비선형 방정식의 양변에 구해야 하는 변수가 들어가 있기 때문에 반복계산을 이용해야 한다. 본 연구에서는 고정점 반복법(Fixed-point iteration)을 이용하여 해를 구하였다. 반복계산의 초기값은 바로 전 스텝에서 계산된 해를 이용하는 것이 효과적이라는 Unnikrishnan et al.(2003)의 연구를 인용하여 본 연구에 적용하였다.

3. 시뮬레이션

잠수함이 심도제어를 하는 한 가지 상황에 대해 종동요각의 한계를 각기 다르게 설정하였을 때 계산되는 제어입력의 한계와 제어입력의 여유를 도출해 보는 방법으로 설계된 운항영역 보호시스템의 성능을 확인해 보았다. 심도변경시 발생하는 종동요각은 대략 20° 정도에서 제한하는 것이 관례이지만, 최대 종동요각은 실제적으로 거의 적용되지 않고 있고 보편적으로 종동요각을 5°~10°로 제한하고 있다(Burcher and Rydill, 1995).

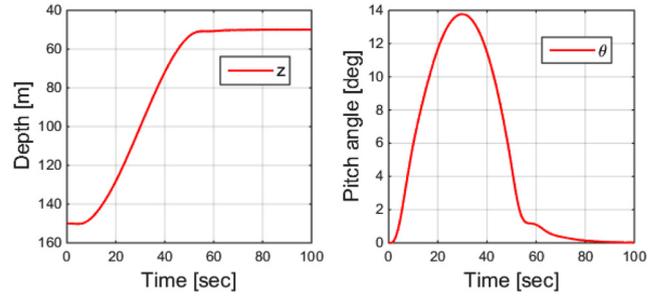


Fig. 3 Depth control simulation results

본 논문에서는 종동요각의 한계를 $\pm 10^\circ$ 와 $\pm 20^\circ$ 로 설정하였다. 잠수함의 선속은 12m/s, 선미제어판의 최대각도는 30° 로 설정하였고 제어판의 동역학은 식 (19)와 같은 1차 동역학으로 가정하였다.

$$T\dot{\delta}_e + \delta_e = \delta_{ec} \quad (19)$$

여기서 시정수 T 는 0.5로 가정하였다. 초기심도 150m에서 목표심도 50m까지 100m의 심도변경을 하는 상황을 가정하였고, 이때 발생하는 최대 종동요각의 크기가 약 14° 가 되도록 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 심도제어 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같다.

종동요각은 선수가 위를 향하는 경우를 양수로, 심도의 경우 연직 하방을 양의 z 축으로 설정하였다. 첫번째 그래프를 통하여 잠수함이 오버슈트가 거의 없이 초기심도 150m에서 목표심도 50m로 심도변경을 하는 것을 알 수 있고, 이때 발생하는 최대 종동요각 크기가 약 14° 라는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 심도제어 시뮬레이션과 같은 상황에서 종동요각의 한계를 10° 로 설정하였을 때 계산되는 제어입력의 한계와 제어입력의 여유를 도출해 보았다. 제어입력의 여유 u_{margin} 는 식 (20)과 같이 정의하였다.

$$u_{margin} = \delta_e - u_{lim}^{upper} \quad (20)$$

Fig. 4의 첫번째 그래프는 설정된 종동요각 한계와 잠수함의 종동요각, 그리고 추정모형의 종동요각을 보여준다. 잠수함의 종동요각을 보면 약 16초부터 43초까지 약 27초간 제한된 종동요각 10° 를 벗어나는 것을 알 수 있다. 두번째 그래프는 제어입력인 선미제어판각과 한계예측으로 계산되는 제어입력한계의 상·하한값을 보여준다. 결과를 보면 약 8초부터 38초까지 선미제어판각이 제어입력의 상한값을 초과하는 것을 알 수 있다. 세번째 그래프는 계산된 제어입력의 여유를 보여준다. 제어입력의 여유를 보면 초기 10° 에서 잠수함의 종동요각이 제한된 값에 가까워지면서 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 종동요각은 약 16초부터 설정된 한계를 초과하게 되고 제어입력의 여유는 약 8초부터 음수를 갖게 된다. 이는 잠수함이 현재의 제어입력을 가지고 운동한다면 종동요각 한계를 초과한다고 8초라는

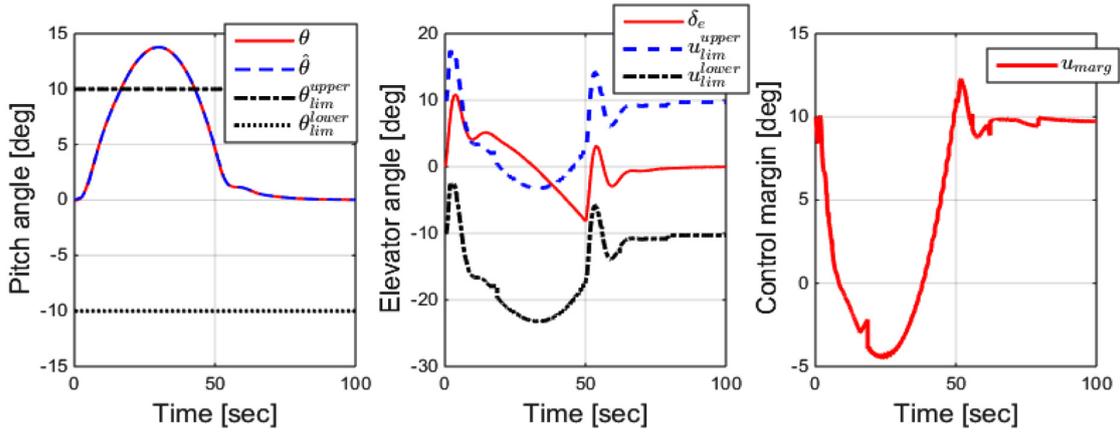


Fig. 4 Control input limit and control margin calculation results in the depth control simulation (pitch limit : 10°)

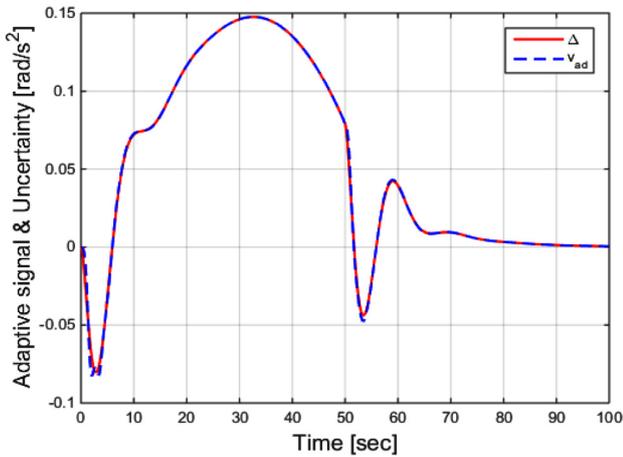


Fig. 5 Comparison of the modeling uncertainty and the adaptive signal

시점에 미리 예측하기 때문에 제어입력의 여유가 음수를 갖게 된다고 해석된다. 만약 제어입력의 여유의 크기와 경향성을 함수로 하는 한계회피 알고리즘을 작성하여 적용한다면 중동요각 한계를

초과한다고 예측하는 8초라는 시점 이전에 한계회피를 수행할 것이기 때문에 중동요각 한계를 초과하지 않을 것이라 예상된다.

Fig. 5는 모델링 불확실성과 적응제어신호를 비교한 결과를 보여준다. 결과에서 알 수 있듯 적응제어신호가 모델링 불확실성을 잘 보상하는 것을 알 수 있다. 모델링 불확실성을 잘 보상하기 때문에 Fig. 4에서 추정모형의 중동요각 $\hat{\theta}$ 이 잠수함의 실제 중동요각을 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 다음으로 앞선 심도제어 시뮬레이션과 동일한 조건에서 중동요각 한계를 20°로 설정했을 때의 한계예측 계산결과를 다시해 보았다.

결과에서 알 수 있듯 중동요각 한계가 20°로 설정되었고, 중동요각이 설정된 한계를 벗어나지 않기 때문에 제어입력의 여유가 전체 시뮬레이션 시간에 걸쳐 항상 양수임을 알 수 있다. Fig. 4 ~ Fig. 6에 수록된 시뮬레이션 결과들에서 알 수 있듯이, 운항영역 보호시스템은 중동요각과 설정된 한계치간의 여유를 실질적으로 중동요각을 제어하는 선미제어관의 여유로 맵핑 (Mapping)시켜 준다. 따라서, 기존 시스템은 중동요각 한계치를 넘지 않도록 직관에 의존하여 제어관을 조작해야 하는 반면, 운항영역 보호시스템은 보다 정량적인 수치를 기반으로 제어 가능하게 함으로써 잠수함 운항안정성 향상에 기여할 수 있다.

