

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

한국해양공학회지

제32권 제1호 (통권 제140호)

2018년 2월

Journal of Ocean Engineering and Technology



Vol. 32, No. 1 (Serial Number 140)
February 2018

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
신성원 한양대학교
안석환 중원대학교
최형식 한국해양대학교

편집위원
김국현 동명대학교
김영훈 경남대학교
김진환 카이스트
문경만 한국해양대학교
박종천 부산대학교
송창용 목포대학교
엄원석 연세대학교
윤현규 창원대학교
이우동 경상대학교
이종현 제주대학교
이탁기 경상대학교
임영섭 서울대학교
정동호 한국해양과학기술원
하태민 강원대학교

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

연구윤리위원회

위원장
서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원
윤현규 창원대학교
구원철 인하대학교

학회 임원

회장
윤종성 인제대학교

부회장
하문근 삼성중공업
고재용 목포해양대학교
김선진 부경대학교
조철희 인하대학교
정대연 대영엔지니어링
양영명 한국가스공사

Editorial Boards

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

Manuscript Editors
Joonmo Choung, Inha University, Korea
Sungwon Shin, Hanyang University, Korea
Seokhwan Ahn, Jungwon University, Korea
Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

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

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

Research and Ethics Boards

Chief
Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Management and Deliberative and Education Department
Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea
Weoncheol Koo, Inha University, Korea

Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

President
Jong-Sung Yoon, Inje University, Korea

Vice President
Mun-Keun Ha, Samsung Heavy Industries, Korea
Jae-yong Ko, Mokpo National Maritime University, Korea
Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea
Chul Hee Jo, Inha University, Korea
Dae-Yeon Chung, DY Engineering, Korea
Youngmyung Yang, KOGAS, Korea

AIMS and SCOPE

Journal of Ocean Engineering and Technology (JOET) is a medium for the publication of original research and development work in the field of ocean engineering. JOET covers the entire range of issues and technologies related to the following topics:

Marine hydro-mechanics including: Design of marine structures; Resistance and propulsion; Seakeeping and maneuvering; Experimental and computational fluid dynamics; Ocean wave mechanics; Thermodynamics and heat transfer; Hydraulics and pneumatics;

Marine structure-mechanics including: Structural strength; Fatigue strength; Optimization and reliability; Arctic technology and extreme mechanics; Noise, vibration, and acoustics; Plasticity engineering; Concrete engineering;

Coastal civil engineering including: Coastal structure engineering; Port and harbor structure engineering; Soil engineering; Drilling and exploration; Hydraulics of estuary; Seismic engineering; Coastal disaster prevention engineering;

Marine material engineering including: Metallic material engineering; Organic material engineering; Ceramics; Composite material engineering; Materials evaluation engineering; Surface engineering; Tribology; **Information technology and convergence fields including:** Design for safety; IT-based design; IT-based production engineering; Welding mechanics; Design of underwater vehicle; Offshore energy system design; Environment and system evaluation; Control engineering; GPS and GIS; Inspection and sensor; Port and logistics; Leisure boat and deep sea water;

Conference papers, research papers, diploma papers and academic articles can be submitted. All of the manuscripts are peer-reviewed.

GENERAL INFORMATION

“Journal of Ocean Engineering and Technology” is the official journal 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.

Full text is freely available from <http://www.joet.org> and <http://www.ksoe.or.kr> without signing in. This journal was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) grant funded by the Korean government. 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, 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, 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.

© 2018 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 February 28, 2018 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

목 차

제32권 제1호 (통권 제140호)

2018년 2월

<학술논문>

초대형 반잠수식 해양 구조물의 최적 감쇠 모델에 대한 고찰 이혜빈 · 배윤혁 · 김동은 · 박세완 · 김경환 · 홍기용	1
부유식 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼의 운동저감장치 개념설계 박세완 · 김경환 · 홍기용	9
극한환경조건에 대한 프리루드 FLNG 안벽계류시스템 설계 조진욱 · 윤상웅 · 김봉재 · 최재웅 · 김부기 · 양승호	21
이미지 방법을 이용한 자유 및 강제 표면 옆의 맥동하는 버블 주위 속도 포텐셜 해석 이상륜 · 최결기 · 김종철 · 유승화	28
2차원 썩기형 물수체의 비정상 공동 와류에 대한 수치해석 김지혜 · 정소원 · 안병권 · 박철수 · 김진도	36
극지용 FPSO의 DP 성능에 영향을 미치는 빙 파라미터 분석에 관한 연구 최솔미 · 이승재 · 한소령 · 이재용	43
FLBT의 적하역 안정성 평가를 위한 실험적 연구 정동우 · 김윤호 · 조석규 · 정동호 · 성홍근 · 권순홍	51
선박용 레이더를 이용한 해상풍 모니터링 시스템 개발 박준수	62
다수의 추진기를 지닌 ROV의 추력배분을 통한 정지 상태에서의 선수각 및 수심 제어 구현 윤석민 · 이종무 · 김기훈	68

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 32, Number 1

February, 2018

<Original Research Articles>

- Study on Optimal Damping Model of Very Large Offshore Semi-submersible Structure
Hyebin Lee, Yoon Hyeok Bae, Dongeun Kim, Sewan Park, Kyong-Hwan Kim and Keyyong Hong 1
- Conceptual Design of Motion Reduction Device for Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power
Generation Platform
Sewan Park, Kyong-Hwan Kim and Keyyong Hong 9
- Quayside Mooring System Design of Prelude FLNG for Extreme Environmental Condition
Jin-Woog Cho, Sang-Woong Yun, Bong-Jae Kim, Jae-Woong Choi, Booki Kim and Seung-Ho Yang 21
- Analysis of Velocity Potential around Pulsating Bubble near Free or Rigid Surfaces Based on Image Method
Sangryun Lee, Gulgi Choi, Jongchul Kim and Seunghwa Ryu 28
- Numerical Analysis of Unsteady Cavitating Vortex around Two-dimensional Wedge-shaped Submerged Body
Ji-Hye Kim, So-Won Jeong, Byoung-Kwon Ahn, Chul-Soo Park and Gun-Do Kim 36
- Study on Ice Parameters Affecting DP Performance of FPSO in Arctic Ocean
Sol-Mi Choi, Seung-Jae Lee, Solyoung Han and Jaeyong Lee 43
- Experimental Study on Floating LNG Bunkering Terminal for Assessment of Loading and
Offloading Performance
Dong-Woo Jung, Yun-Ho Kim, Seok-Kyu Cho, Dong-Ho Jung, Hong-Gun Sung and Sun-Hong Kwon 51
- Development of Sea Surface Wind Monitoring System using Marine Radar
Jun-Soo Park 62
- Implementation of Heading Angle and Depth Keeping Control of ROV with Multiple Thrusters by
Thrust Allocation
Suk-Min Yoon, Chong-Moo Lee and Kihun Kim 68

Study on Optimal Damping Model of Very Large Offshore Semi-submersible Structure

Hyebin Lee*, Yoon Hyeok Bae^{id**}, Dongeun Kim^{***}, Sewan Park^{****},
Kyong-Hwan Kim^{****} and Keyyong Hong^{****}

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

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

***Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University, Jeju, Korea

****Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

초대형 반잠수식 해양 구조물의 최적 감쇠 모델에 대한 고찰

이혜빈* · 배윤혁^{id**} · 김동은*** · 박세원**** · 김경환**** · 홍기용****

*제주대학교 풍력특성화협동과정

**제주대학교 해양시스템공학과

***제주대학교 풍력공학부

****선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Linear damping 선형 감쇠, Quadratic damping 2차 감쇠, Nonlinear drag 비선형 항력, Semi-submersible 반잠수식, Coupled analysis 연성해석

ABSTRACT: In order to analyze the response of the offshore structure numerically, the linear potential theory is generally applied for simplicity, and only the radiation damping is considered among various damping forces. Therefore, the results of a numerical simulation can be different from the motion of the structure in a real environment. To reduce the differences between the simulation results and experimental results, the viscous damping, which affects the motion of the structure, is also taken into account. The appropriate damping model is essential for the numerical simulation in order to obtain precise responses of the offshore structure. In this study, various damping models such as linear or quadratic damping and the nonlinear drag force from numerous slender bodies were used to simulate the free decay motion of the platform, and its characteristics were confirmed. The optimized damping model was found by comparing the simulation results to the experimental results. The hydrodynamic forces and wave exciting forces of the structure were obtained using WAMIT, and the free decay test was simulated using OrcaFlex. A free decay test of the scale model was performed by KRISO.

1. 서 론

해양 플랫폼과 같이 규모가 크고 복잡한 모델의 운동특성을 파악하기 위해서는 실물 크기 그대로의 설계 모델을 이용한 실험을 진행하기 어렵기 때문에 수치해석을 수행하거나 축소된 모형을 이용하여 모형실험을 실시한다. 그러나 수치해석은 많은 가정을 기반으로 하기 때문에 수치 해석의 결과가 실제 구조물의 운동 특성을 정확히 구현한다고 보기는 어렵다. 특히 문제의 단순화 및 계산 시간 단축을 위하여 선형 포텐셜 이론에

기반한 수치 해석을 수행할 경우에는 비압축성 및 비점성 유체, 비회전성 유동을 가정하고 다양한 비선형 효과들을 무시한다. 따라서 모형실험을 함께 수행하고, 수치해석의 결과와 비교하여 수치해석에서 고려되지 못하는 부분을 보완할 수 있다. Chan et al.(1995)은 선박의 횡동요(Roll) 운동에 영향을 주는 감쇠력 계수를 추정하기 위한 수치적 방법을 제시하면서 선형과 2차의 감쇠력을 합한 모델, 그리고 선형과 3차의 감쇠력을 합한 모델을 이용하여 검증을 수행하였다.

Takaki and Tasai(1973)는 빌지킬(Bilge keel)이 부착된 모형 선

Received 8 May 2017, revised 2 January 2018, accepted 25 January 2018

Corresponding author Yoon Hyeok Bae: +82-64-754-3485, yh.bae@jejunu.ac.kr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5198-4519

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Annual Autumn Conference of KSOE 2016 in Busan.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

박을 이용하여 강제 동요 실험을 수행하고 이를 수치적으로 모사할 때, 3차의 감쇠항을 더하면 더욱 근접한 횡동요 응답을 얻을 수 있음을 확인하였다. Dalzell(1978)은 선박의 횡동요 응답에 적합한 비선형 모델 중 해석적인 접근이 유리한 선형과 3차의 혼합된 감쇠 모델에 대하여 논의하였다. 이와 같이 그동안의 연구는 주로 선박의 횡동요 감쇠 현상에 초점이 맞추어져 왔으며, 비선형 감쇠항의 수치적 해법 제시의 관점에서 다양한 연구가 이루어져 왔다.

본 연구에서는 하부가 다수의 폰툰(Pontoon) 및 수직, 수평 방향 브레이스(Vertical or horizontal braces)로 이루어진 초대형 반잠수식(Semi-submersible) 해양 플랫폼의 거동에 적합한 감쇠모델을 선정하기 위하여 6자유도 자유감쇠 거동을 수치해석을 통하여 시뮬레이션하고, 모형실험의 결과와 비교하여 선형 포텐셜 이론에서 고려하지 못하는 적절한 감쇠모델을 찾아보았다. 이를 위하여 선형 및 2차 감쇠와 같은 다양한 감쇠 모델을 적용하여 실제 플랫폼의 운동 특성과 가장 유사한 결과를 보이는 감쇠 모델을 결정하였다. 또한 감쇠모델의 차이에서 기인하는 플랫폼의 운동 응답 특성을 파악하기 위하여 파도가 작용하는 해상 환경 하에서 3시간 동안의 부유체-계류 시간영역 연성해석을 수행하고, 플랫폼의 운동 응답을 통계분석 하였다.

2. 해석 방법

2.1 해석 모델

본 연구에서 해석에 사용한 반잠수식 플랫폼은 Fig. 1과 같이 선박해양플랜트연구소(KRISO, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering)에서 제안한 부유식 해상 풍력·파력 복합발전 플랫폼이다(Kim et al., 2015). 본 플랫폼이 설치될 대상 해역은 제주도 서부의 차귀도 근방으로 수심은 80m로 가정하였다. 플랫폼의 4개의 주 기둥(Column) 위에는 각각 3MW급 풍력발전기가 1기씩 설치되어 있으며, 플랫폼의 각 면마다 6기의 파력발전장치(Wave energy converter, WEC)가 설치되어 있다. 플랫폼의 하부구조물은 반잠수식 구조물로서 Fig. 2와 같은 다수의 세장체로 구성되어 있다.

파도의 영향 하에서 플랫폼의 동적 거동을 수치 시뮬레이션하기 위하여 전체 플랫폼 중 수면 하부에 위치한 주 기둥, 폰툰, 수직 및 수평 방향 브레이스, 원통형의 파력발전장치가 Fig. 2와

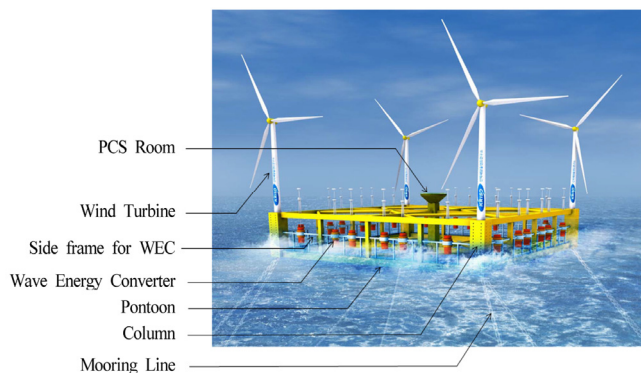


Fig. 1 Conceptual design of hybrid power generation platform

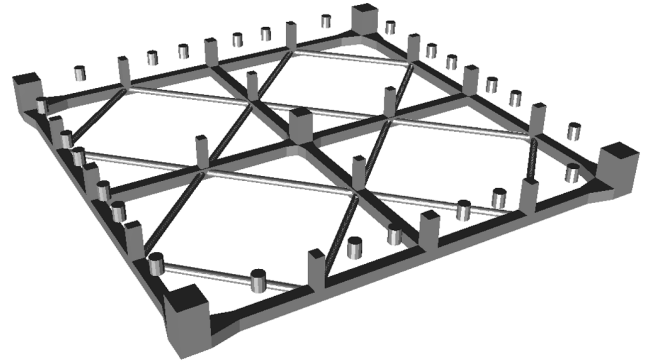


Fig. 2 Submerged geometry of hybrid power generation platform

Table 1 Specifications of hybrid power generation platform

Item	Unit	Value
Overall platform displacement	[kgf]	27,266,000
Distance between two columns	[m]	150
Draft	[m]	15
Total WEC weight	[kgf]	1,777,000
Mooring load	[kgf]	343,000
Center of gravity above keel	[m]	15.33

같이 모델링 되었다. 구조물의 유체력 계산에 큰 영향을 미치지 않는 소형의 파력발전장치 지지 구조물(WEC guide frame) 등은 모델링하지 않았다. Table 1은 플랫폼의 제원을 나타낸다.

Fig. 3은 복합발전 플랫폼의 계류선의 배치를 보여준다. 그림과 같이 플랫폼의 각 주 기둥마다 2개씩, 총 8개의 현수선으로

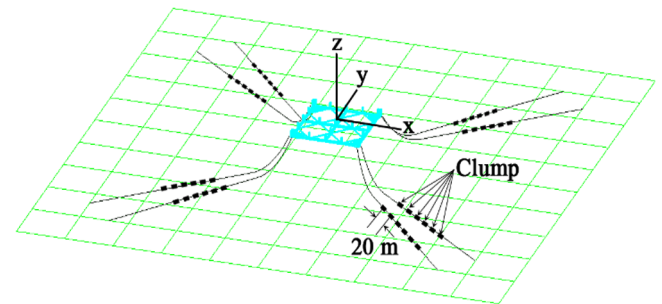


Fig. 3 Mooring line arrangements

Table 2 Specifications of mooring system

Item	Unit	Value
Depth to fairleads below mean water level	[m]	13
Unstretched mooring line length	[m]	500
Chain diameter	[m]	0.147
Wet mass density	[kg/m]	374
Total number of clump weights	[ea]	6
Clump wet weight	[kgf]	11,000
Spacing between clump weights	[m]	20
Distance from fairlead to clump along the arc	[m]	130

계류되어 있다. 각 계류선에는 6개의 클럼프 웨이트(Clump weight)가 일정 간격을 두고 설치되어 있다. 계류선의 상세 제원은 Table 2와 같다.

2.2 감쇠력 해석

플랫폼의 동유체력 계수 및 파 기진력, 2차 파 기진력은 포텐셜 유동 기반의 방사/산란 문제 해석용 상용 프로그램인 WAMIT(Wave analysis at MIT)을 사용하여 주파수 영역에서 계산하였다(Lee et al., 1991). WAMIT으로부터 계산된 계수를 이용하여 플랫폼의 자유감쇠 시뮬레이션 및 시간 영역 운동 응답 해석을 수행하였고, 이는 Orcina사에서 개발한 부유체-계류 연성해석 상용 프로그램인 OrcaFlex를 이용하였다(Orcina, 2015).

WAMIT은 선형 포텐셜 이론을 기반으로 한 주파수 영역의 유체력 해석 프로그램이기 때문에 구조물의 운동 응답 산출 시 점성의 영향은 무시되며, 일반적으로 방사감쇠력을 제외한 나머지 감쇠력은 사용자의 필요에 따라 선형 감쇠의 형태로 추가적으로 입력할 수 있다. 그러나 구조물의 운동 속도에 비례하는 선형 감쇠력은 실제 구조물의 감쇠 경향을 정밀하게 반영하지 못하는 단점이 있으며, 이러한 점에서 구조물의 운동을 시뮬레이션 할 때에는 점성 또는 형상으로부터 기인하는 비선형 감쇠력을 적용할 필요가 있다.

시간영역의 해석을 수행하면 다양한 비선형 효과를 포함시켜 플랫폼의 거동을 해석할 수 있는데 본 연구에서는 반잡수식 구조물의 자유감쇠 거동을 OrcaFlex를 이용하여 시뮬레이션 하였다. OrcaFlex는 WAMIT으로부터 계산된 동유체력 계수(부가질량, 방사감쇠) 및 파 기진력을 이용하여 부유체-계류가 연성된 시간 영역 운동 해석을 수행한다. 이 때 시간 기억함수(Time memory function)로 포함되는 방사감쇠 효과와 더불어 구조물에 작용하는 추가적인 감쇠효과를 적용할 수 있는데, 구조물의 운동 속도에 비례하는 선형 감쇠(Linear damping) 계수 혹은 속도의 제곱에 비례하는 2차 감쇠(Quadratic damping) 계수를 이용하는 방법이 있다. 선형 감쇠와 2차 감쇠를 각각 단독으로 적용할 수 있으며, 필요에 따라서는 두 가지 감쇠력을 동시에 포함시킬 수도 있다. 선형 감쇠와 2차 감쇠는 각 운동 모드에 독립적으로 적용되므로, 부유체의 6자유도 운동 모드에 대하여 각각 독립적으로 감쇠 계수를 선정하여야 한다.

선형 또는 2차의 감쇠 모델 이외에도 세장체로 이루어진 개별 부재(폰톤, 브레이스 등)에 대해 각각 모리슨 방정식의 항력 항을 이용하여 감쇠 모델을 구성할 수도 있다. 플랫폼을 구성하는 개별 부재에 작용하는 항력을 모리슨 방정식의 항력 항을 이용하여 각각 산출 한 뒤, 이를 플랫폼에 작용하는 등가의 합력 및 합모멘트로 변환하여, 플랫폼의 6자유도 운동 방정식에 외력으로 입력한다.

모리슨 방정식의 항력 항을 이용한 감쇠 모델을 적용하기 위해서는 세장체의 형상에 따라 개별 세장 부재에 적절한 항력계수를 적용해 주어야 한다. 이를 위하여 실험을 통하여 얻은 플랫폼의 자유감쇠 경향을 잘 따르도록 개별 부재에 대해 적절한 항력계수를 선정할 필요가 있다. 이러한 경우에 플랫폼의 운동 해석 시 수많은 개별 부재에 대해 일일이 모리슨 방정식을 적용하여 항력을 계산해야 하므로 수치 시뮬레이션 과정에 많은

시간이 소요되는 단점이 있다.

실제 모델과 비슷한 운동 결과를 얻기 위한 감쇠력을 결정하기 위해서는 실험으로부터 측정된 자유감쇠의 결과와 자유감쇠 수치 시뮬레이션의 결과를 비교하며 선형 감쇠 계수, 2차 감쇠 계수 혹은 항력을 계산하기 위한 개별 부재들의 항력계수를 찾아야 한다(Robertson et al., 2014). 또한 세 가지 감쇠 모델 중 필요에 따라서는 두 가지 이상의 모델을 조합하여 동시에 적용할 수도 있다.

3. 감쇠 모델에 따른 자유감쇠 실험

본 연구의 모델인 반잡수식 구조물의 운동 특성을 파악하기 위해서는 수치 해석을 진행하여야 한다. 그러나 수치 해석은 많은 가정을 기반으로 물리적인 모델을 단순화 시켜 해석을 진행하기 때문에 실제 구조물의 운동 특성과 정확히 일치하는 해석 결과를 기대하기는 어렵다. 일반적으로 구조물에 작용하는 여러 감쇠력 중 방사 감쇠력을 제외한 감쇠력을 수치적으로 계산하는 것은 어렵기 때문에 모형실험의 결과를 이용하여 적절한 감쇠 모델을 찾고 이를 수치 시뮬레이션에 적용하여야 한다.

본 구조물에 대한 자유감쇠 수리모형 시험이 설계 모델의 1/50 비율로 축소된 모형을 이용하여 선박해양플랜트연구소에서 수행되었으며, 이 결과를 수치 시뮬레이션의 결과와 비교하여 Fig. 4에 실선으로 나타내었다. 감쇠 계수 및 항력 계수를 선정하기 위하여 실험의 결과와 초기 변위를 동일하게 한 후, 첫 번째 운동 주기에서의 최댓값과 최솟값이 최대한 일치하도록 감쇠 계수 또는 항력 계수를 선정하였다. 그러나 비교적 구조물의 운동 속도가 큰 초기의 데이터를 기준으로 감쇠 계수를 선정하였기 때문에 속도가 작은 운동에서의 감쇠력을 추정하는 데는 어느 정도 한계가 있다.

각 감쇠 모델을 평가하는 데 있어서, 실험의 결과와 정량적으로 값을 맞추기 위하여 정밀한 계수를 선정하기보다 각 감쇠 모델이 실험 결과의 경향을 얼마나 유사하게 구현할 수 있는지를 살펴보았다. Fig. 4(a)는 전후동요의 결과, Fig. 4(b)는 상하동요의 결과, Fig. 4(c)는 종동요의 결과를 비교한 그래프이다. 전반적으로 선형 감쇠 계수를 적용하여 시뮬레이션 한 경우에는 전후동요 및 종동요의 감쇠가 급격히 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면 2차 감쇠 계수를 적용하거나 모리슨 항력을 이용한 감쇠를 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과는 실험의 결과를 보다 정확히 재현하는 경향을 보였다. 특히 2차 감쇠 모델과 모리슨 항력 모델 간은 사용된 계수의 차이로 인한 미세한 차이만 발생하는데 이는 자유감쇠 시뮬레이션이 유체입자의 운동이 없는 정수 중에서 수행되었고, 정수 중에는 2차 감쇠 모델과 모리슨 항력 모델 간 등가의 감쇠계수가 적용되면 동일한 감쇠 거동을 보이기 때문이다. 유체입자와 세장 부재 간의 상대속도의 제곱에 비례하는 모리슨 항력 모델은 파랑에 의한 유체입자의 운동이 존재할 경우에 2차 감쇠 모델과 차이를 나타내게 되며, 이러한 이유로 자유감쇠 실험을 통하여 적절한 감쇠 모델을 선정했다 하더라도, 그 감쇠 모델이 반드시 파랑이 존재하는 환경 하에서도 적합한 감쇠력을 나타내는 것은 아니라는 사실을 확인할 수 있다.

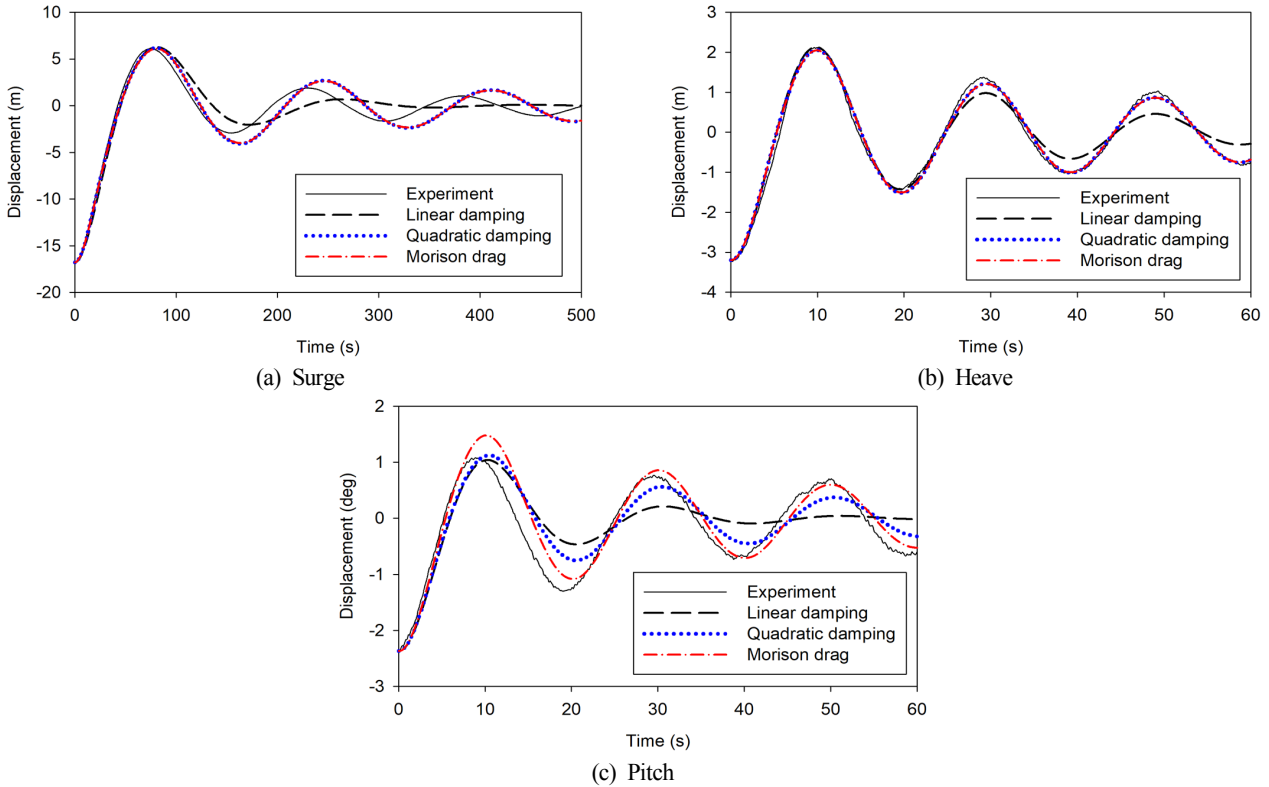


Fig. 4 Free decay simulation results(Linear damping, Quadratic damping, Morison drag) compared to free decay test results(Experiment)

4. 불규칙 파랑 중 운동 응답

앞에서 플랫폼의 자유감쇠실험 결과를 이용하여 플랫폼의 감쇠 거동을 최대한 유사하게 모사할 수 있는 감쇠 계수 또는 항력 계수를 각각의 감쇠 모델에 대하여 선정하였다. 그러나 이러한 과정을 통하여 선정한 감쇠 모델은 정수 중의 플랫폼의 감쇠 거동을 기준으로 선정 되었으므로 실제 해양 환경에 대한 플랫폼의 운동 특성을 파악하기 위해서는 불규칙 파랑 중 부유체-계류 연성해석을 수행하여야 한다. 이 연구에서는 Table 3와

같이 평시 조건(Normal condition), 극한 조건(Extreme condition), 생존 조건(Survival condition)의 3가지 경우에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 설치 대상 해역의 해상환경을 토대로, 평시 조건은 재현주기 1년, 극한 조건은 재현주기 50년, 생존 조건은 재현주기 100년의 해상환경에 해당하는 조건들을 적용하였으며, 파랑만을 고려하고 바람은 따로 고려하지 않았다. 파랑스펙트럼으로써 JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 이용하여 불규칙파를 생성하였다(Fig. 5). 입사파의 방향은 Fig. 6과 같이 좌측에서 우측방향으로 작용하는 것으로 해석하였다.

Table 3 Environmental conditions

	Unit	Normal condition	Extreme condition	Survival condition
Wave	Significant wave height	[m] 5.93	11.28	12.88
	Peak period	[s] 10.81	14.29	15.27
	Peak shape parameter (γ)	[-] 2.2	2.2	2.2

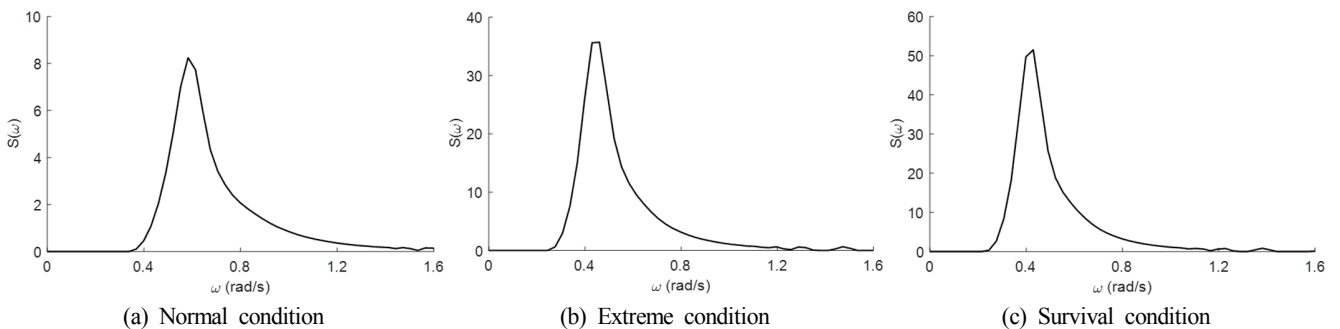


Fig. 5 Wave spectra

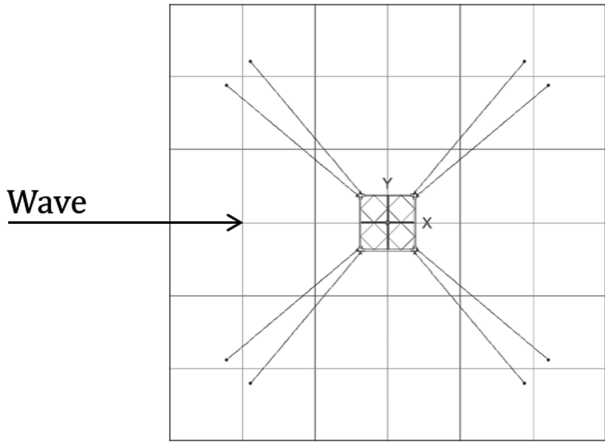
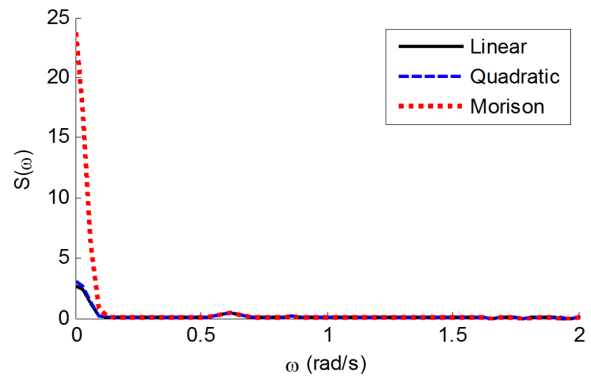
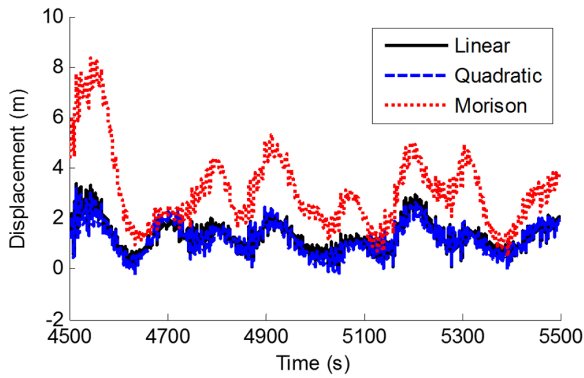


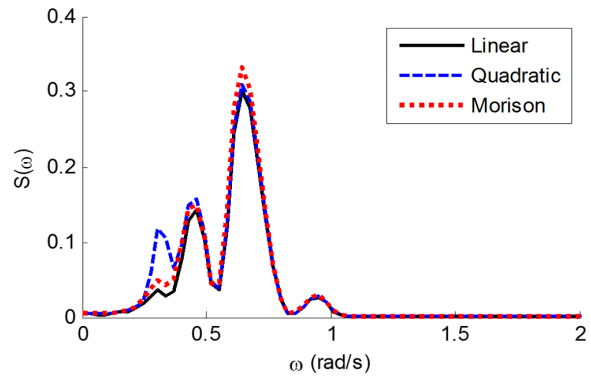
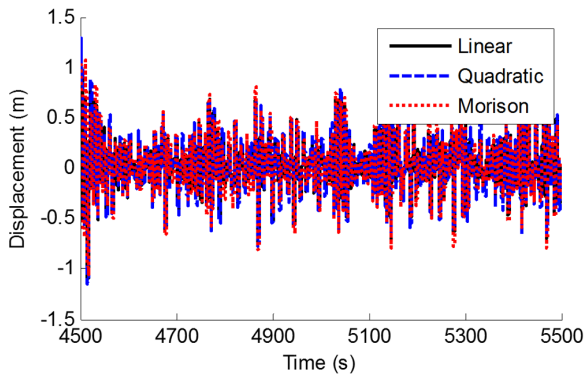
Fig. 6 Wave direction

시뮬레이션 초기에 플랫폼의 과도 응답을 방지하고자 400초 동안에는 점진적으로 외력을 증가시켰으며, 이후 플랫폼의 운동 응답을 살펴보고자 10,800초(3시간)의 시뮬레이션을 수행하였다. Figs. 7-9는 각각 평시 조건, 극한 조건, 생존 조건에서의 플랫폼 전후동요(a), 상하동요(b), 종동요(c) 운동 범위 및 운동 스펙트럼을 보여준다. 운동 범위는 거동의 차이를 확인할 수 있도록 일부 구간을 도시하였으며, 운동 스펙트럼은 초기 400초 동안의 결과를 제외하고 변위의 평균값을 0으로 정규화 하여 구조물의 동적 성능을 확인하는데 활용하였다.

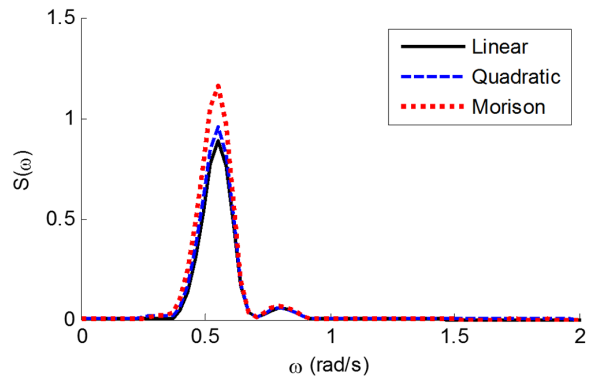
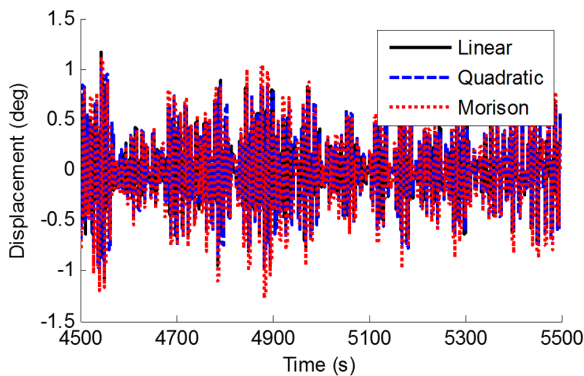
플랫폼의 전후동요의 경우, 세 가지 조건에서 동일하게 모리슨 항력을 이용한 감쇠 모델을 적용하였을 때 유체 입자의 운동과 부재들의 상대속도 차이에서 기인하는 표류력(Drift force)이 발생하였음을 알 수 있다. 운동 스펙트럼에서도 모리슨 항력을 이용한 감쇠 모델의 경우, 나머지 두 감쇠 모델의 결과에 비



(a) Surge



(b) Heave



(c) Pitch

Fig. 7 Platform motion time histories(left) and motion spectra(right) under normal condition

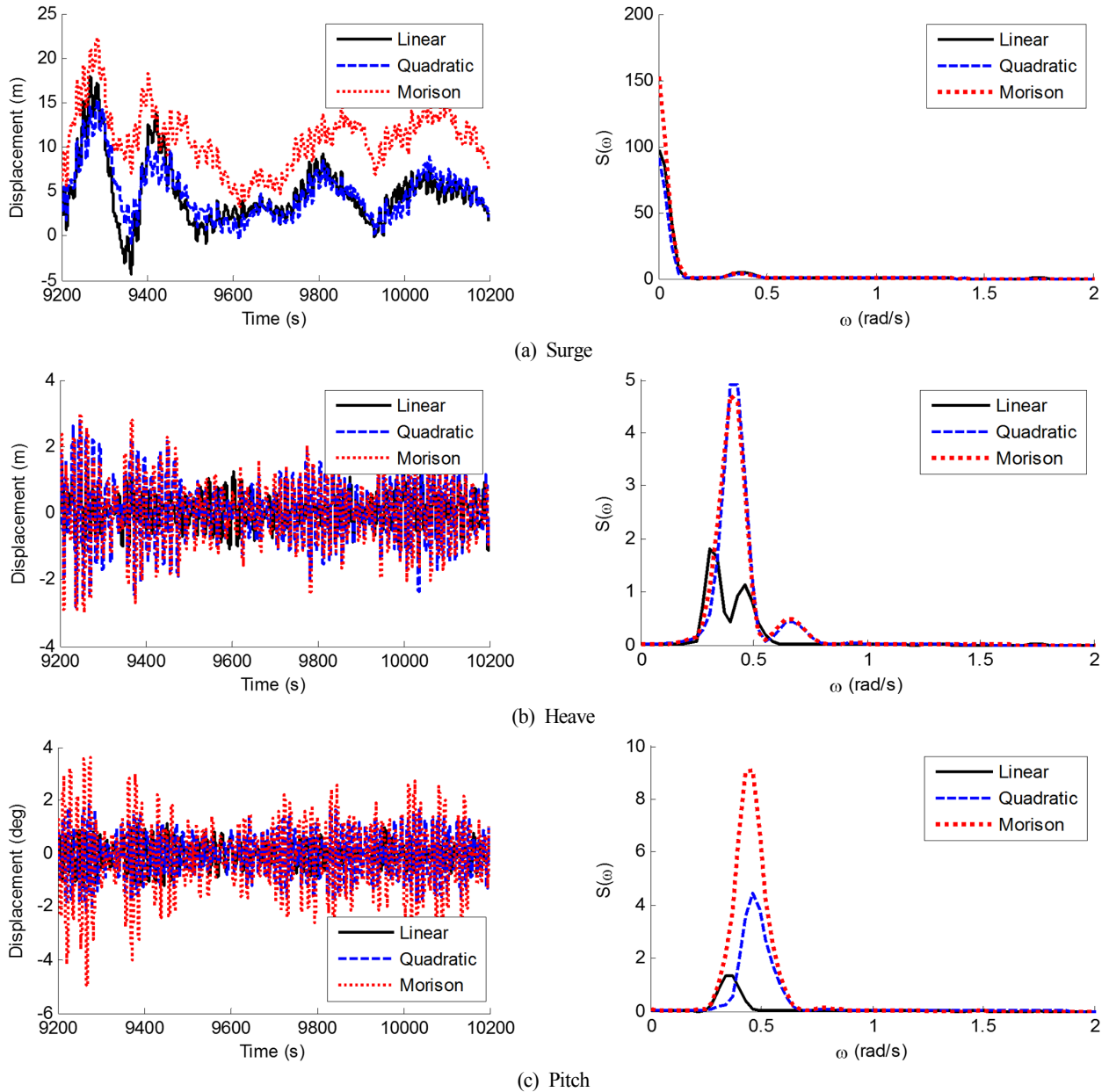


Fig. 8 Platform motion time histories(left) and motion spectra(right) under extreme condition

해 저주파수 영역에 에너지가 집중되거나(평시 조건, 극한 조건) 혹은 에너지가 감소한 결과(생존 조건)를 보였다. 상하동요 운동 스펙트럼의 경우 세 감쇠 모델이 비슷한 수준의 에너지 분포를 보였으나, 종동요의 경우 Fig. 4(c)에서와 같이 감쇠 모델별로 감쇠의 경향이 다소 차이 나므로 운동 응답 결과의 직접적인 해석은 한계가 있다.