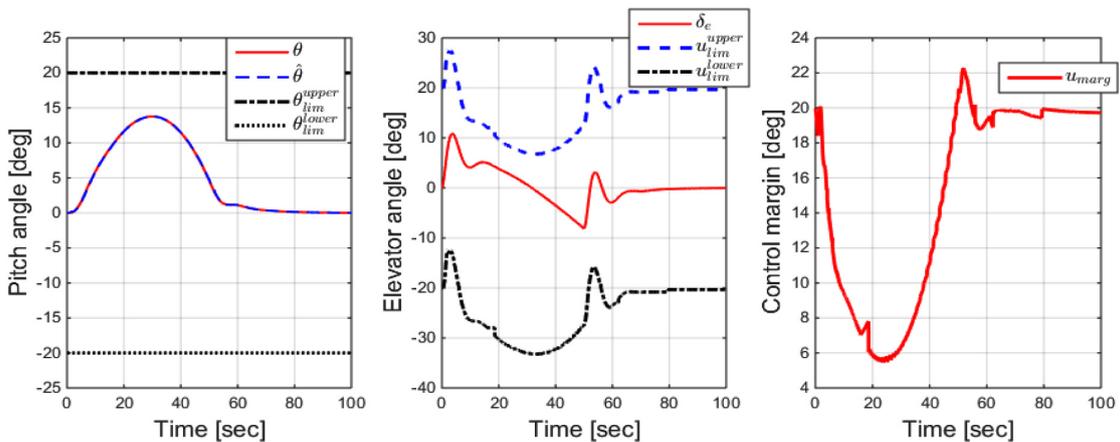


Fig. 6 Control input limit and control margin calculation results in the depth control simulation (pitch limit : 20°)

4. 결 론

본 논문에서는 잠수함의 중동요각을 보호할 수 있는 운항영역 보호시스템을 설계하였다. 잠수함의 실제 중동요 운동을 추정하기 위하여 인공신경망과 LQR제어기법이 사용되었다. 한계 변수가 한계치를 넘게 되는 제어입력한계를 예측하기 위해서 동적 트림 알고리즘을 사용하였다. 제어입력한계를 구하기 위한 방정식의 해는 고정점 반복법을 이용하여 구하였다. 설계된 운항영역 보호시스템을 Gertler 모형을 이용하여 작성된 잠수함 조종운동 시뮬레이션 프로그램에 적용하였다. 적용 결과 운항영역 보호시스템이 잠수함의 운동을 예측하며 제어입력의 한계와 여유를 효과적으로 예측하는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 연구는 잠수함에서 정의하는 한계변수 중 중동요각만을 보호하는 시스템을 설계한 것이므로, 속도 및 심도와 같은 다른 한계 변수도 보호할 수 있는 시스템 설계에 대한 추가적 연구가 필요하다. 한계회피 알고리즘을 추가하고 완전 무인화하여 조타수의 조종없이 설정된 제한을 넘지 않는 것을 보장하는 Carefree maneuvering 시스템을 구축하는 것도 의미있을 것이라 판단된다. 또한 본 연구에서 사용한 동적 트림 알고리즘 외에 Peak response estimation과 같은 다른 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과를 얻는다면, 잠수함에 최적화된 운항영역 보호시스템 설계방법에 대한 유의미한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

부 록

설계된 운항영역 보호시스템 성능검증을 위한 시뮬레이션은 서울대학교에서 개발한 잠수함 조종성능해석 프로그램인 Submarine maneuvering simulation program(SMSP)를 통하여 수행되었다. 대상 잠수함은 개념설계 단계에 있는 잠수함으로서, 길이 대 직경비가 10.9이고 세일의 리딩에지가 선미로부터 0.75L에 위치한다. 잠수함의 제어를 위하여 선수 제어판과 선미에 십자형으로 된 제어판을 장착하고 있다. SMSP는 식 (21)과 같은 6자유도 운동방정식을 기반으로 작성되었다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v}-wp+ur-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w}-uq+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})] &= Z \\
 I_x\dot{p}+(I_z-I_y)qr+m[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)] &= K \\
 I_y\dot{q}+(I_x-I_z)rp+m[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)] &= M \\
 I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq+m[x_G(\dot{v}-wp+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)] &= N
 \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)의 우변은 잠수함에 작용하는 외력을 의미한다. SMSP의 잠수함에 작용하는 외력은 Gertler and Hagen(1967)의 연구를 참고하여 작성되었고, 이를 식으로 표현하면 식 (22)~(27)과 같다.

- 전후동요:

$$\begin{aligned}
 X &= X_{HS} + X_C + X_p + \frac{\rho}{2}L^2[X_{uu}'u^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^3[X_{uv}'uv + X_{vr}'vr + X_{wq}'wq] + \frac{\rho}{2}L^4[X_{qq}'q^2 + X_{rr}'r^2 + X_{rp}'rp]
 \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, $X_{HS} = -(W-B)\sin\theta$, $X_C = \frac{\rho}{2}L^2u^2[X_{\delta_r\delta_r}'\delta_r^2 + X_{\delta_b\delta_b}'\delta_b^2 + X_{\delta_c\delta_c}'\delta_c^2]$

- 좌우동요:

$$\begin{aligned}
 Y &= Y_{HS} + Y_C + \frac{\rho}{2}L^2[Y_{uv}'uv + Y_{v|v}'v|v] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^3[Y_{v\dot{v}}'\dot{v} + Y_{vq}'vq + Y_{vp}'vp + Y_{wr}'wr + Y_r'ur + Y_p'up + Y_{v|p}'v|p] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^4[Y_{\dot{r}}'\dot{r} + Y_{\dot{p}}'\dot{p} + Y_{p|p}'p|p| + Y_{pq}'pq + Y_{qr}'qr]
 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, $Y_{HS} = +(W-B)\cos\theta\sin\phi$, $Y_C = \frac{\rho}{2}L^2u^2[Y_{\delta_r}'\delta_r]$

- 상하동요:

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{HS} + Z_C + \frac{\rho}{2}L^2[Z_{uw}'uw + Z_{w|w}'w|(v^2+w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^3[Z_{uq}'uq + Z_{v|q}'v|q| + Z_{vp}'vp] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^4[Z_{\dot{q}}'\dot{q} + Z_{pp}'p^2 + Z_{rr}'r^2 + Z_{rp}'rp]
 \end{aligned} \quad (24)$$

여기서, $Z_{HS} = +(W-B)\cos\theta\cos\phi$, $Z_C = \frac{\rho}{2}L^2u^2[Z_{\delta_b}'\delta_b + Z_{\delta_c}'\delta_c]$

- 횡동요:

$$\begin{aligned}
 K &= K_{HS} + K_C + K_p + \frac{\rho}{2}L^3[K_{uv}'uv + K_{v|v}'v|v|] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^4[K_p'up + K_r'ur + K_{\dot{v}}'\dot{v} + K_{vq}'vq + K_{wp}'wp + K_{wr}'wr] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^5[K_{\dot{p}}'\dot{p} + K_{\dot{r}}'\dot{r} + K_{qr}'qr + K_{pq}'pq + K_{p|p}'p|p|]
 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, $K_{HS} = (y_GW - y_BB)\cos\theta\cos\phi - (z_GW - z_BB)\cos\theta\sin\phi$, $K_C = \frac{\rho}{2}L^3u^2[K_{\delta_r}'\delta_r]$

- 중동요:

$$\begin{aligned}
 M &= M_{HS} + M_C + \frac{\rho}{2}L^3[M_u'u^2 + M_w'uw + M_{w|w}'w|(v^2+w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^4[M_{\dot{w}}'\dot{w} + M_{vr}'vr + M_{vp}'vp + M_q'uq + M_{v|q}'v|q|] \\
 &+ \frac{\rho}{2}L^5[M_{\dot{q}}'\dot{q} + M_{pp}'p^2 + M_{rr}'r^2 + M_{rp}'rp + M_{q|q}'q|q|]
 \end{aligned} \quad (26)$$

여기서, $M_{HS} = (x_GW - x_BB)\cos\theta\cos\phi - (z_GW - z_BB)\sin\theta$,

$$M_C = \frac{\rho}{2}L^3u^2[M_{\delta_b}'\delta_b + M_{\delta_c}'\delta_c]$$

- 선수동요:

$$\begin{aligned}
 N &= N_{HS} + N_C + \frac{\rho}{2} L^3 U^2 \left[N_v' uv + N_{|v|}' |v| \right] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^5 \left[N_{\dot{r}}' \dot{r} + N_{\dot{p}}' \dot{p} + N_{pq}' pq + N_{qr}' qr + N_{r|p|}' r|p| \right] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 \left[N_{\dot{v}}' \dot{v} + N_p' up + N_r' ur + N_{|v|}' |v| r \right] \quad (27)
 \end{aligned}$$

여기서, $N_{HS} = +(x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_B B) \sin \theta$, N_C

$$= \frac{\rho}{2} L^2 u^2 \left[N_{\delta_r}' \delta_r \right]$$

동유체력 모형의 유체력 미계수는 수조모형시험과 풍동모형시험의 결과를 이용하여 도출되었다. 저항시험-평면운동장치시험(Planar motion mechanism test)-원추형 시험(Coning motion test)이 수조에서 수행되었고, 연성사항시험-제어판시험이 풍동에서 수행되었다. 모형시험 데이터로부터 유체력 미계수를 도출하기 위해 최소자승법(Least square)-황금분할법(Golden section method)-Fourier 해석과 같은 데이터 해석방법이 사용되었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(UE120033DD)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bateman, A.J., Ward, D.G., Barron, R.L., Whalley, M.S., 1998. Piloted Simulation Evaluation of a Neural Network Limit Avoidance System for Rotorcraft. 24th Atmospheric Flight Mechanics Conference, 4252.
- Burcher, R., Rydill, L.J., 1995. Concepts in Submarine Design(2), Cambridge University Press.
- Falkena, W., Borst, C., Chu, Q.P., Mulder, J.A., 2011. Investigation of Practical Flight Envelope Protection Systems for Small Aircraft. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 34(4), 976-988.
- Gertler, M., Hagen G.R., 1967. Standard Equations of Motion for Submarine Simulation. NSRDC Report 2510.
- Gursoy, G., Yavrucuk, I., 2013. Engine Limit Detection and Avoidance for Helicopters with Multiple Limits. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Boston, MA.
- Gursoy, G., Yavrucuk, I., 2015. Non-Iterative Adaptive Limit and Control Margin Estimation with Concurrent Learning. Proceedings of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, SciTech 2015, Kissimmee, FL.
- Horn, J.F., Calise, A.C., Prasad, J.V.R., 1998. Flight Envelope Limiting Systems using Neural Networks. In Proceedings of the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Boston, MA, 741-751.
- Horn, J., Calise, A.J., Prasad, J.V.R., 2002. Flight Envelope Limit Detection and Avoidance for Rotorcraft. Journal of the American Helicopter Society, 47(4), 253-262.
- Horn, J.F., Sahani, N., 2004. Detection and Avoidance of Main Rotor Hub Moment Limits on Rotorcraft. Journal of Aircraft, 41(2), 372-379.
- Sahani, N.A., 2005. Envelope Protection Systems for Piloted and Unmanned Rotorcraft. The Pennsylvania State University, Doctor's Thesis.
- Shin, H.H., Lee, S.H., Kim, Y.D., Kim, E.T., Seong, K.J., Choi, H.S., 2010. Design of Flight Envelope Protection System on Velocity of Aircraft. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 38(4), 327-334.
- Shin, H.H., Lee, S.H., Kim, Y., Kim, E.T., Sung, K.J., 2011. Design of a Flight Envelope Protection System using a Dynamic Trim Algorithm. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 12(3), 241-251.
- Park, J.-Y., Kim, N., Yoon, H.K., Kim, S.Y., Cho, H., 2015. Depth Controller Design for Submerged Body Moving near Free Surface Based on Adaptive Control. Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(3), 270-282.
- Unnikrishnan, S., Prasad, J.V.R., Calise A.J., 2003. Adaptive Dynamic Trim Prediction for Limit Detection and Avoidance. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Austin, TX.
- Yavrucuk, I., Prasad, J.V.R., Calise, A.J., 2002. Carefree Maneuvering Using Adaptive Neural Networks. Proceedings of the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Monterey, CA.
- Yavrucuk, I., 2003. Adaptive Limit Margin Detection and Limit Avoidance. Georgia Institute of Technology, Doctor's Thesis.
- Yavrucuk, I., Unnikrishnan, S., Prasad, J.V.R., 2009. Envelope Protection for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 32(1), 248-261.

Consideration of Launch and Recovery Systems for Operation of Underwater Robot from Manned Platform

Ki-Young Lee*

*Department of Mechanical Engineering & Naval Architecture, Korea Naval Academy, Changwon, Korea

유인플랫폼에서의 수중로봇 운용을 위한 진수 및 회수 체계 고찰

이기영*

*해군사관학교 기계조선공학과

KEY WORDS: Underwater robot 수중로봇, Launch and recovery system(LARS) 진수 및 회수 장치, Unmanned underwater vehicle (UUV) 무인잠수정, Intermediate capture device 중간포획장비, Underwater docking 수중도킹

ABSTRACT: In this technical note, the issues and challenges for the launch and recovery systems (LARS) and related techniques for the operation of an underwater robot from a manned platform are considered. Various types of LARS fitted to specific manned platforms, surface or sub-surface, are surveyed and categorized. The current UUV launch and recovery systems from surface ships and submarines utilize time consuming processes. As underwater robot technologies evolve and their roles are defined, safe and effective launch and recovery methods should be developed capable of reliable and efficient operations, particularly at a high sea state. To improve the existing underwater robot capabilities, LARS technology maturation is required in the near term, leading to the ability to incorporate autonomous LARS for an underwater robot on a manned platform. In the near term, particular emphasis should be placed on UUV LARS, which are surface ship based, with submarine based systems in the long term. Furthermore, for a dedicated LARS ship, independent of the existing host ship type, particular emphasis should be given to fully utilizing the capabilities of underwater robots.

1. 서 론

아프가니스탄 전쟁에서의 무인체계들의 급격한 사용 증가 이후 무인수상정, 무인잠수정 및 무인항공기를 포함하는 해양무인체계들이 해양작전 환경을 변화시키는 하나의 큰 돌파구로서 사용되고 있다. 서해북방한계선(Northern limit line, NLL) 해역과 같이 적의 수상 및 수중세력이 밀집되어 있는 위협해역에서는 아군의 해상전력을 적절하게 이격된 안전거리에서 수중로봇과 같은 해양무인체계를 진수시켜 초계 및 감시·정찰 임무를 수행하게 함은 보다 고가치의 유인플랫폼과 인력을 보호하면서 아군 전력을 전진 배치하는 효과가 있다. 특히 수중에서의 해양작전은 인간의 활동에 많은 제약이 가해지는 영역이기 때문에 무인잠수정(Unmanned underwater vehicles, UUVs)과 같은 수중로봇이 기존의 유인체계인 수상함파 잠수함의 작전능력을 확장하고 전투력을 증대시키는 유용한 도구가 될 수 있다. 즉, 잠

수함에의 수중로봇의 탑재 운용은 적으로부터 아군의 잠수함 전력의 탐지 위험을 줄이면서 적 거부해역으로부터의 우군 작전영역을 확대함으로써 수중작전능력의 전술적, 전략적 가치를 높일 수 있는 운용방안이다(Bladin et al, 2013).

하지만 수중로봇의 해양작전에서의 유용성에도 불구하고, 함정 또는 잠수함에서의 수중로봇 운용비용과 인적소요 시간의 상당 부분을 이를 진수하고 회수하는데 소요되기 때문에 유인체계의 전력극대화를 위한 장애요소중의 하나이다. 특히 높은 해상상태의 파랑 중에 운항하는 수상모선에서의 진수와 회수 뿐 아니라 잠수함 내부로의 회수는 대단히 위험하면서도 기술적 정교함이 요구되는 작업이기 때문에 안전하고 효율적인 진·회수기술은 수중로봇 운용기술의 핵심기술 중의 하나이다. 따라서 유인체계에서의 수중로봇의 운용 활용도를 제고하기 위해서는 수상 및 수중에서의 운용편이성과 유인체계와의 H/W적 S/W적 융합이 필수적이며, 여기에는 많은 부분 수중로봇의 진·회수

Received 10 February 2016, revised 22 March 2016, accepted 22 April 2016

Corresponding author Ki-Young Lee: +82-55-549-1286, kylee04@navy.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on technical report of Korea Naval Institute for Ocean Research, 2015.

기술과 관련되어 있다(Eric, 2012) 우리 해군에서도 수중로봇의 해양작전에서의 유효성을 인식하고 이를 적용하려는 노력이 이루어지고 있음에도 불구하고 이들의 잠재적 운용능력들을 효과적이고 효율적인 발취에 한계를 노출하고 있다. 이는 기존의 유인체계 전력 뿐 아니라 건조 계획되어 있는 함정 및 잠수함의 대부분이 수중로봇의 운용을 고려하지 않은 선체 구조이기 때문이기도 하다. 또한 방위사업청 및 국방과학연구소를 통해 여러 형태의 수중로봇들이 연구 개발되고 있으나 이의 효율적인 유인플랫폼에의 적용에 대한 운용기술, 특히 진·회수기술에 대한 연구는 상대적으로 저조한 것도 한 원인이라 할 수 있다.

따라서 본 기술보고서는 여러 가지 수중로봇의 유인플랫폼에서의 효율적 운용을 위한 주요 기술요소 중의 하나인 진수 및 회수체계(Launch and recovery system, LARS)를 UUV를 중심으로 검토하고, 우리해군의 수상함 및 잠수함에의 적용방안을 검토·제시하였다. UUV는 원격무인잠수정(Remotely operated vehicle, ROV)과 자율무인잠수정(Autonomous underwater vehicle, AUV)로 구분할 수 있는데, 여기에서는 AUV에 초점을 맞추었다. 아울러 본 기술보고서는 어느 특정 임무 혹은 특정 목적에 적합한 LARS의 검토이기보다는 수중로봇의 잠재적인 다양한 임무에 적합한 LARS 옵션들을 검토하였으며, 국내에서 개발되었거나, 개발되고 있는 무인체계들의 전술적 잠재능력을 충분히 발휘할 수 있는 유인플랫폼 혹은 보다 대형의 무인플랫폼에서의 진·회수기술을 중심으로 수중로봇의 지원체계와 운용개념을 고려하였다. 단기적으로는 기존의 유인플랫폼의 개조 없이 임무 목적에 따라 수중로봇을 탑재 운용할 수 있는 방안을 제시하고, 장기적으로는 수중로봇을 운용하는 함정 및 잠수함의 크기와 형식에 관계없이 유인플랫폼의 전술작전 능력을 확대하는 방안을 제시하였다.