앞선 자유감쇠 시뮬레이션 결과에서는 플랫폼의 운동이 각각 독립적으로 발생하였기 때문에 2차 감쇠 모델을 적용하였을 때에도 항력을 이용한 감쇠 모델을 적용하였을 때와 비슷한 수준으로 실험의 결과와 근접한 결과를 얻을 수 있었으나, 실제 해상환경을 대상으로 시뮬레이션을 할 경우에는 구조물의 복잡한 연성 거동으로 인한 항력 효과가 모두 고려되는 모리슨 항력 모델을 적용하여야 보다 실제와 근접한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며 선형 또는 2차 감쇠모델을 사용할 때는

유속과 구조물 운동의 상대속도 제곱까지는 아니더라도 최소한 유속의 제곱에 해당하는 모리슨 항력 영향을 고려하여 시뮬레이션 하여야 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

Table 4는 평시 조건, 극한 조건, 생존 조건의 경우에 플랫폼의 전후동요, 상하동요, 종동요 최대 가속도 값 및 선형 감쇠 모델을 기준으로 계산한 각 감쇠 모델의 최대 가속도 값의 상대적 비율을 보여준다. 플랫폼의 상단에는 풍력발전기가 탑재되고, 풍력발전기의 너셀 부분은 플랫폼의 회전 운동 중심에서 상당히 이격되어 있으므로 일반적으로 큰 가속도가 발생한다. 따라서 본 시스템과 같이 풍력발전기를 포함한 전체적인 플랫폼 운동의 안정성을 확인하기 위해서는 플랫폼의 가속도 값을 정확히 예측하는 것이 필요하다. Table 4의 전후동요의 경우 선형 감쇠와 2차 감쇠 모델의 차이는 2%이내로 큰 차이를 보이지 않으나 모리슨 항력 모델의 경우 선형모델에 비하여 최대 가속도

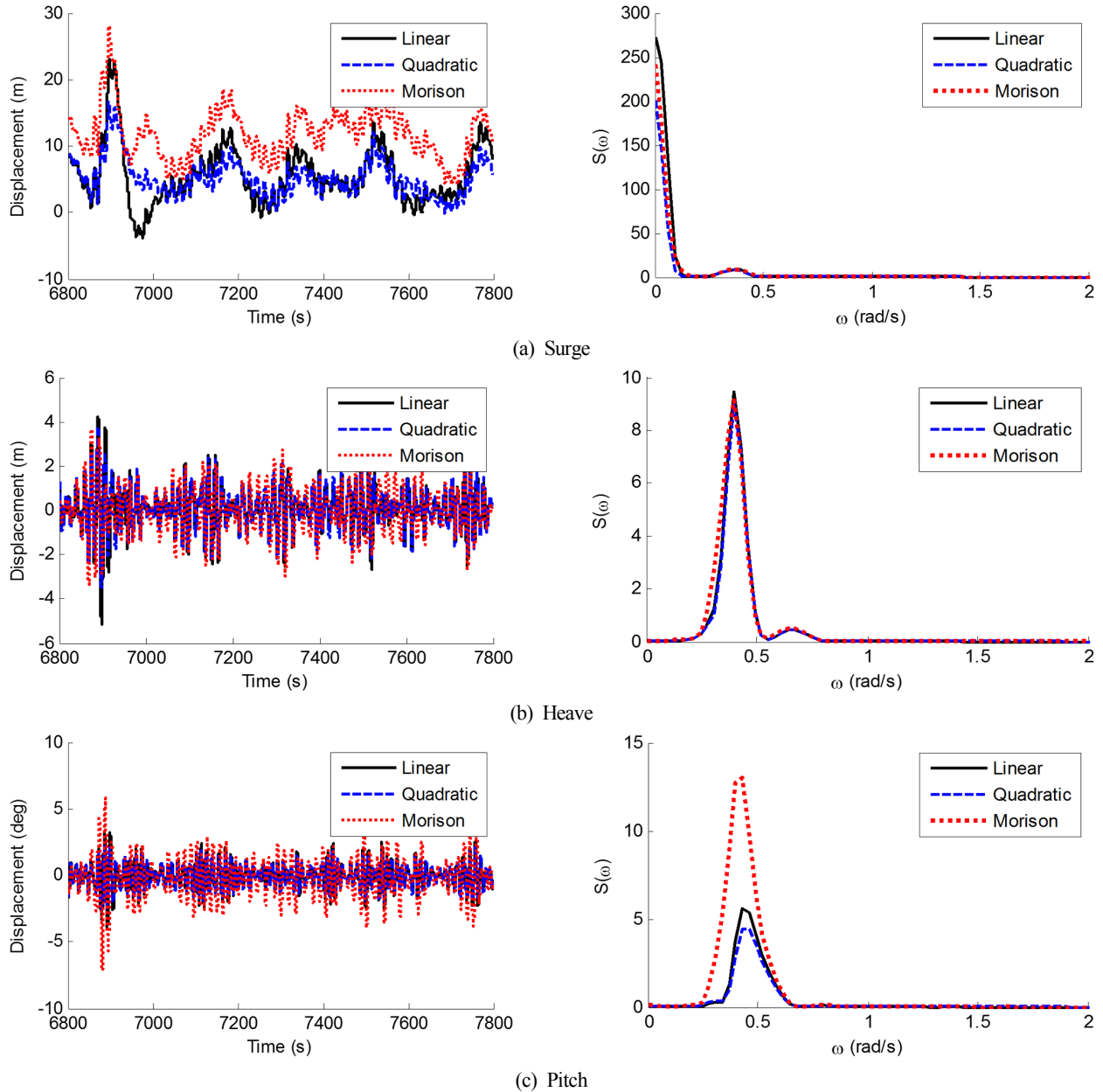


Fig. 9 Platform motion time histories(left) and motion spectra(right) under survival condition

Table 4 Maximum acceleration of platform

		Normal condition		Extreme condition		Survival condition	
		Acc. [m/s^2 or deg/s^2]	[%]	Acc. [m/s^2 or deg/s^2]	[%]	Acc. [m/s^2 or deg/s^2]	[%]
Surge	Linear damping	0.7175	100.00	0.8660	100.00	0.9765	100.00
	Quadratic damping	0.7167	99.89	0.8623	99.57	0.9590	98.21
	Morison drag	0.7603	105.97	0.9330	107.74	1.0201	104.47
Heave	Linear damping	0.4418	100.00	0.8986	100.00	0.9496	100.00
	Quadratic damping	0.4456	100.86	0.7880	87.69	0.7525	79.24
	Morison drag	0.4436	100.41	0.7952	88.49	0.8627	90.85
Pitch	Linear damping	0.4857	100.00	0.8079	100.00	0.9142	100.00
	Quadratic damping	0.4772	98.25	0.7363	91.14	0.7491	81.94
	Morison drag	0.5806	119.54	1.0617	131.41	1.2860	140.67

가 환경 조건에 따라 약 4~8% 정도 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 즉, 수치 시뮬레이션 수행 시 선택한 감쇠 모델에 따라 최대 가속도의 결과가 과소 또는 과대평가 될 가능성이 있다는 의미이다. 특히 2차 감쇠 및 모리슨 항력 모델의 경우 Fig. 4(a)에서 나타난 자유감쇠 경향은 서로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 하지만 실제 해상조건에서의 시뮬레이션 결과 운동 응답은 차이가 남을 확인할 수 있다. 이는 유체입자의 속도를 고려한 상대속도 제곱 항이 모리슨 항력 모델에는 포함되어 있기 때문으로 해석할 수 있다. Table 4의 상하동요의 경우 평시조건에서의 최대 가속도는 감쇠 모델 간 큰 차이를 보이지 않으나 극한 조건 및 생존 조건에서는 2차 감쇠 및 모리슨 항력 모델이 선형 감쇠 모델에 비하여 최대 가속도 값이 다소 작게 나타남을 확인할 수 있다. 상하동요의 경우도 마찬가지로 Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 2차 감쇠와 모리슨 항력 모델의 자유감쇠 경향은 거의 일치하였지만 실제 해상조건에서의 시뮬레이션 결과 운동의 응답은 다소 차이를 보임을 확인할 수 있다. Table 4의 중동요 최대 가속도의 경우는 Fig. 4(c)의 자유감쇠 경향이 감쇠 모델별로 다소 차이를 보이기 때문에 직접적인 결과의 해석은 무리가 있으나 궁극적으로는 적절한 감쇠모형을 적용한 운동 시뮬레이션이 수행되어야만 플랫폼 상부의 다양한 구조물에 작용하는 가속도에 대해 과대 또는 과소평가하게 될 위험을 줄일 수 있게 됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

해양구조물의 동적 거동에 대한 수치해석을 진행할 경우, 일반적으로 문제를 단순화하기 위하여 선형 포텐셜 이론에 기반한 부유체-계류 연성 해석을 수행하게 된다. 그러나 선형 포텐셜 이론은 방사감쇠력을 제외하고 해양구조물에 미치는 추가적인 다양한 감쇠력을 고려하지 않기 때문에 수치 해석으로는 실제 구조물의 운동과 유사한 결과를 구현하기 어렵다. 따라서 구조물에 작용하는 다양한 감쇠력을 추가로 적용해 주어야 보다 정확한 운동 해석 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 감쇠 모델 중 선형 감쇠력, 2차 감쇠력 혹은 모리슨 방정식의 항력 항을 이용하여 구조물의 운동에 미치는 감쇠력을 실제 실험 결과와 비슷한 수준으로 맞추고자 하였다. 각 감쇠 모델에 적절한 값을 찾기 위하여 설계 모델의 모형에 대해 실시한 자유감쇠 실험의 결과와 비교하여 가장 근접한 운동 결과를 보이는 감쇠 계수 또는 항력 계수를 선정하였다.

자유감쇠실험의 결과와 감쇠 모델을 적용하여 실시한 자유감쇠 시뮬레이션 결과를 관찰하면, 2차 감쇠 모델 및 항력을 이용한 감쇠 모델을 적용하였을 때 선형 감쇠 모델에 비하여 실험의 결과와 근접한 수준의 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 실제 해상 환경 하에서의 각 감쇠 모델에 따른 운동의 차이를 확인하기 위하여 평시 조건, 극한 조건, 생존 조건에 대해 시간영역 운동 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과 2차 감쇠 모델과 모리슨 항력 모델은 자유감쇠 시뮬레이션에서는 거의

일치하는 운동 응답을 보였음에도 실제 해상 환경의 시뮬레이션에서는 두 응답이 차이가 남을 확인하였다. 이는 모리슨 항력 모델이 구조물의 부재를 관통하는 유체입자 속도와 그 부재의 운동 속도간의 상대속도를 고려하기 때문으로 해석할 수 있다.

이와 같은 결과를 통하여 정밀한 해양 구조물의 거동 예측을 위해서는 그 구조물의 감쇠 경향을 잘 나타내는 적절한 감쇠 모델을 적용해야 함을 알 수 있으며 적절한 감쇠 모델을 이용하여 예측된 정확한 구조물의 거동은 구조 신뢰성 검증 및 계류선의 최적 설계 등에 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업 「육해상 풍력터빈 신뢰성 및 발전량 향상을 위한 O&M 기술 고급트랙」으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다(No. 20164030201230). 또한 해양수산부의 국가 R&D 사업인 '10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발'과제(PMS3170)에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Chan, H.S.Y., Xu, Z., Huang, W.L., 1995. Estimation of Nonlinear Damping Coefficients from Large-amplitude Ship Rolling Motions. *Applied Ocean Research*, 17(4), 217-224.
- Dalzell, J.F., 1978. A Note on the Form of Ship Roll Damping. *Journal of Ship Research*, 22(3), 178-185.
- Kim, K.H., Lee, K.S., Sohn, J.M., Park, S.W., Choi, J.S., Hong, K., 2015. Conceptual Design of 10MW Class Floating Wave-offshore Wind Hybrid Power Generation System. *Proceedings of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona USA, 1, 737-743.
- Lee, C.H., Newman, J.N., Kim, M.H., Yue, D.K.P., 1991. The Computation of Second-order Wave Loads by WAMIT. *Proceeding of 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Stavanger Norway, 113-123.
- Orcina Ltd., 2015. OrcaFlex Manual version 10. Orcina Ltd., Daltongate, Ulverston, Cumbria UK, [Online] Available at: <<http://www.orcina.com>> [Accessed April 2017].
- Robertson, A., Jonkman, J., Masciola, M., Song, H., Goupee, A., Coulling, A., Luan, C., 2014. Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4. NREL Technical Report, NREL/TP-5000-60601.
- Takaki, M., Tasai, F., 1973. On the Hydrodynamics Derivative Coefficients of the Equations of Lateral Motions of Ships. *Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, 46.

Conceptual Design of Motion Reduction Device for Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation Platform

Sewan Park*, Kyong-Hwan Kim* and Keyyong Hong^{ID*}

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

부유식 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼의 운동저감장치 개념설계

박세완* · 김경환* · 홍기용^{ID*}

*선박해양플랜트연구소 해양에너지연구부

KEY WORDS: Wave-offshore wind hybrid power generation 파력-해상풍력 복합발전, Motion reduction device 운동저감장치, Damping plate 감쇠판, Boundary element method 경계요소법, 2D wave flume model test 2차원 조파수조 모형실험

ABSTRACT: The present study deals with the conceptual design of a motion reduction device for a floating wave-offshore wind hybrid power generation platform. A damping plate attached to the bottom of a column of a large semi-submersible is introduced to reduce the motion of the platform. Performance analyses on various shapes and configurations of damping plates were performed using the potential flow solver, and the appropriate configuration and size of the damping plate were selected based on the numerical results. In order to see the effect of viscous damping, a small scale model test was performed in a 2D wave flume. The performances of five different damping plates were measured and discussed based on the results of free decay tests and regular wave tests.

1. 서 론

파력, 조류, 조력, 해수온도차 등의 해양에너지원은 화석연료를 대체하는 신재생에너지로서 인류의 미래 에너지원으로 각광 받고 있다. 오늘날 전세계 25개가 넘는 국가에서 해양에너지원을 활용한 에너지 생산 기술 개발에 매진하고 있으며, 해양에너지 지원 중 파력-해상풍력 복합발전 분야는 다수의 실해역 실증이 이루어져 상용화에 근접해 있는 분야 중 하나이다 (NRG Expert, 2011; Enferad and Nazarpour, 2013). 신재생에너지원 중 가장 먼저 상용화를 이루었던 풍력발전은 육상 및 근해에서의 개발 제한으로 인해 점차 심해 부유식 영역으로 확장되고 있다(Butterfield et al., 2005). 그러나 해양에너지를 이용한 발전은 화석연료를 이용한 발전에 비하여 경제성이 낮다는 단점이 있으며, 이는 해양에너지 발전시스템의 상용화를 지연시키는 원인이 되고 있다. 최근 해양에너지 발전시스템의 경제성 향상을 위하여 다수의 해양에너지원을 복합적으로 발전하는 시스템을 개발하려는 시도가 이루어지고 있으며, 계류계, 전력변환, 계통연계, 이송/설치 등의 비용을 절약할 수 있는 시스템에 대

한 연구가 이루어지고 있다. 특히 환경 적지가 일치하는 파력과 풍력을 동시에 발전하는 발전시스템의 개발 및 실해역 시험이 유럽을 중심으로 수행되고 있으며, MARINA platform project (Soulard et al., 2013), H2Ocean project(Palomar, 2013), P80(Yde et al., 2015) 등이 대표적이다. 국내에서도 선박해양플랜트연구소 (KRISO, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) 주관으로 2013년부터 2016년까지 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발에 대한 연구가 수행되었으며, 부유식 플랫폼에 다수의 풍력터빈 및 파력발전기를 탑재하고 통합 전력제어시스템을 통해 복합 해양에너지원을 동시에 활용하고자 하는 발전시스템에 대한 개념설계가 완료되었다(Kim et al., 2015).

부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발 연구과제에서 개발된 발전시스템은 반잠수식 플랫폼 형태이며, 플랫폼의 네 모서리에 위치한 컬럼(Column) 상부에는 로터 직경 105m에 달하는 풍력터빈 4기가 각각 배치되어 있다. 본 구조물은 수평면상 전후좌우 대칭인 구조이고 길이와 폭이 각각 150m에 달하는 대형 구조물이다. 트러스(Truss) 구조로 고안되

Received 8 March 2017, revised 11 January 2018, accepted 1 February 2018

Corresponding author Keyyong Hong: +82-42-866-3912, khong@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7284-3248

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of ISOPE 2015 in Kona.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

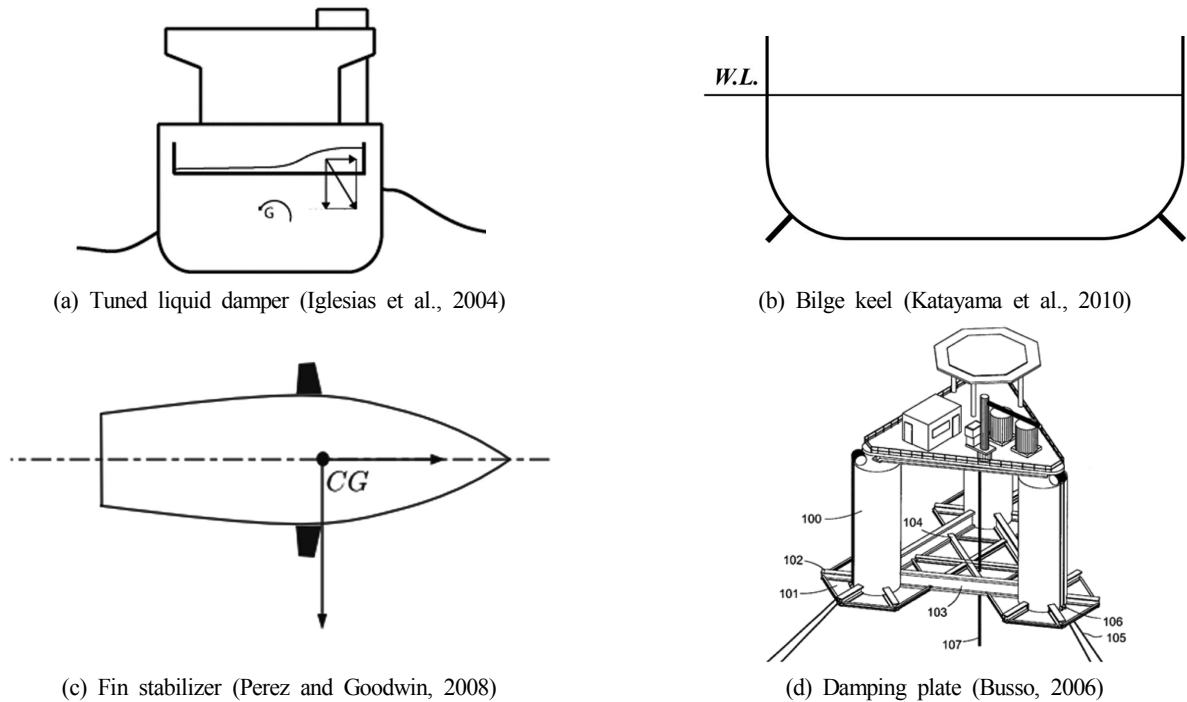


Fig. 1 Type of motion reduction device used in the ship and offshore structure

있기 때문에 통상적인 반잠수식 구조물에 비해 컬럼, 폰툰(Pontoon) 등의 주요부재의 종횡비(Asspect ratio)가 크다는 특징이 있다. 초기에 설계된 구조물의 상하동요, 횡동요, 종동요 등의 고유주기는 약 14초이고, 통상적인 반잠수식 구조물에 비해 공진주기가 파랑주파수에 근접하여 공진 운동의 위험성이 있었다(Park et al., 2014). 한편 풍력터빈 나셀(Nacelle)은 다수 풍력터빈 배치의 특성상 플랫폼 무게중심으로부터 먼 거리에 위치하게 되며, 플랫폼의 작은 횡동요 및 종동요에도 큰 회전가속도를 경험하게 된다. 결과적으로 플랫폼의 과도한 운동은 나셀과 로터의 구조 안전성 및 운용성에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 적절한 운동 저감 장치가 필요하다.

선박 및 해양구조물의 과도한 운동을 억제하기 위한 장치들은 동조액체감쇠장치(Tuned liquid damper), 빌지킬(Bilge keel), 핀 안정기(Fin stabilizer), 수평판(Horizontal plate) 또는 감쇠판(Damping plate), 트러스 폰툰(Truss-pontoon) 등 다양한 형태가 존재한다(Fig. 1). 최근 부유식 풍력터빈에 대해 비용 대비 효과가 높은 감쇠판 형태가 주로 채택되고 있다. Cermelli et al. (2004)은 반잠수식 해양구조물 하단에 감쇠판을 부착한 모델에 대해 주파수 영역 포텐셜 수치해석을 수행하여 공진주기 이동 및 운동저감 효과를 보였으며, Cermelli and Roddier(2005)은 모형실험 및 시간영역 수치해석 결과를 비교하고 불규칙파 조건에서의 운동응답 결과를 검토하였다. 이는 Water entrapment plate(Busso, 2006)로 특허화되었고 부유식 해상풍력발전기인 WindFloat에 적용되었다(Cermelli et al., 2009). 이외에도 스파(Spar) 구조물에 부착된 감쇠판에 대한 운동저감효과가 수치적 및 실험적으로 검토되었으며(Koh and Cho, 2016; Rho and Choi, 2002; Pauline and Adrien, 2015; Javier et al., 2015; Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2015), Tao and Cai(2004)의 연구에서는 CFD(Computational fluid dynamics) 해석을 통해 감쇠판의 크기

및 두께 등에 대해 와류 발생에 기인한 점성감쇠 영향을 검토한 바 있다.

부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발 연구과제에서도 플랫폼의 공진회피 및 과도한 회전운동 저감을 위한 운동저감장치 개발이 요구됨에 따라 문헌조사와 수치해석 및 모형실험에 기반한 운동저감장치 설계가 수행되었다. 본 연구에서는 운동저감장치의 다양한 부착형태 및 크기에 대한 수치해석 결과와 도출된 설계안을 소개한다. 또한 점성감쇠 효과를 증진시킬 목적으로 고안된 감쇠판 형태들을 소개하고 2차원 조파구조 모형실험을 통한 운동응답 예측 결과들을 비교하여 제시한다. 이로부터 대형 반잠수식 플랫폼의 운동저감을 위한 감쇠판의 형태에 대해 논의한다. 본 논문은 대상 구조물인 복합발전 플랫폼 및 운동저감장치의 형상 정의, 적용한 수치해석 기법 및 모형실험 방법 소개, 수치해석 및 모형실험 결과, 결론 순으로 서술되었다.

2. 해석 대상

2.1 대상 플랫폼

복합발전 플랫폼의 주요 치수를 Table 1에 나타내었다. 풍력발전기 4기 및 파력발전기 24기를 플랫폼에 탑재하는 대형 반잠수식 구조물이다. 플랫폼의 수면하부 선체는 컬럼(Column), 내/외 부폰툰(Outer/inner pontoon), 폰툰대각보강재(Pontoon diagonal brace), 수직보강재(Vertical brace), 파력발전기부이(Wave energy converter buoy), 파력발전기지지구조로 구성되어 있다. 수치해석 모델에서는 선체 배수량 기여도가 낮은 파력발전기 지지구조를 배제하였다. Fig. 2에는 복합발전 플랫폼의 형상을 나타내었다. 세장체적 특성을 지닌 복합발전 플랫폼의 구조요소들은 DNV (Det Norske Veritas)에서 권장하고 있는 해양구조물의 환경하중

Table 1 Principal dimensions of the baseline platform

Items	Value
LOA [m]	158.5
Height [m]	27
Draft [m]	15
Total weight [MT]	23,285

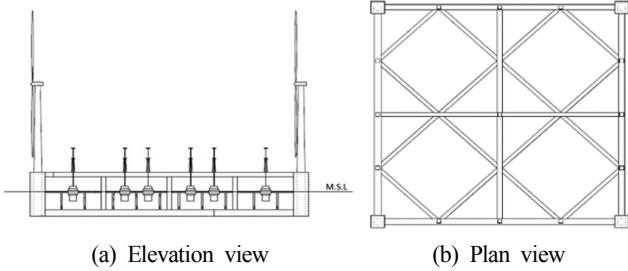


Fig. 2 Baseline platform geometry

Table 2 Categorization of the dominant wave force for the structure component

Items	Regime	Category
Column	Large inertia	Primary structure
Outer/inner pontoon	Large inertia	
Pontoon diagonal brace	Inertia and drag	Secondary structure
Vertical brace	Inertia and drag	
WEC buoy	Inertia and drag	

모델링 가이드라인(DNV, 2010)에 따라 수치해석 모델로 모델링되었다. DNV 가이드라인에서는 해양구조물과 파랑의 상대적

크기에 따른 지배적인 하중을 제시하고 있는데, Table 2와 같이 복합발전 플랫폼의 수면하부 구조 요소에 대해 상대적 크기 별로 지배적인 하중 영역을 구분하여 주요부재(Primary structure) 및 보조부재(Secondary structure)로 분류하였다.

2.2 운동저감장치

감쇠판 형태의 운동저감장치는 플랫폼 부가질량, 점성감쇠를 증가시키면서도 파랑기진력도 증가시키기 때문에 운동저감의 관점에서 해당 효과들은 서로 상충되며(Cermelli et al., 2004), 운동응답은 감쇠판의 부착형태 및 크기에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 감쇠판의 다양한 배치형태와 크기를 개념설계의 설계인자로 정의하였다.

2.2.1 감쇠판의 배치형태

감쇠판의 배치형태에 따른 운동저감 성능을 판별하기 위하여 우선 감쇠판의 크기를 고정하였다. Park et al.(2014)의 연구에서는 WindFloat의 컬럼과 감쇠판 크기 비율을 고려하여 복합발전 구조물의 운동저감장치를 제안한 바가 있으며, 본 연구에서는 Park et al.(2014)에서 제시한 감쇠판의 크기를 적용하였다. 민감도 해석을 위하여 제안된 감쇠판의 배치형태를 Fig. 3에 나타내었다. 그림은 수평면상에서 전후좌우로 대칭인 복합발전 플랫폼의 1/4 형상만을 평면도로 나타낸 것이며, 주요부재인 컬럼, 내/외부폰툰, 감쇠판만 나타내었다. 그림에서 A_p 는 컬럼 단면적 대비 감쇠판의 단면적 비율을 의미하며, Base model은 운동저감 장치가 부착되지 않은 알몸 선체(Bare hull) 모델, Pre model은 Park et al.(2014)에 제시된 감쇠판, Num. model A-D는 새롭게 고안된 운동저감장치 설계 모델이다. Base model에 나타난 컬럼의 단면은 가로 및 세로길이가 8.5m인 정사각형이며, 절반만 나타난 외부폰툰은 길이가 70.75m, 단면의 가로 및 세로 길이는 모두 4m이다.

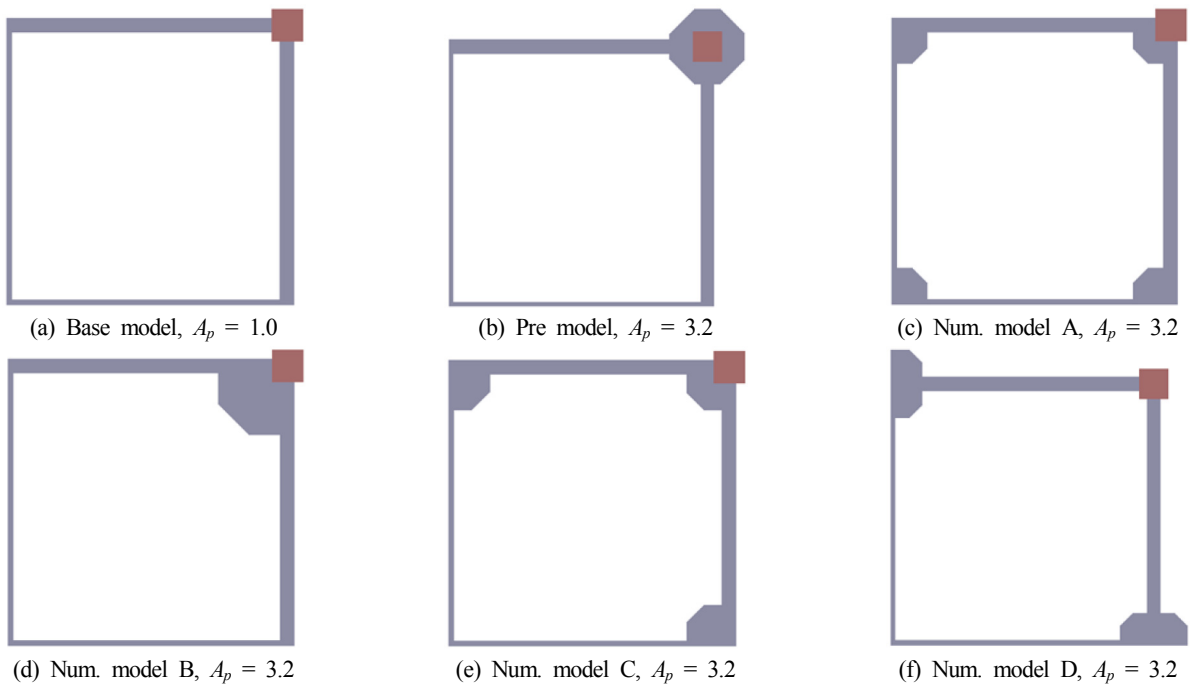


Fig. 3 Various configurations of the horizontal plate for the motion reduction device

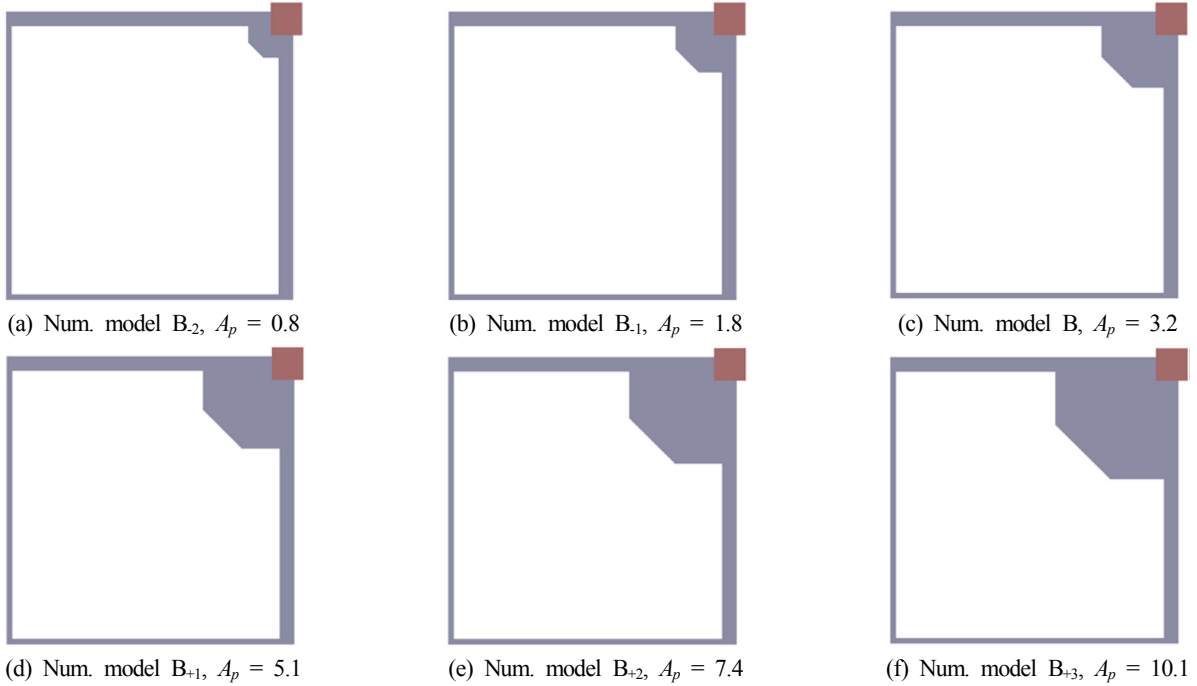


Fig. 4 Various sizes of the horizontal plate for the motion reduction device

2.2.2 감쇠판의 크기

감쇠판의 다양한 배치형태에 대해, 수치해석을 통해 가장 좋은 운동성능을 보이는 배치형태를 선정하고, 해당 배치형태를 기준으로 감쇠판의 크기를 변화시키며 성능을 평가하였다. Fig. 4에는 최적 배치형태로 선정된(Fig. 10) Num. model B를 바탕으로 감쇠판의 크기를 변화시켜 민감도 해석을 수행한 모델들을 나타내었다. 선정된 모델의 감쇠판과 컬럼의 상대면적비는 3.2이며(Fig. 4(c)), 이를 기준으로 0.8~10.1 범위의 상대면적을 고려하였다.

3. 운동저감장치 민감도 해석 방법

운동저감장치의 감쇠판 배치형태 및 크기에 대한 민감도 수치해석은 DNV-GL의 Wadam을 이용하여 수행하였다. Wadam은 포텐셜 유동 이론 기반의 경계치 문제를 파랑그린함수를 적용하여 주파수 영역에서 해석하는 프로그램으로, 선박 및 해양구조물의 운동성능 해석에 활용되고 있는 상용 프로그램이다.

Table 2에서 주요부재로 분류된 구조 요소 및 감쇠판에 대해서는 패널(Panel)로 모델링하여 경계요소법을 통한 산란 및 방사문제를 해석하고, 보조부재로 분류된 구조 요소는 모리슨 보(Morison beam)로 모델링하여 모리슨 식(Morison's equation)을 통해 보조부재에 작용하는 관성력 및 점성항력을 계산하여 플랫폼의 운동방정식에 적용하였다. 최종적으로 수립된 플랫폼 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$[-\omega^2(\mathbf{M} + \mathbf{A}(\omega)) + i\omega(\mathbf{B}_p(\omega) + \mathbf{B}_a + \mathbf{B}_v) + \mathbf{C}] \mathbf{X}(\omega, \beta) = \mathbf{F}(\omega, \beta) \quad (1)$$

이때, \mathbf{M} 은 플랫폼 질량 행렬, \mathbf{A} 는 부가질량 행렬, \mathbf{B}_p 는 파랑감쇠 행렬, \mathbf{B}_a 는 부가감쇠 행렬, \mathbf{B}_v 는 선형화된 점성감쇠 행렬, \mathbf{C} 는 복원력 행렬, \mathbf{X} 는 운동 변위 벡터, \mathbf{F} 는 파랑 기진력 및 모리슨 외력 벡터, ω 는 파랑 주파수, β 는 입사파 입사각을 나타낸다.

산란 및 방사문제 해석에 대한 상세 이론은 WAMIT theory manual에 수록되어 있으며(Lee, 1995), 모리슨 방정식의 적용은

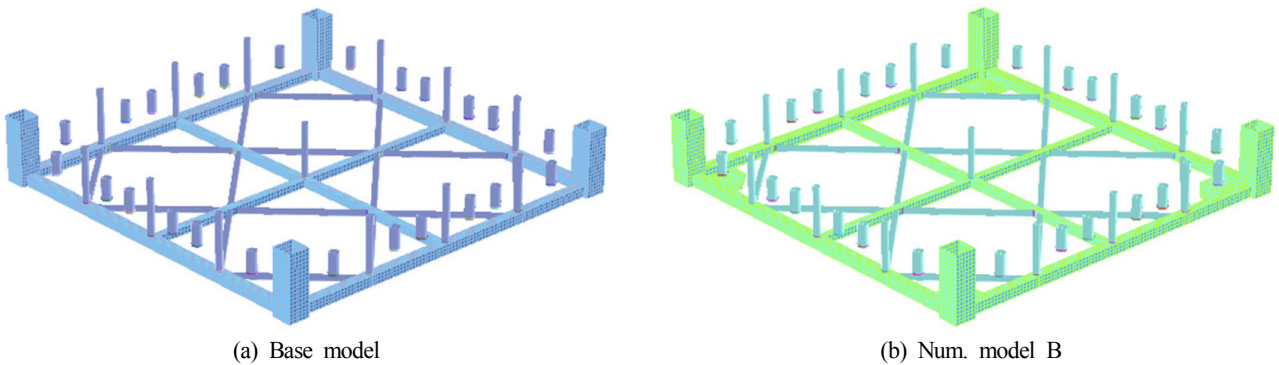


Fig. 5 Numerical analysis models for the Base Model and the Num. model B

Wadam user manual에 기술되어 있다(DNV, 2013). 패널 모델은 DNV-GL Sesam Genie를 통해 생성하였으며, 패널의 단위 요소 크기는 모든 모델에 대해 1.6m로 적용하였으며, 이는 공진주파수 파장에 대해 약 0.4%, 최장주기파 파장에 대해 약 0.1% 수준에 해당된다. Fig. 5에는 복합발전 플랫폼의 Base model 및 Num. model B의 유체동역학 해석 모델을 나타내었다. 각각 1/4 모델에 대해 2,236개 및 2,428개의 패널이 분포되었으며, 보조부재의 모리스 보요소 모델이 함께 반영되었다.

실제로는 주요 부재로 인하여 발생하는 점성감쇠가 있을 수 있으며 본 연구에서는 플랫폼 주요부재 모델에 대한 임계감쇠값의 5%를 모든 해석 모델에 대해 동일하게 부가감쇠로 부여하였다. 해당 임계감쇠 값은 플랫폼 주요부재에 모리스 방정식의 항력을 부여한 수치해석 모델의 운동응답 계산 결과와의 비교로부터 산출되어 적용되었다.

감쇠판은 크게 부가질량의 증가, 파랑기진력의 증가, 점성감쇠의 증가에 영향을 미친다. 본 연구에서는 1차적으로 포텐셜 유동 해석을 통하여 부가질량의 증가 및 기진력의 증가를 고려하고 파랑주파수의 공진을 회피하는 설계를 채택하였다. 그리고 선정된 안을 바탕으로 2차원 수조모형실험을 수행하여 점성감쇠의 영향을 정성적으로 살펴보았다. 따라서 수치해석에서는 감쇠판을 패널로 모델링하여 적용하였다.

4. 운동저감장치 감쇠효과 평가 모형실험

감쇠판의 점성감쇠는 감쇠판의 끝단에서 유기되는 와류와 관계가 있으며(Tao and Cai, 2004), 와류가 많이 발생할수록 플랫폼에 작용하는 점성감쇠가 증가하여 플랫폼의 운동 응답을 감쇠시키게 된다. 본 연구에서는 감쇠판의 배치형태 및 크기에 대한 수치해석 결과로부터 도출한 1차 설계안을 기반으로하여, 점성감쇠의 효과를 증진시키기 위해 감쇠판의 개수를 변화시키거나 공극을 반영하는 등의 형태를 추가적으로 고려하였으며, 이의 점성감쇠를 고려한 운동저감 성능을 정성적으로 평가하기 위해 2차원 조파수조 모형실험을 수행하였다.

본 모형실험에서는 다양한 감쇠판 모델들의 점성감쇠 영향을 주로 중동요 운동저감 관점에서 살펴보는 것이 목적이므로, 복합발전 플랫폼에 대해 전체 형상을 정확하게 모델링하는 것 보다는 2차원 조파수조의 크기, 계류방법, 모형 제작성 등을 고려하여 실험 수행이 가능하도록 모델링하는 것이 유의미하다고 판단하였다. 즉, 복합발전 플랫폼 전체 형태 중 컬럼-외부폰톤-컬럼 연결부만을 실험 모형으로 고려하고, 각 부재의 단면은 1/70 크기로 축소시켰으며, 그 중 외부폰톤의 전체 길이는 1/2로 절단시켜 이상화하였다. 각 감쇠판은 컬럼 외측 하단에 부착하였으며, 이상화 된 모델의 중동요 공진주파수, 조파기 성능범위를 고려하여 파주파수 3~5.5rad/s 범위의 규칙파를 모델에 입사시켰다. 수치해석에서 고려된 3차원 형상과 모형실험에서 고려된 2차원 형상간의 상사성이 유지되지 않으나, 수치해석으로부터 도출한 개념설계안의 점성감쇠가 고려된 성능을 주어진 실험환경에서 정성적으로 평가하기 위하여 상기와 같은 전략을 채택하였다.

Table 3에는 모형실험을 수행한 선박해양플랜트연구소의 2차원 조파수조 제원을 나타내었고, Table 4에는 감쇠판이 부착되

Table 3 Specifications of the 2D wave flume in KRISO

Items	Value
Length [m]	30
Width [m]	0.6
Height [m]	1
Water depth [m]	0.5
Maximum wave height [m]	0.15
Wave period range [s]	0.75 ~ 2.4

Table 4 Specifications of the barehull model for the 2D wave flume experiment

Items	Value
Column section [cm × cm]	13.0 × 13.0
Column height [cm]	38.6
Pontoon section [cm × cm]	6.0 × 6.0
Pontoon length [cm]	101.1
Draft [cm]	26.4

지 않은 모델의 모형 제원을 나타내었다.

Fig. 6에는 모형실험에 적용된 실험모델의 형상을 나타내었다. Exp. model A는 알몸선체 모델, Exp. model B는 단일 감쇠판이 부착된 모델, Exp. model C는 단일 감쇠판 중앙에 공극이 있는 모델, Exp. model D는 박스형 감쇠구조물이 부착된 모델, Exp. model E는 Exp. model B에 적용된 감쇠판을 간격을 두어 이중으로 부착한 모델, Exp. model F는 Exp. model C에 적용된 감쇠판을 간격을 두어 이중으로 부착한 모델이며, 단일 감쇠판의 공극을 제외한 총 수평면적은 모든 모델에 대해 동일하다. Exp. model B의 경우 컬럼 단면과 동일한 치수의 감쇠판이 적용되었으며, Exp. model C의 공극에 대해서는 길이 8.7cm 및 폭 6.5cm가 적용되었다. Exp. model D의 박스형 감쇠구조물의 높이는 폰톤 높이와 동일한 6cm이며, Exp. model E 및 F의 감쇠판 사이의 간격도 6cm로 적용되었다. Exp. model B, C, E, F에 적용된 각 감쇠판의 두께는 모두 0.6cm이다. 알루미늄 및 엔지니어링 플라스틱을 이용하여 제작된 모델을 한 쪽 컬럼부분만 확대 촬영하여 Fig. 7에 나타내었으며, Table 5에는 각 모델의 무게 정보를 나타내었다. 본 모형실험에서는 서로 다른 감쇠판을 부착할 때마다 각 모형들이 같은 무게, 흘수, 관성 반경등을 갖도록 제작하는 것이 용이하지 않았는데, 이는 감쇠판의 형태에 따라 배수량과 무게가 동시에 변화하며 모형 자체가 작아 변화하는 배수량에 대응할 수 있는 추가적인 추 배치에 한계가 있었기 때문이다. 본 연구에서는 감쇠판이 바뀌어도 동일한 흘수에서 모형실험이 수행되도록 감쇠판마다 컬럼 하부에 배치한 추의 무게를 조정하여 흘수를 맞추고 실험하였다. Table 5에 나타난 무게중심과 관성반경은 경사실험 및 그네실험으로 추산한 결과이다.

모델은 2차원 수조 내에 길이 약 76cm, 강성 0.1kg/m의 스프링으로 4점 계류하여 설치하였으며, 모델의 운동은 VICON사의 T40-Camera를 활용한 Motion capture system을 통해 계측하였다.