2. 수상함에서의 진수 및 회수 체계

2.1 램프(Ramp)와 다윗(Davit)

수상함에서의 진·회수체계에는 램프, 크레인, 중간포획장비 혹은 도킹장비 그리고 사출장치로 구분할 수 있다(Hanyok and Smith, 2010). 램프는 통상 선미램프(Stern ramp)와 경사로(Spillways), 웰갑판(Well deck) 및 문풀(Moon pool) 등과 이들을 선체설계에 통합시킨 LARS를 포함한다. 비교적 대형의 UUV는 7°~12°의 선미램프 경사로를 통해 진수하는데, 통상 선미 게이트를 개방하여 램프를 내리고 자중에 의해 경사로를 따라 슬라이드하여 수상으로 진수하는 방식이다(Fig. 1). UUV의 회수는 걸쇠 시스템(Latching system)과 견인줄(Tow line)을 사용하는데, 진수와는 반대로 체계와 모선을 정렬시켜 UUV가 램프로 올라타고 후크에 걸어 끌어 올리는 방식이 사용된다. 선미램프는 선체내부에 설치하는 경우와 선체 외부로의 경사로를 확장시키는 형식이 있다. 선미램프 방식은 비교적 신속한 진·회수가 가능하며, 이에 필요한 갑판 인력 소요를 줄일 수 있는 장점이 있다(Sheinberg et al., 2003). 최근의 전투함 설계에는 무인체계의 운용을 고려하여 선미램프를 선체에 통합시키는 것이 일반적인 추세이다.



Fig. 1 Seahorse AUV launch from surface ship (upper) and land (lower) by extended sliding ramp (Pennsylvania State University, 2006)

다윗은 해상작전용 보트의 진·회수를 위해 대부분의 수상함에 설치되어 있다. 다윗 시스템은 크레인에 비하여 갑판 공간을 비교적 적게 차지하는 장점이 있지만 해상상태에 따라 진·회수에 상당한 제한이 따른다. 다윗은 A-프레임, C-프레임, 회전다윗 등이 있는데 함정의 공간 배치 적합성과 설치 공간에 따라 적절한 형식을 선택하여 사용된다(Fig. 2). 다윗 시스템에 의한 UUV 회수는 진수보다 어려운 작업으로, 소형의 UUV는 소형보트에 탑승한 1~2명의 승조원에 의해 수동으로 회수한 후 보트자체를 다윗으로 끌어 올리지만, 대부분의 경우에는 해상에 떠 있는 UUV를 걸쇠 시스템에 체결한 다음 견인줄을 사용하여 끌어 올리는 방식이 사용된다. 하지만 이러한 작업은 다이버 혹은 승조원의 지원 없이는 상당히 어려운 작업이다. 따라서 크레인 혹은 다윗에 의한 무인체계의 회수에는 중간포획장비(Intermediate capture system)를 사용하는 것이 안전하고 신속한 회수 방식이라 할 수 있다. 중간포획장비는 수중로봇의 회수 과정에서 모선과 UUV의 충돌에 의한 손상과 상대운동을 최소화



Fig. 2 RMS UUV launch from USS Monsen by A-frame type davit system (Lockheed Martin Co., 2016)



Fig. 4 UUV storage and launch concept in M80 Stiletto (Mship C., 2015)

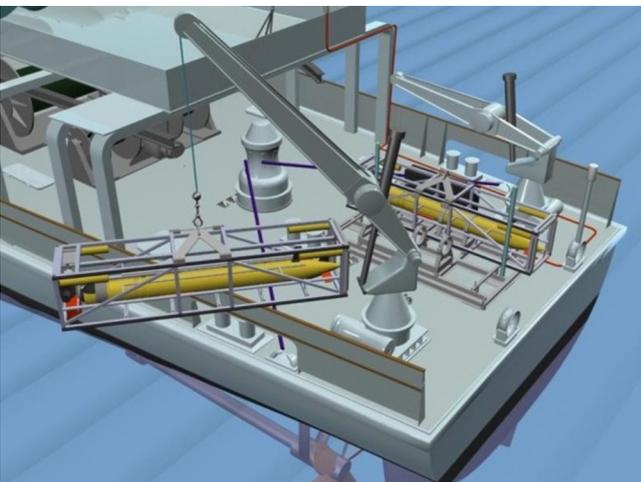


Fig. 3 Remus 600 launch and recovery concept by exclusive cage system (Stokey et al, 2005)

화하여 무인체계의 모션에로의 회수를 용이하게 하기 위한 장비로 케이지(Cage), 슬레드(Sled), 레일, 고치(Cocoon), 회수네트(Nets) 등의 다양한 형태가 사용된다. 케이지와 소형셀매 및 고치 등은 주로 수상함에서의 중간포획장비로 사용되고, 슬레드와 레일 시스템은 육지에서 해상으로 진수하거나 함정에서 움직이는 수상 비클을 진수하거나 회수할 때 사용된다(Fig. 3).

2.2. UUV 수송 및 진·회수 무인모션

미 해군은 저속의 UUV를 고속운항이 가능한 무인수상정(Unmanned surface vehicle: USV)에 탑재하여 원거리의 임무해역으로 신속하게 수송하여 진수시키는 RDUST(Remote delivery of unmanned system technology)를 개발하였다(Freeman, 2005; Abrell and Saajban, 2008). RDUST USV는 소형으로 높은 해상상태에서의 운용은 제한이 따른다. 최근에는 USV보다 대형이면서 고속 운항이 가능한 M80 Stiletto함과 같은 특수전용 소형함정을 수중로봇의 수송 및 진·회수모션으로 활용하고자 시도하고 있다. M80 Stiletto함은 60kts(111.12km/h)의 고속 항주가 가능한 37톤

의 M형 선체의 함정으로 11m급의 USV 혹은 UUV의 탑재가 가능하도록 설계되어 있다. 낮은 갑판의 함정형상과 고속의 항주 능력은 레이더반사면적(Radar cross section, RCS) 감소와 시각관측에 대한 은밀성을 높일 수 있어 적 해역에서의 특수정보작전에 투입할 수 있는 무인체계의 수송 및 진·회수모션으로 유용한 선형이다(Fig. 4). 미 DARPA(Defense Advanced Research Project Agency)는 표준화된 발사관 안에 작전임무 따라 적절한 모듈형 UUV를 탑재할 수 있는 UUV 모션 프로젝트인 Hydra 프로젝트를 진행하고 있다. 이는 Hydra를 잠수함 혹은 수송기에 탑재하여 임무해역 근처에 수송한 뒤 진수하여 Hydra가 자율적으로 작전해역으로 은밀 이동한 뒤 UUV를 진수하는 개념이다.

NATO(North Atlantic Treaty Organization)에서도 소형 소수 선면쌍동선(Small waterplane area twin hull, SWATH)형 USV를 UUV의 수송 및 진·회수모션으로 활용하는 방안을 연구·개발하고 있다. UUV 무인수상모션은 4.2톤 크기로 중·소형의 UUV를 탑재하여 육상기지에서부터 임무해역으로 수송하고, 진수와 회수 뿐 아니라 UUV 동력의 재보급 기지 및 육상기지와 임무명령의 송수신 중계기지 역할을 담당하는 개념이다. 아울러 USV 자체에도 별도의 임무센서를 탑재하여 독자적인 임무를 수행한다. UUV의 진수 및 회수는 인양기(Hoist)와 인양기 벨트를 수중으로 내려, 쌍동선 하부 선체 사이로 수중음향 탐지기 신호에 의해 UUV를 유도하여 정렬시킨 후에 인양기로 끌어올

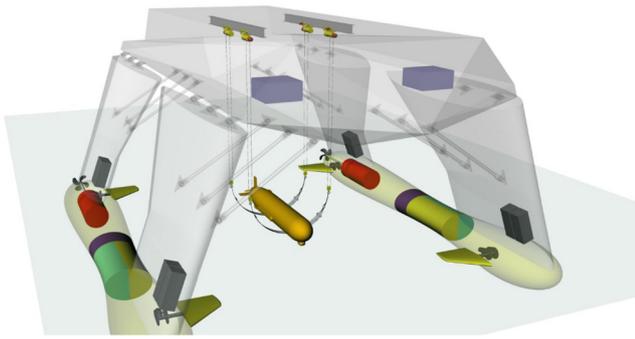


Fig. 5 NATO's UUV transportation and LARS concept (Brizzolara and Chryssostomidis, 2012)

려 회수하는 개념이다(Brizzolara and Chryssostomidis, 2012) 프랑스에서도 무인체계 운용모션으로 대형 USV인 Sterenn Du 함을 개발하고 있다. Sterenn Du는 선미램프 방식의 LARS로 대형 UUV의 진·회수가 가능한 25톤의 쌍동선 형태로 예인배 열소나와 K-ster와 같은 소모성 기뢰소해 UUV를 탑재 운용할 계획으로 알려져 있다. Sterenn Du의 LARS 방식은 선미램프 방식이 사용될 것으로 보인다.

3. 잠수함에서의 진수 및 회수 체계

3.1 잠수함 내부탑재형

잠수함 내부탑재형은 어뢰발사관 혹은 미사일 발사관에 UUV를 탑재하고, 진·회수하는 방식으로 21인치 표준어뢰발사관과 수직미사일 발사관을 활용하는 방법으로 구분할 수 있다(Fig. 6). 표준어뢰발사관에서의 진수는 기존의 어뢰발사 시스템을 사용하거나 UUV 자체 추진력에 의해 진수하는 방식이 사용된다. UUV의 회수는 로봇팔 등의 회수 시스템을 사용하거나 ROV를 회수 보조시스템으로 활용하는 방안들이 연구되고 있다. 표준 어뢰발사관을 활용한 진·회수는 기존의 잠수함 어뢰 발사관을 사용하기 때문에 UUV 운용에 따른 잠수함 모션에의 영향을 최



Fig. 6 ANBLQ-11 LMRS loading into a submarine missile tube (Defense Industry Daily, 2007)

소화할 수 있으며, UUV 운용을 위한 잠수함의 개조가 용이한 장점이 있다. 또한 외부에서 UUV의 탑재여부를 알 수 없어 은밀작전에 적합하며, 잠수함 내부에서 UUV의 정비, 동력충전 및 임무 페이로드 교체 등의 작업을 수행할 수 있다. 그러나 제한된 어뢰관 혹은 미사일 발사관 직경에 부합되는 어뢰형 UUV만 운용 가능한 단점이 있다.

3.2 잠수함 외부탑재형

잠수함 외부탑재형은 잠수함 선체 외부에 UUV 탑재 행거를 부착하여 편승시키는 방식으로 건식행거와 습식행거로 구분할 수 있다. 건식행거는 잠수함 선체와 기밀통로로 연결된 밀폐식 격납모듈로 UUV 운용과 정비를 위한 다이버들과 비클이 출입할 수 있다(Fig. 7). UUV의 진·회수는 일반적으로 전문 다이버를 활용하는데, 다이버가 행거 내로 들어가 해수를 유입시킨 다음 후방의 도어를 개방시킨 후 원치를 사용하여 행거 밖으로 진수시킨다. 회수는 진수와 역의 절차를 수행한다. 건식행거는 소형으로부터 테크셀터와 같은 대형 행거까지 제작할 있어 다양한 크기와 형태의 UUV를 사용할 수 있다. 또한 잠수함 모션의 압력선체와 건식행거 간 정비요원 및 운용요원이 기밀통로를 통해 이동할 수 있도록 설계할 수 있어 UUV 회수 후 행거 내에서 정비와 동력충전, 페이로드 교체 등의 작업을 수행할 수 있다. 아울러 특수작전 임무 다이버 등 여타의 수중전력을 진수하는데도 활용할 수 있다. 하지만 상대적으로 소형의 잠수함에는 설치가 곤란하고, 복잡한 드레인 및 수배출 시스템, 공기 및 압력관리 시스템이 요구되고, 잠수함 이동 중에는 UUV의 회수가 어려운 단점이 있다. 따라서 건식행거 방식은 구형 잠수함의 개조 및 비교적 대형의 신조 계획 잠수함에 적용할 수 있는 방식이다.

습식행거는 해수가 유통되는 개방형 행거로 통상 잠수함 모션의 핀 후방에 위치시켜 UUV의 보관과 진·회수 관련 장비를 탑재하는 방식이다. UUV는 행거 내에 격납시킬 수 있으며, 건식행거와 유사한 방식으로 진·회수할 수 있다. UUV LARS는 다이버 지원이 없는 자동시스템 혹은 다이버의 지원이 요구되는 단순시스템에 이르기까지 다양한 방식으로 구성할 수 있다. 습식행거 방식은 운용할 UUV의 크기와 맞추어 잠수함 주위의 적절한 위치에 행거 혹은 울타리를 부착하는 방식도 고려되고 있다(Fig. 8). 이는 잠수함 모션이 이동하는 동안 UUV를 제한적으로 보호하는 역할을 하며, UUV의 자체 추진력으로 행거 전방 출입구로 유평하여 나가고, 후방으로 유평해 들어는 진·회



Fig. 7 US Navy SSN platform dry deck shelter hanger (Mast Europe, 2016)

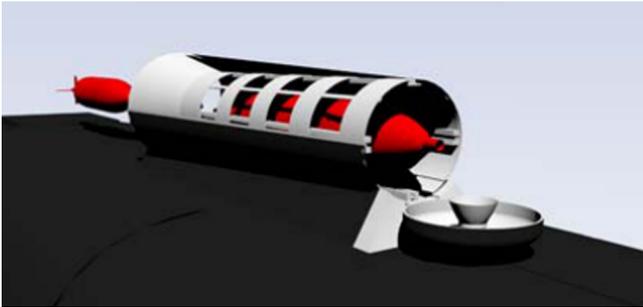


Fig. 8 Wet type deck shelter hanger (Hardy and Barlow, 2008)

수 방식이다(Hardy and Barlow, 2008). 습식행거는 건식행거에 비해 경량이며 기존 잠수함에서도 신속하게 개조하여 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 잠수함 모선의 주압력 선체와 행거 간 정비작업을 위한 인력 투입이 불가능하고, UUV 진·회수 시스템이 복잡하여 자동화된 LARS가 요구되는 방식이다.

3.3 잠수함 선체 착탈식

잠수함 선체 착탈식은 잠수함 측면 혹은 하부와 UUV 표면을 서로 흡착 및 분리하여 진·회수하는 방식으로, UUV가 잠수함 모선의 무장발사 역할을 하는 전투무인잠수정의 진·회수 시스템으로 제안된 방식이다(Fig. 9). 어뢰 혹은 미사일 등의 무장은 전투용 UUV에 탑재하고 잠수함 모선은 UUV의 수송지원함의 역할을 수행하므로 수중 UUV 항공모함의 개념이다(Gish, 2004). UUV 탑재위치는 잠수함의 선체 외부이지만 잠수함의 압력선체 설계는 UUV를 탑재할 수 있는 공간을 조성하고 UUV를 탑재한 후 덮개를 하기 때문에 잠수함의 항해에 지장을 주거나 소음을 증대시키지 않는다. 또한 UUV의 외형과 크기 등의 제한으로부터 자유롭기 때문에 소형급으로부터 대형급에 이르기까지 수용할 수 있도록 개발하면 UUV 운용상 이점을 증대시킬 수 있다. 즉, UUV 형상설계상의 융통성이 커지므로 고성능화가 가능해지고 은밀성을 증가시킬 수 있는 외형을 가질 수 있다. 또한 잠수함 모선 주변 외부에 보다 많은 수의 UUV를 탑재하여 진수 가능하며, 잠수함 모선의 형태 및 크기에 따라서

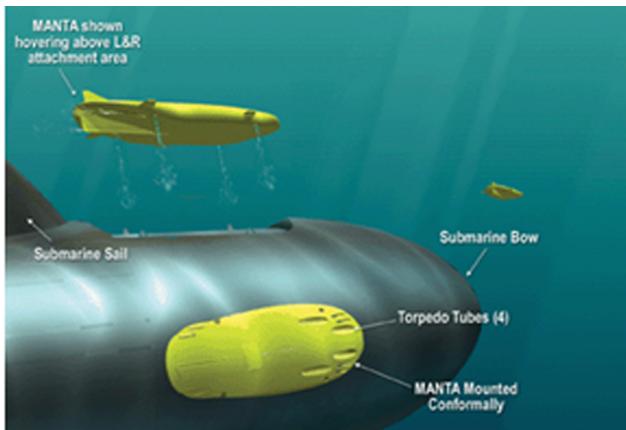


Fig. 9 Submarine hull attachment and detachment type LARS concept (Undersea Warfare, 2002)

는 잠수함의 수중 작전반경과 임무능력 획기적으로 확대시킬 수 있는 능력을 보유할 수 있다. 이 방식은 대규모의 UUV 진수 및 은밀작전을 가능하게 할 수 있으나 고도의 기술을 갖춘 진·회수 시스템의 자동 및 자율화가 요구되어 상당기간 실현이 어려운 방식이다.

3.4 수중 도킹 및 회수체계

수중에서 잠수함 내부로의 UUV 회수는 수중상태, 잠수함과 UUV의 운용템포, UUV의 자율도, 잠수함 및 UUV의 운동에측 그리고 UUV의 기동과 제어능력의 강건성 등 대단히 정교한 기술이 요구된다. 초기에는 다이버가 UUV를 포획하여 전인줄에 연결한 다음 잠수함 내부로 인입시키는 방식이 사용되었다. 현재에는 능동 자율기술이 뒷받침된 깔때기형 수중도킹시스템, 수직폴 회수, 로봇팔 회수 그리고 SUBROV 회수시스템 등의 UUV 도킹 및 회수시스템 기술이 개발되어 있다.