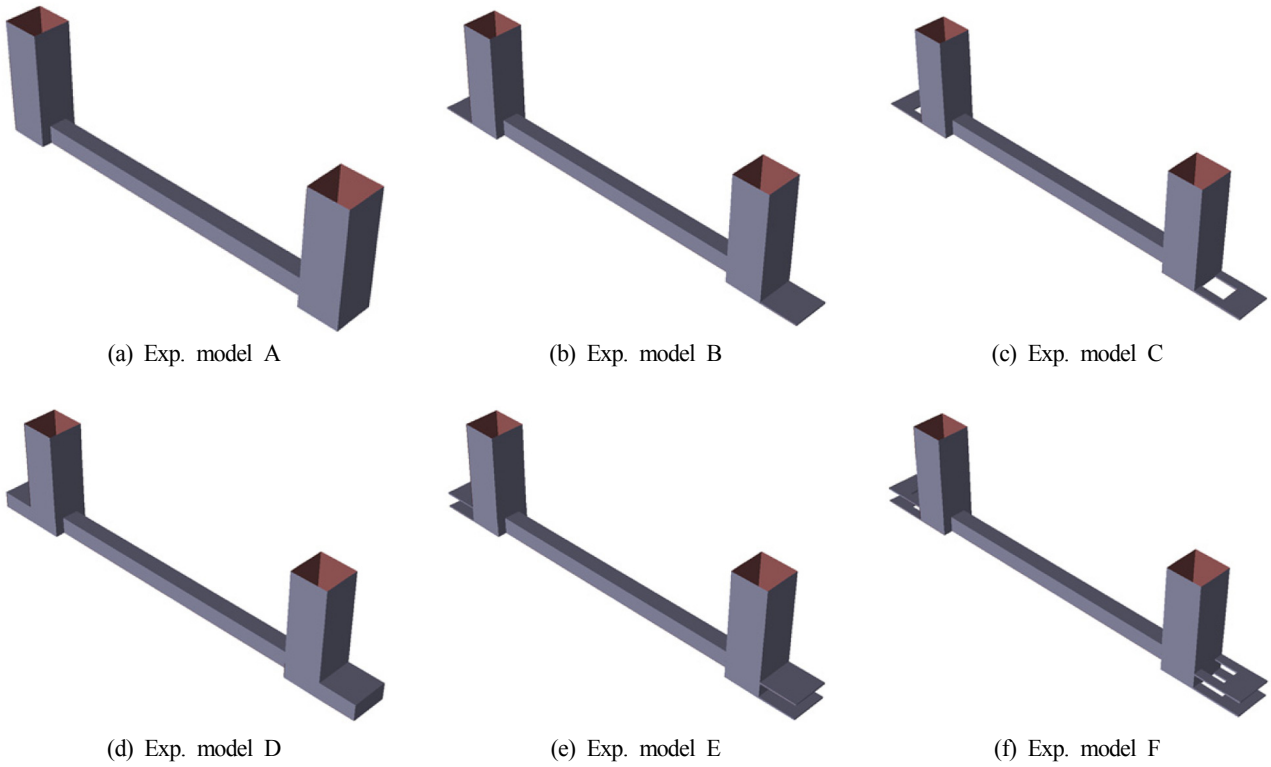


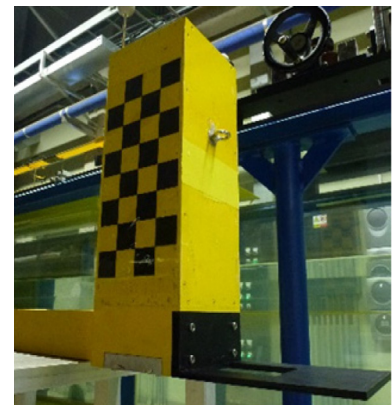
Fig. 6 Simplified platform models for 2D wave flume experiment



(a) Exp. model A



(b) Exp. model B



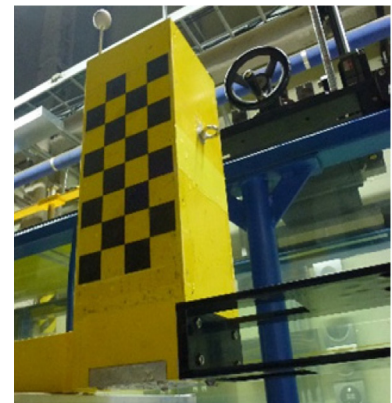
(c) Exp. model C



(d) Exp. model D



(e) Exp. model E

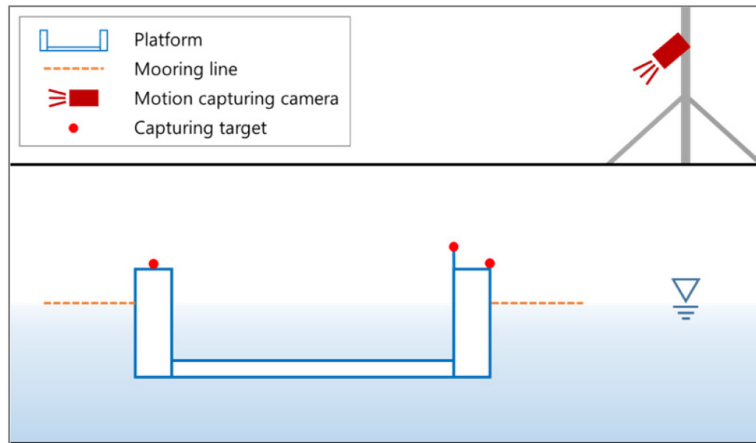


(f) Exp. model F

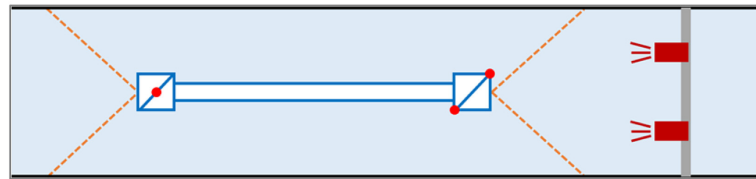
Fig. 7 Manufactured platform models for 2D wave flume experiment

Table 5 Weight information of manufactured platform models

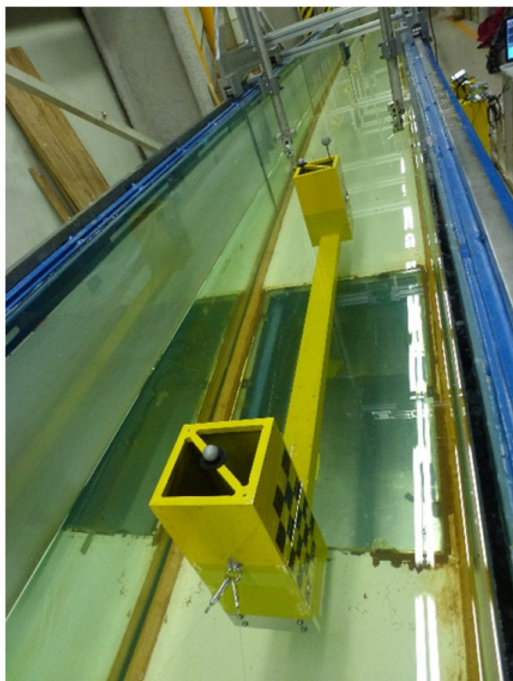
Items	Displacement [kg]	Center of gravity above keel [cm]	Pitch radius of gyration [cm]
Exp. model A	12.3	7.3	58.0
Exp. model B	12.6	7.4	75.3
Exp. model C	12.6	7.5	78.6
Exp. model D	14.4	7.0	74.0
Exp. model E	12.6	7.2	71.8
Exp. model F	12.6	7.2	75.4



(a) Elevation view of schematic diagram



(b) Plan view of schematic diagram



(c) Installed platform model in the wave flume



(d) Installed motion capture system with two T40-Cameras

Fig. 8 Experimental Setups

T40-Camera는 최대 4 Mega pixel, 최대 2,000FPS(Frame per second)의 제원을 갖춘 장비로, 타겟으로부터 반사된 빛을 센싱하여 타겟의 변위를 계측할 수 있으며, 복수의 타겟 및 복수의 카메라를 활용하여 타겟의 6자유도 운동을 계측할 수 있다. Fig. 8에는 조파수조 내에 설치된 모형 및 계측장비에 대한 모식도와 실제로 설치된 모형 및 장비의 사진을 나타내었다.

모형 스케일로 3rad/s~5.6rad/s의 파주파수 범위에서 0.2rad/s 간격으로 총 14개의 주파수 조건에 대해 8cm파고의 규칙파를 생성하여 모델에 입사시켰으며, 공진주파수 근처 조건에서는 4cm 파고 조건에 대해서도 RAO(Response amplitude operator)를 도출하여 파고 불확실성을 제거하고자 하였다.

5. 결 과

5.1 운동저감장치 민감도 해석

5.1.1 감쇠판의 배치형태

수치해석을 통해 감쇠판의 다양한 배치형태에 대한 플랫폼의 부가질량, 파랑감쇠, 파랑기진력, 6자유도 운동 RAO를 계산하였다. 본 논문에서는 운동저감 관점에서 중요한 상하동요 및 중동요 수치해석 결과를 주로 나타내었다. Fig. 9에는 다양한 부착형태 모델(Fig. 3)의 상하동요 및 중동요 운동 RAO를 나타내었다. Num. model B의 중동요 공진응답이 가장 낮은 것으로 해석되었으며, 상하동요의 경우에도 다른 모델에 비해 비교적 낮은

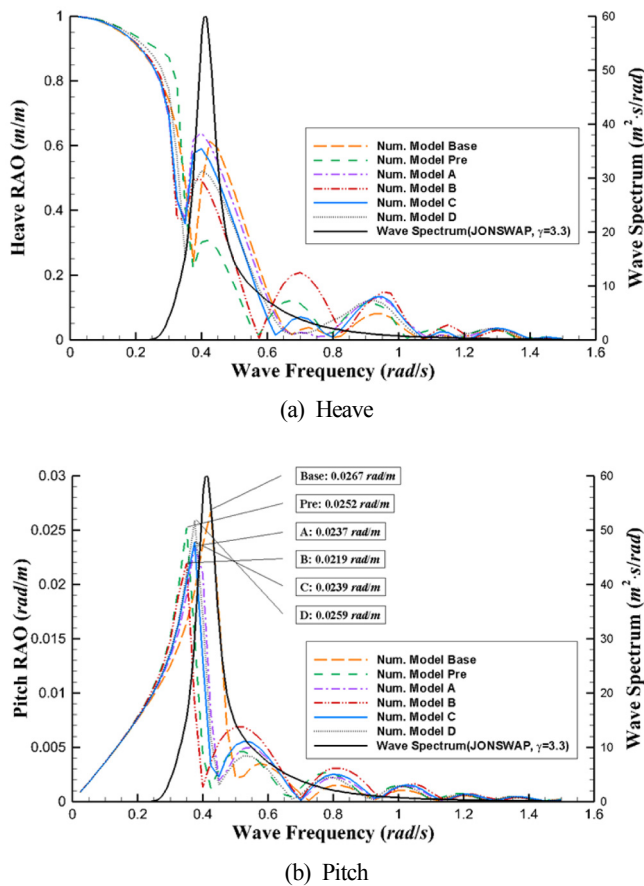


Fig. 9 Heave and pitch motion RAO for various configurations of the motion reduction device

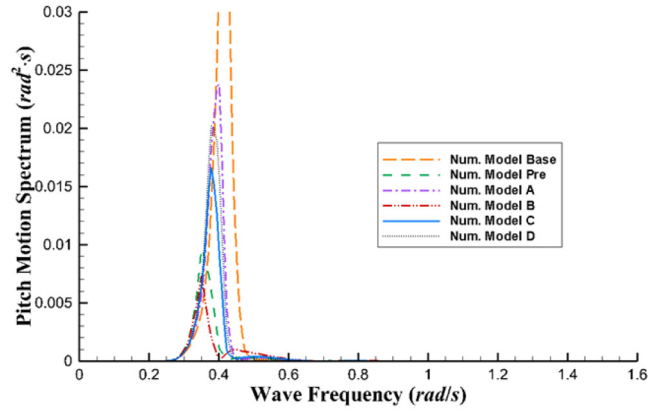


Fig. 10 Pitch motion response spectrums at the survival wave condition ($H_s = 11.32$ m, $T_p = 15.1$ s) for various configurations of the motion reduction device

공진응답을 보여주었다. 그러나 공진응답이 저감된 반면 두번째 정점에 해당하는 주파수 영역(상하동요 약 0.6~0.8rad/s, 중동요 약 0.4~0.7rad/s)에서는 응답이 증가하는 경향이 있었으며, 특히 중동요의 경우 생존조건(100년 재현주기) 파랑의 정점주기 15.1초(0.416rad/s)가 공진응답 영역과 두번째 정점 영역에 겹쳐 있기 때문에 공진응답 평가만으로 최적안을 선정하는 것은 무리가 있다. Fig. 10에는 다양한 부착형태 모델의 생존조건 파랑 스펙트럼에 대한 중동요 운동 응답스펙트럼을 나타내었다. 이때, H_s 는 파랑스펙트럼의 유의파고, T_p 는 정점주기를 나타낸다. 모델간 결과를 비교해보면 감쇠판을 부착하지 않은 모델뿐만 아니라 다른 배치형태 모델보다도 Num. model B의 응답 스펙트럼이 가장 낮았으며, 이는 공진주파수가 파랑 정점주파수로부터 가장 멀리 떨어진 점과 파랑 정점주파수에서 중동요 응답이 가장 낮았다는 점에서 기인한 것이다. 생존조건이 아닌 극한조건(Extreme condition)이나 운용조건(operational condition)은 일반적으로 생존조건에 비하여 유의파고가 낮고 정점주기가 짧아 해당 파랑조건을 고려하면 모델별로 다른 경향이 나타날 수 있다. 그러나 생존조건외의 유의파고 부근에서 가장 큰 운동이 나타나게 되므로 본 연구에서는 이를 고려하여 다양한 부착형태 중 Num. Model B를 최적의 운동저감장치 부착형태로 선정하였다.

감쇠판은 플랫폼의 부가질량을 증가시켜 고유주기를 이동시키고, 점성감쇠를 증가시켜 운동응답을 억제하기도 하지만 파랑기진력도 증가시키기 때문에 상충효과를 잘 파악해야하며, 파랑기진력 증가효과를 최소화시키면서도 부가질량과 점성감쇠를 많이 증가시킬 수 있는 방향으로 설계해야 한다. Fig. 11에는 다양한 부착형태에 따른 중동요 모드의 플랫폼 부가질량 및 파랑기진력 계산결과를 나타내었다. 생존조건 파랑 정점주파수 (0.416rad/s) 부근에서 Num. model B의 부가질량이 가장 많이 증가하였으면서도 파랑기진력은 가장 작게 받는 것을 확인할 수 있다.

5.1.2 감쇠판의 크기

부착형태 민감도해석을 통해 도출한 최적 설계안 Num. Model B에 대해 감쇠판의 크기를 변화시켜 그 성능을 검토하였다. Fig. 12에는 Num. model B의 다양한 크기 모델(Fig. 4)의 상하동

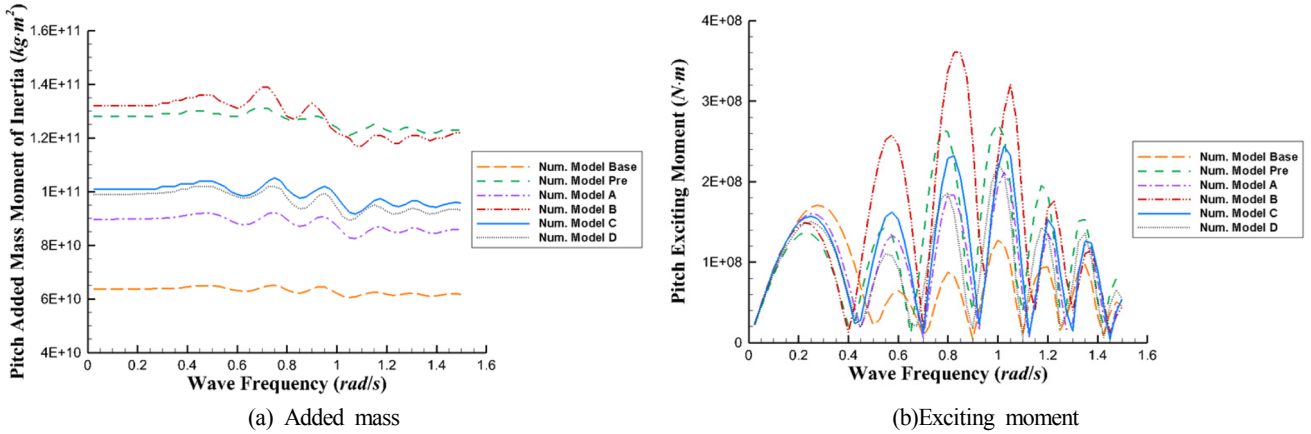


Fig. 11 Pitch added mass moment of inertia and exciting moment for various configurations of the motion reduction device

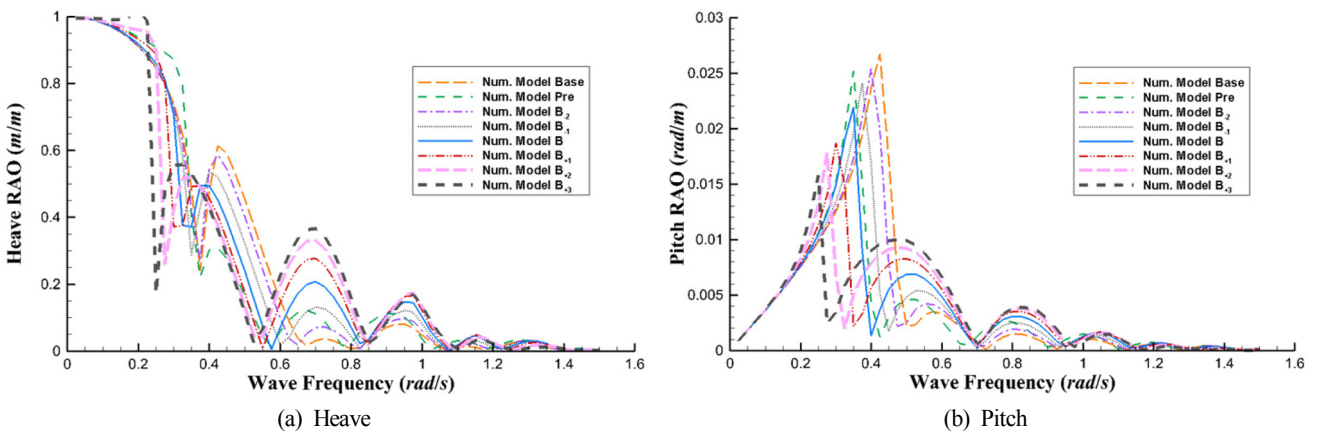


Fig. 12 Heave and pitch motion RAOs for various sizes of the motion reduction device (Num. model B)

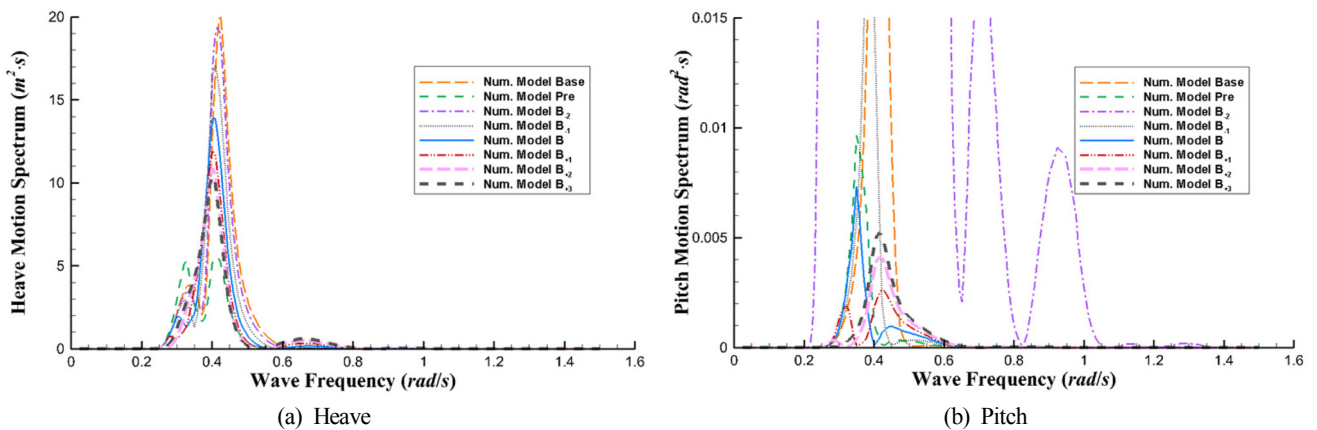


Fig. 13 Heave and pitch motion response spectrums at the survival wave condition ($H_s = 11.32$ m, $T_p = 15.1$ s) for various sizes of the motion reduction device (Num. model B)

요 및 중동요 운동 RAO를 나타내었다. 감쇠판의 크기가 증가할수록 부가질량이 커지기 때문에 플랫폼의 공진주기는 상하동요 및 중동요 모두에서 점차 장주기 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 상하동요의 경우 감쇠판의 크기가 증가할수록 공진응답이 줄어들다가 다시 증가하는 경향이 있었고, 중동요의 경우 점차 공진응답이 줄어들었으나 두번째 정점 영역에서 반대의 경향을 보였다. Fig. 13에는 Num. model B의 다양

한 크기 모델에 따른 상하동요 및 중동요 응답스펙트럼을 나타내었다. 중동요 응답스펙트럼 결과에서 Num. model B₁이 가장 좋은 운동저감 성능을 보여주었다. 상하동요 관점에서는 해당 모델은 최적 설계안이 아니지만 운동저감장치의 주요목표인 중동요 운동저감 효과 측면에서 가장 적합한 크기라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 컬럼 단면적 대비 5.1배의 면적을 갖는 감쇠판 설계안(Num. model B₁)을 복합발전 플랫폼에 대한

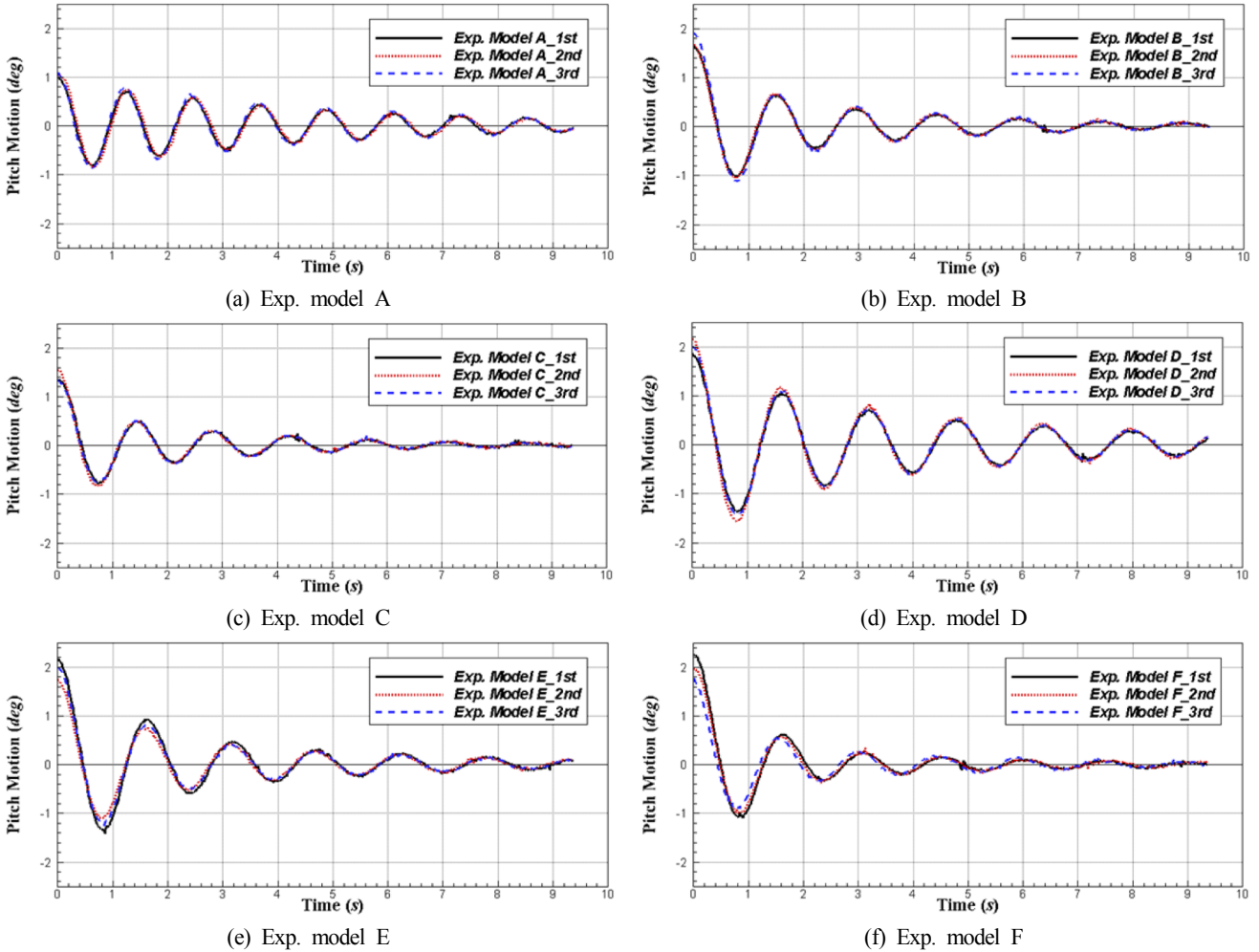


Fig. 14 Time series of pitch free decay tests (model scale)

운동저감장치 최적 설계안으로 선정하였다.

5.2 운동저감장치 감쇠효과 평가 모형실험

점성감쇠 영향을 고려할 수 있는 모형실험을 통해 운동저감장치 설계모델에 대한 성능을 정성적으로 평가하였다. Fig. 14에는 자유감쇠실험을 통해 계측한 중동요 자유감쇠 운동 시계열을 각 모델 별(Fig. 6)로 나타내었다. 약 1~2° 범위의 초기 중동요 변위를 가한 뒤 시간에 따라 감쇠되는 플랫폼 중동요 변위를 60Hz의 샘플링 주파수로 취득하였으며, 각 모델 별로 3회씩 반복 실험하였다. Table 6에는 각 모델 별로 반복 수행된 자유감쇠실험에서 평균을 통해 산출한 고유주기와 감쇠계수를 나타내었다. 이때 감쇠계수는 임계감쇠(Critical damping)에 대한 백분율로 표시되어 있다. 각 시계열에 대해서는 각각 세번째까지의 양의 극값(Positive peak) 및 음의 극값(Negative peak)에 대해 대수감쇠법(Logarithmic decrement method)을 통해 계산된 감쇠계수를 모두 평균하여 임계감쇠에 대한 백분율을 산출하였다. 감쇠판이 부착되지 않은 Exp. model A와 다른 모델들을 비교해보면, 공진주기가 1.21초에서 약 0.2~0.3초 정도 증가하였는데, 이는 감쇠판에 의해 증가된 중동요 부가질량에 일부 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 15에는 규칙과 중 중동요 운동 RAO 계측 결과를 각 모델에 대해 나타내었다. Exp. model A를 제외하고는 Exp. model

B-F의 경우, 자유감쇠실험에서 도출한 고유주기와 중동요 운동 RAO 커브의 공진점이 서로 일치하지 않는 것처럼 보이는데, 이는 해당 모델들의 상하동요 공진점(약 3.2 rad/s)에서 상하동요와의 연성이 발생하여 해당 주파수 부근에서 공진이 발생한 것이며, 실제 자유감쇠실험에서 도출한 고유주파수 부근(약 4.3 rad/s 부근)에서는 점성감쇠에 의해 중동요 응답이 저감되었기 때문에 판단된다. Exp. model A에 비해 감쇠판이 부착된 모델들은 중동요 응답이 전반적으로 저감되었는데, 이는 각 모델 별로 감쇠판이 점성감쇠를 증가시키는 역할을 하였기 때문이다. 박스형 감쇠구조가 부착된 Exp. model D의 경우, 중동요 감쇠(Table 6)도 높지 않을 뿐만 아니라 박스형 감쇠구조가 파랑 기진모멘트도 크게 받기 때문에 공진 응답이 상대적으로 다소 높게 형성된 것으로 판단된다(Fig. 15). 또한, Exp. model B 및 C에 비해 Exp. Model E 및 F, 즉, 이중 감쇠판 형태의 모델의 감쇠가 가장 크지만(Table 6), 공진 응답은 예상만큼 낮지 않은 것으로 확인되었는데(Fig. 15), 이 또한 이중 감쇠판이 단일 감쇠판에 비해 파랑 기진모멘트를 더 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 Exp. model B와 C를 비교하거나, Exp. model E와 F를 종합적으로 비교해보면, 감쇠판의 공극에 의해 감쇠가 증가되었을 뿐만 아니라(Table 6), 플랫폼 공진응답도 공극에 의해 감소된 것을 확인할 수 있다(Fig. 15). 이는 공극으로부터 점

Table 6 Pitch natural periods and damping coefficients measured from free decay tests for each models (model scale)

Items	Natural period [s]	Pitch damping coefficient [%]
Exp. model A	1.21	4.13
Exp. model B	1.45	10.75
Exp. model C	1.39	10.93
Exp. model D	1.57	7.42
Exp. model E	1.54	11.05
Exp. model F	1.44	14.08

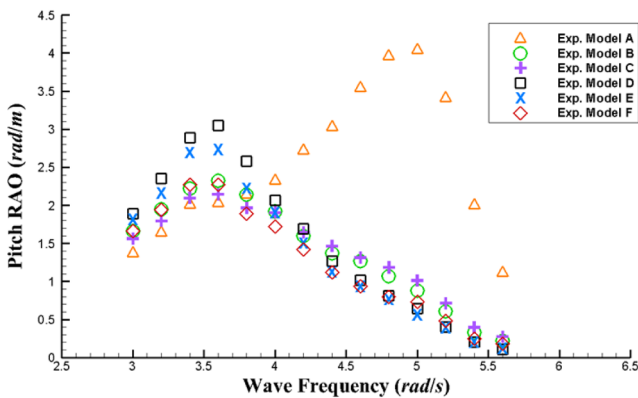


Fig. 15 Pitch RAO measured by the 2D wave flume experiments (model scale)

성감쇠에 의한 운동저감효과가 더 증대된 것을 나타내며, 공극으로부터 와류 발생이 증가하였기 때문인 것으로 예측된다.

6. 결 론

본 연구에서는 파력-해상풍력 복합발전 대형 부유식 반잠수식 구조물의 운동을 저감시키기 위한 감쇠판의 개념설계를 수행하였다. 경계요소법 수치해석을 이용하여 다양한 부착형태 및 크기에 대한 민감도해석을 수행하였으며, 100년 재현주기의 생존조건 파랑 스펙트럼에 대해 Num. model B+1 모델(Fig. 4 (d))이 복합발전 플랫폼의 중동요 운동을 효과적으로 억제시키는 것을 확인하였다.

점성감쇠 효과를 평가하기 위하여, 수치해석을 통해 선정된 감쇠판 설계 모델 및 점성감쇠 효과를 증진시키도록 고안된 다수의 설계 모델을 2차원 조파수조 모형실험에 적합하도록 이상화하여 자유감쇠 운동 및 규칙파 중 중동요 운동을 평가하였다. 자유감쇠실험을 통해 각 감쇠판 모델의 감쇠를 정량적으로 평가하였으며, 규칙파 중 중동요 운동 RAO를 비교함으로써 Exp. model C 모델(Fig. 6(c))의 공진응답이 최대로 억제된 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 Num. model B+1의 면적으로 외부폰튼-컬럼-외부폰튼 연결부 내측 하단에 부착되면서 Exp. model C와 같이 공극을 갖는 감쇠판이 복합발전 플랫폼의 중동요 운동을 효과적으로 저감시킬 것으로 기대할 수 있으며, 향후 전체 플랫폼에 대한 3차원 수조 모형실험을 통해 설계 모델에 대한 정량적인

성능평가가 가능할 것으로 사료된다.

한편 점성감쇠를 평가하기 위해 수행한 자유감쇠 실험에서 와류 발생에 의한 점성감쇠를 보다 정확하게 평가할 수 있도록 비선형 감쇠에 대한 해석이 향후연구에서 보완되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지기술개발사업 ‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발(PMS3170)’ 및 ‘방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발(PMS3780)’의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., Sclavounos, P., Wayman, L., 2005. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines. Proceedings of Copenhagen Offshore Wind 2005 Conference and Expedition, Copenhagen Denmark.

Busso, C., 2006. Minimum Floating Offshore Platform with Water Entrapment Plate and Method of Installation. United States Patent, US7086809 B2.

Cermelli, C.A., Roddier, D.G., Busso, C.C., 2004. MINIFLOAT: A Novel Concept of Minimal Floating Platform for Marginal Field Development. Proceedings of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon France, 538-545.

Cermelli, C.A., Roddier, D.G., 2005. Experimental and Numerical Investigation of the Stabilizing Effects of a Water-Entrapment Plate on a Deepwater Minimal Floating Platform. Proceedings of 24th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Halkidiki Greece, 517-525.

Cermelli, C.A., Roddier, D.G., Aubault, A., 2009. WINDFLOAT: A Floating Foundation for Offshore Wind Turbine - Part II: Hydrodynamic Analysis. Proceedings of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu USA, 135-143.

Det Norske Veritas(DNV), 2010. Environmental Conditions and Environmental Loads. [Online] (Updated October 2010) Available at: <https://exchange.dnv.com/publishing/downloadPDF.asp?url=http://exchange.dnv.com/publishing/codes/docs/2014-04/RP-C205.pdf> [Accessed March 2014].

Det Norske Veritas(DNV), 2013. WADAM User Manual - Wave Analysis by Diffraction and Morison Theory. [Online] Available at: <https://projects.dnvgl.com/sesam/manuals/Wadam_UM.pdf> [Accessed March 2014].

Enferad, E., Nazarpour, D., 2013. Ocean's Renewable Power and Review of Technologies: Case Study Waves, New Developments in Renewable Energy. [Online] (Updated 2013) Available at: <http://www.intechopen.com/books/new-developments-in-renewable-energy/ocean-s-renewable-power-and-review-of-techn

- ologies-case-study-waves> [Accessed June 2015].
- Iglesias, A.S., Rojas, L.P., Rodriguez, R.Z., 2004. Simulation of Anti-Roll Tanks and Sloshing Type Problems with Smoothed Particle Hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 31(8), 1169-1192.
- Javier, M., Matt, C., Krish, P.T., 2015. Hydrodynamic Performance of Heave Plates on Floating Offshore Wind Turbine Platforms. *Proceedings of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona USA, 408-414.
- Katayama, T., Yoshioka, Y., Kakinoki, T., Ikeda, Y., 2010. Some Topics for Estimatio of Bilge-Keel Component of Roll Damping. *Proceedings of 11th international Ship Stability Workshop*, Wageningen Netherlands, 225-230.
- Kim, K.-H., Lee, K., Sohn, J.M., Park, S., Choi, J.-S., Hong, K., 2015. Conceptual Design of 10MW Class Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation System. *Proceedings of 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona USA, 737-743.
- Koh, H-J, Cho, I-H, 2016. Heave Motion Response of a Circular Cylinder with the Dual Damping Plates. *Ocean Engineering*, 125, 95-102.
- Lee, C.-H., 1995. WAMIT Theory Manual. [Online] (Updated October 1995) Available at: <<http://www.wamit.com/Publications/tmanual.pdf>> [Accessed March 2014].
- NRG Expert, 2011. *Global Ocean Energy Report*. 1st Edition, NRG Expert, London.
- Palomar, A.J., 2013. Project Periodic report - Development of a Wind-Wave Power Open-Sea Platform Equipped for Hydrogen Generation with Support for Multiple Users of Energy. [Online] Available at: <<http://cordis.europa.eu/docs/results/288145/periodic1-h2ocean-propereport-m18-v5-9-publishable-summary.pdf>> [Accessed June 2015].
- Park, S.-W., Kim, K.-H., Sohn, J.-M., Lee, K.-S., Shin, S.-H., Hong, K., 2014. Numerical Simulation on Hydrodynamic Motion Response for Floating Hybrid Power Generation System in Waves. *Proceedings of Grand Renewable Energy 2014*, Tokyo Japan.
- Pauline, B., Adrien, E., 2015. CFD Simulations for the Design of Offshore Floating Wind Platforms Encompassing Heave Plates. *Proceedings of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona USA, 375-384.
- Perez, T., Goodwin, G.C., 2008. Constrained Predictive Control of Ship Fin Stabilizers to Prevent Dynamic Stall. *Journal of Control Engineering Practice*, 16, 482-494.
- Rho, J.B., Choi, H.S., 2002. Heave and Pitch Motions of a Spar Platform with Damping Plate. *Proceedings of 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu Japan, 198-201.
- Soulard, T., Babarit, A., Borgarino, B., 2013. Preliminary Assessment of a Semi-Submersible Floating Wind Turbine Combined with Pitching Wave Energy Converters. *Proceedings of 10th European Wave & Tidal Energy Conference*, Aalborg Denmark.
- Subbulakshmi, A., Sundaravadivelu, R., 2015. Effect of Heave Plate on Hydrodynamic Response of Spar. *Proceedings of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona USA, 1439-1445.
- Tao, L., Cai, S., 2004. Heave motion suppression of a spar with a heave plate. *Journal of Ocean Eng*, 31, 669-692.
- Yde, A., Larsen, T.J., Hansen, A.M., Fernandez, M., Bellew, S., 2015. Comparison of Simulations and Offshore Measurement Data of a Prototype of a Floating Combined Wind and Wave Energy Conversion System. *Proceedings of 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona USA, 721-729.

Quayside Mooring System Design of Prelude FLNG for Extreme Environmental Condition

Jin-Woog Cho*, Sang-Woong Yun*, Bong-Jae Kim*, Jae-Woong Choi*, Booki Kim* and Seung-Ho Yang^{ID**}

*Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Korea

**Mechanical Engineering, Ulsan College, Ulsan, Korea

극한환경조건에 대한 프리루드 FLNG 안벽계류시스템 설계

조진욱* · 윤상웅* · 김봉재* · 최재웅* · 김부기* · 양승호^{ID**}

*삼성중공업중앙연구소

**울산과학대학교기계공학부

KEY WORDS: Extreme environmental condition 극한환경조건, Prelude FLNG 프리루드 FLNG, Quayside mooring system design 안벽계류시스템 설계, Mooring safety 계류안전성

ABSTRACT: The design and analysis of a quayside mooring system for safe mooring of Prelude FLNG under extreme environmental conditions were carried out. The design of the mooring system considered the yard operation conditions and maximum wind speed during a typhoon. In order to secure the mooring safety of Prelude FLNG under an extreme environment, a special steel structure was designed between the quay and Prelude FLNG to maintain the distance from the quay to a certain extent to avoid a collision with the inclined base. The mooring safety was also ensured by installing additional new parts on the quay. A mooring analysis and mooring safety review were performed with more rigorous modeling considering the nonlinearity of the mooring rope and fender. In order to secure additional safety of the mooring system under extreme environmental conditions, a safety assessment was conducted on the failures of the mooring components proposed in the marine mooring guidelines. Based on the results of the mooring analysis, it was confirmed that the Prelude FLNG can be safely moored even under the extreme conditions of typhoons, and a worst case scenario analysis verified that the mooring system design was robust enough. The proposed mooring analysis and design method will provide a basis for the safe mooring of ultra-large floating offshore structures of similar size in the future.

1. 서 론

글로벌 경기침체에도 불구하고 장기적으로 에너지 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 특히, 전문가들 사이에서는 지구온난화에 따른 대안으로 LNG(Liquefied natural gas)와 같은 청정에너지에 대한 수요가 가파르게 상승할 것으로 예상하고 있다. 기술발달에 따른 심해 해상 가스전의 탐사와 개발이 용이해 지고 있으며, 개발된 에너지의 이송방식이 과거의 파이프라인과 육상플랜트를 이용한 방식이 아닌 해상에서의 부유식 해양플랜트를 이용한 새로운 개념의 에너지 이송방식으로 변화되고 있다(KOSHIPA, 2011; KEIT, 2015; KEEI, 2015).

FLNG(Floating liquefied natural gas)는 해저로부터 채굴된 천연가스를 해상에서 정제하고 LNG로 액화해 저장과 하역을 할 수 있는 부유식 해양플랜트로서 주변환경에 대한 영향이 적고

육상에 대규모 정제를 위한 플랜트를 건설할 필요가 없기 때문에 최근 들어 오일메이저에서 선호하고 있는 부유식 해양구조물이다(LNG plant project business group, 2010; KPMG GEI, 2014).

최근에 셰일가스 생산량 증가로 인해 추가 FLNG 발주가 지연되고 있는 상황임에도 불구하고 근래수년에 걸친 FLNG에 대한 실현가능성 검토(Feasibility study)결과를 토대로 궁극적으로는 전 세계 LNG 시장의 수요증가와 맞물려 다수의 FLNG가 발주될 것으로 기대하고 있다. 프리루드 FLNG(Fig. 1)는 호주 브라우즈 유정(Browse basin)의 천연가스 개발을 목표로 프로젝트가 추진되었으며 규모면에서는 현재까지 건조된 부유식 해양구조물 중에서 가장 크다. 선체의 길이가 488m(LBP기준 473.6m), 폭이 74m, 깊이가 43.4m에 이르고, 상부구조물을 포함할 경우 높이가 무려 110m에 이른다(Table 1). 강재만 26만톤 이상 사용

Received 13 September 2017, revised 5 January 2018, accepted 5 January 2018

Corresponding author Seung-Ho Yang: +82-52-279-3138, shyang@uc.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7163-4081

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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



Fig. 1 Prelude FLNG

Table 1 Main particulars of prelude FLNG

Items	Dimension	Remarks
LBP	473.6 m	
B	74.0 m	
D	43.4 m	
T	9.8 m	Quayside
Displacement	316999 MT	Quayside

되어 제작되었으며, 만재홀수(Full loaded) 상태에서 배수량은 60만톤에 이른다(Shell, 2009).

부유식 해양구조물 건조 중, 선체 제작 외에 상부구조물 통합작업(Topside integration) 및 각종 의장작업을 수행하기 위해 일정기간 안벽접안을 하게 된다. 상부구조물 통합작업과 복잡한 의장작업을 고려할 때 도크(Dock) 진수 이후 안벽접안 기간만 최소 2년 이상 걸리게 된다. 삼성중공업 거제조선소가 위치해 있는 고현항의 경우, 태풍의 진로에 있기 때문에 반드시 태풍과 같은 극한환경조건에서도 계류가 가능하도록 계류시스템 설계를 해야 한다. 실 사고사례로 2003년 내습한 태풍 매미로 인해 국내조선소의 안벽접안 후 작업중이던 선박 및 부유식 해양구조물들이 계류 중 대거 유실되는 사고를 당하여 큰 손실을 입은 바 있다(Na et al., 2004; Park et al., 2011; Yang et al., 2015).

본 연구에서는 이러한 잠재적 위험요소에 따른 극한환경조건에서의 프리루드 FLNG의 건조 중 계류안전성을 확보하기 위해 계류시스템을 설계하고 다양한 최악상황 시나리오에 따른 사례연구(Case study)를 통해 최적으로 설계된 계류시스템을 도출하고자 하였다.

2. 안벽계류시스템

안벽에 계류된 선박은 외해에 계류된 선박에 비해 경험하게 되는 환경하중이 상당히 낮을 수 있지만, 부유식 해양구조물의 계류시스템(Mooring system for floating offshore structure)과 달리 상대적으로 계류로프가 짧고, 팽팽한 상태로 유지되므로 해양구조물의 작은 움직임에도 매우 높은 인장력이 발생할 수 있다. 또한, 계선작업에 따른 계류로프의 초기 인장력 적용과 안벽 및 선체와의 마찰과 마모, 주변 여건에 따른 환경외력 평가방법의 어려움뿐만 아니라 작업 상황에 따른 여러 가지 방해 요소들로 인해 선박과 안벽의 완벽한 연결점을 찾을 수 없는 등 다양한 불완전 요소들이 존재한다. 따라서 효과적인 안벽계류 시스템 설계는 선박 및 안벽과 같은 구조물의 안전뿐 아니라 작업자의 안전을 보장하기 위해서도 필수적이다

프리루드 FLNG의 계류시스템 설계과정은 선상에서의 계류시스템 배치와 안벽 접안위치 그리고 작업장 구조물의 간섭 등 현장 작업조건 및 환경조건을 고려한 수치 시뮬레이션을 통해 최종적으로 완성하였다.

2.1 극한환경조건

일반적으로 안벽 작업중 겪게 될 극한환경조건을 안벽계류시스템설계 및 해석의 입력조건으로 사용하게 된다. 프리루드 FLNG의 경우 계류되어 있는 고현항 내 안벽의 경우, 주변 지형이 산으로 둘러싸여 있어 외해의 풍속이 상대적으로 크게 감소되어 실제 안벽에서는 훨씬 작은 풍속값을 나타낸다. 통영, 거제 기상청 장기 관측자료, 삼성중공업야드 내 안벽부근 건물 옥상에 설치되어 운용중인 풍속계측시스템의 실제측데이터 등의 자료를 이용하여 100년 재현주기에 해당하는 설계풍속을 산정하였다.