깔때기형 도킹시스템은 UUV 수중회수에 가장 일반적으로 시도된 시스템으로 UUV를 적재위치로 가이드하는 방식이다(Fig. 10). 통상 UUV 전방에 설치된 USBL를 사용하여 도킹 스테이션에 설치된 트랜스듀서에서 전송된 음향을 수신하여 도킹 콘 근처로 접근하도록 유도한다(Stokey et al., 1997) 도킹 성공률을 높이기 위해 도킹 타깃을 영상으로 식별할 수 있는 거리까지는 음향 호밍으로 유도하고 도킹 최종단계에서는 영상 기반의 도킹 타깃을 확인하는 복합호밍 방식도 시도되고 있다(Evans et al., 2003; Maire et al, 2009) 깔때기형 도킹시스템은 비교적 간단하면서 저가로 제작할 수 있는 장점이 있지만, 장치가 상대적으로 크고, 최적 환경이 아닌 조건에서의 도킹 성공률은 아직 입증되지 않고 있다. 최근에는 캐나다의 DRDC(Defense Research and Development Canada)에서 도킹 성공률을 높이기 위한 능동자동도킹회수장치를 개발하고 있다(Currie et al., 2014). 국내에서는 선박해양플랜트연구소(Maritime Ocean Engineering Research Institute, MOERI)의 Isimi 개발 당시 광원을 활용한 수중비전에 의한 근거리 유도 도킹방식의 도킹콘을 개발한 바 있다. 그러나 도킹콘 방식은 어뢰발사관이 전방에 위치하고 있는 경우 UUV가 잠수함 정면으로 ±1m 이내의 정확도로 접근해야 하는 등 실



Fig. 10 Funnel type docking station for Remus 100 (Oceanographic Institution, 2012)

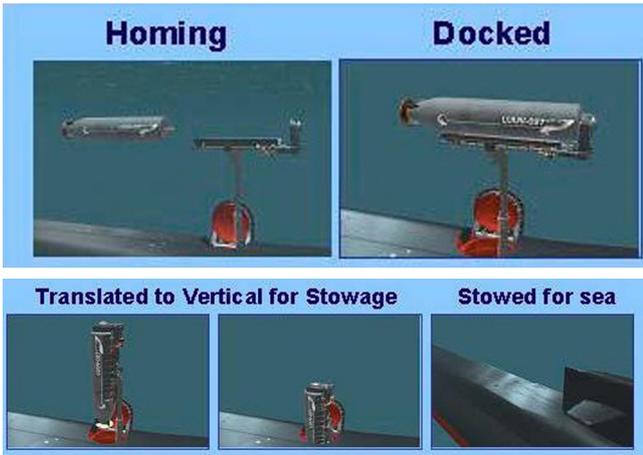


Fig. 11 Seahorse UUV launch & recovery for SSGN vertical missile tube (Naval Drones Co., 2015)



Fig. 12 Robot arm LMRS UUV recovery system (White, 2007)

제로 적용하기 어려운 기술이다(Jun et al., 2009).

수직폴 회수시스템은 Woods Hole과 Florida Atlantic 대학에서 개발한 회수 방식으로 UUV가 스팅어(Stinger) 혹은 수직폴 (Vertical pole)로 슬라이딩해 들어와 가위모양의 구조물로 포획하여 회수하는 방식이다. 이 방식은 UUV가 어느 방향에서든 접근할 수 있으므로 조류 등 외부 흐름의 교란이 있는 상황에서 도킹장치에 정렬시켜야 되는 문제를 피할 수 있다(Singh et al, 2001) 수직폴 회수방식을 잠수함 탑재 회수시스템에 적용한 것이 ULRM(Universal launch and recovery module)으로 미해군의 오하이오급 잠수함을 유도미사일 원자력잠수함으로 개조하는 프로젝트의 일환으로 개발된 UUV 회수 모듈이다(Fig. 11). ULRM은 잠수함의 미사일 발사관 공간을 활용하여 UUV 보관 및 진수에 사용하기 때문에 잠수함 형상 변경없이 운용비용을 대폭 감소시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

로봇팔 회수시스템은 어뢰관 장착 UUV 회수용 로봇팔로 잠수함 모선에 근접한 UUV를 포획하여 근처의 어뢰관 안으로 밀어 넣는 방식이다. 로봇팔 회수시스템은 Boeing의 장거리기뢰탐색시스템(Long-term mine reconnaissance system, LMRS) AN/BLQ-11의 일부로 개발한 것으로 어뢰발사관에서 진수한 UUV를 임무 수행 후 호밍 및 도킹 소나로 잠수함 모선근처로 유도한 뒤 회수 로봇팔을 최대로 전개시켜 접근하는 UUV를 포획하여 어뢰발사관 내로 회수한다. 그러나 회수시 사용하는 로봇팔은 UUV를 어뢰관에 정확하게 조준시킬 필요가 있고, 다른 회수 시스템에 비하여 매우 고가이며, 어뢰발사관에서 사용하기에는 중량이 2,000kg으로 무거운 것이다 단점이다. 더욱이 어뢰발사관이 잠수함 측면에 있는 경우에 적합하게 설계되어 있어 잠수함 정면에 어뢰관이 있는 재래식 잠수함에의 적용은 어렵다(Fig. 12; White, 2007)

SUBROV 회수시스템은 스웨덴 Saab사가 개발한 Sea Owl SUBROV를 사용한 UUV 회수시스템으로 어뢰발사관에서 진수된 UUV 회수의 보조 역할을 수행한다. SUBROV 회수시스템은 콘솔에 영상 및 소나 이미지를 전시하여 운용자가 ROV를 제어하여 다이버 지원 없이 UUV와 도킹 및 회수한다. 즉 진입하는



Fig. 13 Sea Owl SUBROV launch and recovery concept (Saab Seaeye Ltd., 2015)

UUV를 운용자의 조종에 의해 ROV 자체를 조종하여 정렬시킨 후 그립 툴을 사용하여 도킹한 다음 어뢰관 내로 회수하는 방식이다.(Fig. 13) 국내에서도 RF 센서와 비전시스템에 의한 ROV 회수 시스템 개발이 시도된 바 있다. 이 방식은 잠수함의 개조 없이 사용할 수 있는 장점이 있으나, 회수과정에서 운용자가 필요한 반-자동 회수 시스템이다(Kim and Lee, 2011).

4. 진·회수체계 개발 및 운용방안

4.1 수상함에서의 진·회수

미 해군의 연안전투함과 같이 선진국은 함정의 설계단계에서부터 수중로봇을 최소인원으로 신속하게 진·회수 할 수 있는 LARS가 설계되어 있다. 하지만 국내의 전투함들은 수중로봇 운용을 전제로 설계된 함정은 거의 없기 때문에 전용 LARS 또한 고려되지 않았다. 다만 ROV를 운용하는 기뢰탐색함과 구조함에 A-프레임 형태의 LARS 체계가 있을 뿐이다. 아울러 기존 함정의 탑재 공간은 이미 여러 가지 기존 시스템들이 차지하고 있기 때문에 수중로봇을 운용하기 위하여 많은 변화를 가하는 일은 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 단기적으로는 기존 전투함 등의 수상함 플랫폼을 개조하기 보다는 진·회수장치를 보완함으로써 합리적인 운용방안을 모색하는 것이 현명한 일이다. 이상적으로는 기존 함정운용에 영향을 주지 않으면서 통합할 수 있는 있도록 최대한의 높은 신뢰성과 낮은 정비요건을 갖는 LARS의 보완이 요구된다. 아울러 수중로봇의 신속하고

안전한 진·회수를 위하여 기존의 수동식 LARS를 반자동 LARS로 개발하여 운용하는 것이 바람직하다. 이는 수중로봇 운용에 따른 기존 수상함 전력에의 영향을 최소화 하면서 관련 기술이 성숙할 때까지 수중로봇을 점진적으로 도입하는데 유리할 것으로 판단된다.

수상함으로부터의 수중로봇의 진·회수는 기존의 소형 보트의 진·회수와 같이 새로운 개념은 아니지만 회수방법과 장비의 개발은 새로운 도전이 되고 있는 기술 분야이다. 특히 해상에서의 진·회수는 대략 해상상태 5~7정도가 운용한계인 만큼 안전과 신속한 운용을 위해 자동화, 자율화되는 추세이다. 자동화 LARS 프로세스는 자동호밍, 정대, 부착 및 모선에의 탑재단계로 구분할 수 있다. 각각의 진·회수 단계별 수행을 지원하기 위한 기술개발 요소들은 수중로봇 탑재 공통명령 및 제어의 개발, 자동화 LARS에 필요정보를 제공하는 센서와 제어시스템의 통합개발과 수중로봇과 함정 시스템에의 영향을 최소화하면서 적절하게 탑재제어를 제공하는 강인한 결속 및 부착 메커니즘의 개발이 요구된다. 기존 함정의 선체 개조를 줄일 수 있는 대안으로 수중로봇 전용 컨테이너형 LARS의 활용을 고려할 수 있다. 컨테이너형 LARS는 표준 컨테이너를 활용하여 수중로봇을 보관하고, 수송하며, 진·회수하는 개념으로 LARS 유닛을 모듈화 하여 기존 함정의 구조변경 없이 임무 수행시만 탑재할 수 있다. 이는 수중로봇의 수송 중 체계안전을 도모할 수 있고 필요한 경우에만 수중로봇 전용 컨테이너를 탑재함으로써 운용 비용을 절감할 수 있어 전투함정에 수중로봇의 운용을 보다 확대할 수 있는 방안이다(Rauch et al, 2008).