2.2 프리루드 FLNG 풍하중 면적, 풍하중 계수, 최대풍하중

풍동 테스트에서 사용된 특정 홀수에서의 프리루드 FLNG 풍하중 면적은 Fig. 2에 보이는 바와 같다. 이는 측면도를 기준으로 할 때, 대형 LNG 운반선의 네 배 이상 풍하중 면적을 가진다. 안벽 접안 시 해당 홀수에서 프리루드 FLNG에 상부구조물 모듈들이 모두 탑재되었을 때를 가정하면, 전면 약 8,000 m², 측면 약 37,000 m²의 풍하중 면적을 가지게 된다.

풍하중 계수는 풍동시험 결과를 이용하였고 방향별 풍하중산정을 위한 입력조건으로 사용하였다. Fig. 3은 특정 홀수에 해당하는 풍동시험 모형과 프리루드 FLNG의 풍하중 계수값이며,

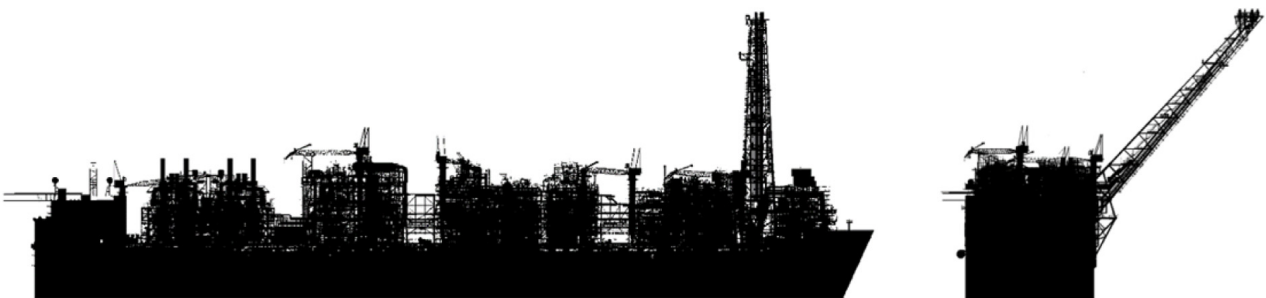


Fig. 2 Prelude FLNG for wind screen calculations(left: side view, right: front view)

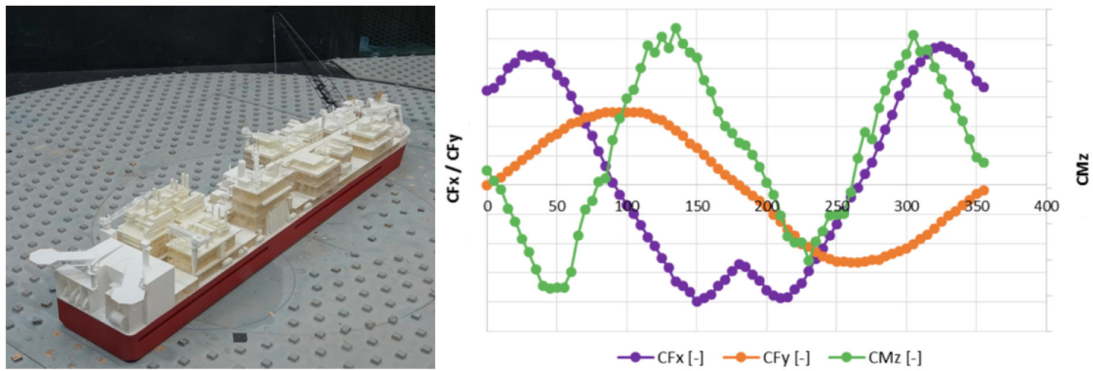


Fig. 3 The model for wind tunnel test and wind coefficients of Prelude FLNG

해석에는 안벽 접안홀수에 가까운 풍동시험 홀수의 풍하중 계수값을 그대로 사용하고 적용면적을 안벽 접안 조건에 맞게 보정하여 적용하였다. 본 연구에서는 풍동시험 홀수와 안벽 접안 홀수의 차이가 크지 않아 적용가능한 방법이었으나 만약 홀수 차이가 크다고 하면 해당 홀수 조건에 맞게 풍동시험을 추가로 수행하여 그 결과값을 사용하는 등 보다 현실적인 풍하중 계수 적용 방법을 고려할 필요가 있다.

계류시스템 설계를 위한 최대 풍하중과 최대 모멘트는 아래 식 (1), (2), (3)으로부터 산정될 수 있다.

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_A C_{Fx} A_x V_W^2 \quad (1)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_A C_{Fy} A_y V_W^2 \quad (2)$$

$$M_z = \frac{1}{2} \rho_A C_{Mz} A_y L_{BP} V_W^2 \quad (3)$$

여기서,

- ρ_A : 공기밀도 (1.225 kg/m³)
- C_{Fx}, C_{Fy}, C_{Mz} : 축 방향하중 및 모멘트 계수
- A_x, A_y : 축 방향 투영면적 [m²]
- L_{BP} : 선체길이 [m]
- V_W : 풍속 [m/s]

산정된 풍하중은 전면과 측면의 면적중심, 즉 전면과 측면의 도심에 각각 부과하였다.

2.3 안벽계류시스템 설계

야드 안벽 건조 작업중 프리루드 FLNG가 격계될 극한환경하에서 안전한 계류를 위한 계류시스템 설계는 프리루드 FLNG 자체의 계류시스템 구성요소와 야드 안벽이 현재 가지고 있는 혹은 추가 설치 가능한 계류시스템 구성요소들을 살펴보는 것으로부터 시작될 수 있다.

2.3.1 프리루드 FLNG 본선 계류구성 요소

해양(Offshore)에서 본선의 위치 유지를 위해 설치되는 계류시스템을 제외하고 해양구조물 갑판에 설치되는 대부분의 계류설

비들은 야드에서 안전한 안벽 작업을 수행하기 위해 부착된다 고 볼 수 있다. 이러한 계류설비들은 해양구조물이 초대형화 됨에 따라 필요 수량의 증가로 공간적 문제뿐만 아니라 구조적, 생산적, 비용적 문제로 확대가 된다. 따라서 초기에 최적 설계를 통해 이러한 문제를 줄여나가야 할 필요가 있다.

2.3.2 프리루드 FLNG 접안안벽 계류구성 요소들

해양구조물의 초대형화는 설계부터 생산에 이르기까지 극복해야 할 다양한 문제들을 야기할 뿐만 아니라 접안을 위한 안벽의 길이, 수심 그리고 계선을 위한 비트의 수, 용량, 배치 등에도 개선을 요구하고 있다. Table 2는 프리루드 FLNG가 접안하게 될 안벽의 계류시스템 구성요소들의 개별 설계하중을 나타낸다.

Table 2 Quayside mooring components for Prelude FLNG

Items	Capacity	Remarks
Bits	100 MT	Horizontal force 100 MT Vertical force 58 MT
	200 MT	Horizontal force 200 MT Vertical force 116 MT
Foam filled fenders	700 MT	Φ 4500 × 9000 L, 60 % deflection of diameter

안벽비트 하중테스트(proof load test)

안벽에 위치해 있는 비트들의 경우, 설치 후 장시간의 사용과 해수에 대한 노출로 인해 지반과 구조물이 초기 설계되었던 하중을 만족하지 못하고 붕괴되는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, 기설치되어 사용되고 있는 프리루드 FLNG용 계류 비트들에 대해 선주, 해사검정보증인(Marine warranty surveyor)과 협의를 거쳐 선택적으로 하중테스트를 통한 안전성 검증을 수행하였다. 아래 그림은 하중 테스트를 위해 계측장치를 100톤, 200톤 비트에 부착한 것이며, Fig. 4는 비트 하중테스트 절차에 따른 하중 초과시 비트의 최대 변형량(load-strain)을 나타낸 것이다. 이때 적용하중은 수평, 수직 방향에 대해 안전작업하중(SWL, Safe working load)의 1.25배 값을 사용하였다.

프리루드 FLNG 접안용 특수 철재구조물

일반 선박의 접안과 달리 프리루드 FLNG는 접안을 위한 특

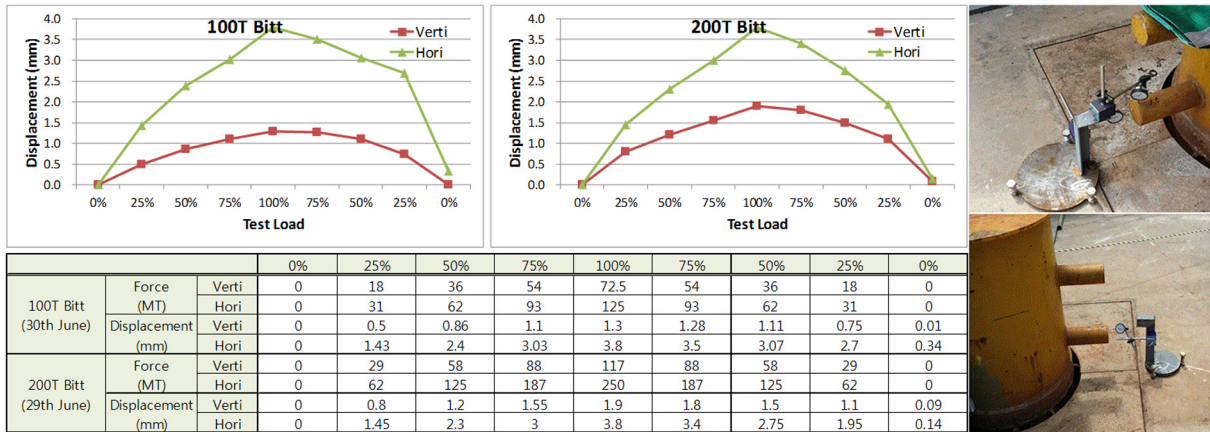


Fig. 4 The results of proof load test for 100 MT and 200 MT bits

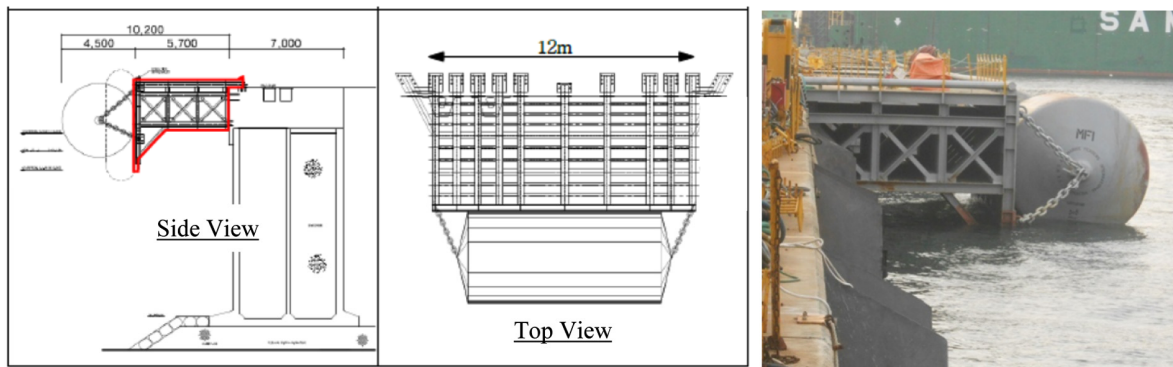


Fig. 5 Steel structure and fender at quay

수 철재구조물이 고안되어 적용되었다(Fig. 5). 특수 철재구조물의 목적은 접안 안벽의 구조적 형상에 따라 프리루드 FLNG를 안벽으로부터 충분한 이격거리를 유지함으로써 해저면과 본선의 바닥면과의 여유공간(Bottom clearance)을 확보하기 위한 것이다. 바지선(Barge)을 포함한 부유형태의 이격물을 구성할 수도 있으나 개별 부유구조물들의 파랑 중 상대운동으로 인한 충돌 등 예상치 못한 위험 상황을 배제하기 위해 고정된 형태의 철재구조물을 고안하여 안벽에 설치하였다. 철재구조물의 경우, 펜더 압착면에 의한 응력변형 등을 고려하여 구조물 자체의 안전성도 평가하였으나 본 연구논문에서는 추가로 기술하지는 않았다.

3. 안벽계류를 위한 수치해석적 연구

본 연구에서는 MOSES(Multi-operational structural engineering simulator, Ver.10.00.01.38) 프로그램을 사용하여 안벽계류해석을 수행하였다. MOSES는 다양한 유형의 해양 플랫폼 및 선박에 대한 정적, 동적 거동해석을 위한 소프트웨어로 해양 구조물의 운송 및 설치 시뮬레이션 및 분석뿐만 아니라 환경외력에 의해 해양구조물에서 발생할 수 있는 응력을 해석할 수 있는 텍스트 기반의 소프트웨어이다.

3.1 지배방정식 및 해석입력조건

MOSES는 아래의 방정식 (4)를 이용하여 주파수영역 혹은 시간

영역에서 부유체의 운동 해를 구하게 된다(Bently Systems, 2015).

$$I \ddot{q} + C \dot{q} + Kq = s \tag{4}$$

여기서,

I : Mass matrix of the body

C : Damping matrix

K : Stiffness matrix

q : Displacement vector

s : Generalized force vector

본 연구에서는 주파수영역 해석법이 적용되었으며 일반적인 안벽계류해석과 마찬가지로 프리루드 FLNG에 대해서도 준정적 해석법으로 부유체의 변위와 계류로프에 작용하는 힘을 각각 구하였다. 좌표계는 Fig. 6과 같은 우수좌표계를 사용하였으며, 환경외력의 작용방향은 x축을 기준으로 반시계방향으로 0도 ~ 360도 방향이 된다.

비선형 계류로프

계류에 사용되는 로프는 직경, 종류(Synthetic, Polyamide 등) 그리고 연결 지점간의 거리에 따라 작용 하중에 대한 변위량이 달라지므로 가능한 한 동일한 종류, 유사한 길이의 로프들로 구성하고 배치될 수 있도록 해야 한다. 이럴 경우 통상 계류로프는 로프하중-변형량 특성을 선형으로 가정하여 적용하고 있으나,

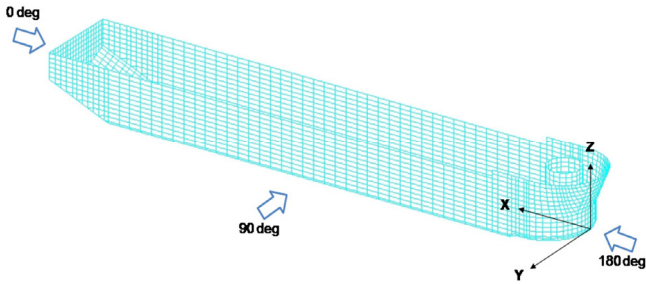


Fig. 6 Coordinates of the Prelude FLNG model and environmental load direction

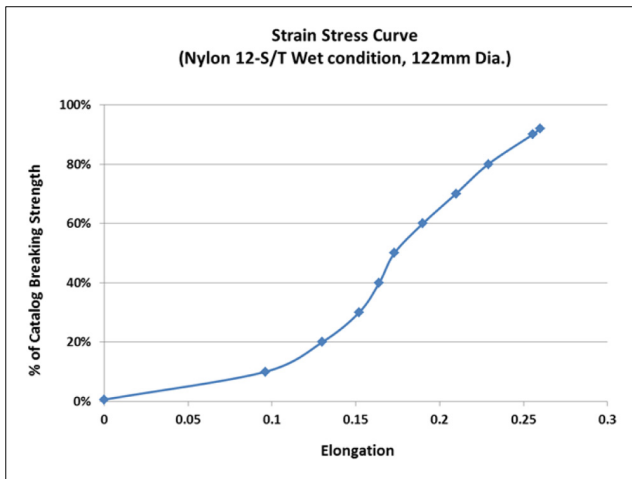


Fig. 7 Mooring rope property

긴 로프와 짧은 로프가 혼재하여 개별 로프간 길이 차이가 크게 발생하는 계류시스템이 구성되었을 때에는 짧은 로프에 하중이 집중되는 상황이 제대로 표현될 수 있도록 비선형 로프하중-변형량 특성을 고려할 필요가 있다. 프리루드 FLNG의 경우 사용되는 계류로프들로 변형률이 큰 나일론 로프를 사용하고, 100줄 이상 많은 로프들이 적용됨으로 선주, 해사검정보증인과의 협의를 통해 Fig. 7 같은 비선형 로프하중-변형량 특성이 반영될 수 있도록 하였다.

비선형 초대형 계류 펜더

대형 선박의 안벽 접안 시 본선과 안벽의 직접적인 충돌 방지를 위해 통상 부유식 형태의 3300mm × 6500mm 폼필드(Foam filled) 펜더 다수를 선측 수평부에 배치하여 사용한다. 그러나, 프리루드 FLNG의 경우 정적 환경외력만으로도 기존 폼필드 펜더의 최대 압축력을 초과하는 상황이 발생함에 따라 4500mm × 9000mm의 특수 주문제작 펜더를 프리루드 FLNG 계류용으로 사용하였다. Fig. 8은 주문제작 펜더의 압축하중에 대한 반발력 특성곡선을 나타낸다.

해석 전제 및 가정

본선 블라드와 안벽 비트에 연결되는 계류 로프의 초기 인장력은 균일하게 2톤이 작용하는 것으로 하였다. 보수적 설계를 위해 안벽에 의한 바람의 차폐효과는 무시하였으며, 환경외력은 모두 동일한 방향에서 입사되는 것으로 가정하였다.

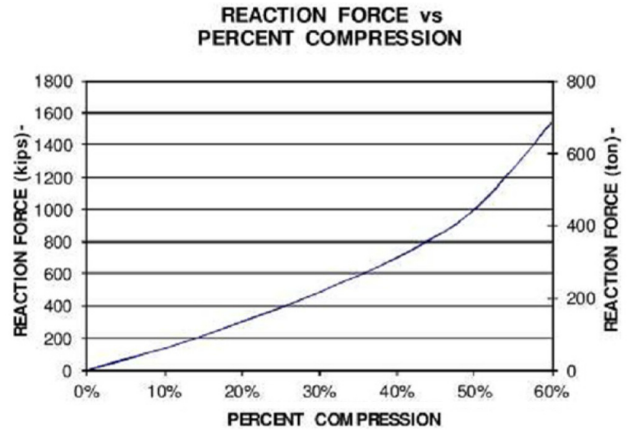


Fig. 8 Load-deflection curve of a fender

3.2 계류해석 결과

계류해석을 통해 극한 환경조건에 따른 각 계류로프에 걸리는 최대하중과 펜더의 반발력, 프리루드 FLNG의 최대 오프셋(Offset)을 결과로 얻었다. 특히, 계류로프의 하중분포는 최악상황 시나리오의 토대가 되는 입력조건으로, 아래와 같은 다섯 가지의 파단조건을 최악상황에 대한 검증 시나리오로 구성하였다.

- (1) 최대하중 로프의 파단(Maximum loaded line failure)
- (2) 최대하중 로프 바로 옆 로프의 파단(Neighbor line failure for maximum loaded line)
- (3) 최대하중 비트의 붕괴(Maximum loaded bitt failure)
- (4) 최대하중 초크의 붕괴(Maximum loaded chock failure)
- (5) 최대하중 블라드의 붕괴(Maximum loaded bollard failure)

최악상황 시나리오는 기본적으로 해양계류 적용지침을 따랐으며(GL Noble Denton, 2013), 선주, 해사검정보증인과의 긴밀한 협의를 통해 관련 시나리오에 대해 확정짓는 과정을 거쳤다.

계류로프하중과 계류안전성 검증

거제 고힌항 극한환경조건에서 프리루드 FLNG에 대한 안벽 계류해석이 수행되었고, 그 결과 안전한 계류를 위해 총 132개의 계류로프와 15개의 펜더가 소요되었다. Fig. 9는 해석 프로그램에서 도시된 안벽계류로프 배치도이다.

또한, 계류해석결과를 바탕으로 계류구성요소들이 각각 손상되는 최악상황 시나리오를 가정하고 이에 따른 프리루드 FLNG 계류안전성 검증결과를 Table 3에 요약하였다. Table 3은 계류구성요소들이 손상받지 않은 조건(Intact)과 최대하중을 받는 계류로프의 파단조건(Max. 1 line failure), 최대하중을 받는 로프 바로 옆 로프의 파단조건(Neighbor line failure of Max. line), 최대하중을 받는 비트의 붕괴조건(Max. loaded bitt failure), 최대하중

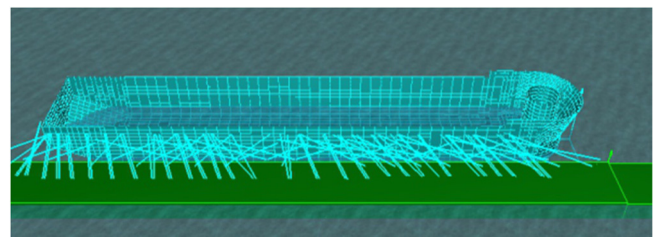


Fig. 9 Quayside mooring arrangement for Prelude FLNG

Table 3 Mooring analysis results for Prelude FLNG

Conditions		Line Tension	Max./SWL	Fender Force
Damage	Intact	93.02 %	94.52 %	
	Max. 1 line failure	92.44 %	94.49 %	
	Neighbor line failure of Max. line	94.34 %	94.33 %	
	Max. loaded bitt failure	95.86 %	94.31 %	
	Max. loaded chock failure	95.38 %	93.99 %	
	Max. loaded bollard failure	94.99 %	94.17 %	



Fig. 10 Mooring analysis results for mooring lines(Intact, Max. 1 line failure, Neighbor line failure of Max. line, Max. loaded bitt failure)

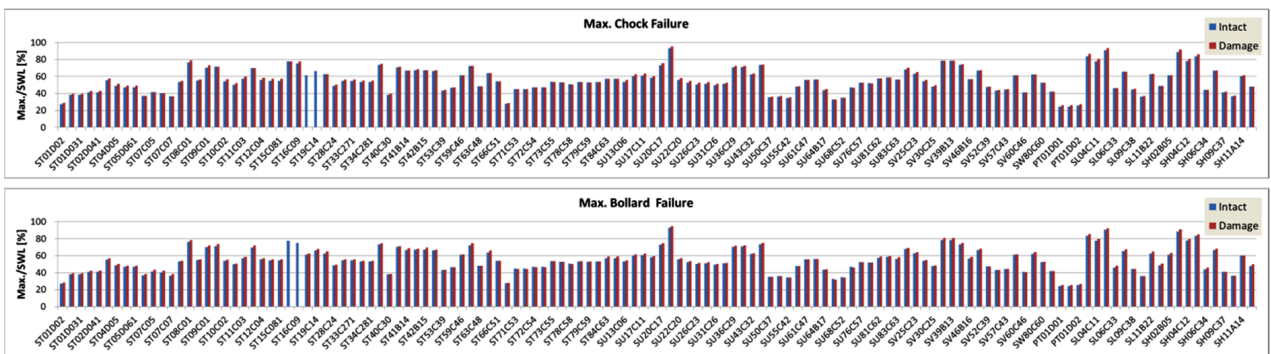


Fig. 11 Mooring analysis results for mooring lines(Max. loaded chock failure, Max. loaded bollard failure)

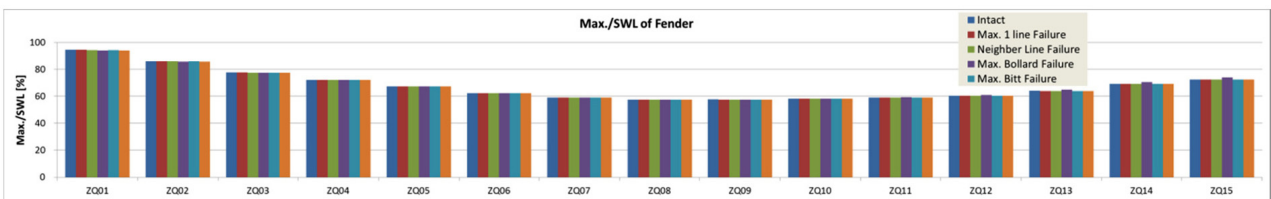


Fig. 12 Mooring analysis results for fender

을 받는 초크의 붕괴조건(Max. loaded chock failure), 최대하중을 받는 볼라드의 붕괴조건(Max. loaded bollard failure)에 대한 상황들을 가정하고 이때의 발생되는 최대하중에 대해 안전작업하중의 비율로 나타낸 것이다. 모든 최악상황 시나리오에 대한 해석결과에서 로프 최대하중이 안전작업하중을 넘지 않는 결과를 보여주었다. 각각의 최악상황 시나리오에 대한 펜더의 압축하중 또한 펜더의 설계하중을 넘지 않는 결과를 보여주었다.

각 해석조건에 따른 계류로프에 걸리는 인장력분포와 펜더에 작용하는 압축력분포를 Figs. 10-12에 각각 도시하였다.

일반적으로 최대하중을 받는 계류로프의 파단조건(Max. 1 line)이 가장 흔히 고려될 수 있는 최악상황으로 검토될 수 있다. 그러나, 최대하중을 받는 로프 바로 옆 로프의 파단조건(Neighbor line of max. failure)은 최대하중 계류로프의 작용하중을 더욱 높일 수 있기 때문에 이에 대한 검토 또한 타당성 있는 중요한 검토사항으로 볼 수 있다. 비교결과 최대하중을 받는 계류로프 파단조건인 경우 작업안전하중의 92.44%에 해당하는 계류로프 최대하중결과를 얻은 반면 최대하중을 받는 로프 바로 옆 로프 파단조건인 경우에는 94.34%로 더 높은 작업안전하중에 대한 최대하중비율을 얻었다. 따라서, 계류로프 관점에서는 최대하중을 받는 로프 바로 옆 로프의 파단조건을 더 보수적인 최악상황 시나리오로 볼 수 있다.

계류시스템 전체의 안전성 평가에서는 계류로프보다 의장품류(Fittings; Bollard, Bitt, Chock)의 붕괴가 계류시스템의 안전성에 더 큰 영향을 미치게 된다. 프리루드 FLNG와 같은 극초대형 부유식 해양구조물의 경우, 하나의 의장품에 두 개의 계류로프가 걸리는 상황이 다수 발생하였기 때문에 의장품류의 붕괴 상황은 두 개의 계류로프가 동시에 끊기게 되는 상황으로 계류시스템 전체가 순차적으로 붕괴할 수도 있는 위험한 상황에 놓이게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 삼성중공업 야드안벽에 계류된 프리루드 FLNG의 안전한 계류시스템 설계를 위하여 극한환경조건에 대해 프리루드 FLNG 안벽계류해석을 수행하였다. 프리루드 FLNG 계류시스템 설계과정과 해석결과들로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 본선 볼라드, 초크, 안벽 비트, 철재구조물, 초대형 펜더 등의 개별 계류구성요소들을 이용한 계류시스템 설계를 통해 야드 건조 중 극초대형 해양구조물인 프리루드 FLNG의 계류안전성을 확보하였다.

(2) 계류해석 시 비선형 로프, 비선형 펜더 모델을 적용함으로써 극한환경조건에서 프리루드 FLNG 계류시스템 구성요소들이 받게 되는 하중을 실제에 더욱 근접하게 모사함으로써 보다 안전한 계류시스템을 설계할 수 있었다.

(3) 계류시스템 설계 및 해석 과정에 선주사, 해사검정보증인과의 협의를 통해 다양한 최악상황 시나리오를 산정하여 극한조건 최악상황에 대비한 강건한 계류시스템 설계 방안을 확보하였다.

(4) 계류로프와 의장품류가 1대 1 대응관계일 때는 최대하중이 걸리는 계류로프의 파단뿐만 아니라 계류로프의 이웃한 로프의 파단을 최악상황 시나리오로 검토해야 하며, 극초대형 부유식 해양구조물의 계류시스템과 같은 1대 다 조건일 경우엔 추가적으로 최대하중이 걸리는 의장품류의 붕괴를 가정하여 계류시스템의 안전성을 검토해야 한다.

(5) 본 연구결과는 향후에 있을 보다 더 큰 규모의 극초대형 부유식 해양구조물 계류시스템 설계 및 해석을 위한 기초자료로 사용가능할 것으로 평가되며 유사 대형 해양 프로젝트 수행을 위한 기본토대가 될 것으로 사료된다.

References

- Bently Systems, 2015. Reference Manual for MOSES, Bently Systems.
- GL Noble Denton, 2013. Technical Policy Board Guidelines for Moorings, GL noble denton 0032/ND. GL Noble Denton.
- Korea Offshore and Shipbuilding Association(KOSHIPA), 2011. Analysis of Competitiveness of Offshore Plant Industry and Development of Short-and Long-term Strategy. [Online] Available at: <<http://www.prism.go.kr/>> [Accessed January 2017].
- Korea Evaluation Institute of Industrial Technology(KEIT), 2015. The Status and Prospect of Floating Offshore Power Plant Technology. [Online] Available at: <<http://www.kosen21.org/>> [Accessed January 2017].
- Korea Energy Economics Institute(KEEI), 2015. Tasks and Countermeasures of the Domestic Resource Development Offshore Plant Industry. [Online] Available at: <<https://www.keei.re.kr/>> [Accessed February 2017].
- KPMG Global Energy Institute(KPMG GEI), 2014. Floating LNG: Revolution and Evolution for The Global Industry. [Online] Available at: <<https://home.kpmg.com/>> [Accessed February 2017].
- LNG Plant Project Business Group, 2010. LNG-FPSO Planning Study of LNG Plant Project Business Group. [Online] Available at: <<http://lngplant.or.kr/>> [Accessed February 2017].
- Na, J.H., Sim, W.S., Lee, I.H., Moon, J.S., Kim, J.W., Shin, H.S., 2004. FPSO Quay Mooring Analysis in Typhoon Condition. Proceedings of the Annual Autumn Meeting, Sancheong Korea.
- Park, M.K., Cho, J.W., Chung, J.H., 2011. Quay Mooring Analysis for a Drillship in Typhoon Conditions. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Special Issue, 70-74.
- Shell Development (Australia) Proprietary Limited, 2009. Prelude Floating LNG Project Environmental Impact Statement. [Online] Available at: <<http://www.shell.com.au/>> [Accessed September 2016].
- Yang, S.H., Cho, J.W., Kim, H.J., Kim, B.K., 2015. Study on the Mooring Stability of Floating Dock with Ultra Large Offshore Structure. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 52(6), 509-519.

Analysis of Velocity Potential around Pulsating Bubble near Free or Rigid Surfaces Based on Image Method

Sangryun Lee*, Gulgi Choi*, Jongchul Kim** and Seunghwa Ryu^{id*}

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

**Agency for Defense Development, Changwon, Korea

이미지 방법을 이용한 자유 및 강체 표면 옆의 맥동하는 버블 주위 속도 포텐셜 해석

이상륜* · 최걸기* · 김종철** · 유승화^{id*}

*한국과학기술원 기계공학과

**국방과학연구소

KEY WORDS: Bubble motion 버블운동, Image bubble 가상 버블, Velocity potential 속도 포텐셜, Pulsation 맥동, Translation 병진

ABSTRACT: An analytical method for predicting the velocity potential around a pulsating bubble close to a free or rigid wall was established using an image method. Because the velocity potential should satisfy two boundary conditions at the bubble surface and rigid wall, we investigated the velocity in the normal direction at the two boundaries by adding the image bubbles. The potential was analyzed by decomposing the bubble motion as two independent motions, pulsation and translation, and we found that when the number of image bubbles was greater than ten, the two boundary conditions were satisfied for the translation term. By adding many image bubbles after the approximation of the pulsation term, we also confirmed that the boundary condition at the wall was satisfied.

1. 서 론

수면 아래에서 TNT(trinitrotoluene), 펜타라이트와 같은 폭발물의 폭발로 발생한 버블은 맥동과 동시에 연직 상승하고 함정과 상호작용에 의한 버블젯 현상 등에 의해 큰 피해를 초래한다(Zhang et al., 2011a; Zhang et al., 2011b). 따라서 함정의 구조적 안정성을 고려한 설계를 위해 버블 운동을 이해하는 것이 필요하다. 본 연구팀에서 펜타라이트를 이용하여 수조에서 진행한 수중폭발 실험결과에 따르면(Choi et al., 2017), 폭발물이 수면에서 위치한 깊이에 따라서 폭발로 생성된 버블이 하강 혹은 상승하는 현상이 관찰되었으며, 이러한 현상은 버블과 자유수면 및 수조벽의 상호작용에 의해 결정된다고 알려져 있다(Brennen, 1995; Zhang et al., 2013). 이러한 버블과 구조물의 상호작용은 유체 내에서 회전하는 블레이드를 설계할 때 역시 필요하다. 유체의 속도 변화에 의한 압력변화로 유체 내에 공동이 발생하는데, 이러한 공동이 블레이드의 수명에 큰 영향을 미치기 때문이다(Sedlář et al., 2015; Sreedhar et al., 2017; Taskar et

al., 2017; Zhang et al., 1989).

따라서 이러한 버블-구조물 상호작용에 의한 현상을 정확히 이해하기 위해서는 버블 주변의 유동을 정확히 예측하는 것이 필요하지만, 실험을 통해서 이러한 버블의 운동을 관찰하기 위해서는 ms(millisecond) 수준에서 관찰 가능한 카메라와 여러 센서 등을 포함한 가시화 장비가 필요하다는 물리적, 시간적인 한계가 존재한다(Cui et al., 2016). 이러한 한계를 극복하고자 속도 포텐셜을 이용한 이론연구와 전산 유체 시뮬레이션 연구가 진행되어 왔다. 전산 유체 시뮬레이션 방법 중 경계요소법을 이용하여 시간에 따라 변화하는 버블 거동에 대해 연구하였으며, 속도 포텐셜을 이용하여 비점성, 비회전성을 갖는 유체내의 유동장을 예측하였다(Klaseboer et al., 2005). 경계요소법을 이용하여 수치적으로 계산된 속도 포텐셜은 버블 표면과 구조물 표면에서 속도 경계조건을 만족하도록 하였다(Chahine and Perdue, 1990). 구조물과의 상호작용에 의한 효과를 연구하기 위해 구조물 부분은 Lagrangian 좌표계에서 계산을 수행하고 유체부분은 Eulerian 좌표계를 이용하였으며(Kaumuck et al., 1995; Zhang et

Received 24 October 2017, revised 12 December 2017, accepted 15 December 2017

Corresponding author Seunghwa Ryu: +82-42-350-3019, ryush@kaist.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9516-5809>

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

al., 2011a), 연성 해석을 통해서 유체가 고체 구조물을 향해 이동하고 버블렛 현상을 모사할 수 있었다(Zhang et al., 2001). 이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석은 정확한 계산시간에 비해 많은 계산시간을 요구한다는 단점이 있다(Zhang et al., 2011a). 버블이 항상 구 형상을 한다는 가정을 하여 속도 포텐셜을 이론적으로 계산한 기존의 연구는 적은 계산량으로 속도 포텐셜을 예측할 수 있었고 버블 표면과 강체 평판에서 경계조건을 근사적으로만 만족하며, 그 오차에 대한 체계적인 연구가 부족하다(Brennen, 1995). 속도 포텐셜을 이용한 계산은 비회전 비점성인 유동장에 대해서만 성립하지만, 해석적인 해로부터 물리적인 직관을 얻을 수 있는 장점이 존재하고, 해석적인 해를 구한 후 기존 시뮬레이션 모델의 정확도를 점검할 수 있는 테스트베드로 활용할 수 있다.

수중 폭발 혹은 공동현상으로 발생한 버블은 맥동과 병진, 2 가지 독립적인 운동이 선형 중첩된 형태의 운동을 한다. 속도 포텐셜을 이용한 연구에 따르면, 무한한 유체 내에서 운동하는 버블은 두 가지 운동에 의한 속도 포텐셜을 선형적으로 더하여 전체 유동의 속도 포텐셜을 구할 수 있다. 한 방향으로 무한한 평판의 고체나 자유 표면의 경계를 갖는 유체 내에서 버블의 운동에 의한 속도 포텐셜을 계산하기 위해 기존의 연구에서는 강체(자유표면) 경계면에서의 속도 경계조건을 만족시키기 위해 강체(자유표면) 경계면 기준 대칭인 위치에 하나의 가상 버블이 있다고 가정한 후, 두 속도 포텐셜을 더하여 속도 포텐셜을 계산하였다(Brennen, 1995). 가상 버블에 의한 속도 포텐셜을 선형적으로 더하게 되면 강체(자유 표면) 경계면에서의 경계조건은 만족하지만, 가상 버블이 없을 때 만족했던 버블 표면에서의 경계조건은 가상의 속도 포텐셜이 생김에 따라 만족하지 않게 된다. 이러한 한계점을 극복하고자 이전의 연구에서는 버블과 평판사이의 거리가 버블의 반지름 보다 충분히 큰 경우에 대해 만족하는 속도 포텐셜 근사식을 Taylor 급수 전개를 통해 계산하였다(Brennen, 1995).

본 연구에서는 무한한 유체 속에서 운동하는 버블에 의한 3 차원 속도 포텐셜을 이용하여 자유 표면 혹은 강체 평판과 상호작용하는 버블 주변의 속도 포텐셜을 다수의 가상 버블을 이용하여 예측한다. 병진 운동에 의한 속도 포텐셜의 경우 하나의 가상 버블을 사용한 기존 연구의 한계점을 뛰어넘기 위해 가상

버블의 개수를 늘려가며 더해가면서 강체(자유 표면) 경계면과 버블 표면 두 개의 경계조건을 만족하는 것을 보인다. 맥동에 의한 속도 포텐셜은 기존의 버블 표면에서의 오차 정도를 유지 하면서 강체(자유 표면)경계면에서의 경계조건은 만족하도록 가상 버블의 개수를 늘려가며 속도 포텐셜을 계산하였다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 속도 포텐셜을 이용한다면 버블과 강체(자유 표면)의 다양한 조건에서 해석적으로 빠르게 계산하고, 물리적인 직관을 주는 장점을 이용하여 강체와 버블 사이의 인력을 이해하는 연구가 가능하고 최종적으로 수중 폭발로 생겨난 버블이 함정에 주는 피해의 정도를 예측가능하다.

2. 가상 버블

2.1 병진 운동에 의한 속도 포텐셜

무한 유체 내에서 맥동하지 않고 병진운동만 하는 버블에 의한 속도 포텐셜은 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi_t = -\frac{WR^3 \cos\theta}{2r^2} \quad (1)$$

W 는 Fig. 1에서의 x 방향 속도를 나타낸다. 극 좌표계를 도입하여 r, θ 를 구하면 임의의 점에서 속도 포텐셜을 계산할 수 있다. Fig. 1과 같이 버블 중심으로부터 $h(=H/2)$ 거리에 강체(자유 표면) 경계면이 존재하는 경우의 속도 포텐셜을 계산하기 위해 가상 전하 방법(Griffiths, 2013)을 사용한다. 전자기학에서 전위 경계조건을 맞추는 가상 전하 방법과 유사한 원리로, 강체(자유 표면) 경계면을 기준으로 버블의 중심에 대칭인 점에 가상 버블의 중심이 위치하게 되면 식 (2)와 같이 속도 포텐셜을 예측할 수 있으며 이는 강체(자유 표면) 경계면에서의 경계조건을 자동으로 만족하게 된다.

$$\Phi_t = \phi_t + \phi_t^i = -\frac{WR^3 \cos\theta}{2r^2} \pm \frac{WR^3 \cos\theta_1}{2r_1^2} \quad (2)$$

ϕ_t 는 실제 버블과 가상 버블의 속도 포텐셜의 합으로 구해진 전체 속도 포텐셜, ϕ_t^i 는 i 번째 가상 버블의 병진운동에 의한 속도 포텐셜

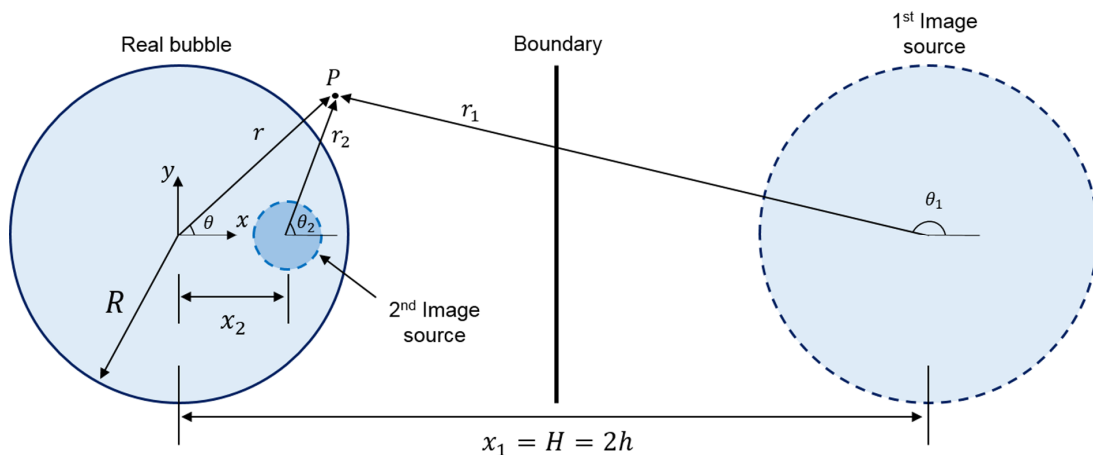


Fig. 1 Schematic for image method applied to bubble dynamics

을 의미하고 r_1 는 첫 번째 가상 버블의 중심으로부터 점 P 까지의 거리를 나타낸다. 식 (2)의 두 번째 항 앞에 있는 부호는 경계면의 종류에 따라 결정되며 강체 평판을 경계면으로 하는 경우 +부호를, 경계면이 자유 표면인 경우는 -부호가 된다. 첫 번째 가상 버블을 도입하여 속도 포텐셜을 계산하면 강체(자유 표면) 경계면에서의 경계조건(강체 평판의 경우 $\left(\frac{\partial\Phi_t}{\partial x}\right)_{x=h} = (v_x)_{x=h} = 0$, 자유 표면의 경우 $\left(\frac{\partial\Phi_t}{\partial y}\right)_{x=h} = (v_y)_{x=h} = 0$)은 만족하지만, 가상 버블을 도입하여 생긴 ϕ_t^1 로 인해 버블 표면에서의 경계조건 $\left(\frac{\partial\Phi_t}{\partial r}\right)_{r=R} = W\cos\theta$ 은 만족하지 않게 된다. 버블 표면에서의 경계조건을 만족시키기 위해서 두 번째 가상 버블을 도입한다. 버블 표면의 점 $\theta=0, \theta=\pi$ 에서 경계조건을 만족하는 두 번째 가상 버블의 위치 x_2 와 속도 w_2 를 이용하여 아래와 같이 식 (3)을 설정한다.

$$\Phi_t = \phi_t + \phi_t^1 + \phi_t^2 = -\frac{WR^3\cos\theta}{2r^2} + \frac{WR^3\cos\theta_1}{2r_1^2} + \frac{w_2R^3\cos\theta_2}{2r_2^2} \quad (3)$$

버블 표면에서 속도 경계조건을 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\left(\frac{\partial\Phi_t}{\partial r}\right)_{r=R} = \left(\frac{\partial\phi_t}{\partial r}\right)_{r=R} + \left(\frac{\partial\phi_t^1}{\partial r}\right)_{r=R} + \left(\frac{\partial\phi_t^2}{\partial r}\right)_{r=R} = W\cos\theta \quad (4)$$

경계조건을 적용하기 위해서 r 에 대해 편미분하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Phi_t}{\partial r} &= \frac{\partial\phi_t}{\partial r} + \frac{\partial\phi_t^1}{\partial r} + \frac{\partial\phi_t^2}{\partial r} = \left(\frac{WR^3\cos\theta}{r^3}\right) \\ &+ \left(-\frac{WR^3\cos\theta_1}{r_1^3}\frac{\partial r_1}{\partial r} - \frac{WR^3\sin\theta_1}{2r_1^2}\frac{\partial\theta_1}{\partial r}\right) \\ &+ \left(-\frac{w_2R^3\cos\theta_2}{r_2^3}\frac{\partial r_2}{\partial r} - \frac{w_2R^3\sin\theta_2}{2r_2^2}\frac{\partial\theta_2}{\partial r}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

버블 표면위의 두 점 ($\theta=0, \theta=\pi$)에 적용하게 되면 $\frac{\partial\theta_2}{\partial r} = \frac{\partial\theta_3}{\partial r} = 0$ 이 되기 때문에 각 점에서의 r_2, r_3 값을 대입하여 식 (6), 식 (7)로 식을 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial\phi_t}{\partial r}\right)_{r=R, \theta=0} \quad (6)$$

$$= (W) + \left(-\frac{WR^3(-1)}{(x_1-R)^3}(-1)\right) + \left(-\frac{w_2R^3(1)}{(R-x_2)^3}(1)\right) = W$$

$$\left(\frac{\partial\phi_t}{\partial r}\right)_{r=R, \theta=\pi} \quad (7)$$

$$= (-W) + \left(-\frac{WR^3(-1)}{(x_1+R)^3}(1)\right) + \left(-\frac{w_2R^3(-1)}{(R+x_2)^3}(1)\right) = -W$$

식 (6), 식 (7)을 x_2, w_2 에 대해 연립하여 풀이하면 아래와 같이 두 번째 가상 버블의 위치와 속도를 구할 수 있다.

$$x_2 = \frac{R^2}{H}, \quad w_2 = -\left(\frac{R}{x_1}\right)^3 W \quad (8)$$

두 번째로 도입한 가상 버블에 의해 버블 표면에서 속도 경계조건은 정확하게 만족하지만, 강체(자유 표면) 경계면에서의 경계조건은 다시 만족하지 않게 된다. 식 (2)와 식 (8)에서 볼 수 있듯이 홀수 번째 가상 버블의 속도는 이전의 가상 버블의 속도와 부호가 반대이고 크기가 같지만, 짝수 번째 가상 버블의 속도의 크기는 직전의 홀수 번째 가상 버블에 비해 크게 감소한다. 따라서 식 (9)의 n 번째 가상 버블의 위치와 거리를 이용하여 식 (9)와 같이 무한개의 가상 버블을 도입하게 되면 강체(자유 표면) 경계면과 버블 표면에서 경계조건을 모두 만족하는 속도 포텐셜을 구할 수 있다.

$$x_0 = 0, x_n = \begin{cases} H - x_{n-1}, n: \text{홀수} \\ \frac{R^2}{x_{n-1}}, n: \text{짝수} \end{cases}, \quad r_n = \sqrt{r^2 + x_n^2 - 2rx_n\cos\theta} \quad (9)$$

$$w_0 = -W, w_n = \begin{cases} -w_{n-1}, n: \text{홀수} \\ -w_{n-1}\left(\frac{R}{x_{n-1}}\right)^3, n: \text{짝수} \end{cases} : \text{강체 평판} \\ \begin{cases} w_{n-1}, n: \text{홀수} \\ -w_{n-1}\left(\frac{R}{x_{n-1}}\right)^3, n: \text{짝수} \end{cases} : \text{자유 표면}$$

$$\Phi_t = \phi_t + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_t^n = -\frac{WR^3\cos\theta}{2r^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{w_n R^3 \cos\theta_n}{2r_n^2}$$

r_n 은 n 번째 가상버블의 중심으로부터 거리를 뜻한다. 기존의 연구에서는 버블과 강체(자유 표면) 경계면 사이의 거리가 버블 반지름에 비해 충분히 크다고 가정하여 한 개의 가상 버블에 의한 속도 포텐셜을 구하였는데, 이는 식 (9)에서 2번째 항 ($n=1$)까지 고려한 속도 포텐셜을 사용하였기 때문에 버블 표면에서 경계조건을 만족하지 않는다(Fig. 2).

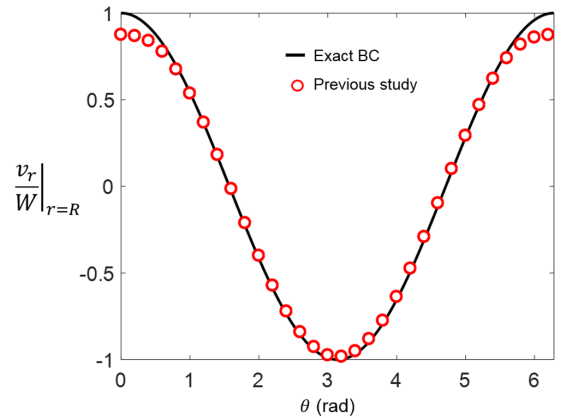


Fig. 2 Normalized radial velocity at bubble surface in the previous study(Brennen, 1995)

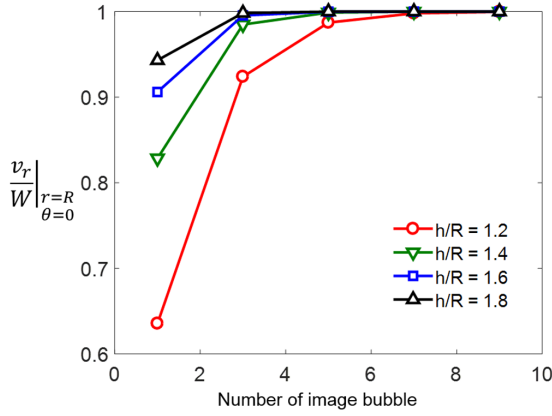


Fig. 3 Normalized radial velocity at bubble surface for different number of image bubble and h/R

본 연구에서는 가상 버블의 개수를 늘려가며 속도 포텐셜을 계산하여 각 경계조건이 어떻게 변화하는지 살펴보기로 한다. 먼저 강체 경계면을 기준으로 대칭인 버블 분포를 갖는 홀수개의 가상 버블을 더하는 경우 자동적으로 강체 경계면에서 경계조건을 만족하기 때문에 버블 표면에서의 경계조건을 살펴보면 Fig. 3과 같다. 가상 버블의 개수에 따라서 버블 표면의 한 점 ($r=R, \theta=0$)에서의 r 방향 유속을 비교한 결과이며, 버블 중심과 강체 경계면사이의 거리가 버블의 반지름에 비해 클수록 ($h > R$) 더 적은 수의 가상 버블을 더하여도 경계조건을 비교적 정확하게 만족하는 속도 포텐셜을 구할 수 있다. $h/R=1.2$ 인 경우는 3개의 가상 버블을 사용할 때 대략 10% 상대오차를 갖지만, $h/R=1.8$ 의 경우는 같은 수의 가상 버블에 대해 매우 작은 오차를 나타낸다.

가상 버블의 개수를 늘려가면서 버블 표면에서 속도 경계조건을 살펴보면, 약 9개의 가상 버블을 이용하여 계산할 경우 버블과 강체 경계면이 매우 가까운 $h/R=1.2$ 인 경우에도 표면에서 경계조건을 만족한다. 따라서 9개의 가상 버블을 이용하여 점($r=R, \theta=0$) 뿐만 아니라 임의의 θ 에 대해서 버블 표면에서 반지름 방향 속도를 그려보면 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 표면 모든 점에서 경계조건을 만족하는 것을 볼 수 있다.

짝수개의 가상 버블을 도입하여 속도 포텐셜을 계산할 경우

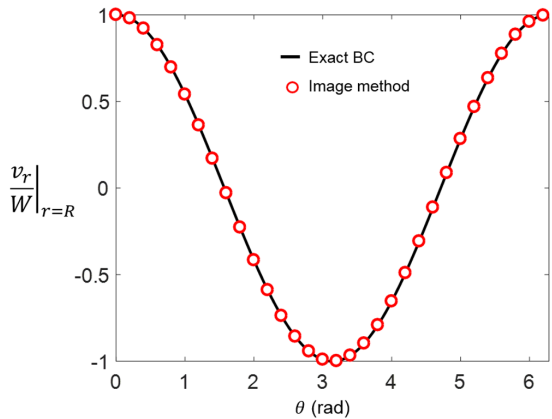


Fig. 4 Normalized velocity in radial direction at bubble surface (present study)

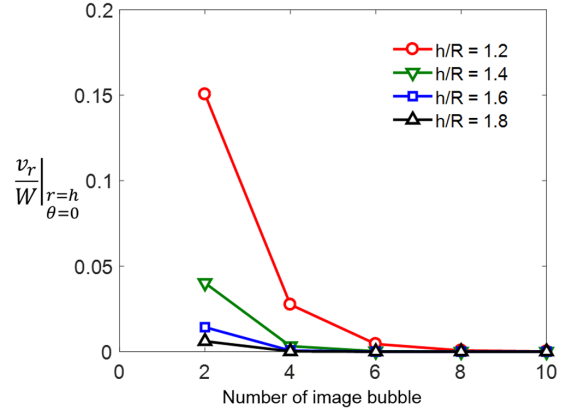


Fig. 5 Velocity in normal direction at $(x,y)=(h,0)$ at rigid wall

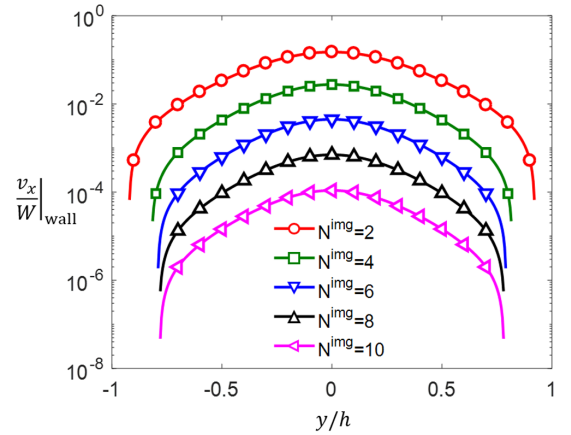


Fig. 6 Normalized velocity in normal direction at rigid wall

버블 표면에서 자동적으로 경계조건을 만족하고 강체 경계면에서의 경우 그 오차가 가상 버블의 개수에 따라 달라진다. 강체 경계면의 한 점($x=h, y=0$)에서 v_x 를 계산하면 Fig. 5와 같다. 버블의 중심이 강체 경계면으로부터 충분히 먼 경우 비교적 적은 수의 가상 버블을 사용하여 속도를 예측하여도 그 오차가 상대적으로 작으며, 8~10개의 가상 버블을 도입하여 계산할 경우, 강체 경계면으로부터 버블이 충분히 가까워도 무시할만한 오차를 보이며 경계조건을 만족한다.

강체 경계면에 수직한 방향의 속도 값을 강체 경계면의 위치에 대해 계산하면 Fig. 6과 같다. $h/R=1.2$ 인 경우에 대해 10개의 가상 버블($N^{img}=10$)을 더할 경우, 그 오차는 매우 작아진다. 앞서 가상 버블의 개수가 홀수 일 때의 결과와 종합하여 보면, 가상 버블의 개수가 10개 이상이면 그 숫자가 홀, 짝 종류에 상관없이 두 개의 경계조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있고 만약 무한개의 가상 버블을 더하게 되면 그 오차는 0으로 수렴하게 된다. 10개의 가상 버블을 이용하여 $h=1.2R$ 인 경우 경계조건을 모두 만족하는 속도 포텐셜을 xy 평면에서 그려보면 Fig. 7로 나타낸다. 속도 포텐셜을 공간에 대해 수치 미분하여 화살표로 유동장을 가시화 하였고 모든 변수는 W, R 로 나누어 무차원화 하였다.

본 연구에서 제시하는 방법의 오차를 고찰하기 위해서 주어진 계산 자원(Intel Core i7-6700 CPU @ 3.40GHz)을 이용하여

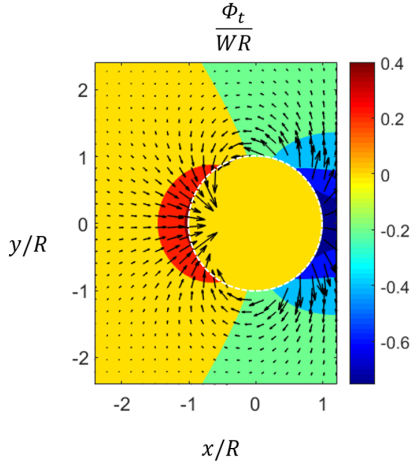


Fig. 7 Normalized velocity potential(contour) for ϕ_t and fluid flow (black arrow) near the bubble

Table 1 Computed error and computation time

N^{img}	Computation time [s]	Error at wall	Error at bubble surface
10	0.5138	1.089×10^{-4}	0
11	0.4789	0	2.6×10^{-3}

병진운동하는 버블 주변 3차원 속도 포텐셜을 계산하고 그 결과의 오차를 정리하면 Table 1과 같다. 벽면에서의 이론값은 0 이기 때문에 벽면에서의 속도를 W 로 나눈 값을 그대로 나타냈고, 버블 표면에서의 오차는 이론값에 대해 상대 오차를 나타냈다. 홀수, 짝수에 상관없이 10개 이상의 가상 버블을 이용하여 본 연구에서 제시하는 3차원 속도 포텐셜을 계산할 경우 짧은 계산 시간으로 높은 정확도를 갖는 것을 알 수 있다.

2.2 맥동 운동에 의한 속도 포텐셜

버블의 맥동운동에 의한 속도 포텐셜은 식 (10)과 같다.

$$\phi_p = -\frac{R^2 \dot{R}}{r} \quad (10)$$

\dot{R} 은 버블 반지름의 시간에 대한 변화율을 의미한다. 강체(자유 표면) 경계면($x=h$)에서 경계조건을 만족시키기 위해 강체(자유 표면) 경계면을 기준으로 대칭인 위치에 첫 번째 가상 버블을 도입하면 속도 포텐셜은 식 (11)로 나타난다.

$$\Phi_p = \phi_p + \phi_p^1 = -\frac{R^2 \dot{R}}{r} \mp \frac{R^2 \dot{R}}{r_1} \quad (11)$$

두 번째 항 앞에 있는 부호는 강체 경계면의 경우 -, 자유 표면 경계인 경우 +로 계산된다. 맥동에 의한 속도 포텐셜의 경우, 병진에 의한 속도 포텐셜과 달리 버블표면에서 경계조건을 정확하게 만족시키는 2번째 가상 버블의 위치와 반지름의 시간에 대한 변화율을 구하는 것이 수학적으로 어렵기 때문에 경계조건을 오차 $(R/H)^2$ 정도까지 만족하는 속도 포텐셜을 계산한

다. 2번째 가상 버블에 의한 속도 포텐셜(ϕ_p^2)을 더하고 버블 표면에서 경계조건을 적용하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Phi_p}{\partial r} \right)_{r=R} &= \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial r} \right)_{r=R} + \left(\frac{\partial \phi_p^1}{\partial r} \right)_{r=R} + \left(\frac{\partial \phi_p^2}{\partial r} \right)_{r=R} \\ &= \dot{R} - \left(\frac{R^2 \dot{R}}{r_1^2} \frac{\partial r_1}{\partial r} \right)_{r=R} + \left(\frac{\partial \phi_p^2}{\partial r} \right)_{r=R} = \dot{R} \end{aligned} \quad (12)$$

코사인 제2법칙을 이용하여 r_2 를 계산한 뒤, 식 (12)에 대입하여 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Phi_p}{\partial r} \right)_{r=R} &= \dot{R} + R^2 \dot{R} (R^2 + H^2 - 2RH \cos \theta)^{-\frac{3}{2}} (R - H \cos \theta) + \left(\frac{\partial \phi_p^2}{\partial r} \right)_{r=R} = \dot{R} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\therefore \left(\frac{\partial \phi_p^2}{\partial r} \right)_{r=R} = -R^2 \dot{R} (R^2 + H^2 - 2RH \cos \theta)^{-\frac{3}{2}} (R - H \cos \theta) \quad (14)$$

이전의 연구에서 식 (14)의 우변을 Taylor 근사하고 $(R/H)^3$ 이상의 고차항은 값이 작다고 가정하여 식을 계산하였고, 그 결과, 버블 표면에서 주어진 오차까지 경계조건을 만족하는 2번째 가상 버블의 맥동에 의한 속도 포텐셜을 식 (15)로 나타낼 수 있다(Brennen, 1995).

$$\phi_p^2 = -\frac{R^5 \dot{R} \cos \theta_2}{2H^2 r_2^2} \quad (15)$$

2번째 가상 버블의 중심이 1번째 버블과 일치하기 때문에 조건 $r_2 = r, \theta_2 = \theta$ 를 사용하여 식 (15)에 나타냈다. 이전의 연구에서는 식 (15)에 표현된 2번째 가상 버블까지 고려하여 속도 포텐셜을 계산하였는데, 2번째 가상 버블의 도입으로 강체 경계면에서 경계조건을 만족하지 않는다. 본 연구에서는 이러한 기존 연구의 한계를 해결하고자 추가적인 가상 버블을 도입하여 계산하기로 한다. 먼저 강체 경계면을 기준으로 대칭인 위치에 3번째 가상 버블을 두면, 강체 경계면에서의 경계조건을 만족하고 버블 표면에서 만족하지 않는다. 버블 표면에서 기존의 오차 정도 $(R/H)^2$ 를 갖으며 동시에 강체 경계면에서의 경계조건을 만족시키기 위해서 앞서 설명한 방법을 이용하여 4번째 가상 버블의 위치와 버블 반지름의 시간에 대한 변화율을 계산할 수 있다.

$$\phi_p^4 = \frac{R^5 \dot{\rho}_4 \cos \theta_3}{2H^2 r_4^2}, \quad x_4 = \frac{R^2}{H}, \quad \dot{\rho}_4 = -\left(\frac{R}{x_3} \right)^3 \dot{R} \quad (16)$$

식 (16)의 가상 버블에 의한 속도 포텐셜은 병진운동에 의한 속도 포텐셜과 식의 형태가 유사하기 때문에 맥동에 의한 속도 포텐셜을 구할 때 사용했던 방법을 이용하여 아래와 같이 무한

급수의 형태로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned}
 x_1 = H, x_2 = 0, x_n = \begin{cases} H - x_{n-1}, n \geq 3: \text{홀수} \\ \frac{R^2}{x_{n-1}}, n \geq 3: \text{짝수} \end{cases}, r_n = \sqrt{r^2 + x_n^2 - 2rx_n \cos \theta} \\
 \dot{\rho}_n = \begin{cases} \dot{\rho}_1 = -\dot{R}, \dot{\rho}_2 = -\dot{R}, \dot{\rho}_n = \begin{cases} -\dot{\rho}_{n-1}, n \geq 3: \text{홀수} \\ -\dot{\rho}_{n-1} \left(\frac{R}{x_{n-1}} \right)^3, n \geq 3: \text{짝수} \end{cases} : \text{강체 평판} \\ \dot{\rho}_1 = +\dot{R}, \dot{\rho}_2 = +\dot{R}, \dot{\rho}_n = \begin{cases} \dot{\rho}_{n-1}, n \geq 3: \text{홀수} \\ -\dot{\rho}_{n-1} \left(\frac{R}{x_{n-1}} \right), n \geq 3: \text{짝수} \end{cases} : \text{자유 표면} \end{cases} \\
 \Phi_p = \phi_p + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_p^n = -\frac{R^2 \dot{R}}{r} + \frac{R^2 \dot{R}}{r_1} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{R^5 \dot{\rho}_n \cos \theta_n}{2H^2 r_n^2} \quad (17)
 \end{aligned}$$

맥동운동에 의한 속도 포텐셜은 함수 형태가 달라 병진운동에 의한 속도 포텐셜과 달리 두 경계조건을 모두 정확히 만족하는 함수를 계산하기 어렵다. 그 결과, Fig. 8에 나타나있듯이, 무한개의 가상 버블을 중첩하여 속도 포텐셜을 계산해도 버블 중심과 강체 경계면의 거리에 따라 버블 표면에서 경계조건을 만족하지 않는다.

버블 표면에서 경계조건 오차는 $(R/H)^3$ 정도이기 때문에 h/R 값이 커질수록 오차의 크기가 작아지기 때문에 버블 표면에서 경계조건을 더 정확하게 만족하게 된다. $h/R > 1.8$ 인 경우 버블 표면에서 10% 미만의 상대 오차를 갖는 반면, $h/R = 1.2$ 인 경우

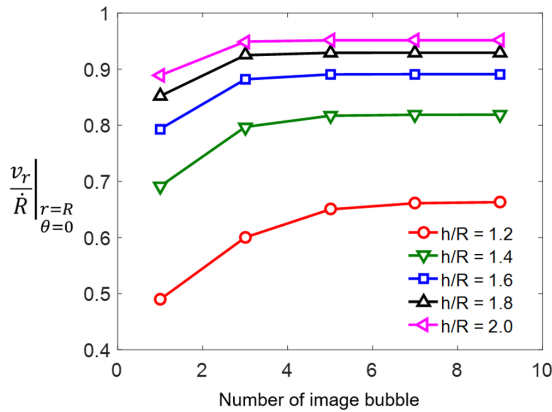


Fig. 8 Normalized radial velocity at $(r, \theta) = (R, 0)$ on the bubble surface

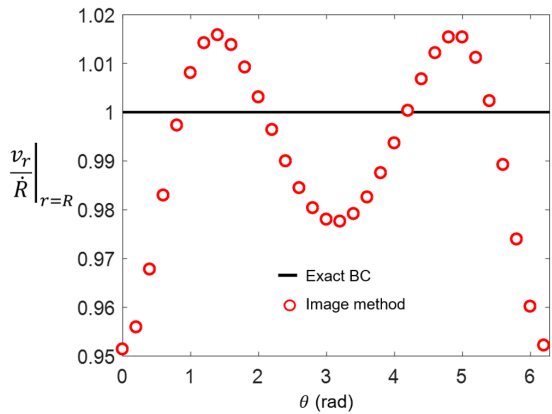


Fig. 9 Normalized radial velocity at the bubble surface

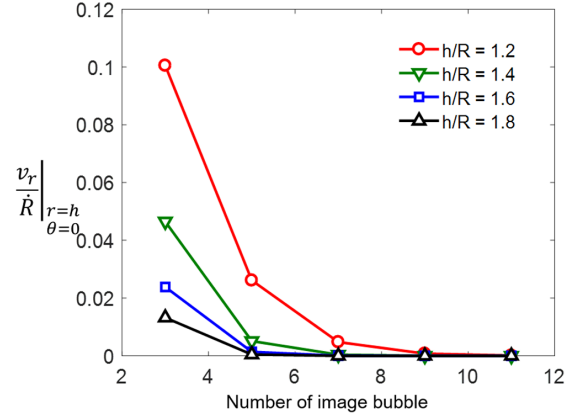


Fig. 10 Normalized normal velocity at $(x, y) = (h, 0)$ at the rigid wall

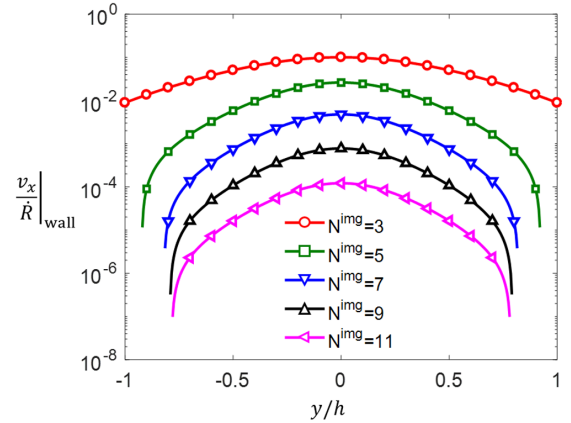


Fig. 11 Velocity in normal direction at the rigid wall

충분히 많은 가상 버블을 중첩하여 계산하여도 30% 이상의 상대오차를 갖는다. $h = 2R$ 일 때 9개의 가상 버블을 중첩하여 표면에서의 속도를 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 버블 반지름의 변화율로 무차원화된 속도 변수는 버블 표면에서 대략 5% 미만의 오차를 갖으며, $\theta = 0$ 에서 최대 오차를 갖는다.

버블의 중심과 강체 경계면의 거리에 상관없이 많은 가상 버블을 도입하면 강체 경계면에서 경계조건을 만족하는 속도 포텐셜을 구할 수 있기 때문에 작은 h/R 값에 대해서도 경계 조건을 만족한다. 대략 11개의 가상 버블을 사용하게 되면, 강체 경계면에서는 $h/R = 1.2$ 인 경우에도 경계조건을 만족한다. 강체 경계면($x = h$)에서 경계조건을 가상 버블의 개수(N^{img})를 증가시키면서 계산해보면 Fig. 10처럼 오차가 감소하는 것을 알 수 있다. 11개의 가상 버블을 중첩시켜서 계산할 경우 강체 경계면에서 10^{-5} 수준의 오차를 갖는다(Fig. 11).

11개의 가상 버블을 중첩시켜서 $x = h = 2R$ 의 위치에 강체 평판이 있는 경우에 대해 계산한 무차원 속도 포텐셜과 유동장을 가시화하면 Fig. 12와 같다. 강체 평판에서 x 방향으로의 속도가 0으로 경계조건을 만족하며, 속도 포텐셜을 갖는 이상 유체이기 때문에 강체(자유 표면) 경계면에서의 $y(x)$ 방향 속도는 유한한 값을 갖는다.

맥동 운동하는 버블에 의한 속도 포텐셜 계산 결과를 정리하면 Table 2와 같다. 계산 소요 시간은 병진 운동의 경우와 마찬가지로

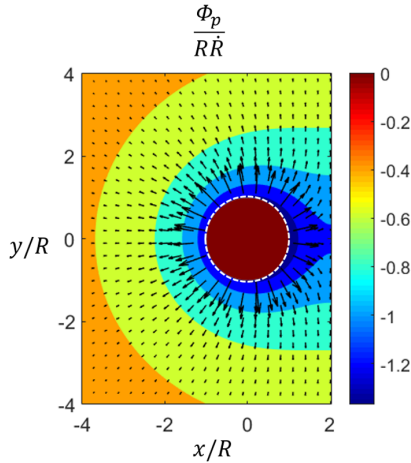


Fig. 12 Normalized velocity potential(contour) for $\bar{\phi}_p$ and fluid flow (black arrow) near the bubble

Table 2 Computed error and computation time

N^{ring}	Computation time [s]	Error at wall	Error at bubble surface
10	0.5389	1.317×10^{-9}	1.58×10^{-2}
11	0.5347	0	1.58×10^{-2}

가지로 대략 0.5초 정도가 소요되며, 만족해야하는 경계조건에 대한 오차도 작게 나타났다. 벽면에서의 경계조건은 비교적 정확하게 만족하는 반면, 버블 표면에서의 오차는 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 오차는 앞서 설명한 Taylor 급수 전개를 통해 얻은 계산의 오차이며 그 값은 10^{-2} 정도로 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 가상 버블을 이용하여 맥동, 병진운동하며 강체(자유 표면)경계면과 상호작용하는 버블 주변 유동의 속도 포텐셜을 이론적으로 예측하였다. 이전의 연구에서는 2개(병진) 혹은 3개(맥동)의 가상 버블을 사용하여 속도 포텐셜을 계산하였기 때문에 병진운동에 의한 속도 포텐셜의 경우 버블의 표면에서, 맥동운동에 의한 속도 포텐셜의 경우 강체(자유 표면) 경계면에서 경계조건을 만족하지 않았다. 병진 운동에 의한 속도 포텐셜은 가상 버블의 개수를 대략 10개까지 늘려가면서 포텐셜을 계산하면 버블 표면과 강체(자유 표면) 경계면에서 경계조건을 동시에 만족하는 속도 포텐셜을 계산 할 수 있었다. 맥동운동의 경우는 속도 포텐셜 함수 형태가 병진 운동에 의한 속도 포텐셜과 달라서 직접적인 가상 버블을 도입하기는 어려움이 있었다. 이에 본 연구에서는 이전의 연구에서 제시한 방법을 이용하여 버블 표면에서 $(R/H)^3$ 정도의 오차를 갖는 속도 포텐셜을 사용하였고, 더 나아가 기존의 연구에서 강체(자유 표면) 경계면에서 경계조건을 만족하지 않는 한계점을 가상 버블을 추가적으로 도입하여 극복하였다. 후속연구로써, 맥동하는 버블의 경계조건을 더 정확하게 만족하는 해석적인 풀이 방법을 개발하고, 그렇게 구해진 속도 포텐셜을 이용하여 강체(자유 표면) 경계면에 의해 버블에 가해지는 인력과 척력을 계산하는 연

구를 계획 중에 있다. 본 연구에서 제시한 속도 포텐셜은 버블과 고체의 상호작용으로 발생하는 인력을 이용하여 버블에 의한 함정의 피해 가능성을 예측하는 연구에 적용 가능할 것이라 예상되며 또한, 수조에서 수중 폭발 실험을 하는 경우 자유 표면과 강체(바닥)으로부터 인력과 척력을 받기 때문에 발생하는 버블의 상승 혹은 하강을 예측하는 연구가 가능하다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 ‘수중 근접폭발 특화연구실’ 과제의 지원을 받아 수행 하였으며, 이에 감사드립니다.

References

- Chahine, G.L., Perdue, T.O., 1990. Simulation of the Three-dimensional Behavior of an Unsteady Large Bubble Near a Structure. AIP Conference Proceedings, 197, 188.
- Choi, G.G., Jung, K.W., Jung, S.S., Kim, J.C., Lee, P.S., 2017. Underwater Explosion Experiments using Pentolite. Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering, 35(3), 21-30.
- Cui, P., Zhang, A.M., Wang, S.P., 2016. Small-charge Underwater Explosion Bubble Experiments under Various Boundary Conditions. Physics of Fluids, 28, 117103.
- Brennen, C.E., 1995. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, New York.
- Griffith, D.J., 2013. Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press, New York.
- Kalumuck, K.M., Duraiswami, R., Chahine, G.L., 1995. Bubble Dynamics Fluid-structure Interaction Simulation by Coupling Fluid BEM and Structural FEM Codes. Journal of Fluids and Structures, 9(8), 861-883.
- Klaseboer, E., Hung, K.C., Wang, C., Wang, C.W., Choo, B.C., Boyce, P., Debono, S., Charlier, H., 2005. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of an Underwater Explosion Bubble near a Resilient/Rigid Structure. Journal of Fluid Mechanics, 537, 387-413.
- Sedlář, M., Šoukal, J., Krátký, T., Vyroubal, M., 2015. Numerical Prediction of Impacts of Cavitation in Pumps for Power Generation. Thermal Engineering, 62(6), 408-413.
- Sreedhar, B.K., Albert, S.K., Pandit, A.B., 2017. Cavitation Damage: Theory and Measurements – A Review. Wear, 372-373, 177-196.
- Taskar, B., Steen, S., Eriksson, J., 2017. Effect of Waves on Cavitation and Pressure Pulses of a Tanker with Twin Podded Propulsion. Applied Ocean Research, 65, 206-218.
- Zhang, Y.J., Li, S.C., Hammit, F.G., 1989. Statistical Investigation of Bubble Collapse and Cavitation Erosion Effect. Wear, 133(2), 257-265.
- Zhang, Y.L., Yeo, K.S., Khoo, B.C., Wang, C., 2001. 3D Jet Impact and Toroidal Bubbles. Journal of Computational Physics, 166,

336-360.

Zhang, A.M., Zeng, L.Y., Cheng, X.D., Wang, S.P., Chen, Y., 2011a. The Evaluation Method of Total Damage to Ship in Underwater Explosion. *Applied Ocean Research*, 33(4), 240-251.

Zhang, Z.H., Wang, Y., Zhang, L.J., Yuan, J.H., Zhao, H.F., 2011b. Similarity Research of Anomalous Dynamics Response of

Ship Girder Subjected to near Field Underwater Explosion. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 32(12), 1491-1504.

Zhang, A.M., Wang, S.P., Huang, C., Wang, B., 2013. Influences of Initial and Boundary Conditions on Underwater Explosion Bubble Dynamics. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 42, 69-91.

Numerical Analysis of Unsteady Cavitating Vortex around Two-dimensional Wedge-shaped Submerged Body

Ji-Hye Kim*, So-Won Jeong*, Byoung-Kwon Ahn^{ORCID}*, Chul-Soo Park** and Gun-Do Kim**

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

**Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

2차원 썰기형 물수체의 비정상 공동 와류에 대한 수치해석

김지혜* · 정소원* · 안병권^{ORCID}* · 박철수** · 김건도**

*충남대학교 선박해양공학과

**한국해양연구원 선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Cavitating flow 공동유동, Multiphase flow 다상유동, Wake flow 후류 유동, Vortex 와류

ABSTRACT: Unlike a slender body, vortices are shed off alternately in the wake of a blunt body. In the case of liquid flows, when the pressure falls below the vapor pressure, cavitation occurs in the vortex core and affects the formation of the vortex street. This phenomenon is of major importance in many practical cases because the alternate shedding of vortices creates imbalanced forces on the body. Hence, it is very important to determine the shedding frequency of cavitating vortices. In this paper, the unsteady cavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped submerged body was simulated using the commercial code STAR-CCM+. A numerical investigation of the structure of cavitating vortices was performed for a model with an apex angle of 20°. The results were validated by comparing them with experimental measurements carried out at a cavitation tunnel of Chungnam National University (CNU-CT). It was found that the shedding frequency of the vortex increased by up to 18%, which was strongly affected by the development of cavitation.

1. 서 론

수중운동체의 속도가 빨라짐에 따라 운동체 주위의 압력이 증기압 이하로 감소하게 되면, 액체가 기체로 변화는 캐비테이션 현상이 발생하게 된다. 발생한 기포가 성장하여 수중운동체를 모두 뒤덮게 되면 운동체는 물과 직접적으로 접촉하는 면적이 감소함에 따라 마찰저항의 영향을 거의 받지 않게 되고, 이로 인해 동일한 연료 대비 극적인 속도 증가 효과를 얻을 수 있다. 이러한 초공동(Supercavitation) 현상을 이용한 수중운동체에 대한 기초연구가 국내에서 활발히 이루어지고 있으며(Ahn, et al., 2010; Ahn, et al., 2012; Kim, et al., 2013; Kim, et al., 2016), 초공동을 발생시키는 기술뿐만 아니라 초공동 수중운동체의 제어를 위한 기초 연구도 함께 수행되어오고 있다. 초공동 수중운동체의 제어를 위해 사용하는 제어핀은 일반적으로 썰기형상의 단면을 갖으며 수중운동체의 자세와 심도를 변화시키는 역

할을 한다. 수중운동체의 속도가 증가함에 따라 일정 속도 이상의 영역에서는 초공동을 발생시키는 캐비테이터(Cavitator)뿐만 아니라 제어핀의 후류에서도 공동이 성장하게 되는데, 이때, 상대적으로 무딘 물체(Blunt body)의 후류에서 나타나는 주기적인 와류(Periodic vortex)가 발생하게 된다. 비공동 상태에서 발생하는 이러한 와류 특성에 관해서는 실험 또는 수치적인 연구가 활발히 수행되어 왔으나(Ramamurthy and Balachandar, 1990; Ozgoren, et al., 2015), 공동 생성 이후 발생하는 와류의 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. Belahadji, et al.(1995)은 2차원 썰기 후류 유동장을 유동 특성에 따라 분류하고, 2차원 썰기 후류에 공동이 생성되었을 경우 발생하는 와류의 형상 및 주기적인 특성을 평가하였다. 국내에서는 2차원 썰기형 제어핀 후류에서 발생하는 공동유동 특성을 살피기 위하여 충남대학교 캐비테이션 터널에서 초고속 카메라를 이용하여 유동장을 면밀히 관측하고 유동장 내 변동압력을 계측하여 2차원 썰기형 제어핀 후

Received 19 December 2017, revised 18 January 2018, accepted 1 February 2018

Corresponding author Byoung-Kwon Ahn: +82-42-821-6625, bkahn@cnu.ac.kr, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0339-6069

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of SNAK 2017 in Yeosu

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

류 유동의 주기적인 특성을 확인한 바 있다(Jeong and Ahn, 2016). 본 연구에서는 상용프로그램인 STAR-CCM+를 사용하여 2차원 썬기 후류의 비정상 공동유동을 해석하였으며, 다양한 조건에서 발생하는 공동의 형상정보 및 유동장의 변동 압력 계산을 통해 공동의 발생이 후류의 주기적인 와류 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 이를 충남대학교 캐비테이션 터널에서 수행한 실험 결과와 비교하여 검증하고자 하였다.

2. 지배방정식 및 수치해석 기법

2.1 지배방정식

2차원 썬기 주위의 비정상 공동유동 해석을 위하여 검사체적 내의 각 셀(Cell)은 다음의 연속방정식과 운동량방정식, 즉 RANS(Reynolds averaged navier-stokes) 방정식을 포함하는 지배방정식을 만족한다. 또한, 물과 수증기로 이루어진 다상유동(Multiphase flow) 해석을 위하여 상계면(Phase interface)을 추적하는 방법으로 VOF(Volume of fluid) 방법을 적용하였으며, 이를 위해 식 (3)의 체적분율 방정식을 해석한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + F_j \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_q \alpha_q) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_q \alpha_q u_j) = S_{\alpha_q} + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3)$$

여기서, i, j, k 는 좌표계를, p 와 q 는 혼합 유체 내에 존재하는 상(Phase)을 나타내고 각각의 상은 동일한 속도(u)와 압력(P)을 갖으며 F 는 외력항을 나타낸다. 공동유동은 물과 수증기로 이루어진 이상유동(Two-phase flow)으로 상의 개수 $n=2$ 이다. 이때, 식 (1)과 식 (2)의 밀도(ρ)와 점성계수(μ)는 다음과 같이 각각의 상에 대한 체적분율(Volume fraction) α 로 정의할 수 있으며, α 는 0~1의 값을 갖는다.

$$\rho = \sum_{q=1}^2 \alpha_q \rho_q \quad (4)$$

$$\mu = \sum_{q=1}^2 \alpha_q \mu_q \quad (5)$$

식 (3)에서 S_{α_q} 는 체적분율에 대한 소스항이며, 2차상(Secondary phase)인 수증기에 대해 방정식을 먼저 해석하고, 식 (6)을 이용하여 1차상(Primary phase)인 물에 대하여 방정식을 해석한다.

$$\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \quad (6)$$

2.2 캐비테이션 모델

공동유동 해석을 위하여 다음 식 (7)로 나타나는 수증기의 체적분율에 대한 수송방정식을 풀게 된다. 여기서 v 는 수증기를 나타내

며, R_e 와 R_c 는 각각 기포의 기화(Evaporation)와 응축(Condensation)을 나타내는 소스항이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_v \alpha_v) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_v \alpha_v u_j) = R_e - R_c \quad (7)$$

캐비테이션 해석을 위해 다양한 모델들이 제시되어 왔으며, 본 연구에서는 Schnerr-Sauer 모델(Schnerr and Sauer, 2001)을 적용하였다. Schnerr-Sauer 모델은 기존의 Rayleigh-Plesset 방정식을 단순화한 형태로 기포의 성장 가속도, 점성 효과, 그리고 표면 장력의 영향을 무시한다. 해당 모델에서 제시하는 소스항과 기포 직경(R_B)은 다음 식 (8)-(10)과 같다. 이때, p_v 는 증기압(Vapor pressure)을 나타내며, n_b 는 단위체적당 기포수, 그리고 ρ_v 와 ρ_l 은 각각 공기와 물의 밀도를 나타낸다.

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}, \quad (p \leq p_v) \quad (8)$$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}, \quad (p \geq p_v) \quad (9)$$

$$R_B = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

2.3 수치해석 기법

2차원 썬기 후류의 공동유동 특성에 대한 수치해석을 위해 상용프로그램인 STAR-CCM+ (ver.11.06)를 사용하였다(Siemens, 2016). 지배방정식의 확산항 및 대류항, 그리고 시간 적분은 2차 정확도로 이산화하였고, 속도와 압력은 SIMPLE(Semi-implicit method for pressure linked equations) 알고리즘을 사용하여 해석하였다. 난류모델은 Realizable k-epsilon 모델을 적용하였고, 썬기 및 캐비테이션 터널의 벽면에 대한 경계조건 처리를 위하여 벽함수를 사용하였다.

3. 수치해석 조건 및 결과

3.1 수치해석 조건

계산 영역 및 경계조건은 Fig. 1과 같으며, 이때 캐비테이션 터널의 폭은 100mm이고 썬기의 폭과 각도는 각각 20mm와 20°이다. 썬기의 위치를 기준으로 상류 경계면, 하류 경계면 그리고 캐비테이션 터널 벽면까지의 거리는 썬기 폭의 약 10배, 25배, 그리고 3배이다. 캐비테이션 터널 벽면에는 Slip-wall 조건을 적용하였다.

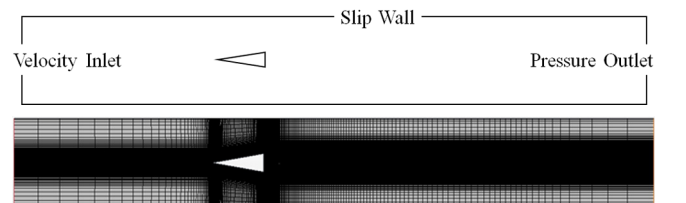


Fig. 1 Computation domain and grid system

Table 1 Fluid properties

	Water	Vapor
Temperature [°C]	24.5	
Density [kg/m ³]	997.13	0.0224
Dynamic viscosity [Pa·s]	9.003×10 ⁻⁴	9.8527×10 ⁻⁶
Saturation Pressure [Pa]	3170.34	

2차원 정렬 격자수는 6~8만개 사이에서 공동 및 비공동 상태에 대하여 격자 민감도 테스트를 수행하였으며, 충분한 캐비테이션의 모사를 위해 최종적으로 7만개의 격자로 계산을 수행하였다. 이때 $y+$ 는 벽함수를 사용하는 조건으로 30~100으로 하였고 비정상 해석을 위한 $\Delta t = 10^{-5}$ 이며, 썸뿔 주변 유동장의 최소격자 기준으로 CFL(Courant-friedrichs-lewy) 조건은 1이 넘지 않도록 하였다. 또한, 충남대학교 캐비테이션터널(CNU-CT) 실험과의 비교를 위하여 계산에 사용된 물과 수증기의 물성치는 다음 Table 1과 같다.