장기적으로는 호위함 혹은 초계함과 같은 UUV 임무수행에 적합한 중·소형의 전투함 설계에 수중로봇의 운용을 위한 진·회수체계가 고려되어야 한다. 수중로봇 등의 신기술에 의한 체계들을 통합할 때 함정 개조로 발생할 수 있는 추가 비용을 절감하기 위해서는 기술발전과 필요에 따라 신속하고 효과적으로 조정할 수 있는 모듈화 설계와 무인체계용 임무격실의 확보가 요구된다(Kimble, 2012). 또한 수중로봇을 비롯한 해양무인체계를 활용한 다양한 형태의 해양작전에서의 활용을 위해서는 미 해군의 연안정찰선(Littoral reconnaissance ship, LRS)과 같

은 무인체계전용 수송 및 진·회수체계 전용 함정을 건조하여 다양한 작전에의 운용을 고려할 필요가 있다. LRS는 약 1,000톤급의 소수선면쌍동선으로 중간지원기지로부터 약 1,000NM (1,852km) 떨어진 해상에서 수중, 수상, 공중 무인체계들의 진·회수, 연료재보급 혹은 재충전, 임무감독 및 정비 등의 무인체계 운용을 위해 특화된 모선이다. LRS에서의 무인체계 진·회수는 갠트리 크레인을 사용하여 USV 크래들 혹은 UUV 랙크를 수면상으로 내리고 올려 진·회수하는 개념이다(Fig. 14).

4.2 잠수함에서의 진·회수

잠수함에서의 UUV 운용 역시 많은 이점에도 불구하고 이를 위하여 기존 플랫폼에 변화를 가하는 일은 수상함보다도 어려운 일이다. 따라서 수상함의 경우와 마찬가지로 기존 플랫폼에 영향을 주지 않으면서 통합할 수 있는 시스템을 고려하여야 한다. 이를 위해서는 잠수함 모선과 UUV의 임무목표와 목적 즉, 운용개념을 먼저 정립한 후에 적절한 LARS 방식을 검토하여야 한다. 즉, 잠수함 모선과 UUV의 전술적 능력의 통합을 극대화하기 위해서는 잠수함 모선의 안전 뿐 아니라 UUV와의 전술적 요구와 능력간의 균형의 조화를 이룰 수 있어야 한다. 여기에는 잠수함 모선이 UUV 임무 지원에 역할, 즉 잠수함 운용간의 UUV 진·회수 주체 및 방식, UUV 탑재와 동력충전 방식 등의 운용개념들이 정립되어야 한다. 따라서 단기적으로는 지휘통제 체계 등을 일부 개조하고 진·회수장치를 보완하여 운용하는 것이 현실적이다. 기존 잠수함 전력을 고려하면 21인치 표준어뢰관에서의 진·회수가 가장 현실적이나 소형의 UUV만이 운용 가능한 단점이 있다. 따라서 향후 건조되는 잠수함에는 보다 대형의 UUV를 활용할 수 있도록 압력선체 외부의 상부데크에 행거를 설치하여 진·회수하는 방안을 고려하여야 한다. 이는 특수목적 임무 수행시에만 행거를 설치 운용하는 방법으로 선체개조에 따른 시간과 비용을 절감할 수 있는 방안이다. UUV를 잠수함의 상부데크 행거내로 회수하기 위해서는 행거내부에 자동도킹 할 수 있는 시스템이 필요하다. 이를 위해서 높은 신뢰도를 갖는 정밀한 호밍장치가 행거 뿐 아니라 UUV 자체에도 탑재되어야 한다. 하지만 잠수함에서의 운용시 UUV의 진·회수 시스템 운용으로 인한 소음발생 등의 기술적 문제를 포함하여 잠수함과의 도킹 과정에서의 음향신호 노출 등으로 인한 모선의 위치가 노출될 위험성을 개조설계 단계에서 충분히 고려하여야 한다(Benjamin et al., 2011).

장기적으로 잠수함에서의 UUV 운용개념별로 전력지수를 극대화 할 수 있는 방향으로 UUV의 진·회수 개념을 병행하여 개발하여야 한다. 잠수함에서의 UUV 진·회수는 로봇팔을 이용한 LMRS 회수방식과 SUBROV를 이용한 Saab의 회수방식 모두 실패역 실험에서는 만족스러운 결과를 얻지 못하여 실전 운용에는 아직 적합하지 않기 때문에 회수 성공률을 제고할 수 있는 보다 현실적 방법이 모색되어야 한다. 즉, 능동자율 LARS 도킹 장치의 개발은 잠수함에서의 UUV 운용 가능성을 발전시키는 매우 중요한 기술이다. 그러나 현재의 자율도킹 시스템들은 UUV를 실전에 투입 위험을 감수할 만큼의 도킹 성공률에는 미치지 못하고 있다. 예를 들어 Remus 100 AUV의 음향호밍에

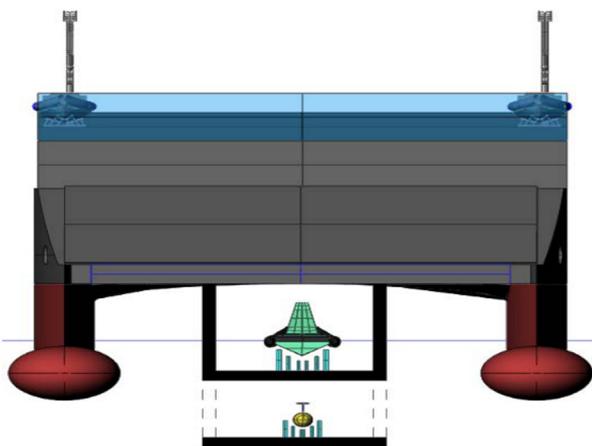


Fig. 14 LARS concept of NSWC's LRS (Abrell and Saajban, 2008)

의한 직경 1m의 고정 깔때기모양 도크에의 도킹 성공률은 62%~91%, 전자기호밍의 경우는 63%가 보고되어 있다(Freezor et al., 2001). 이와 같이 도킹 성공률을 제고할 수 있는 고정밀 수중항법과 유도제어 등의 기술발전이 잠수함에서의 UUV 운용의 핵심 기술이다.

5. 결 론

수중로봇의 전술적 잠재능력을 발휘할 수 있도록 기존의 유인 플랫폼과의 연동 운용에 있어서 핵심적인 역할을 하게 될 진수 및 회수체계에 대해 고찰하고 이의 운용방안들을 검토하였다.

수상함의 경우, 단기적으로는 기존의 전투함정에서의 무인체계 운용의 유연성을 극대화하기 위해서는 다양한 형태의 수중로봇을 진수하고 회수할 수 있는 LARS의 개발이 요구된다. 기존의 유인플랫폼의 개조 없이 임무 목적에 따라 무인체계를 탑재 운용할 수 있는 컨테이너형 전용 LARS 시스템을 개발하여 활용하는 것도 경제적인 운용방안이다. 장기적으로는 무인체계를 운용하는 모선의 크기와 형식에 관계없이 전술작전 능력을 확대하는 방안으로 무인체계 전용 LARS 시스템을 탑재한 고속의 유인 혹은 무인함정의 개발·운용이 요구된다. 무인체계 전용 LARS 함정은 유인 혹은 무인으로 병용할 수 있는 크기가 적합할 것으로 생각되며, 이의 효율적인 운용을 위해서는 임무장비의 자율진·회수 기술의 개발이 필요하다.