3.2 수치해석 결과

공동의 발생정도는 다음 식 (11)로 정의된 캐비테이션수(σ)를 사용하여 평가하였다. 여기서 p_∞ 와 V_∞ 는 유입유동의 압력과 속도를 나타낸다. 계산은 캐비테이션터널 시험조건과 동일하게 $Re = 1.6 \times 10^5$ 에서 압력을 낮춰가며 수행하였고, 레이놀즈수(Re)는 다음 식 (12)로 정의하며, 여기서 d 는 썸뿔의 폭, ν 는 동점성 계수를 나타낸다.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \tag{11}$$

$$Re = \frac{V_\infty d}{\nu} \tag{12}$$

Fig. 2는 캐비테이션수가 낮아짐에 따라 썸뿔의 후류에서 공동이 성장하는 모습을 보여준다. 충남대학교 캐비테이션터널 관측 결과와 수치해석을 통한 절대압력(Absolute pressure) 분포를 동일한 캐비테이션수 조건에서 비교하였을 때 발생하는 공동의 형상이 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

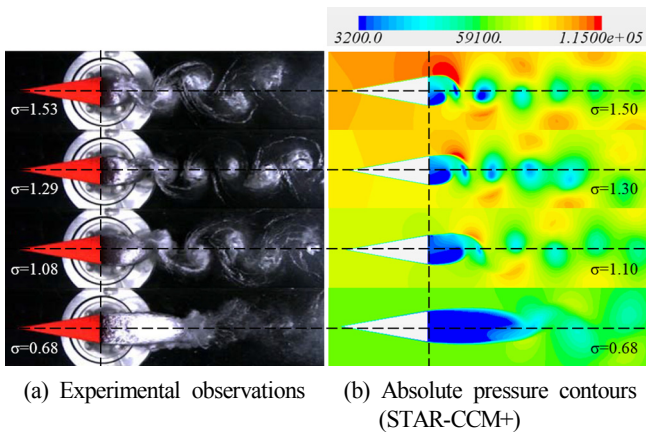


Fig. 2 Comparison of wake cavitating flow

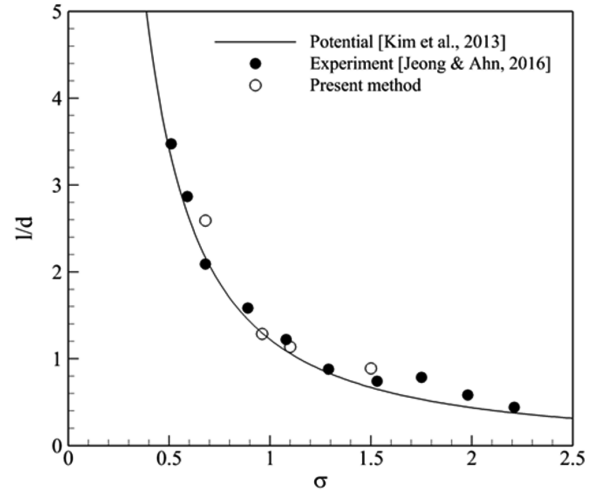


Fig. 3 Comparison of the cavity length according to the cavitation number

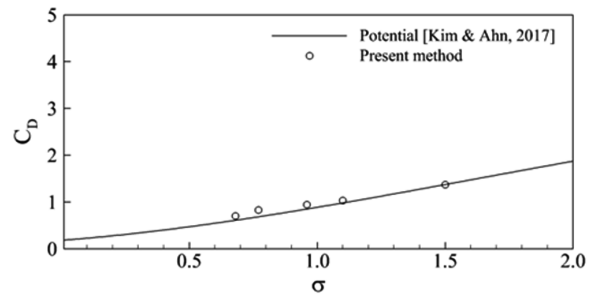


Fig. 4 Comparison of the drag coefficient according to the cavitation number

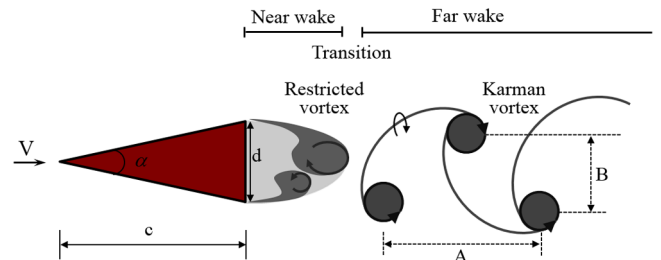


Fig. 5 Typical structure of the cavitating wake

발생한 공동의 형상 및 특성을 보다 면밀하게 검증하기 위하여 수치해석을 통해 계산한 공동의 길이와 썸뿔에 작용하는 항력 특성을 실험(Jeong and Ahn, 2016) 및 비점성 해석법(Kim et al., 2013)을 통해 얻은 결과와 비교하여 평가하였다. Fig. 3과 Fig. 4의 비교 결과를 통해 캐비테이션수에 따라 발생한 공동의 무차원 길이(l/d)와 썸뿔에 작용하는 항력 계수(C_D)가 해당 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 본 연구에서는 썸뿔 후류에서 발생하는 와류의 주기적인 거동 특성을 엄밀하게 평가하고자 하였다. 2차원 썸뿔의 후류에서 형성되는 유동장은 Fig. 5에 나타난바와 같이 가까운 후류(Near wake)와 먼 후류(Far wake) 영역으로 구분되며, 그 사이에 천이영역으로 구분할 수 있다. 썸뿔 끝단에서 박리되는 와류는 속도가 가속됨에 따라 일반적으로 천이구간을 거치면서 와류의 중심에서 캐비테이션이 발생하

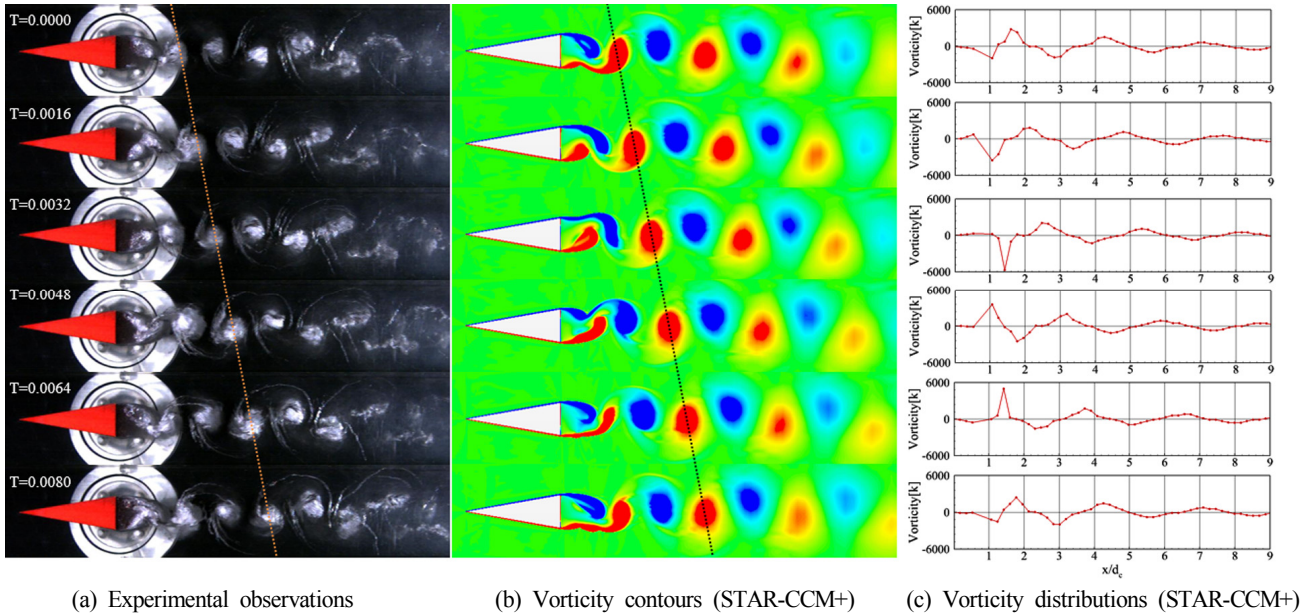


Fig. 6 Periodic motion of the Karman vortex street in the far wake region (cal. $\sigma = 1.30$, exp. $\sigma = 1.29$)

게 되며, 먼 후류 영역에서 잘 알려진 Karman 와류의 발생을 야기한다(Franc and Michel, 2004). 또한 캐비테이션수가 높을 때, 즉 공동의 길이가 짧은 조건에서는 썰기 폭의 1배 이전의 가까운 후류 영역에서 Karman 와류와 주기적 특성이 다른 구속 와류(Restricted vortex)가 존재한다.

먼저 먼 후류 영역에서 발생하는 Karman 와류의 주기적 특성을 살펴보기 위하여 캐비테이션수 $\sigma = 1.30$ 일 때, 시간에 따라 나타나는 2차원 썰기 후류 유동 특성을 살펴보았다. 수치해석을 통해 와도(Vorticity k , min $-600/s$, max $600/s$) 분포를 확인한 결과(Fig. 6(b)), Karman 보텍스의 박리되는 주기가 $0.008s$ 로 나타났으며 이는 동일한 조건의 실험결과(Fig. 6(a))와 비교하였을 때 해당 주기가 일치한다. 또한, 썰기의 중심선을 따라 추출한 와도의 세기 분포가 해당 주기와 일치하게 반복됨을 확인하였다(Fig. 6(c)).

보다 면밀한 비교를 위하여 기준이 되는 $T=0.000$ 초와 주기의 절반인 $T=0.004$ 초일 때의 수치해석 결과 중 와도(Vorticity k ,

min $-600/s$, max $600/s$) 분포를 실험 결과와 비교하였을 때, 각 시간별 Karman 와류의 박리 위치와 공동의 형상이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7).

공동의 성장은 먼 후류에서 발생하는 Karman 와류의 형상에도 영향을 미친다. 동일한 방향으로 회전하는 Karman 와류 사이의 수평 거리를 A , 수직거리를 B 라고 할 때(Fig. 5 참조), 캐비테이션수 변화에 따른 두 거리의 비(B/A)를 평가하였다(Fig. 8). 캐비테이션수가 감소함에 따라 와류 간의 수직거리는 감소하고 수평거리는 증가하여 거리비는 최대 75%까지 감소하는 것을 알 수 있으며, 실험 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

다음으로 가까운 후류 영역에서 발생하는 구속 와류의 주기적 특성을 살펴보기 위하여 앞서와 동일한 캐비테이션수 $\sigma = 1.30$ 일 때, 시간에 따라 나타나는 2차원 썰기 후류 유동 특성을 살펴보았다. Fig. 9는 왼쪽부터 와도(Vorticity k , min $-600/s$, max $600/s$), 압력(Absolute total pressure, min $3200Pa$, max $1.15 \times 10^5 Pa$), 수증기

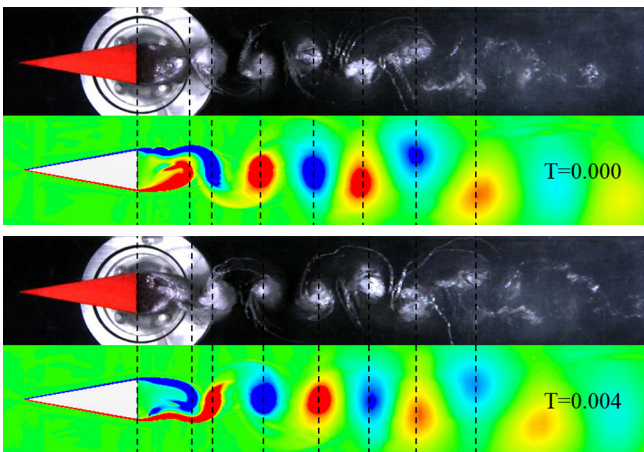


Fig. 7 Comparison of periodic motion of the Karman vortex (cal. $\sigma = 1.30$, exp. $\sigma = 1.29$)

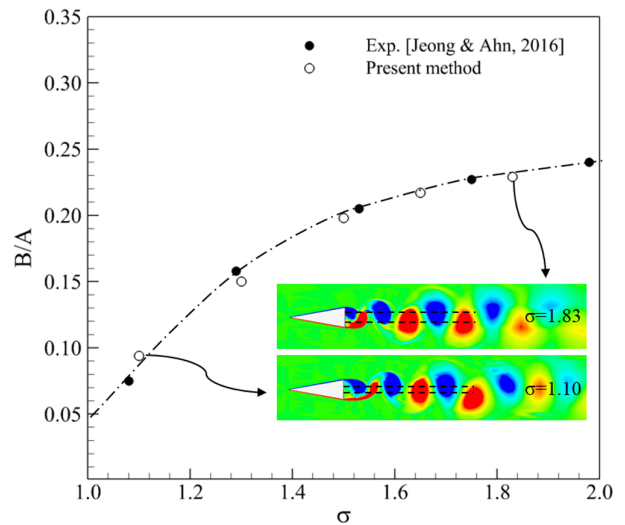


Fig. 8 Geometric characteristic of the vortex street

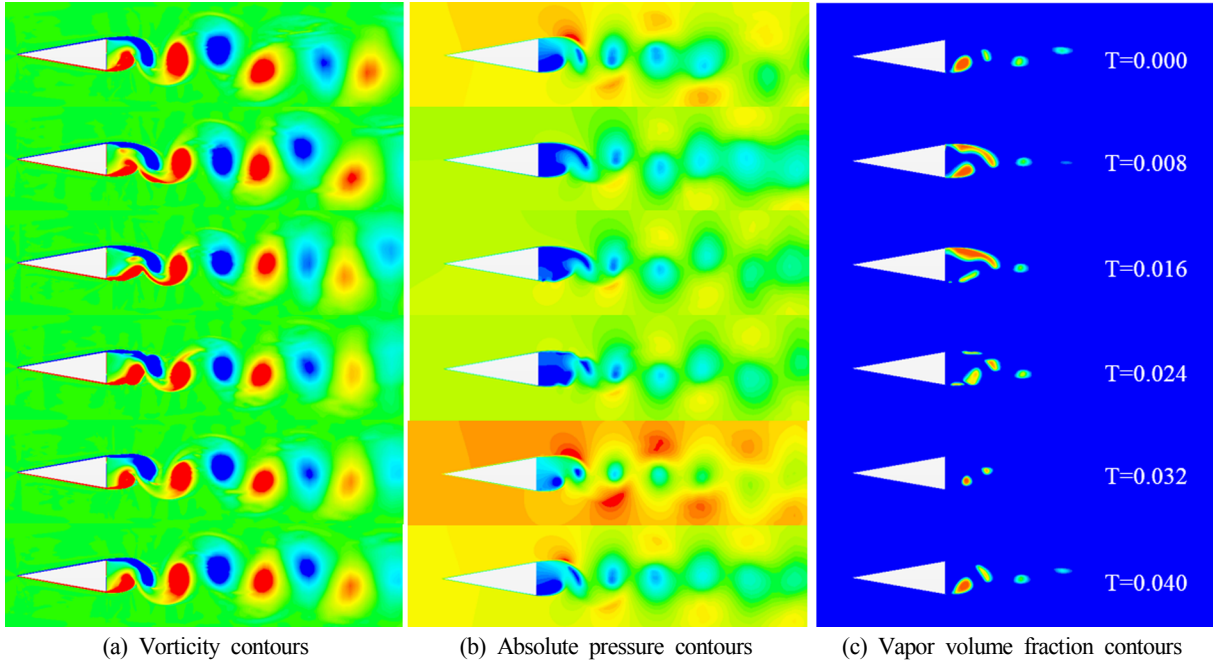


Fig. 9 Periodic motion of the restricted vortex in the near wake region ($\sigma = 1.30$)

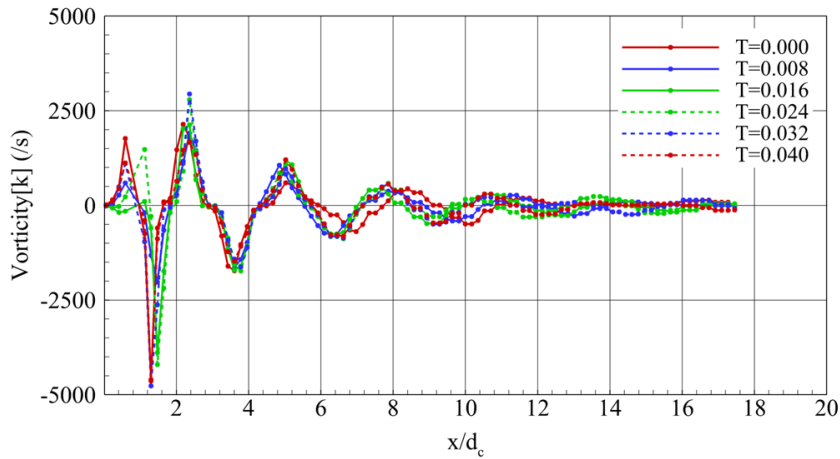


Fig. 10 Vorticity distributions along the center line of a wedge-shaped submerged body ($\sigma = 1.30$)

체적분율(Vapor volume fraction, min 0, max 1)을 보여주며, 압력과 수증기 체적분율 분포가 반복됨을 통해 구속 와류의 주기가 $T=0.04$ 임을 확인하였다. 해당 계산 조건의 경우 왼쪽 와도 분포에서 확인할 수 있듯이 구속 와류의 한 주기($T=0.04$) 안에 Karman 와류의 주기($T=0.008$)가 5번 반복됨을 확인할 수 있다. 다만 수치해석을 통한 수증기 체적분율 분포와 실험에서 발생한 공동의 형상을 비교하였을 때 수치해석 결과는 췌기 후류로 떨어져 나가는 보텍스 중심에서 발생하는 공동을 모사하지는 못하고 있는데, 터널 내부 압력 및 속도장은 유사하게 모사됨을 고려하였을 때 캐비테이션 모델에서의 질량 손실에 대한 보다 면밀한 고려가 더 필요할 것으로 보인다.

또한 췌기의 중심선을 따라 추출한 와도의 세기 분포를 살펴 보았을 때(Fig. 10), 한주기가 반복되는 $T=0.000$ 과 $T=0.040$ 의 결과가 췌기 폭의 1배되는 동일한 지점에서 와도의 최대치를 갖

는 것을 확인할 수 있으며, 계산된 각각의 결과가 Karman 와류가 반복되는 주기이므로 후류영역 전반에 걸친 와도 분포가 동일함을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 구속 와류와 박리 와류의 특성을 보다 면밀하게 평가하기 위해 서로 다른 캐비테이션수 조건에서 발생하는 변동압력을 분석하여 주기적인 특성을 비교하였다. Fig. 11(a)와 같이 췌기의 끝단이 위치한 관측창 상부에서 계측된 변동압력을 Fig. 11(b)와 같이 고속 푸리에 변환(FFT, fast Fourier transform)을 통해 주파수영역의 소음수준(Sound pressure level, SPL)으로 변환하여 나타내었다. 수치해석 결과 또한 실험과 같은 위치에서의 변동압력 값을 주파수영역의 소음수준으로 변화하여 비교하였다. 그 결과 상대적으로 낮은 주파수와 높은 주파수 특성이 명확하게 분리되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 캐비테이션수가 낮아질수록 먼 후류영역에서 발생하는 Karman 와류의 박

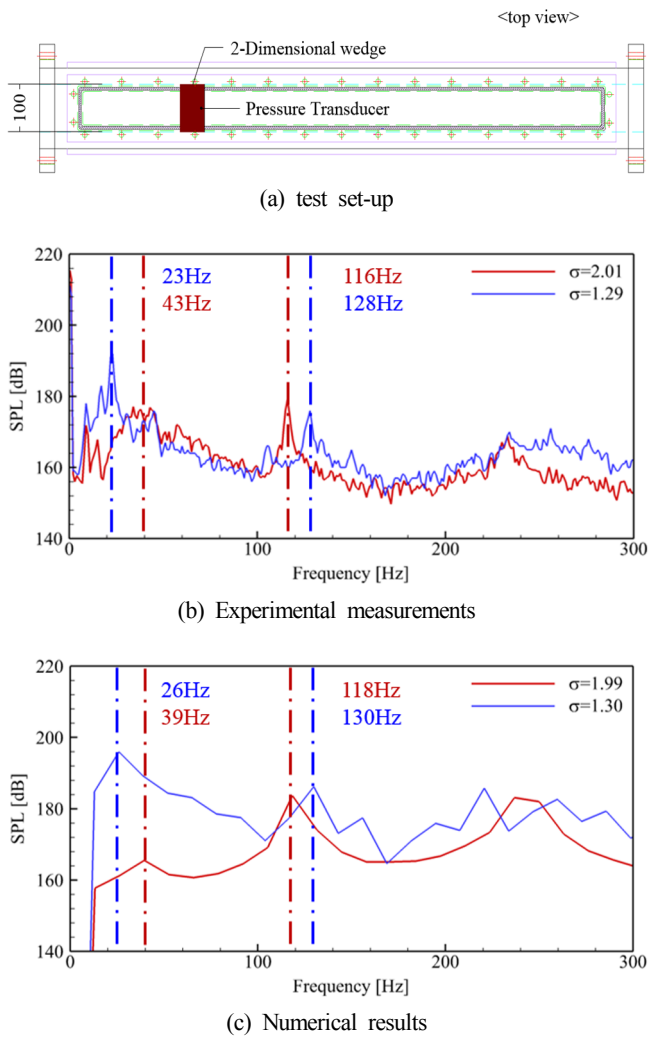


Fig. 11 Sound pressure level in the frequency domain

리 주기는 짧아지며, 즉 주파수는 커지며, 가까운 후류영역에서 발생하는 구속 와류는 공동의 길이가 증가함에 따라 주기가 커지기 때문이며, 수치해석 결과 또한 이러한 특성을 잘 보여주고 있다. 이러한 주파수 특성을 면밀히 비교하기 위해 다음 식 (13)으로 정의되는 Strouhal수(S_t)를 사용하여 비공동 상태의 후류와 공동 상태의 후류에서 발생하는 주파수 특성을 평가하였다.

$$S_t = \frac{fd}{V_\infty} \quad (13)$$

여기서 f 는 주파수, d 는 쐐기의 폭, V_∞ 는 유동속도이다. Fig. 12는 캐비테이션수에 따라 나타나는 Karman 와류의 주파수 특성을 Strouhal수로 나타낸 결과로, 비공동 상태일 때의 Strouhal수는 약 0.28로 일정하게 유지되다가 캐비테이션이 발생하면 그 값은 약 18% 정도 증가하였다가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 최대값은 캐비테이션수(σ) 1.29에서 나타났으며, 이때 구속 와류에서 생성된 공동의 길이가 쐐기의 폭(d)과 일치함을 확인하였다. 이후 캐비테이션수가 낮아짐에 따라 Karman 와류의 박리 주파수는 비공동 상태와 같아지는 것을 알 수 있다. 비공동 상태에서는 유속 변화에 상관없이 일정하게 유지되는 Karman 와류의

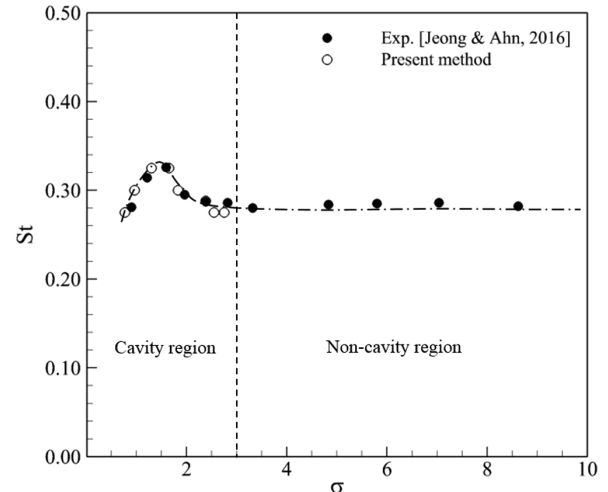


Fig. 12 Strouhal number versus cavitation number

Strouhal수는 공동이 발생하면서 구속 와류영역에서 발생하는 공동의 영향으로 증가하는 특성을 확인 하였다. 즉, 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 비공동 상태에서는 유속 변화에 상관없이 일정하게 나타나는 Karman 와류의 박리 주파수 특성은 공동에 의해 큰 영향을 받으며 무엇보다 구속 와류의 성장과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 2차원 쐐기형 물수체 후류에서 발생하는 비정상 공동 유동장을 해석하여 공동 발생에 따라 달라지는 박리 와류의 주기특성 변화를 평가하고자 하였다. 이를 위해 상용프로그램인 STAR-CCM+를 사용하여 비정상 공동유동 해석을 수행하였으며, 충남대학교 캐비테이션 터널 실험 결과와 비교, 검증하였다. 본 연구를 통해 2차원 물수체에서 발생하는 Karman 와류의 주기적 특성은 공동의 발생정도에 따라 큰 영향을 받으며, 특히 구속된 공동의 길이가 쐐기의 폭만큼 성장하였을 가장 크게 나타난다는 것을 규명하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 원천기술개발사업(NRF-2014M3C1A 9060786), 산업통상자원부의 산업융합원천기술개발사업(1004 5337)과 산업핵심기술개발사업(10062293)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Ahn, B.K., Lee, C.S., Kim, H.T., 2010. Experimental and Numerical Studies on Super-Cavitating Flow of Axisymmetric Cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(1), 39-44.
 Ahn, B.K., Lee, T.K., Kim, H.T., Lee, C.S., 2012. Experimental Investigatino of Supercavitating Flows. *International Journal*

- of Naval Architecture and Ocean Engineering, 4(2), 123-131.
- Belahadji, B., Franc, J.P., Michel, J.M., 1995. Cavitation in the Rotational Structures of a Turbulent Wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 287, 383-403.
- Franc, J.P., Michel, J.M., 2004. *Fundamentals of Cavitation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Jeong, S.W., Ahn, B.K., 2016. An Experimental Study on Wake Cavity Flow Characteristics of Two-dimensional Wedge Shaped Control Fin. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 53(3), 180-187.
- Kim, J.H., Jang, H.K., Ahn, B.K., Lee, C.S., 2013. A Numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-Dimensional Axisymmetric Cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), 160-166.
- Kim, J.H., Jeong, S.W., Ahn, B.K., Jeon, Y.H., 2016. A Study on Natural Supercavitation and Drag Characteristics of Axisymmetric Cavitators. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 53(6), 465-472.
- Ozgoren, M., Yagmur, S., Dogan, S., Aksoy, M.H., Canli, E., Goktepe, I., 2015. Flow Characteristics around a Vortex Flow Meter via CFD and PIV Methods. *Proceedings of 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Naples Italy.
- Ramamurthy, A.S., Balachandar, R., 1990. The Near Wake Characteristics of Cavitating Bluff Sources. *Transactions of the ASME*, 112, 492-495.
- Schnerr, G.H., Sauer, J., 2001. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics. *Proceedings of 4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans USA.
- Siemens, 2016. *STAR-CCM+ User Guide*. Version 11.06.

Study on Ice Parameters Affecting DP Performance of FPSO in Arctic Ocean

Sol-Mi Choi*, Seung-Jae Lee*, Solyoung Han** and Jaeyong Lee^{id}***

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

**Offshore Floater Research, Samsung Heavy Industries Co., LTD, Daejeon, Korea

***Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-eui University, Busan, Korea

극지용 FPSO의 DP 성능에 영향을 미치는 빙 파라미터 분석에 관한 연구

최솔미* · 이승재* · 한소령** · 이재용^{id}***

*한국해양대학교 조선해양시스템공학과

**삼성중공업 해양부유체연구파트

***동의대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Dynamic positioning system 동적 위치유지 시스템, DP capability plot DP 성능 도표, Ice load 빙하중, GPU-event-mechanics GEM, Arctic FPSO 극지용 부유식 생산 저장 하역 설비

ABSTRACT: Recently, various efforts have been made to develop oil and gas in the Arctic Ocean. It is very important to consider the load caused by ice in designing floating structures in the area. The magnitude of the ice load and its impact on a structure should be considered. In this paper, we analyze ice parameters affecting the DP performance of FPSO with a DP-assisted mooring system. Several ice characteristics are selected, and the resulting ice load is calculated using GEM software. Numerous simulations are conducted while changing the values of the parameters, and DP capability plots are generated to visualize the effects of changing these parameters. It is shown that the ice drift speed and thickness are the major properties to be considered in DP system design. The limitations of the analysis and future work are discussed in the conclusion.

1. 서 론

최근 낮은 원유 및 가스 가격에도 불구하고, 증가하는 원유의 수요에 따라 장기적인 관점에서 수심이 깊은 해역 및 극지방의 에너지 개발이 활발히 진행될 것으로 예상되고 있다. 동적 위치유지 시스템(Dynamic positioning system, DPS)은 이러한 환경에서 운용되는 생산 플랫폼의 위치유지를 능동적으로 수행할 수 있어 단독으로 혹은 계류 시스템과 함께 사용되고 있다. FPSO(Floating production storage and offloading)의 동적 위치유지 시스템은 설계단계에서 대상 해역을 기준으로 한 성능평가가 매우 중요하다. 동적 위치유지 시스템의 성능은 목적에 따라 다양한 방법으로 검토가 이루어지며 대표적인 검토 방법에는 DP(Dynamic positioning) 성능 분석(DP capability analysis), 시간 영역 해석, 드리프트-오프와 드라이브-오프 시뮬레이션(Drift-off and Drive-off simulation) 등이 주로 사용되고 있다. DP 성능 분

석은 주어진 환경조건에서 대상 선박에 설치된 추진기의 위치와 용량이 위치유지를 할 수 있는지에 대한 정적 해석을 수행하는 것이다. 일반적으로 IMCA(International Marine Contractors Association)의 규정서(Specfication)에 명시된 DP 성능 분석을 위한 환경 외력 계산과정 및 추력 손상 등의 분석 시나리오가 사용된다(IMCA, 2000). DP 성능 분석의 결과는 통상적으로 Wind envelope와 Thrust envelope 로 대표되는 DP 성능 도표(DP capability plot) 형태로 나타낸다. 이 DP 성능 도표들은 풍력, 파력 및 조류력을 포함하는 일반적인 환경 하중에 대한 DP 성능을 나타낸다. 극지방의 경우 DP 성능 평가를 위하여 환경 외력에 빙하중을 반드시 고려해야 한다. 하지만, 빙하중의 경우 다양한 빙 파라미터들로 인한 하중의 변동성이 존재하기 때문에 환경 외력에 포함하기 위한 정량화된 값을 산출하기 어려운 점이 있다. Kerkeni et al.(2013)은 쇄빙 된 빙(Managed ice)조건에서의 CFD(Computational fluid dynamics)기반 수치해석 시뮬레이

Received 22 December 2017, revised 5 February 2018, accepted 5 February 2018

Corresponding author Jaeyong Lee: +82-51-890-2596, jlee@deu.ac.kr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4469-7765

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

션을 수행하여 환경 외력의 비선형적인 요소들을 포함한 시간 영역 기반의 DP 성능 도표를 산출하였다. 산출 결과로부터 빙 밀집도와 표류 속도에 따른 위치유지 성능을 평가하였다. Su et al.(2013)은 다양한 빙 파라미터를 고려한 실험을 통해 빙하중의 시계열 변화를 통계적으로 처리하여 DP 성능 도표를 산출하였으며 빙 파라미터들 중 두께와 표류 속도의 변화에 대한 DP 성능 도표를 나타내었다. 빙 조건에서의 DP 성능 도표에 관한 기존 연구들은 산출법 제시에 우선순위를 두고 있으며 다양한 빙 파라미터들의 변화에 따른 DP 성능의 변동성은 명확하게 분석되지 않았다. 빙 파라미터의 종류는 매우 다양하며 해양 구조물의 목적에 따라서 우선시 되어야 할 파라미터의 종류도 달라진다. 따라서, 목적에 따라 빙 파라미터들의 영향도를 분석하여 어떤 파라미터들을 중점적으로 시뮬레이션에 포함해야 할지 판단할 필요가 있다. 본 연구에서는 ARC7이라는 구체적인 빙 등급(Ice class)을 대상으로 한 북극해에서, DP 성능에 영향을 주는 빙 파라미터들을 분석하였다. 분석에는 IMCA의 DP 성능 도표 산출법을 기반으로 빙 조건을 추가하여 산출된 두 가지의 성능 도표를 사용하였으며, 민감도 분석을 통해 파라미터별 해석상 중요도를 판단하였다.

2. DP 성능 도표

DP 시스템(DPS)의 정적 성능평가는 일반적으로 극좌표계 형태의 DP 성능 도표를 통해 분석할 수 있다. DP 성능 도표의 분석은 다양한 환경조건에서의 직접적인 DPS 성능 비교가 가능하며 시간영역 해석보다 시뮬레이션 과정이 간단하여 적은 계산시간이 소모되기 때문에 보통 설계 초기 단계에서 유용하게 활용되며 운용 중인 선박의 Dynamic positioning operator(DPO)들을 위한 자료로도 사용된다. 반면에, 환경 외력의 동적인 요소와 선박과 추진기 및 추진기간의 간섭효과 등을 정확하게 고려할 수 없다는 단점이 존재한다.

2.1 DP 성능 도표의 종류

앞서 기술한 바와 같이 DP 성능 도표에는 2가지 종류가 가장 널리 사용된다. Wind envelope는 주어진 조건에서 선박의 위치유지가 가능한 최대 풍속을 나타낸다. Thrust envelope는 제시된 환경조건에서 위치유지를 가능하게 하는 모든 추진기의 각 가용출력 대비 필요출력의 비가 가장 높은 추진기의 비를 표시하여 나타낸 도표이다. 가용출력은 추진기가 발생시킬 수 있는 최대 추력을 의미하며 추진기마다 고유의 값을 가진다. 필요출력은 해당 환경조건에서 위치유지를 위해 추진기에게 요구되는 추력이다. 필요 출력은 환경 하중의 상태에 따라 변화하며 각 추진기마다 다른 값을 가질 수 있다.

2.2 DP 성능 도표의 산출법

일반적으로 DP 성능 분석은 IMCA의 기준 규정서(Standard specification)에 명시된 사항을 수행하게 된다. 분석에 적용되는 환경 외력은 보통 풍력, 파력 그리고 조류력이다. 풍력과 조류력의 경우 환경 요소들의 방향에 따른 대상 선박의 투영면적과 환경계수에 따라서 계산될 수 있으며, 파력은 IMCA의 풍속과

도의 관계표에 나타난 파 관련 지표들을 사용하여 계산된다. DP 성능 도표의 종류에 따라서 산출하는 방법에 차이가 있으며, 일반적으로 세 가지 환경 하중이 모두 동일한 방향에서 작용하는 것으로 가정한다.

2.2.1 Wind envelope

Wind envelope를 그리는 순서는 Fig. 1과 같다. IMCA에 따라 정의된 모든 환경 외력들의 합력에 대응하기 위해 추력 분배 알고리즘이 추진기별 필요추력을 산출한다. 식 (1)에 따라 산출된 필요 추력이 추진기별 가용 추력 이상의 값을 가질 때까지 Table 4에 명시되어 있는 IMCA의 평균 풍속 간격에 따라서 풍속을 상승시키며 반복적으로 시뮬레이션한다. \vec{F}_{th} 는 추진기들이 생성시켜야 하는 필요추력이며 \vec{F}_w 는 풍력, \vec{F}_{wa} 는 파력, \vec{F}_{ca} 는 조류력이다. 추진기별로 할당된 필요추력이 가용추력 이상의 값을 가질 때, 환경외력 요소 중 풍속이 성능 도표에 표시된다. 이 때의 환경조건이 DPS가 위치유지를 가능하게 하는 최대 환경 외력임을 알 수 있다. 완전한 Wind envelope는 주어진 환경 외력의 방향 개수만큼 시뮬레이션하여 도출할 수 있다.

$$0 = \vec{F}_{th} + \vec{F}_w + \vec{F}_{wa} + \vec{F}_{ca} \quad (1)$$

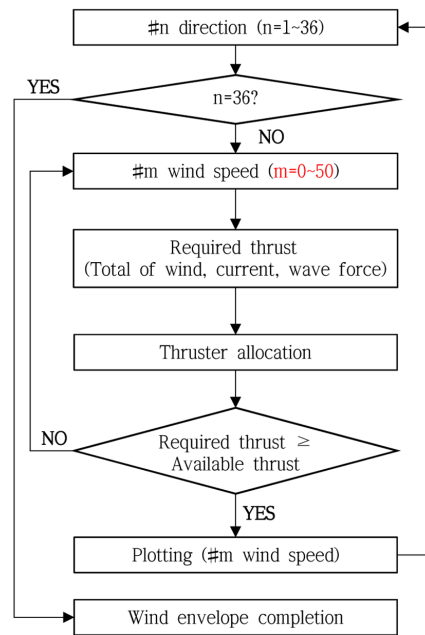


Fig. 1 Generation procedure for wind envelope

2.2.2 Thrust envelope

Thrust envelope는 보통 Fig. 2에 나타난 순서에 따라 작성된다. 주어진 환경조건과 환경요소들의 방향이 설정되면 환경외력이 계산된다. 계산된 환경 외력은 Wind envelope와 같이 추력 분배 알고리즘을 통해 추진기별로 필요추력이 분배된다. 이때, 모든 추진기의 가용추력에 대한 필요추력의 비중 가장 큰 추진기의 비율이 성능 도표에 작성된다. 본 과정이 환경외력의 방향 개수에 따라 반복되면 최종적으로 Thrust envelope가 결정될 수 있다.

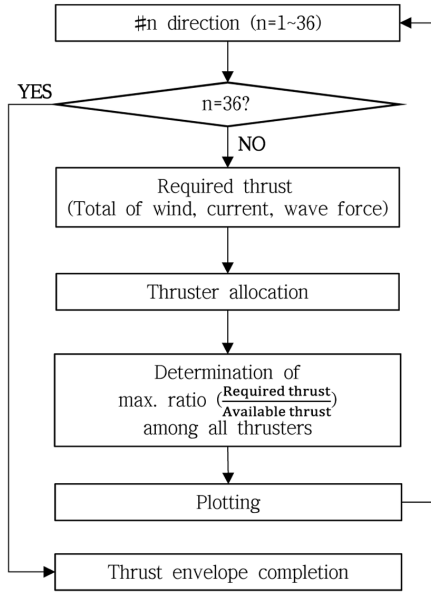


Fig. 2 Generation procedure for thrust envelope

3. 시뮬레이션 파라미터

3.1 대상선과 추진기 모델

DP 성능 지표 도출을 위한 시뮬레이션에 사용된 대상 선박은 원유 생산 설비인 FPSO선으로 최대적재 조건을 고려하였다. 주요 제원은 Table 1에 명시하였으며 대상 선박의 모델은 Fig. 3에 나타내었다. DPS를 위한 제어장치는 2개의 터널 추진기(Tunnel thruster)를 선수부에, 3개의 전방향 추진기(Azimuth thruster)를 선미부에 배치하였다. 각 추진기의 최대추력과 배치도는 Table

Table 1 Principle dimension of target vessel

Principal dimension	Value
Length between perpendiculars(LBP) [m]	244
Breadth [m]	50
Draft [m]	18.6
Displacement [m ³]	163215
GM [m]	4.43
Vertical center of gravity(VCG) [m]	18.5
Radius of gyration for x [m]	15.2
Radius of gyration for y [m]	59.3
Radius of gyration for z [m]	60.0

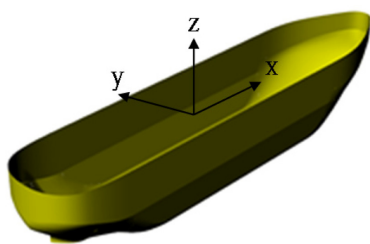


Fig. 3 Geometry of target model

Table 2 Principle dimension of actuators and arrangement

No.	Type of thruster	Thrust [kN]	Thruster arrangement
1	Tunnel thruster	330	
2	Tunnel thruster	330	
3	Azimuth thruster	875	
4	Azimuth thruster	875	
5	Azimuth thruster	875	

2에 나타내었다. 대상 선박의 위치유지 시스템을 위해 DPS뿐만 아니라 미드쉽과 선수 사이의 인터널 터렛 계류 시스템이 적용되어 있지만 본 연구에서는 DPS의 성능 평가가 목적이므로 계류 시스템은 시뮬레이션에 고려하지 않았다.

3.2 환경 하중

3.2.1 빙 하중

빙 하중을 계산하기 위한 시뮬레이션은 러시아 선급 RMRS (Russia Maritime Register of Shipping)의 극지용 선박을 대상으로 한 빙 등급인 ARC7 조건을 기반으로 수행되었다(RMRS, 2016). 구체적으로, ARC7에서도 연중 운영이 가능하며 쇄빙선이 없는 독자적인 운용환경을 대상으로 한 빙 등급 조건을 적용하였다. 대상 해역은 빙 등급의 조건과 대상 선박의 특징을 고려하여 ARC7 해역 중 하나인 척치해(Chukchi Sea)로 선정되었다.

3.2.1.1 GEM(GPU-Event-Mechanics) 시뮬레이터

DP 성능 분석에 적용된 빙하중은 GPU-event-mechanics(GEM) 기법 기반의 시뮬레이터를 이용하여 계산되었다. GEM은 미국 선급인 ABS와 캐나다Memorial 대학교의 극지용 선박 항해 경로 예측 프로젝트에서 개발된 소프트웨어를 기반으로 제시된 새로운 수치해석 기법이다(Daley et al., 2012). GEM은 그래픽 연산 전용의 프로세서인 GPU 하드웨어를 계산에 이용해서 빠른 계산 속도와 수많은 유빙의 동시 해석을 가능하게 한다. 시뮬레이터 내에는 Fig. 4(a)와 같이 다각형의 빙 조각들을 2D로 모델링 가능하다. 또한 유빙 크기, 밀집도 등을 무작위로 설정하여 분포시키거나 그리드(Grid) 라인에 따라 분포시켜 Fig. 4(b)와 같이 빙 집중도를 변경시키며 조건을 설정 가능하다. 유빙과 구조물의 충돌을 묘사하기 위해서는 다양한 입력 정보를 고려하는 일련의 방정식들이 필요하다. 다수의 수학적 방정식들을 이용하여 유빙과 구조물의 충돌 및 유빙 간의 충돌이 묘사되며, 빙 두께, 강도, 밀도 등의 유빙의 파라미터들뿐만 아니라 선박의 형상과 같은 데이터들을 입력하면 일련의 방정식들이 일정한 시간 간격에 따라 계산된다. 유빙의 움직임, 파단, 유빙간의 충돌 및 선박과 유빙의 충돌 등 모든 변화는 이벤트로 간주되며 결론적으로, 구조물과 유빙의 충돌 이벤트가 발생했을 때, 구조물이 받는 하중을 계산할 수 있다. 이러한 GEM은 복잡하고 긴 계산시간이 발생하는 조건들을 실시간보다 빠르게 계산할 수 있어 하이퍼-실시간 계산법(Hyper-real-time method)이라고 불린다.

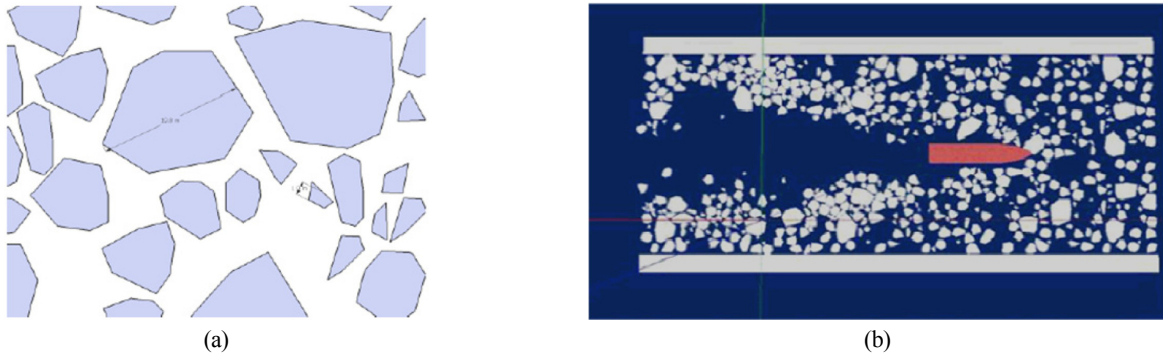


Fig. 4 2D Geometry of ice floe in GEM simulator (Daley et al., 2014)

3.2.1.2 빙 파라미터 선정

빙하중 산출을 위해 다양한 빙 파라미터들을 고려하였다. ITTC(International Towing Tank Conference)의 가이드라인은 빙 조건의 선박 모델 테스트에서 고려해야 할 빙 파라미터들의 목록과 우선순위를 소개하고 있다(ITTC, 1999). 빙 조건에서의 DPS 시뮬레이터와 관련된 연구인 DYPIC 프로젝트(Jenssen et al., 2012)는 유빙 조건에서의 예인 실험에 적용되는 주요 빙 파라미터들에 대해 언급하였다. 일반적으로 모델 테스트와 시뮬레이션에 적용되는 주요 빙 파라미터는 빙 밀집도, 사이즈, 두께, 밀도, 분포도, 표류속도, 표류 각도 등이다. 파라미터의 우선 순위는 모델 테스트 및 시뮬레이션 환경, 대상 모델의 목적에 따라서 달라질 수 있다. 본 연구에서 선정된 주요 빙 파라미터는 빙 밀집도, 두께, 밀도, 표류속도, 파쇄 강도이다. 파쇄 강도는 ITTC의 가이드라인에 명시되어 있지 않지만 DP선박의 유빙-선박 충돌 시뮬레이션에 고려되는 주요 인자 중 하나이기 때문에 본 논문의 빙 파라미터로 선정하였다(Nguyen et al., 2009).