잠수함에서의 UUV LARS의 핵심목표는 잠수함 모선과 UUV의 전술적, 전략적 가치를 극대화 할 수 있는 LARS를 식별하고 이를 구현하여야 한다. 이를 위해서는 UUV 기반 임무에 대한 명확한 운용개념을 먼저 정립하고, 이를 구현하기 위한 기술들을 식별하며, 식별된 UUV에 특화된 LARS의 개발이 요구된다. 가까운 장래에 UUV의 전술적 가치를 극대화 할 수 있도록 잠수함 모선과의 통합할 수 있는 맞춤형 혹은 복합형 잠수함 모선 설계에의 반영이 요구된다. 우리 해군의 수중전력을 고려할 때, 소형의 UUV는 잠수함 어뢰발사관을, 그리고 대형의 UUV는 건식 혹은 습식 행거를 잠수함 상부갑판에 설치하여 운용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해군사관학교 해양연구소의 연구지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Abrell, S., Saajban, A., 2008. Littoral Reconnaissance Ship. Technical Report, NSWCCD-CISD-2008/010.
- Benjamin, M., Newman, P., Schmidt, H., Leonard, J., 2011. An Overview of MOOS-IvP and User Guide to the IvP Helm - Release 4.2.1. MIT-CSAIL-TR-2011-037.
- Blandin, M., Brux, J., Caraway, C., Cook, J., Fromille, S., Haertel, D., Hall, S., Kish, J., Szachta, S., 2013. 2024 Unmanned Undersea Warfare Concept. NPGS Capstone Project Report, Naval Postgraduate School.
- Brizzolara, S., Chryssostomidis, C., 2012. Design of an Unconventional ASV for Underwater Vehicles Recovery: Simulation of the Motions for Operations in Rough Seas. ASNE International Conference, Linticum (MD).
- Currie, J., Gills, C.B., Carretero, J.A., Dubay, R., Jeans, T., Watt, G.D., 2014. Dynamics of Two Active Autonomous Dock Mechanisms for AUV Recovery. Transaction of Canadian Society for Mechanical Engineering, 38(2), 213-226.
- Defense Industry Daily, 2007. Boeing's BLQ-11 LMRS: A Sub-Recoverable UUV. [Online] Available at: <<http://www.defenseindustrydaily.com/boeings-blq-11-lmrs-a-sub-recoverable-uuv-04/>> [Accessed 12 Jan. 2016].
- Evans, J., Redmond, P., Plakas, C., Hamilton, K., Lane, D., 2003. Autonomous Docking for Intervention-AUVs Using Sonar and Video-based Real-time 3D Pose Estimation. Proceedings of OCEANS 2003, 4, 2201-2210.
- Eric, D., 2012. Technical, Legal Experts Discuss Role of Unmanned Maritime Vessels. U.S. Naval War College Public Affairs Office.
- Freeman, D.K., 2005. Remote Delivery of Unmanned System Technologies. OCEANS 05 MTS/IEEE Conference, Washington DC, 1, 36-39.
- Freezor, M., Sorrell, Y., Blankinship, P., Bellingham, J., 2001. Autonomous Underwater Vehicle Homing/Docking via Electromagnetic Guidance. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26(4), 515-521.
- Gish, L.A., 2004. Design of an AUV Recharging Systems. MS Thesis, MIT.
- Hanyok, L.W., Smith, T.C., 2010. Launch and Recovery System Literature Review. NSWCCD-50-TR-2010/71.
- Hardy, T., Barlow, G., 2008. Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Deployment and Retrieval Considerations for Submarines. Proceedings of INEC in Hamburg, Germany.
- Jun, B., Lee, P., Lim, Y., 2009. Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 26(5), 14-22.
- Kim, J., Lee, G., 2011. A Study on the UUV Docking System by Using Torpedo Tube. Proceedings of 8th International Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence Coherence, Incheon, Korea, 842-844.
- Kimble, A., 2012. Boat Launch and Recovery - A Key Enabling Technology for Flexible Warship. Proceedings Pacific 2012, Sydney.
- Lockheed Martin Co., 2016. Remote Minehunting System. [Online] Available at: <<http://www.lockheedmartin.com/us/product/remote-minehunting-system.html>> [Accessed

- 14 July 2015].
- Maire, F., Prasser, D., Dunbabin, M., Dawson, M., 2009. A Vision Based Target Detection System for Docking of an Autonomous Underwater Vehicle. Proceedings of 2009 Australasia Conference on Robotics and Automation.
- Mast Europe, 2016. Dry Deck Shelter. [Online] (Updated Jan. 2000) Available at: <<http://fas.org/man/dod-101/sys/ship/ddds.html>> [Accessed 14 July, 2015].
- Mship Co., 2015. Naval Architecture and Marine Engineering Services. [Online] Available at: <<http://www.mshipco.com/exercise-howler.html>> [Accessed 7 Dec. 2015].
- Naval Drones Co., 2015. Universal Launch and Recovery Module(ULRM). [Online] Available at: <<http://www.navadrones.com/ULRM.html>> [Accessed 14 July, 2015].
- Oceanographic Institution, 2012. Oceanographic System Laboratory. [Online] (Updated Nov. 2012) Available at: <<http://www.whoi.edu/>> [Accessed 20 June, 2015].
- Pensylvania State University, 2006. The Applied Research Laboratory and the Office of Naval Research. [Online] Available at: <<http://www.doncio.navy.mi./CHIPS/>> [Accessed 4 Feb. 2016].
- Rauch, C.G., Purcell, M.J., Austin, T., Packard, G.J., 2008. Ship of Opportunity Launch and Recovery System for REMUS 600 AUV's. IEEE 978-1-4244-2620-1.
- Saab Seaeye Ltd., 2015. Saab Sea Owl Subrov. [Online] Available at: <<http://www.seaeye.com/seaowlsubrov.html/>> [Accessed 7 July, 2015].
- Sheinberg, R., Minnick, P.V., Beukeme, T.G., Kauczynski, W., Silver, A.L., Cleary, C., 2003. Stern Boat Deployment Systems and Operability. SNAME Transitions.
- Singh, H., Bellingham, J.G., Hover, F., Lerner, S., Moran, B.A., von der Heydt, K., 2001. Docking for an Autonomous Ocean Sampling Network. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26(4), 498-514.
- Stokey, R.P., Roup, A., von Alt, C., Allen, B., 2005. Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle. OCEANS, Proceedings of MTS/IEEE, 1301-1304.
- Stokey, R., Purcell, M., Forrester, N., Austin, T., Goldsborough, R., Allen, B., von Alt, C., 1997. A Docking System for REMUS, an Autonomous Underwater Vehicle. Proceedings of OCEANS'97 MTS/IEEE Conference, 2, 1132-1136.
- Undersea Warfare, 2002. Beneath the Wave of the Future. [Online] Available at: <<http://www.public.navy.mil/subfor/underseawarfaremagazine/>> [Accessed 7 July, 2015].
- White, D.P., 2007. Navy Unmanned Maritime Vehicle System Brief. Mine Warfare Technology Review Conference.

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 λ ← (수식편집기사용) 라고 할 때, 파고의 축척비는 λ , 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)

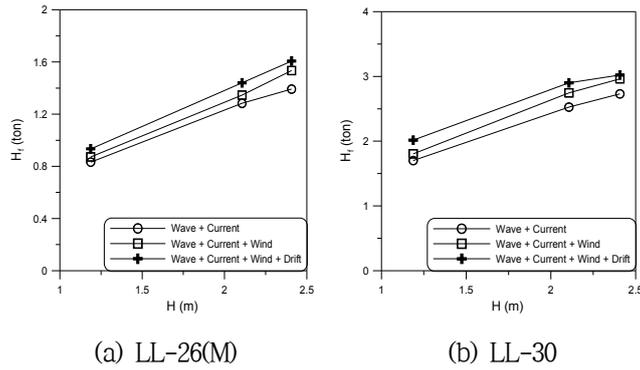


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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 파랑조건이 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. 6th 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). 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 Communcation*. 163, 51-59.

Reference to a book:

Strunk, W. and White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, 4th 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 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

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]

Transfer of copyright

Article details

Article :
Corresponding author :
E-mail address :
DOI : <http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.0000.00.000>

Assignment of publishing right

- I am one author signing on behalf of all co-authors of the manuscript.
- KSOE hereby agrees to follow Creative Commons License.
- I have read and agree to the terms of the journal(Journal of Ocean Engineering and Technology) copyright policy.

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)

오페라에서는 세계해양산업의 핵심인
해양플랜트영역을 담당하는 **유능한 인재육성**을
사업의 최고 목표로 삼고 있습니다

- 특성화 교과과정 개설
- 교육인프라 구축
- 국내외 인턴십 및 국제협력 프로그램 지원
- 해양플랜트 특화기술 개발

오페라가 무한한 ∞ 해양의 꿈을 열어줍니다

OPERA
Offshore Plant Education
and Research Advanced Center

한국해양대학교 해양플랜트특성화대학 사업단



국립 **한국해양대학교**
KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY

한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2015. 1. 7 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 제주도에서 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 사항은 본 학회 편집위원회의 결정에 따른다.
14. 학회는 저자에게 별쇄본을 제공하지 않는 것을 원칙으로 하나, 필요한 경우는 저자가 실비를 부담하여야 한다.

한국해양공학회지

제30권 제2호(통권 제129호)

인쇄: 2016년 4월 27일

발행: 2016년 4월 30일

발행인: 조효제

편집인: 김윤해

발행소: 사단법인 한국해양공학회

부산광역시 동구 중앙대로 180번길 13, 1302호 (초량동 프레지던트오피스텔)

전화: (051)759-0656 FAX: (051)759-0657

담당: 사무국장 이희진

E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr

Homepage: www.ksoe.or.kr

인쇄소: 한림원(주)

서울특별시 중구 퇴계로51길 20 1303(오장동,백서스타워)

전화: (02)2273-4201 FAX: (02)2179-9083

E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr



사단법인 **한국해양공학회**

The Korean Society of Ocean Engineers