시뮬레이션에 적용된 빙 파라미터들의 조건은 대상 해역 및 통상적인 유빙의 데이터를 기반으로 Table 3과 같이 선정되었다. ARC7의 1년빙 두께는 여름과 가을은 평균 1.7m, 봄과 겨울에 평균 1.4m이다(RMRS, 2016). 해당 범위를 포함하여 빙 두께 조건은 1.0m, 1.5m, 2.0m로 선정하였다. 빙 표류속도는 척치해의 조류속도와 관련지어 케이스를 선정하였다. 척치해의 10,000년 주기의 조류는 약 0.3~0.9m/s이다(Jung et al., 2017). 빙 표류속도는 조류속도와 동일한 속도로 가정하였다(Jenssen et al., 2012). 빙 파쇄 강도와 밀도의 경우 해역과 계절에 따라 상당한 변동이 존재하기 때문에, 전 세계 해역의 일반적인 유빙의 데이터를 이용하여 선정하였다. 빙 파쇄 강도는 1.8, 2.0, 2.2MPa로 선정하였으며, 빙 밀도는 해수의 밀도인 1025kg/m³를 초과하지 않으며 얼음의 밀도인 920kg/m³를 고려하여 적절하게 분배하였다. 선정된 빙 밀도 조건은 850kg/m³, 900kg/m³, 950kg/m³이다.

Table 3 Principal ice parameters for simulation

Ice parameter	Value
Ice concentration [%]	80 (Fixed)
Ice thickness [m]	1.0, 1.5, 2.0
Ice drift speed [m/s]	0.5, 0.8, 0.9, 1.0
Ice crushing strength [MPa]	1.8, 2.0, 2.2
Ice density [kg/m ³]	850, 900, 950

빙하중은 GEM 시뮬레이터를 이용하여 산출된 Surge, Sway, Yaw 3자유도의 평균 하중 값을 사용하였다.

3.2.1.3 GEM을 이용한 빙하중 산출 시뮬레이션

DP 성능 분석에 필요한 빙 하중은 유빙(Pack ice) 조건의 선박 시뮬레이션으로부터 산출된다. 유빙의 크기는 최소 10m, 최대 50m 내에서 무작위로 생성되도록 설정하였으며, 유빙의 모양은 4각형에서 7각형 사이의 다각형이 무작위로 분포되도록 설정하였다. 시뮬레이션 시, 유빙 구역이 모델링된 환경에서 선박에 대한 상대적인 빙 표류각을 구현하기 위해 선박의 Yaw각도를 변경하며 Fig. 5와 같이 시뮬레이션 하였다. Yaw 각도가 변경된 선박은 유빙 구역으로 표류하며 이때의 빙하중은 시간에 따라 기록되어 Fig. 6과 같은 시계열 형태로 산출된다(Han et al., 2017). 본 연구에 사용된 최종 빙하중 값은 산출된 시계열의 통계적인 후처리를 거친 평균 빙하중값이 사용되었다. 빙하중은 대상 선박과 유빙이 접촉한 후 지속해서 상승한다. 유빙 구역이 대상 선박에 의해 완전히 영향을 받게 되면 빙하중은 급

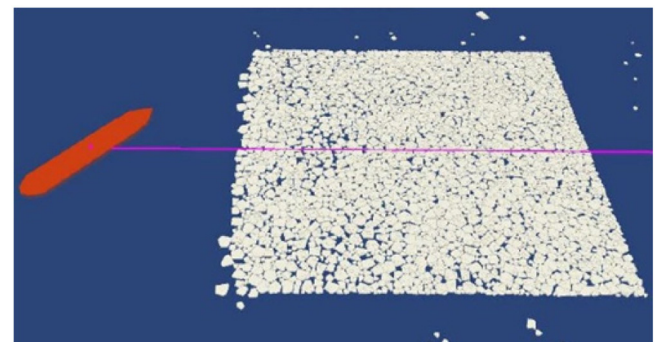


Fig. 5 Sample of GEM simulation

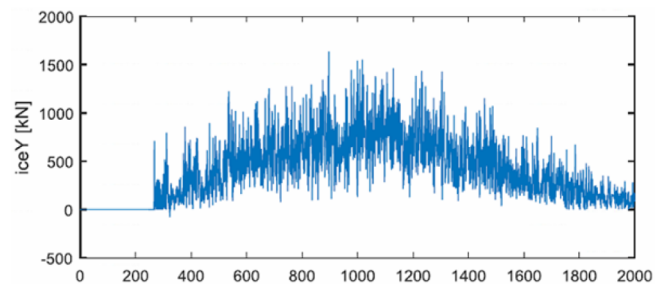


Fig. 6 GEM output example of ice load in seconds (Han et al., 2017)

격한 변동성을 보이며 일정한 평균값을 가진다. 대상 선박이 유빙 구역을 벗어나기 시작하면 빙하중은 다시 감소하는 경향을 보인다. 따라서, 빙하중의 시계열에서 하중의 상승과 하강 구간을 제외하고 일정한 값 이내에서 변동하는 정상상태 구간을 선정하여 최종적으로 평균 빙하중을 산출하였다.

3.2.2 기타 환경 하중

풍력은 대상 선박의 실험 및 시뮬레이션 결과로부터 구해진 Surge, Sway, Yaw 3자유도의 풍력 계수와 대상 선박의 수면 위 길이 방향, 폭 방향 투영면적으로부터 계산할 수 있다. 본 연구에서, 풍력 계수는 대상 선박의 CFD 결과로부터 계산된 값을 이용하였고 10도 간격으로 360도를 고려한 총 36개의 풍력 계수가 사용되었다. 고려된 최대 풍속은 50m/s이며 정상풍(Steady wind) 조건이 적용되었다.

일반적으로 DPS는 고주파수대의 외력에 대한 보상을 고려하지 않는다. 따라서, 고주파수 대역인 1차 파랑 강제력은 고려되지 않기 때문에 2차 파랑강제력의 평균 표류력이 DP 성능 지표 산출을 위한 시뮬레이션에 사용된다. IMCA에 따르면, 파도의 조건은 Table 4에 명시되어 있는 복해를 대상으로 한 풍속과의 관계에 의해 결정된다. 우선 풍속 조건이 결정되면 풍속-파도 관계에 따라 해당 파도의 데이터를 이용해 특정 스펙트럼을 생성시킬 수 있다. 생성된 파 스펙트럼과 평균 표류력의 전달함수를 이용해 DP 성능 분석을 위한 파력이 계산된다. 본 연구에는 JONSWAP(Joint North Sea wave project) 스펙트럼을 적용한 파력이 계산되었다.

Table 4 Wind-wave relation in IMCA

Sig. Wave height H_s [m]	Crossing period T_z [s]	Peak period T_p [s]	Mean wind speed V_w [m/s]
0	0	0	0
1.28	4.14	5.3	2.5
1.78	4.89	6.26	5
2.44	5.72	7.32	7.5
3.21	6.57	8.41	10
4.09	7.41	9.49	12.5
5.07	8.25	10.56	15
6.12	9.07	11.61	17.5
7.26	9.87	12.64	20
8.47	10.67	13.65	22.5
9.75	11.44	14.65	25
11.09	12.21	15.62	27.5
12.5	12.96	16.58	30
13.97	13.7	17.53	32.5
15.49	14.42	18.46	35

4. 시뮬레이션 과정

4.1 시뮬레이션 적용 대상 빙조건

시뮬레이션을 통해 여러 가지 조건에서 Thrust envelope와 Wind envelope를 작성하여 DP 성능에 영향을 미치는 빙 파라미

터들에 대한 분석을 수행하였다. 빙 조건에서의 DP 성능 지표는 IMCA에 따른 기존의 분석법인 Fig. 1, Fig. 2와 같은 방식으로 작성되지만, 전체 환경 외력 산정 과정에서 식 (2)에 따라 \vec{F}_{ice} 로 명시된 빙하중을 추가하였다.

$$0 = \vec{F}_{th} + \vec{F}_{wi} + \vec{F}_{wa} + \vec{F}_{cu} + \vec{F}_{ice} \quad (2)$$

빙하중은 빙 파라미터의 변화에 따른 GEM 시뮬레이션 결과 값을 사용하였다. 빙 하중을 산출하기 위한 빙 조건은 Table 5와 같다. Case 3번을 기준 데이터로 하여 각 파라미터를 변경하면서 총 10가지 조건의 빙 하중을 산출하였다. 유빙의 표류 각도를 묘사하기 위해 설정하였던 선박의 각도를 0~50까지 10도 간격으로 총 6개의 각도에 대해 변경하며 시뮬레이션하였다. 결과분석은 Table 6의 결과 비교 시나리오에 따라서 진행되었다.

Table 5 Ice load cases for simulation

Case No.	Ice thickness [m]	Density [kg/m ³]	Drift speed [m/s]	Crushing strength [Mpa]	Heading [deg]
1	1.0	850	0.5	2.0	0~50
2	1.0	900	0.5	1.8	0~50
3	1.0	900	0.5	2.0	0~50
4	1.0	900	0.5	2.2	0~50
5	1.0	900	0.8	2.0	0~50
6	1.0	900	0.9	2.0	0~50
7	1.0	900	1.0	2.0	0~50
8	1.0	950	0.5	2.0	0~50
9	1.5	900	0.5	2.0	0~50
10	2.0	900	0.5	2.0	0~50

Table 6 Result comparison scenario

	Ice thickness	Density	Drift speed	Crushing strength
Case no.	3,9,10	3,5,6,7	2,3,4	1,3,8

4.2 시뮬레이션 결과 분석

본 논문은 유빙 조건이라는 특수한 환경 조건에서의 DP 성능 평가가 목적이다. 따라서, 선수의 유지 가능 영역에 대한 판별이 우선순위가므로 Thrust envelope을 이용한 평가를 수행하였다. 극좌표계에서 결과는 선박의 각도(Heading)에 따라 유효한 값인 50도까지만 도표에 점선으로 경계선을 설정하여 나타내었다. 이는 해당 선박의 경우 빙하중이 없는 조건에서도 ± 50 도 이상의 각도에서 하중이 가해질 경우 분배 알고리즘에 의해 각 추진기에 할당된 추력이 가용추력을 넘어선 상태인 추진기 포화가 발생하기 때문이다. Thrust envelope에서는 결과값이 극 좌표계의 원점에 가까울수록 DP 성능이 좋을 것을 의미한다. DP 성능에 미치는 빙 파라미터의 영향도 분석은 빙 파라미터 간의 평균 민감도 비교를 통해 수행되었다. 민감도는 식 (3)에 따라 계산될 수 있다. 각 빙 파라미터마다 파라미터 변화량에 대한 최대추력 변

Table 7 Simulation result

	ΔP (Variation)	$\Delta Thrust\ envelope$	Sensitivity	Mean sensitivity (E(sensitivity))
Thickness	0.5 (1 → 1.5 m)	2.58	5.15	5.94
	0.5 (1.5 → 2.0 m)	3.36	6.72	
Drift speed	0.3 (0.5 → 0.8 m/s)	0.27	0.90	40.44
	0.1 (0.8 → 0.9 m/s)	6.29	62.9	
	0.1 (0.9 → 1.0 m/s)	5.75	57.5	
Crushing strength	0.2 (1.8 → 2.0 MPa)	0.54	2.68	2.67
	0.2 (2.0 → 2.2 MPa)	0.53	2.65	
Ice density	50 (850 → 900 kg/m ³)	0.40	0.01	0.01
	50 (900 → 950 kg/m ³)	0.11	0.01	

화량 비를 의미하며 최종적으로 민감도의 평균값을 계산하여 Table 7에 나타내었다. $\Delta Thrust\ envelope$ 은 Thrust envelope의 값의 변화량을 의미하며 최대 추력 변화량이라 칭한다. 민감도가 낮을수록 파라미터의 변화량에 따른 최대추력의 변화가 크지 않으므로 해당 파라미터가 추력에 미치는 영향이 적다는 것을 의미한다.

$$Mean\ Sensitivity = E\left(\frac{\Delta Thrust\ envelope}{\Delta P}\right) \quad (3)$$

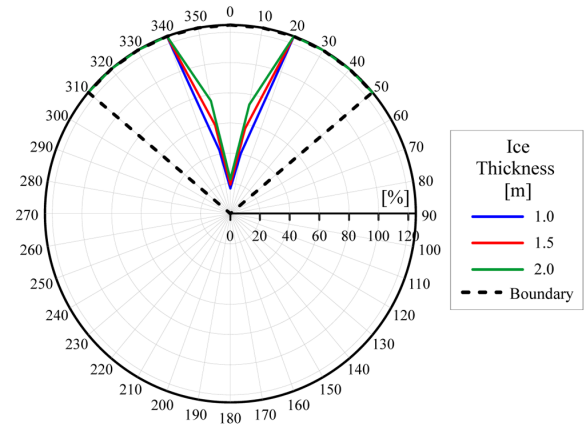
$\Delta Thrust$ = Variation of thrust envelope value

ΔP = Variation of parameter value

Fig. 7-10은 각 빙 파라미터들의 변화에 따른 Thrust envelope을 나타낸다. 각 결과 그래프의 아래에는 환경조건을 정의하였으며, V_c 는 조류의 속도, V_w 는 풍속, H_s 는 유의파고, T_z 는 영점상교차추기를 말한다. Table 7의 최대 추력 변화량과 결과 그래프들로부터, 모든 빙 파라미터들의 파라미터 변화량(ΔP)이 발생할수록 최대 추력변화량($\Delta Thrust\ envelope$)이 모두 양의 값을 가지므로 DP 성능이 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 파라미터들에 따라 그 민감도의 차이가 존재하며, 민감도 분석 결과로부터 특히 Fig. 9-10의 파쇄 강도, 밀도의 경우 표류속도보다 민감도가 미소한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서, 해당 파라미터들의 변화로 인한 DP 성능의 변화는 둔감한 경향을 보이며 DP 성능에 미치는 영향이 작은 것으로 판단된다. 특히, 밀도의 경우 민감도의 값이 매우 미소하므로 빙조건이 추가된 DP 시뮬레이션 시 통상적으로 사용되는 얼음 밀도인 920kg/m³로 고정하여 시뮬레이션하여도 DP 성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

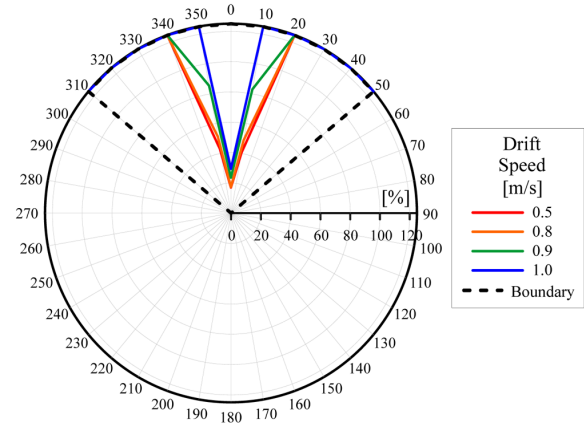
Table 7의 민감도 수치에 따르면 빙 두께의 경우 표류속도에 비해 8배 작은 값을 가지며 파라미터 변화량에 따른 추진기 포화(Saturation) 각도의 변동이 없어 DP 성능이 민감하게 반응하지는 않지만 Fig. 7에 나타난 두께 변화에 의한 Thrust envelope의 뚜렷한 변화가 관찰된다. 따라서, 빙 두께는 시뮬레이션의 중요한 파라미터 중 하나가 될 수 있으며 적용된 대상 해역의 유빙 두께 데이터를 기반으로 하여 시뮬레이션 해야 한다.

Table 7에 의하면 빙 표류 속도의 결과에서, 표류 속도의 파라미터 변화량이 0.3일 때, 민감도는 0.90이며 파라미터 변화량



$V_c : 1\text{ m/s}, V_w : 10\text{ m/s}, H_s : 3.21\text{ m}, T_z : 6.57\text{ s}$

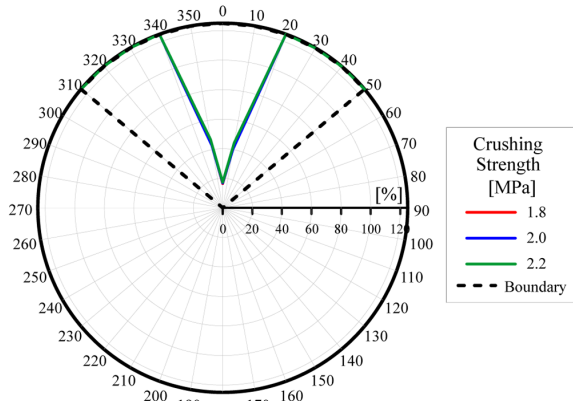
Fig. 7 Thrust envelope with respect to ice thickness



$V_c : 1\text{ m/s}, V_w : 10\text{ m/s}, H_s : 3.21\text{ m}, T_z : 6.57\text{ s}$

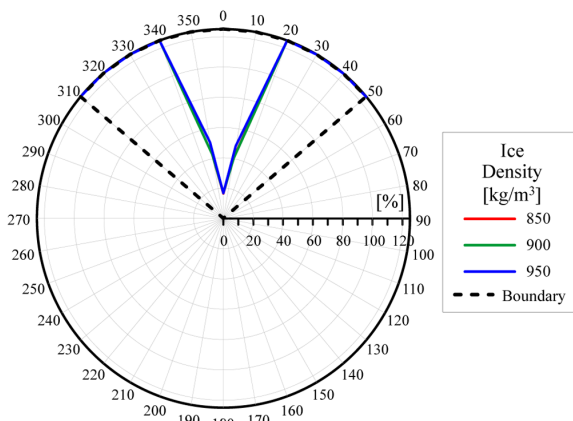
Fig. 8 Thrust envelope with respect to ice drift speed

이 0.1일 때, 민감도는 각 62.9, 57.5로 변화량 차이에 따른 민감도 차이가 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이로부터, 결과 값 산출에 사용한 통계적 처리의 합리성을 평가할 필요가 있다. 빙하중은 시간에 따른 변동성이 극심한 환경 조건 중 하나이기 때문에, 조건에 따라 임펄스 반응을 할 수도 있으며, 비연속적인 형태를 띠기도 한다. 따라서, 평균값을 취하는 과정에서 비합리적인 값이 산출될 수 있기 때문에, 본 연구의 결과 분석에 사용



$V_c : 1 \text{ m/s}, V_w : 10 \text{ m/s}, H_s : 3.21 \text{ m}, T_z : 6.57 \text{ s}$

Fig. 9 Thrust envelope with respect to crushing strength



$V_c : 1 \text{ m/s}, V_w : 10 \text{ m/s}, H_s : 3.21 \text{ m}, T_z : 6.57 \text{ s}$

Fig. 10 Thrust envelope with respect to ice density

된 표류 속도는 비선형성을 띠는 구간을 제외한 0.8m/s, 0.9m/s, 1.0m/s의 값을 사용하였다.

선정된 표류 속도를 적용한 분석 결과로부터, 빙 표류속도는 시뮬레이션에 사용된 빙 파라미터 중 가장 높은 민감도를 나타낸다. 또한, Fig. 8으로부터 추진기 포화 각도의 변동도 나타난다. 이는 표류 속도에 대한 추력의 변화가 굉장히 민감하며 표류속도가 DP 성능 감소에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터임을 의미한다. 이는 빙 표류속도가 조류 속도와 일치하는 것으로 가정한 것과 상관이 있으며, 대상 해역의 조류 속도에 대한 분석이 상세히 이루어져야 함을 의미한다. 따라서, 표류속도를 고려한 시뮬레이션 시, 본 시뮬레이션에서 사용된 파라미터 변화량보다 더 미세한 변화량을 설정하여 다양한 표류속도를 고려해야 한다.

분석 결과로부터 유빙 조건이 추가된 DP 시뮬레이션 시에는 빙 두께, 표류속도를 중점적으로 고려해야 하며 특히 표류속도는 더욱 미세한 파라미터 변화량을 설정하여 시뮬레이션할 필요가 있다. 파쇄 강도, 밀도는 큰 영향을 미치지 않으며, 특히 밀도는 DP 성능 변화에 매우 둔감한 경향을 보이므로 시뮬레이션 시 고려 대상에서 제외하거나 고정된 한 값을 적용한다면 고려해야 하는 유빙의 조건들이 간소화될 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 본 시뮬레이션은 앞서 언급한 통계적 처리의 한계점을 동반하고 있다. 표류 속도뿐만 아니라 대부분의 빙 파라미터에서 파라미터 변화량에 따른 추력의 변화량이 비선형성을 띠고 있다. 이를 최소화하기 위해서 산출되는 빙하중의 평균 하중 값이 아닌 유의 빙하중값 혹은 제곱평균제곱근(RMS)와 같은 다른 통계적인 처리를 하거나, 비선형성과 동적인 요소가 포함된 시계열 데이터를 이용한 DP 성능 분석법이 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 빙 파라미터들의 변동에 따른 DP 성능의 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 통상적인 DP 성능도표를 그리기 위한 절차인 IMCA의 규정서 및 성능 도표의 종류를 소개하였으며 기존의 방법에 유빙 조건이 추가된 성능도표를 그리기 위한 과정에 대해 설명하였다. 빙 하중은 전문 빙하중 추정 소프트웨어인 GEM을 이용해 계산되었다. 빙 조건에 따라 설정된 파라미터들을 변경하며 산출된 시계열 데이터를 통계적인 후처리로 가공하여 얻은 평균 하중을 사용하였다. 산출된 평균 하중이 적용된 환경 조건으로부터 Wind envelope과 Thrust envelope을 작성하였으며 이를 기반으로 빙 파라미터들의 변화에 대한 DP 성능의 변화를 분석하였다.

시뮬레이션 결과 분석으로부터 아래의 5가지 결론을 도출하였다.

- (1) 모든 빙 파라미터들의 값이 증가하였을 때, DP 성능은 감소하였다.
- (2) 빙 표류속도는 DP 성능에 매우 민감하며 가장 큰 영향을 끼친다.
- (3) 빙 두께는 시뮬레이션 시 반드시 고려해야할 파라미터 중 하나이다.
- (4) 빙 파쇄 강도와 밀도는 DP 성능에 큰 영향을 미치지 않는다.
- (5) 빙하중 시계열로부터 빙하중 계산 시, 변동성(Variation)을 고려할 수 있는 통계적 특성치가 필요하다.

5가지의 결과를 수립하였다. 결과로부터, 유빙 조건이 고려된 DP 시뮬레이션에는 빙 두께, 표류속도를 우선순위로 고려해야 하며 빙 파쇄 강도, 밀도는 DP 시뮬레이션 시 고정값을 사용하거나 DP 성능 분석을 위한 주요 파라미터에서 제외할 수 있을 것으로 판단된다.

시뮬레이션 과정에서 빙하중은 시계열의 평균치를 사용하여 산출되었다. 이로 인해 평균값의 변동성이 발생할 수 있기 때문에, 추후, 유의 빙하중, 제곱평균제곱근과 같은 다른 통계적 기법을 이용하여 계산된 빙하중을 기반으로 빙 파라미터의 변화에 대한 DP 성능 분석을 수행하여 기존의 방법과 비교할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업(과제번호: 10063 405) ‘위치유지와 계류 시스템을 적용하여 ARC7 조건에서 연중 운용이 가능한 북극해 기반 부유식 해양구조물 형상 개발’ 과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

References

- Daley, C., Alawneh, S., Peters, D., Quinton, B., Colbourne, B., 2012. GPU Modeling of Ship Operations in Pack Ice. International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice, Banff Alberta Canada, 20-23.
- Daley, C., Alawneh, S., Peters, D., Colbourne, B., 2014. GPU-Event-Mechanics Evaluation of Ice Impact Load Statistics. OTC Arctic Technology Conference, Offshore Technology Conference.
- Han, S.L., Kim, H.J., Lee, D.Y., Kim, B.K., 2017. Capability Analysis of Dynamic Positioning for the Arctic FPSO in ICE. Proceeding of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Busan Korea.
- International Marine Contractors Association(IMCA), 2000. Specification for DP Capability Plots. IMCA M 140.
- International Towing Tank Conference(ITTC), 1999. Testing and Extrapolation Methods Ice Testing General Guidelines. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-04-01.
- Jenssen, N.A., Hals, T., Jochmann, P., Haase, A., Dal Santo, X., Kerkeni, S., Doucy, O., Gürtner, A., Hetschel, S.S., Moslet, P.O., Metrikin, I., Løset, S., 2012. DYPIC-A Multi-National R&D Project on DP Technology in Ice. Dynamic Positioning Conference, Marine Technology Society, Houston Texas.
- Jung, K.H., Lee, M.K., Shin, S.Y., 2017. Design Considerations and Analysis of Arctic FPSO's Turret Moorings System. The Autumn Conference of The Korea Society of Ocean Engineers, Gejeje Korea.
- Kerkeni, S., Metrikin, I., Jochmann, P., 2013. Capability Plots of Dynamic Positioning in Ice. ASME Paper, OMAE2013-10912.
- Nguyen, D.T., Sørbø, A.H., Sørensen, A.J., 2009. Modelling and Control for Dynamic Positioned Vessels in Level Ice. IFAC Proceedings, 42(18), 229-236.
- RMRS., 2016. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part I - Classification. Russia Maritime Register of Shipping, Russia.
- Su, B., Kjerstad, Ø.K., Skjetne, R., Berg, T.E., 2013. Ice-going Capability Assessment and DP-Ice Capability Plot for a Double Acting Intervention Vessel in Level Ice. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions.

Experimental Study on Floating LNG Bunkering Terminal for Assessment of Loading and Offloading Performance

Dong-Woo Jung^{1b*}, Yun-Ho Kim^{*}, Seok-Kyu Cho^{*}, Dong-Ho Jung^{*}, Hong-Gun Sung^{*} and Sun-Hong Kwon^{**}

^{*}Offshore Plant Research Institute, KRISO, Daejeon, Korea

^{**}Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

FLBT의 적하역 안정성 평가를 위한 실험적 연구

정동우^{1b*} · 김윤호^{*} · 조석규^{*} · 정동호^{*} · 성홍근^{*} · 권순홍^{**}

^{*}한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구부

^{**}부산대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: FLBT 부유식 LNG 병커링 터미널, Loading arm and manifold 로딩암과 매니폴드, Loading and offloading operability 적하역 운용성, Relative motion 상대운동, Side by side moored vessel 병렬계류선박, Ocean engineering basin 해양공학수조

ABSTRACT: In this study, the operability of an FLBT (floating LNG bunkering terminal) was evaluated experimentally. Model tests were conducted in the KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) ocean engineering basin. An FLBT, an LNG carrier, and two LNG bunkering shuttles were moored side by side with mooring ropes and fenders. Two white-noise wave cases, one irregular wave case, and various regular wave cases were generated. The relative local motions between each LNG loading arm and its corresponding manifold in the initial design configuration were calculated from measured 6-DOF motions at the center of gravity of each of the four vessels. Furthermore, the locations of the LNG loading arms and manifolds were varied to minimize the relative local motions.

1. 서 론

21세기 초부터 본격적으로 기후변화와 기상이변이 전 세계적으로 나타남에 따라 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서 선박의 배출가스 규제에 나섰다. 이는 MARPOL (Marine pollution) 73/78로 알려진 선박으로부터 오염 방지를 위한 국제협약(International convention for the prevention of marine pollution from ships)에서 지정된 것으로 2020년까지 선박의 배출가스에 포함된 황산화물을 0.5% 이하로, 특히 ECA(Emission control areas)에서는 0.1% 이하로 규제하고 있다. 이러한 환경 규제에 따라 청정연료인 LNG(Liquefied natural gas)로 추진하는 선박에 대한 요구가 높아지고 있으며, 이에 따라 2010년 이후부터 LNG 추진선박 뿐만 아니라 LNG 병커링 셔틀(LNG-BS, LNG bunkering shuttle)의 요구 또한 늘어나고 있다. 여기서 LNG 병커링이란 LNG 추진선박에 LNG를 주입하는 일련의 과정을 뜻한다.

병커링 방법으로 크게 육상에서 수행되는 것과 해상에서 수행되는 것으로 나눌 수 있다. 육상에서 병커링을 수행할 경우 파랑에 대한 영향을 받지 않아 안정적인 작업이 가능하지만, 대규모 인프라 구축이 필요하고 사고 시 인명피해가 크다는 특징이 있는 반면 해상에서 수행할 경우 파랑에 의한 로딩암에서의 상대운동에 제약이 따르지만 육상대비 폭발에 대한 인명피해 우려가 적다는 특징이 있다. 본 연구에서는 해상 병커링 방법에 대해 부유식 병커링 터미널(FLBT, Floating LNG bunkering terminal)을 대상으로 하여 FLBT에 LNG 운반선(이하 LNGC)과 LNG-BS가 병렬계류시스템을 이용해 접안하여 LNGC로부터 공급받은 LNG를 LNG-BS에 하역하는 절차로 운용된다.

병렬계류된 선박들의 운동 특성에 대해서는 많은 선행연구가 수행되었는데, LNG FPSO와 두 LNGC가 병렬 배치되었을 때 부유체 주위의 유동장 변화에 따른 운동응답 및 표류력 변화를 실험과 수치적으로 평가하였고(Hong et al., 2005), 고차 경계요

Received 27 January 2018, revised 19 February 2018, accepted 19 February 2018

Corresponding author Dong-Woo Jung: +82-42-866-3979, dwjung@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9154-8500

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2017 in 'Assessment of Operability with Respect to the Location of Loading Arm of Floating LNG Bunkering Terminal'

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

소법을 적용하여 다물체 운동에 대해 수치적으로 접근하였다 (Choi and Hong, 2002). LNG-FPSO와 LNGC가 병렬계류되었을 때 파랑 중 운동 특성을 실험과 수치적인 방법으로 주로 차폐 효과에 대해 연구하였고(Kim et al., 2003), 서아프리카 투입을 위해 개발한 다소 작은 규모의 LNG-FPSO와 LNGC의 운동 응답에 대한 연구를 수행하였다(Kim et al., 2017a). 두 부유체의 사파중 운동응답, 상대운동, 틈새유동 그리고 표류력 등 전반적인 운동 응답에 대한 연구를 수행하였다(Fang and Kim, 1986; Fang and Chen, 2001; Fang and Chen, 2002). FLBT 관련된 선행 연구로는 FLBT의 3 & 4-body 상태에서의 운동 특성에 대해 실험 및 고차 경계요소법을 적용한 수치적 방법으로 연구하였고 (Kim et al., 2017b), FLBT의 로딩암 위치에 따른 운용성을 평가 하였다(Jung et al., 2017). 또한 은 본 연구와 유사한 개념으로 GIFT(Gas import floating terminal) 이라는 이름으로 부유식 LNG 터미널에 대해 GIFT 단독상태에서 계류계 성능과 슬로싱을 고려한 운동특성을 검토하였고, LNGC가 GIFT에 접안할 때와 적 하역시 안전성을 평가하였다(Claes et al., 2007).

본 논문에서는 FLBT와 작업 선박들의 운용 절차에 따라 FLBT에 1척에서 3척의 작업선이 병렬계류되어 있을 때 로딩암과 매니폴드에서의 상대운동을 실험적으로 평가하였고, 더 나아가 로딩암과 매니폴드의 위치를 다양하게 검토함으로써 상대 운동 특성을 분석하였다.

2. 대상 모델

LNG의 적하역 공정에 있어 FLBT와 FLBT에 병렬계류된 작업 선박들이 근접 배치됨에 따라 차폐효과, 상호 간섭효과에 따른 운동 및 파랑 표류력 특성 변화를 실험적으로 평가하기 위해 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트 연구소의 해양공학수조에서 FLBT, 170K LNGC, 30K LNG-BS 그리고 5K LNG-BS를 대상선으로 모형시험을 수행하였다. 각 부유체의 배치는 Fig. 1에, 그리고 주요제원은 Table 1에 제시하였고 모형 축척비는 1:65를 적용하였다.

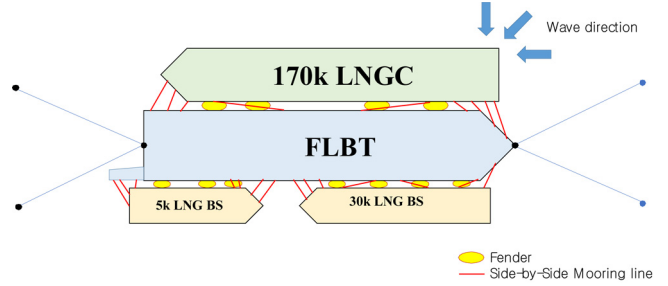


Fig. 1 Arrangement of FLBT, LNGC and two LNG BSs

Fig. 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 170K LNGC와 30K LNG-BS의 선수 방향이 FLBT와 반대로 배치된다. FLBT의 위치 유지를 위해 파도의 1차 주파수 성분의 영향을 받지 않도록 20kgf/m의 강성을 가지는 스프링을 사용하여 네 지점에서 계류하였다. 이 때 Surge, Sway 고유주기는 각각 실선 기준으로 110 초, 165초로 확인되었다.

부유체간 충돌 방지를 위해 아래와 같이 두 종류의 공압 펜더가 고려되었으며, 배수량이 큰 170K LNGC에는 지름 4.5m급의 펜더가, 배수량이 상대적으로 적은 30K LNG-BS와 5K LNG-BS의 경우 3.0m 급 펜더가 사용되었다.

- $\phi 4.5\text{m} \times 7.0\text{m}$ (Initial inner pressure of 80kPa): for 170K LNGC
- $\phi 3.0\text{m} \times 5.0\text{m}$ (Initial inner pressure of 80kPa): for 30K & 5K LNG BS

각 펜더의 변위와 힘에 대한 관계는 Fig. 2에 제시하였다. 그 래프에서 비선형 특성 값들과 이를 35%, 60%까지 선형으로 근사 했을 때에 대해 제시하였고, 실제 펜더는 60%의 압축 까지 가능하지만 본 실험에서는 실제 제원과 스프링이 근접하게 모사 가능한 35% 압축 까지만 선형 근사 하였다.

병렬계류사의 경우 모형선의 설치를 고려하여 실선의 두 가닥을 하나로 모델링하였고, 각 계류사의 강성은 병렬계류이므로 식 (1)로 계산하였다.

Table 1 Main characteristics of operating vessels

Item	Unit	FLBT	170K LNGC	30K LNG-BS	5K LNG-BS
Loading condition	-	Design condition	Design condition	Ballast condition	Ballast condition
Length between perpendicular	[m]	326.0	282.2	162.0	91.2
Breadth	[m]	60.0	45.5	26.5	17.0
Depth	[m]	32.7	26.0	15.0	10.0
Draft	[m]	13.5	12.0	5.08	4.3
Displacement	[m ³]	2.39e05	1.11e05	1.69e04	4.75e03
Water plane Area	[m ²]	1.88e04	1.11e04	3.59e03	1.38e03
Center of gravity (x, y, z)	[m]	-0.695, 0.0, 3.295	1.27, 0.0, 4.75	5.21, 0.0, 2.74	3.12, 0.0, 0.25
Center of buoyancy (x, y, z)	[m]	0.8, 0.0, -6.6	-2.5, 0.0, -5.7	4.5, 0.0, -2.4	6.5, 0.0, -2.0
Radius of gyration in roll	[m]	16.255	18.78	9.81	6.51
Radius of gyration in pitch	[m]	87.082	65.29	43.25	24.95
Radius of gyration in yaw	[m]	87.867	65.29	43.25	24.95
Transverse metacenter height	[m]	13.51	4.257	5.81	3.20
Roll natural period	[sec]	12.255	18.616	9.52	7.577

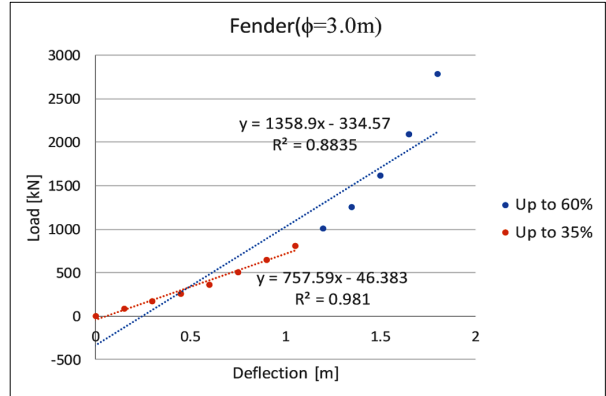
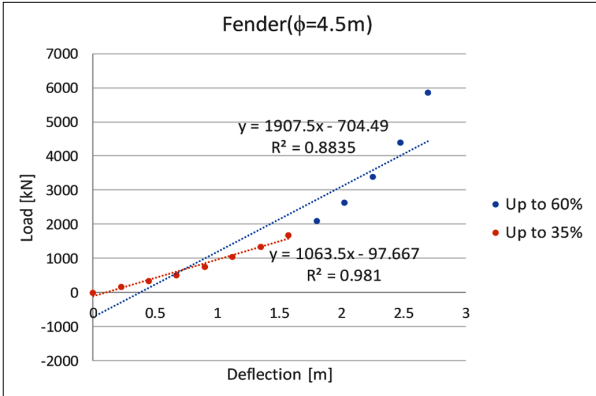


Fig. 2 Relation between deflection and load of fender

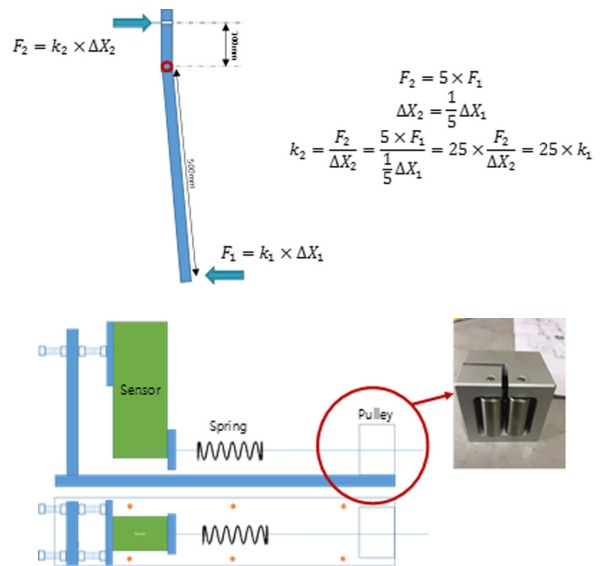
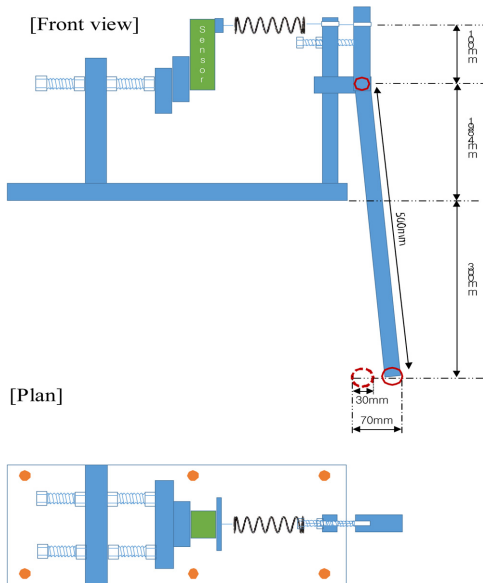


Fig. 3 Test equipment of side by side mooring system

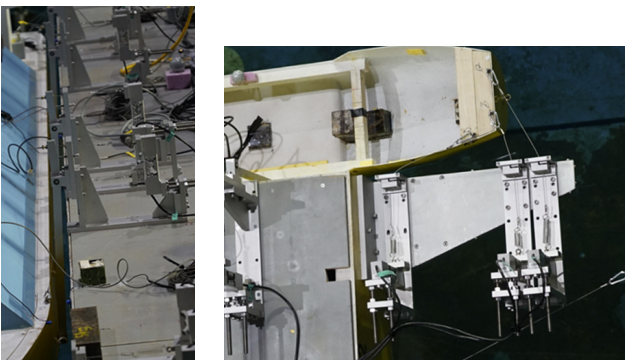


Fig. 4 Test setup of FLBT, LNGC and two LNG-BS

$$k_{eq} = k_1 + k_2 \quad (1)$$

계류삭과 펜더를 모사하기 위해 Fig. 3에서 제시한 치구를 모델링하여 사용하였다. 모두 굽힘(Bending) 형식의 로드셀을 사용하여 힘을 계측하였다. 계류삭의 경우 마찰력을 최소화하기 위한 도르레를 적용하였고, 펜더는 지렛대 원리를 이용하여 힘을 계측하였다. 특히 펜더 모델의 경우 힌지에서 센서 연결부와

바의 끝단까지의 거리 비가 1:5이므로 여기에 적용한 스프링은 25배 큰 강성을 적용하였다.

Fig. 4에는 모형시험에서 펜더와 계류삭이 설치된 모습과, FLBT, LNGC 그리고 두 LNG-BS가 수조에 설치된 모습을 제시하였다. 모형선을 설치한 후 FLBT와 LNGC 사이 간격은 실선 기준 4.0m, FLBT와 두 LNG-BS 사이 간격은 실선기준 2.7m가 되도록 계류삭의 초기 장력과 펜더의 초기 압축력을 조절하였다.

3. 실험 조건

실험에서 고려한 파도 조건은 규칙파, 불규칙파 그리고 백색 잡음파 조건이다. 규칙파의 경우 파고를 2.0m로 고정하고 주기를 틱새유동, 각 부유체의 고유주기를 포함하여 Table 2과 같이 모두 15개의 조건을 선정하였다. 불규칙파의 경우 본 FLBT의 투입 후보지의 1년 주기 조건으로 실선 3시간에 대응되는 시간으로 생성하였고 투입 후보지가 연안임을 감안하여 JONSWAP (JOint North Sea WAve Project) 스펙트럼을 적용하였다. 백색잡음파는 응답의 비선형성 여부를 확인하기 위해 유의파고 2.0m,

Table 2 Condition of regular waves in real scale

ID	ω [rad/s]	Period [sec]	Height [m]	Remark
REG01	0.300	20.944	2.0	Troll (170 K)
REG02	0.338	18.617	2.0	
REG03	0.400	15.708	2.0	
REG04	0.512	12.255	2.0	Troll (FLBT)
REG05	0.571	11.004	2.0	
REG06	0.616	10.208	2.0	Troll (30 K)
REG07	0.660	9.520	2.0	
REG08	0.700	8.976	2.0	
REG09	0.720	8.727	2.0	Gap resonance
REG10	0.770	8.160	2.0	Gap resonance
REG11	0.829	7.579	2.0	Troll (5 K)
REG12	0.900	6.981	2.0	Gap resonance
REG13	0.970	6.478	2.0	
REG14	1.000	6.283	2.0	
REG15	1.100	5.712	2.0	Gap resonance

Table 3 Condition of irregular waves in real scale

ID	Hs [m]	Tp [sec]	γ	Current Vel. [m/s]	Remark
WNT 2 m	2.0	5 ~ 25	-	-	White noise
WNT 4 m	4.0	5 ~ 25	-	-	White noise
IRW01	2.1	6.02	3.3	-	JONSWAP
IRW01-Vc	2.1	6.02	3.3	1.0	Irr. w/ current

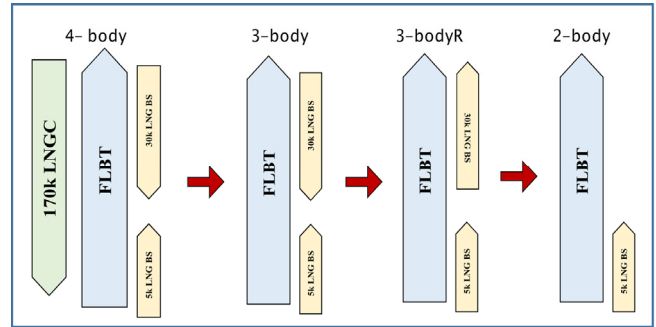


Fig. 5 Vessel arrangements for the side by side moored tests

4.0m에 대해 주기 5~25초까지 생성하였고, Table 3에 백색잡음파 및 불규칙파 조건에 대해 제시하였다.

파향은 FLBT 기준으로 선수파, 선수사파, 횡파 조건을 고려하였는데, 선수사파와 횡파의 경우 배수량이 상대적으로 적은 LNG-BS로 파가 입사할 경우 운용성 확보가 힘들기 때문에 LNGC 방향으로 입사되는 조건만 고려하였다. 횡파의 경우 실험 도중 운동 응답이 상당히 커 운용이 불가하다는 판단아래 본 논문에서는 결과를 제외하였다.

FLBT와 각 작업선들의 배치 조건은 Fig. 5와 같이 모두 네 가지

Table 4 Test matrix of side by side moored condition

Wave ID	4-body		3-body		3-bodyR		2-body	
	Test ID [$\theta = 180^\circ$]	Test ID [$\theta = 225^\circ$]	Test ID [$\theta = 180^\circ$]	Test ID [$\theta = 225^\circ$]	Test ID [$\theta = 180^\circ$]	Test ID [$\theta = 225^\circ$]	Test ID [$\theta = 180^\circ$]	Test ID [$\theta = 225^\circ$]
WNT 2 m	501	601	531	631	531-1	631-1	561	661
WNT 4 m	503	603	533	633	533-1		563	663
IRW01	505	605	535	635	535-1	635-1	565	665
IRW01-Vc	508	608	538	638			568	668
REG01	510	611	540	640	540-1	640-1	570	670
REG02	511	611	541	641	541-1	641-1	571	671
REG03	512	612	542	642	542-1	642-1	572	672
REG04	514	614	544	644	544-1	644-1	574	674
REG05	515	615	545	645	545-1	645-1	575	675
REG06	516	616	546	646	546-1	646-1	576	676
REG07	518	618	548	648	548-1	648-1	578	678
REG08	519	619	549	649	549-1	649-1	579	679
REG09	520	620	550	650	550-1	650-1	580	680
REG10	522	622	552	652	552-1	652-1	582	682
REG11	523	623	553	653	553-1	653-1	583	683
REG12	524	624	554	654	554-1	654-1	584	684
REG13	526		556		556-1		586	
REG14	527		557		557-1		587	
REG15	528		558		558-1		588	

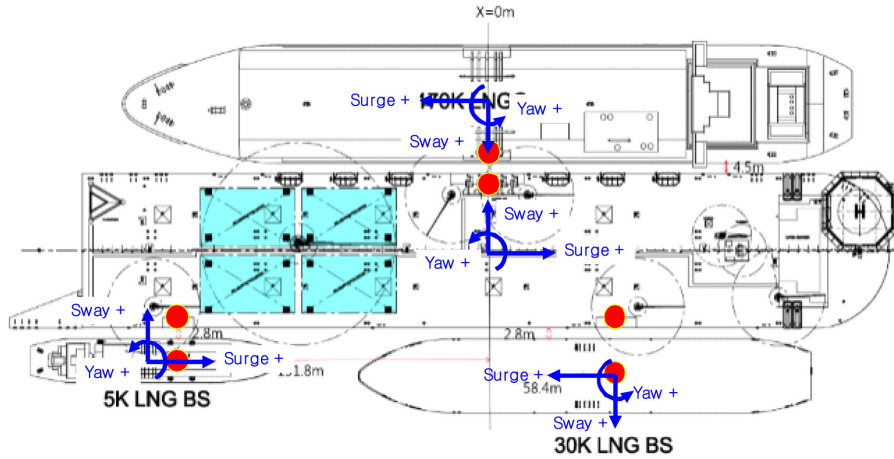


Fig. 6 Location of loading arm and manifold

조건을 고려하였으며, 특히 3-body 조건에 대해서는 30K LNG-BS의 선수 방향에 따른 영향도 검토하였다. 제시한 환경 조건 및 작업선의 배치에 따른 실험 조건을 Table 4에 정리하였다.

초기 설계 단계에서 결정된 로딩암과 매니폴드의 위치는 Fig. 6과 Table 5에 제시하였다. LNGC의 경우 매니폴드는 좌현 끝단에 위치하고 LNG BS의 경우 갑판중심선에 로딩암이 위치한다. 각각에 대응되는 FLBT에서의 로딩암과 매니폴드는 절대좌표계에서 X 위치가 동일하다. Fig. 6에는 각 부유체의 물체고정좌표계를 추가로 표기하였다. 6자유도 운동의 Surge는 선수방향,

Sway는 좌현방향, Heave는 수면 상부방향, Roll은 우현이 내려갈 때, Pitch는 선수가 내려갈 때 그리고 Yaw는 선수가 좌현으로 돌아갈 때 양의 값으로 정의된다.

Table 5의 좌표는 각 부유체의 선미수선(AP, After perpendicular), 갑판 중심선(CL, Center line), 기선(BL, Base line)을 기준으로 하고 상대 거리의 Z 좌표는 흘수를 고려한 값이다. 이 때 LNGC의 매니폴드는 갑판 위 2m에 위치하고 30K LNG-BS와 5K LNG-BS의 로딩암은 갑판으로부터 각각 6m, 7.1m 위에 위치한다고 가정하였다. 추가로 Table 5의 위치 포함하여 모두 15 위치에서의 상대운동을 평가하였고 Fig. 7에 위치를 제시하였다.

LNGC의 경우 Table 5의 좌표를 기준으로 X 방향으로 -30m ~ +30m까지 15m 간격, 30K LNG BS는 -24m ~ +24m까지 12m 간격 그리고 5K LNG BS의 경우 -20m ~ +20m까지 10m 간격으로 모두 5개의 지점을 선정하였다. Y 방향 좌표의 경우 선측, 갑판 중심선, 그리고 선측과 갑판중심선의 중간 위치로 3 위치를 고려하여 평면상 각 부유체별 15개의 위치에서 상대운동을 평가하였다. 마찬가지로 로딩암과 대응되는 매니폴드의 X 좌표는 절대좌표계에서 동일하다.

Table 5 Location of loading arm and manifold

Vessel	FLBT	Connected vessel	Relative distance	
FLBT - LNGC	X [m]	163.5	141.39	0.0
	Y [m]	30.0	22.75	4.0
	Z [m]	32.7	28.0	-3.15
FLBT - 30K LNG-BS	X [m]	215.58	79.871	0.0
	Y [m]	-30.0	0.0	15.95
	Z [m]	32.7	21.0	-3.28
FLBT - 5K LNG-BS	X [m]	38.7	50.88	0.0
	Y [m]	-30.0	0.0	11.2
	Z [m]	32.7	17.1	-6.4

4. 모형시험 결과

4.1 데이터 후처리

실험에 있어 6자유도 운동은 비접촉식 광학카메라로 Fig. 6에

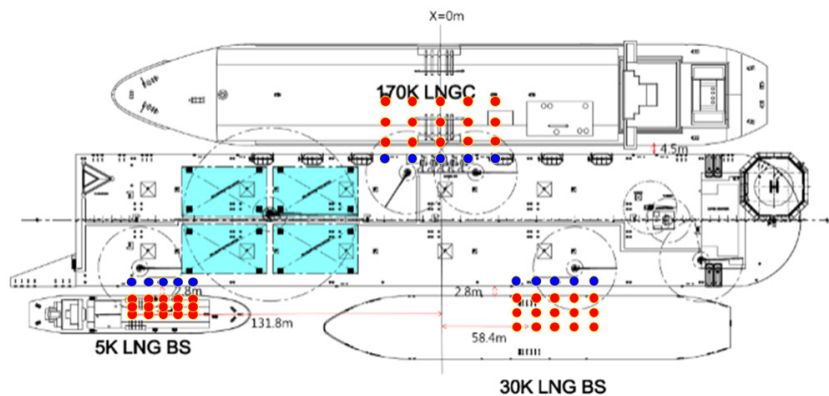


Fig. 7 Fifteen locations of loading arm and manifold for the relative motion contour

서 제시한 좌표계와 같이 각 부유체의 물체고정좌표계를 기준으로 계측하였다. 계측 값은 각 부유체의 무게 중심(COG, Center of gravity)을 기준으로 하고 있으며, COG에서 X, Y, Z 방향으로 떨어진 위치(x_b, y_b, z_b)에서의 X, Y, Z 방향 운동(x_p, y_p, z_p)은 각각 아래 식 (2)에서 식 (4)로부터 계산할 수 있다.

$$x_p = x - y_b\psi + z_b\theta \quad (2)$$

$$y_p = y + x_b\psi - z_b\phi \quad (3)$$

$$z_p = z - x_b\theta + y_b\phi \quad (4)$$

식 (2)에서 식 (4)의 $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ 는 각각 COG에서의 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw를 의미한다.

상대운동은 FLBT에서의 국부운동에서 계류된 부유체에서의 국부운동을 빼면 구할 수 있지만, 부유체의 선수 방향에 따라 물체고정좌표계가 달라지기 때문에 이를 고려하여 계산해야 한다. 예를 들어 FLBT와 170K LNGC의 선수방향이 다르므로 X, Y 방향 운동의 부호가 반대이기 때문에 이 경우는 식 (5)에서 식 (7)과 같이 X, Y, Z 방향 상대운동(R_x, R_y, R_z)을 계산해야 한다. 식 (5)에서 식 (7)의 아래첨자 A 는 FLBT를, B 는 170K LNGC를 의미한다.

$$R_x = (x_A - y_A\psi_A + z_A\theta_A) + (x_B - y_B\psi_B + z_B\theta_B) \quad (5)$$

$$R_y = (y_A + x_A\psi_A - z_A\phi_A) + (y_B + x_B\psi_B - z_B\phi_B) \quad (6)$$

$$R_z = (z_A - x_A\theta_A + y_A\phi_A) - (z_B - x_B\theta_B + y_B\phi_B) \quad (7)$$

상대운동의 계산은 R_x, R_y, R_z 의 시계열을 생성 후 규칙파와 백색잡음파에 대해서는 진폭응답함수(RAO, Response amplitude operator)로, 불규칙파에 대해서는 유의값(SDA, Significant double amplitude)로 평가하였다. RAO 도출을 위해 파 고정 시 FLBT의 중심 위치에서 계측한 신호로 실험 데이터를 동기화를 선행하였고, 특히 규칙파의 경우 파가 완전히 발달한 후 반사파 영향이 없는 구간을 선정하여 실효치(RMS, Root mean square) 기준으로 계산하였다.

4.2 상대운동 평가 결과

Fig. 6의 설계된 로딩암 및 매니폴드 위치에서의 상대운동 특성을 RAO 비교하여 Fig. 8에서 Fig. 12에 제시하였다. Fig. 8에서는 4-body 조건에 대해 수직방향 상대운동 RAO를 제시하였는데, heave 영향을 가장 크게 받으므로 파고에 따른 비선형성은 없는 것으로 확인되었다. 이 결과는 다른 배치 조건에서도 마찬가지이다. 하지만 X 방향 상대운동에는 배수량에 따른 비선형성이 나타났는데, Fig. 9에서 보는바와 같이 LNGC의 경우 비선형성이 없으며, 30K LNG-BS에는 주파수 0.35rad/s (18초) 부근에서 비선형성이 나타나고 5K LNG-BS의 경우 0.43rad/s (14.7초) 부근에서 비선형성이 크게 나타났다. 이를 확인하기 위해 Fig. 10에 Surge RAO를 비교하였다.

Fig. 10에서 파의 1차 성분의 에너지가 존재하는 최대 주파수인 0.251 rad/s (25초)를 기준으로 저주파(LF, Low frequency), 고주파(HF, High frequency) 영역으로 나누어 제시하였다. FLBT의

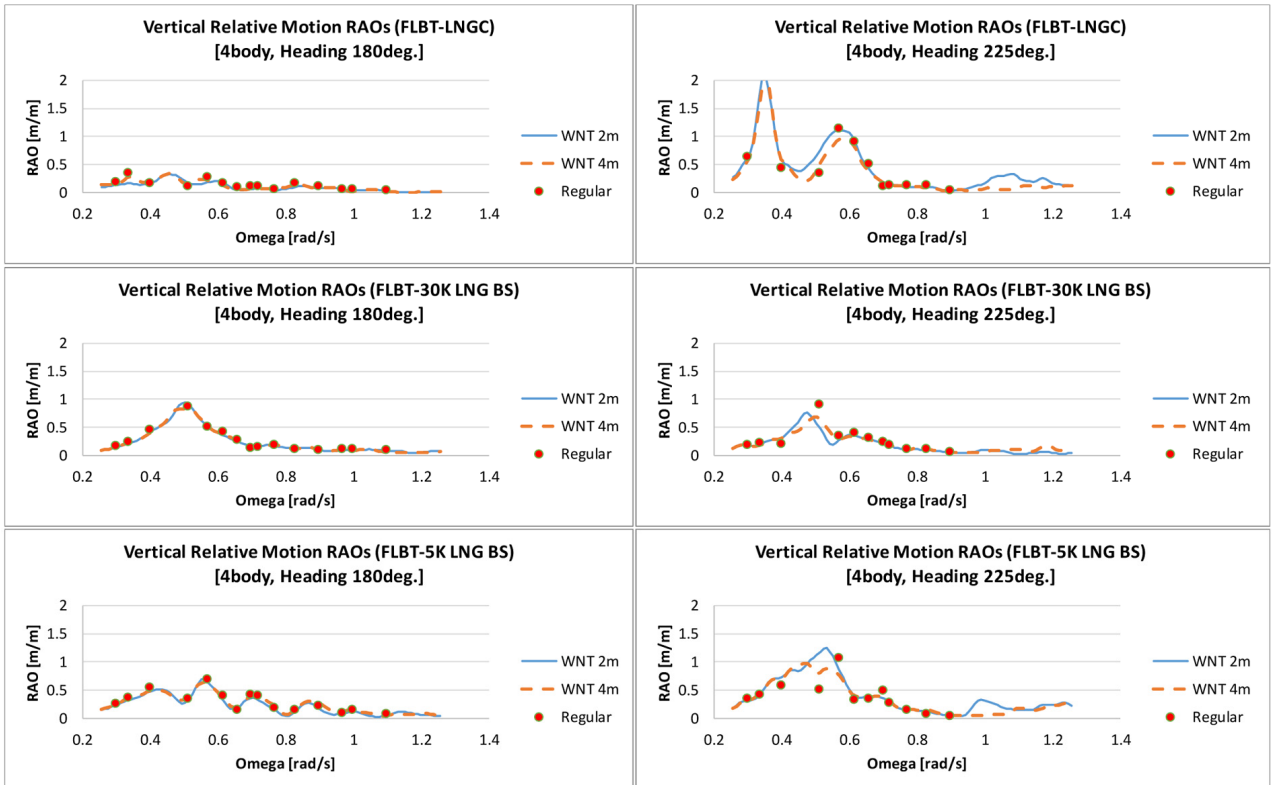


Fig. 8 Vertical relative motion RAOs in 4-body arrangement

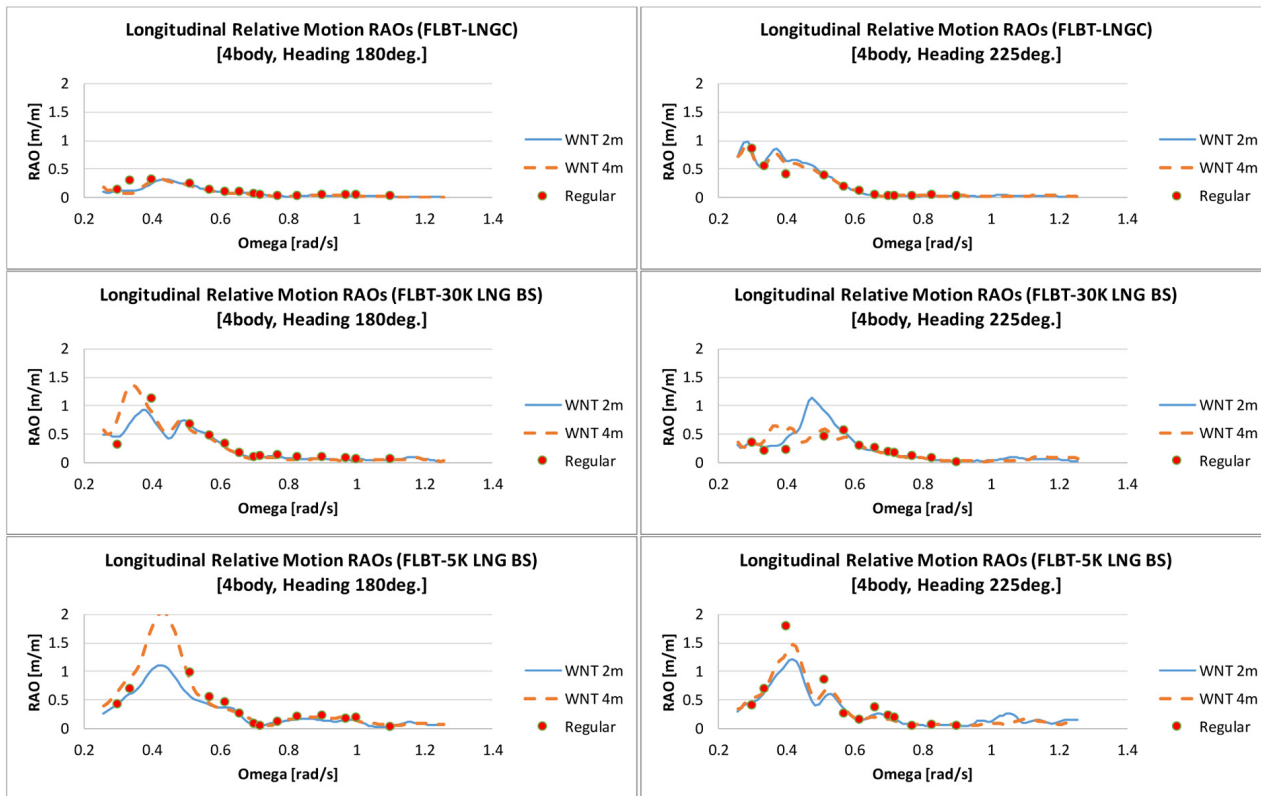


Fig. 9 Longitudinal relative motion RAOs in 4-body arrangement

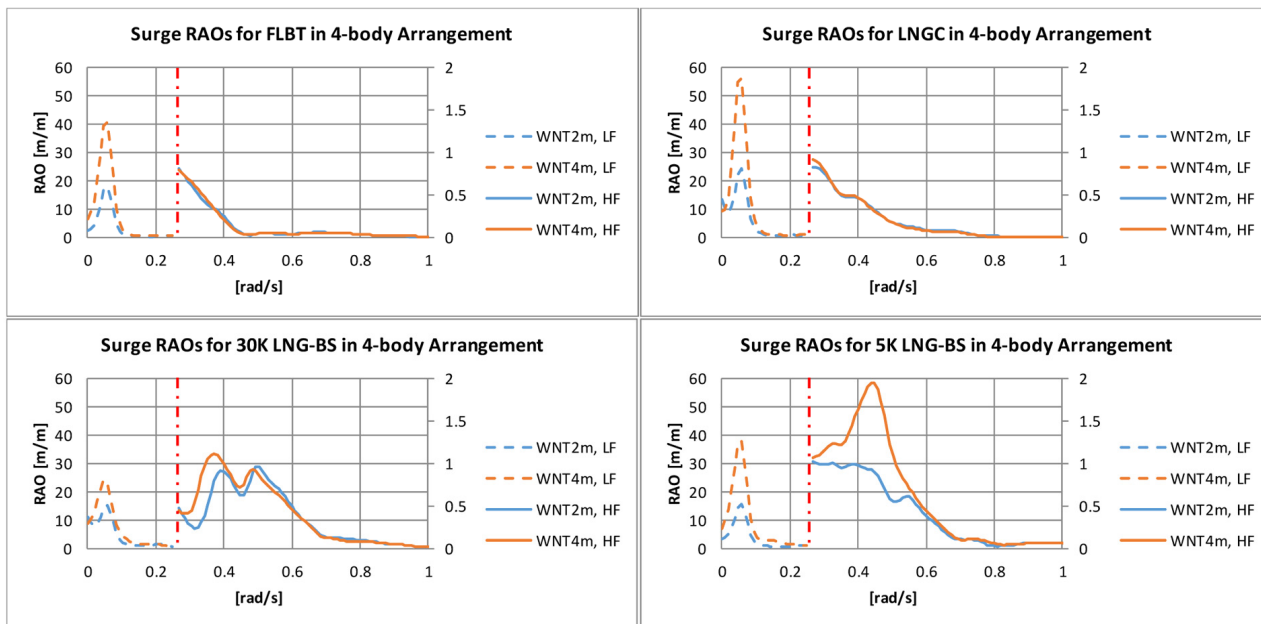


Fig. 10 Surge RAOs in 4-body arrangement

계류계에 의한 고유주파수 0.057rad/s (110초) 부근에서 동일한 응답특성을 보이고 있으며, 이는 작업선들이 FLBT에 병렬계류됨에 따른 결과이다. 반면 0.251rad/s 이상의 파 1차 성분에 대한 Surge 응답은 상이하다. 배수량이 큰 FLBT, 170K LNGC의 경우 비선형성이 나타나지 않지만, 30K LNG-BS에서는 0.25~0.5rad/s 영역에서 파고가 커짐에 따라 응답이 더욱 커지고, 5K LNG-BS

에서는 비선형성이 확연하게 드러난다. 이는 FLBT 대비 5K LNG-BS의 배수량이 1/50 수준이지만, 병렬계류계의 강성은 다른 작업선과 비슷하기 때문에 고유주기가 짧아졌기 때문으로 사료된다.

3-Body, 3-BodyR 그리고 2-Body 조건에서의 FLBT와 5K LNG-BS의 상대운동 RAO를 Fig. 11에 제시하였다. 30K LNG-BS

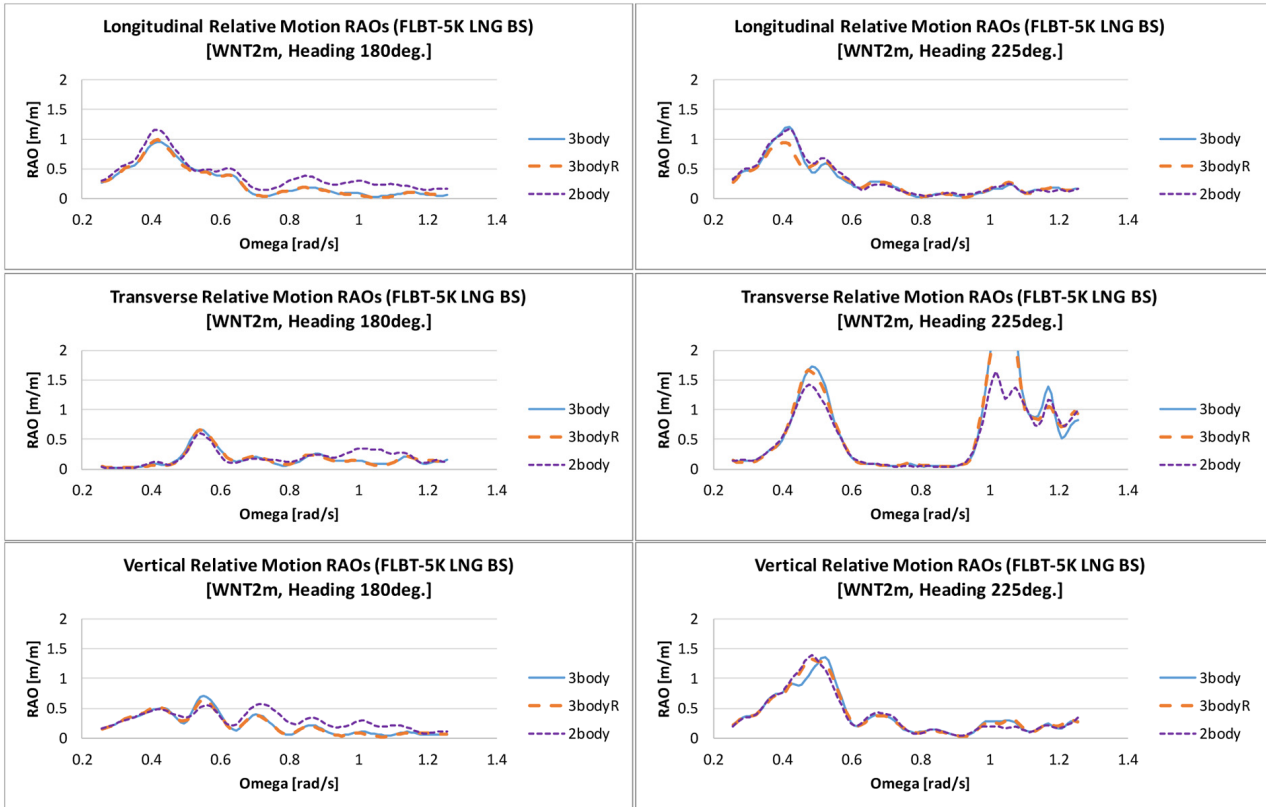


Fig. 11 Relative motion RAOs between FLBT and 5 K LNG-BS

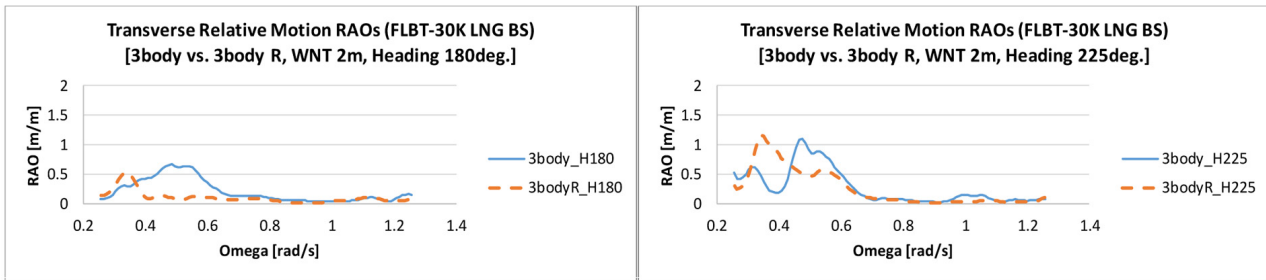


Fig. 12 Transverse relative motion RAOs between FLBT and 30 K LNG-BS

의 존재유무에 따라 차폐효과로 인한 5K LNG-BS의 상대운동 응답이 작아짐을 확인할 수 있고, 30K LNG-BS의 선수 방향에 따라 후류의 유동에는 큰 영향이 없으므로 5K LNG-BS의 상대운동 응답이 대동소이함을 확인할 수 있다.

3-body 조건에 대해 30K LNG-BS의 선수방향에 따른 30K LNG-BS와 5K LNG-BS의 상대운동 RAO를 Fig. 12에 제시하였다. 전체적으로 유사한 결과를 보이지만, 30K LNG-BS의 선수 방향이 FLBT와 동일할 경우 X방향 상대운동이 감소하였고, 전체적인 운동 특성이 장주기 방향으로 이동하였다. 하지만 실험역 파의 에너지가 1rad/s 전후에 존재함을 감안할 때 상대운동 응답 크기에는 별다른 영향이 없을 것으로 보인다.

4-body 조건에 대해 실험역 1년 주기파에서 조류의 존재 유무에 따른 상대운동 응답을 SDA 기준으로 정리하여 Fig. 13에 제시하였다. Fig. 13에서 조류가 있을 경우 상대운동 응답이 소량 증가하는 것을 알 수 있으며, 보통 적하역 운용의 상대운동 한

계를 1.5m 이내라고 볼 때 선수파 조건에서는 안정적인 운용이 가능하고, 선수사파에서는 30K LNG-BS를 제외하고 운용이 불가하다는 결론을 얻을 수 있다. 운용한계는 X, Y 방향 상대운동에서 초과하는데 이러한 결과의 원인은 X, Y 방향 상대운동의 핵심인자인 Surge, Sway의 시계열로부터 확인할 수 있다.

4-Body 조건에 대해 Surge, Sway 운동 시계열을 Fig. 14에 제시하였다. Fig. 14의 시계열은 계측된 값으로 물체고정좌표계를 기준으로 하므로 선수파의 경우 FLBT의 Surge에 대한 작업선들의 Surge의 위상차가 0도이다. 즉, 모든 부유체들의 운동이 동일한 방향이므로 상대운동이 작게 평가되었다. 반면 선수사파의 경우 FLBT의 Surge, Sway에 대해 30K의 Surge, Sway 위상차는 0도에 가깝고, LNGC와 5K LNG-BS의 위상차는 180도에 가깝다.

다음으로 설계된 로딩암과 매니폴드의 위치 주변 15개 지점에서 파 조건 IRW01에 대한 수직방향 상대운동을 평가하여 Fig.

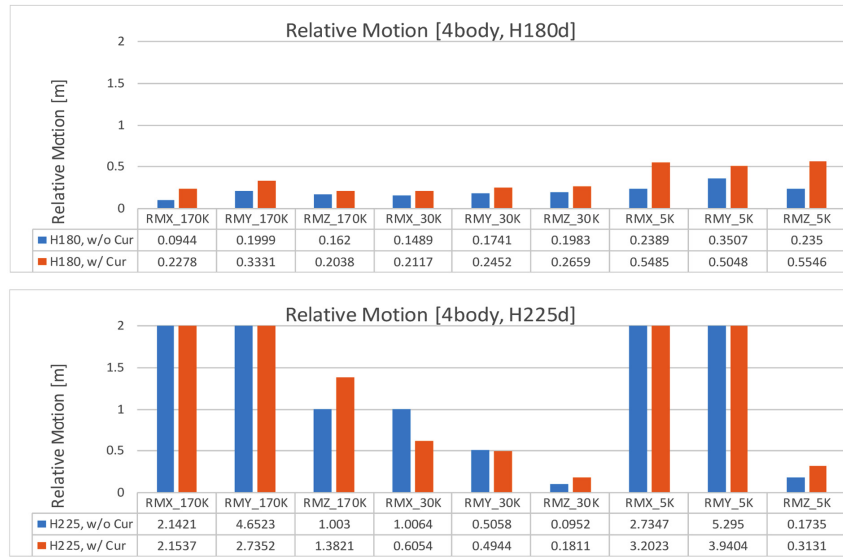
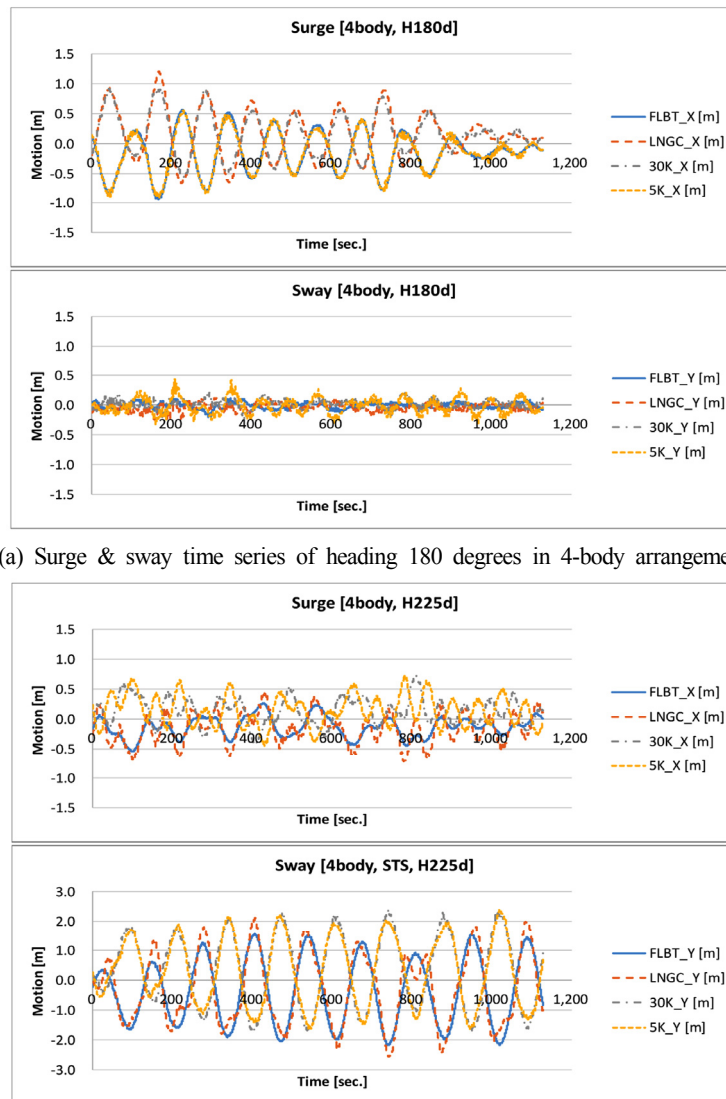


Fig. 13 Significant double amplitude of relative motion for 1-yr return period environmental condition



(a) Surge & sway time series of heading 180 degrees in 4-body arrangement

(b) Surge & sway time series of heading 225 degrees in 4-body arrangement

Fig. 14 Time series of surge and sway for 1-yr return period environmental condition

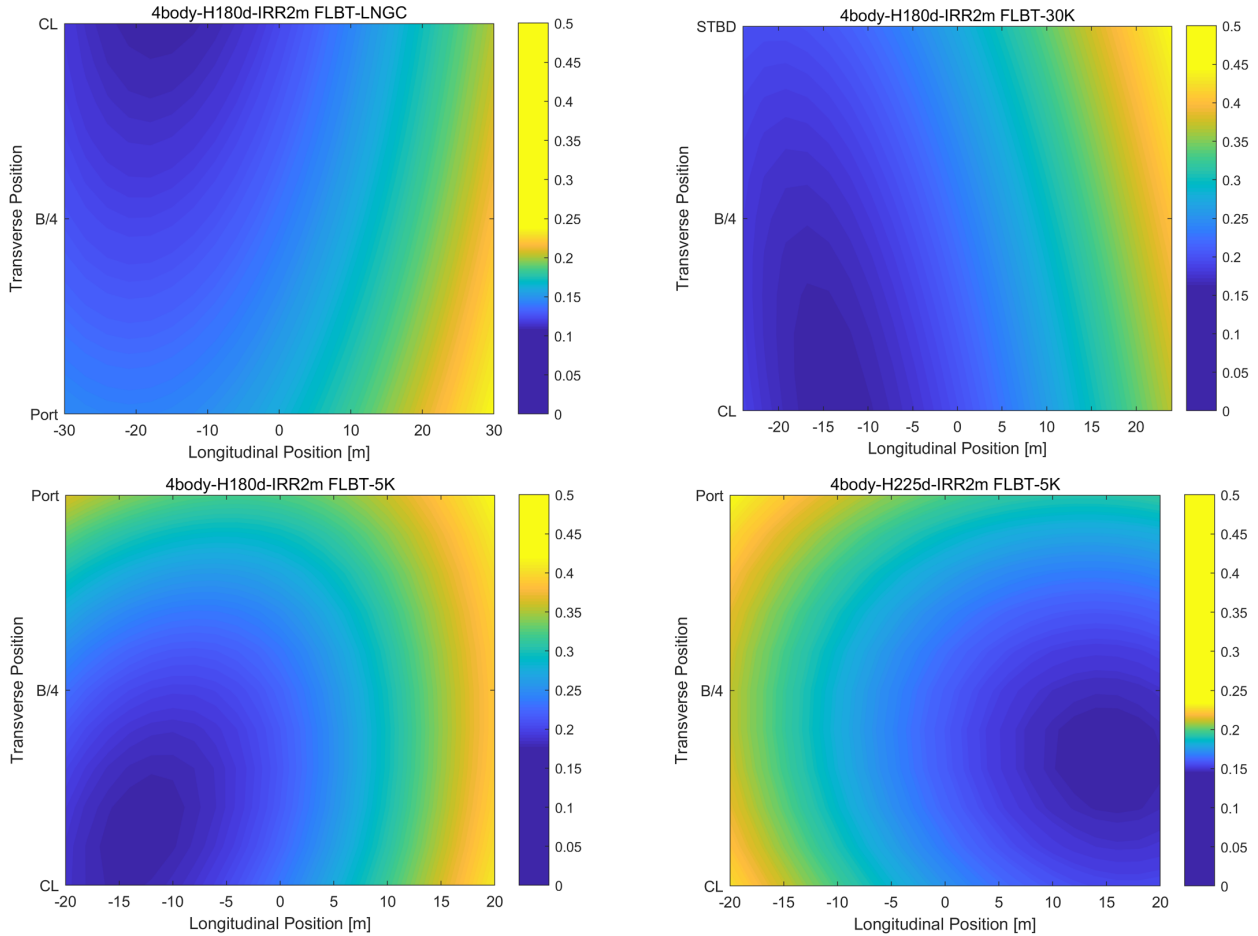


Fig. 15 Contour plot of vertical relative motion for 4-Body arrangement

15에 등고선 그래프로 제시하였다. 수직방향 상대운동은 roll에 영향을 받기 때문에 갑판중심선에 가까울수록 상대운동이 감소됨을 확인할 수 있다. 또한 선수와 조건에서 FLBT와 선수방향이 같을 경우는 선미 방향에서, FLBT와 선수방향이 다를 경우 선수 방향에서 수직방향 상대운동이 최소가 됨을 알 수 있다.

5K LNG-BS의 경우 선수과와 선수사과 조건에서 상대운동이 최소가 되는 위치가 달라졌다. 이는 Fig. 16의 4-Body 조건의 수면 하부에서 본 배치와 같이 LNGC 방향으로 선수 사과에서 5K LNG-BS의 선수부는 FLBT에 의한 차폐효과가 적용되지만, 선

미부는 파랑기진력을 받기 때문에 운동의 중심이 선수방향으로 이동했기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 FLBT에 170K LNGC, 30K LNG-BS 그리고 5K LNG-BS가 병렬계류되어 있을 때 LNG를 적하역함에 있어 운용 가능 여부 판단에 핵심이 되는 상대운동을 실험적으로 평가하였다.

병렬계류선과 펜더의 강성을 실선과 유사하게 모사하여 4-body, 3-body, 3-bodyR 그리고 2-body 배치 조건에 대해 다양한 환경조건을 검토하였다. 각 부유체에서 측정한 6자유도 운동 신호를 바탕으로 로딩압과 매니폴드에서의 국부 운동을 계산하였고 부유체의 선수 위치에 따른 좌표계를 고려하여 상대운동을 평가하였고, 설계된 로딩압과 매니폴드 주위의 15개 위치에서 상대운동을 평가하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 높이방향 상대운동 RAO의 경우 파의 크기에 따른 비선형 특성이 없었지만, 길이 방향 상대운동에는 배수량에 따른 비선형성이 나타났다. FLBT 배수량의 1/50 수준인 5K LNG-BS의 경우, 병렬계류계의 강성이 배수량에 비해 상당히 커 수평운동의 고유주기가 짧아졌기 때문으로 사료된다.

(2) 3-body 조건에 대해 30K LNG-BS의 선수방향이 FLBT와

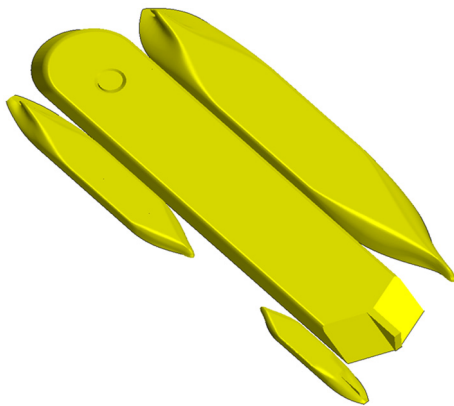


Fig. 16 4-body vessel arrangement

동일할 경우 길이방향 상대운동이 감소하였고, 전체적인 운동 특성이 장주기 방향으로 이동하였다. 하지만 실험역 파의 에너지가 1rad/s 전후에 존재함을 감안할 때 상대운동 응답 크기에는 별다른 영향이 없을 것으로 보인다. 또한 30K LNG-BS의 영향으로 5K LNG-BS에 차폐효과가 작용하여 운동 응답이 작아짐을 확인할 수 있었다.

(3) 4-body 조건에 대해 실험역 1년 주기파에서 조류의 존재 유무에 따른 상대운동 응답에서 선수파의 경우는 상대운동이 작아 안정적인 운용이 가능할 것으로 판단되지만, 선수 사파에서는 FLBT와 작업선들의 Surge, Sway 위상이 180도 차이남에 따라 길이, 폭방향 상대운동 응답이 상당히 커 운용이 불가할 것으로 보인다.

(4) 설계된 로딩암과 매니폴드 위치 주위로 15개 지점에 대한 높이방향 상대운동을 평가하여 등고선 그래프로 경향을 파악하였다. 높이방향 상대운동은 Roll 운동의 영향이 가장 적은 폭방향 중심에서 가장 낮은 응답을 보였다. 또한 5K LNG-BS의 경우 선수파와 선수사파 조건에서 상대운동이 최소가 되는 위치가 달라졌는데, 5K LNG-BS의 선수부는 FLBT에 의한 차폐효과가 적용되지만, 선미부는 파랑기진력을 받기 때문에 운동의 중심이 선수방향으로 이동했기 때문으로 사료된다.

본 연구를 바탕으로 향후에는 실험 결과로부터 해석 툴을 튜닝한 후 다양한 환경조건에 대한 해석을 수행할 예정이다. 해석 결과를 바탕으로 해상에서 LNG의 적하역 가능한 환경 조건을 제시하고 더 나아가 FLBT에 고려된 터널 추진기의 사용으로 파의 입사각을 제어할 경우 운용 범위가 어디까지 넓어지는지에 대한 검토도 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가R&D사업인 ‘해상부유식 LNG 병커링 시스템 기술개발 (PMS3731)’ 및 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 ‘심해공학수조 기초 운용기술 개발 (PES9460)’에서 수행되었습니다.

References

- Hong, S.Y., Kim, J.H., Cho, S.K., Choi, Y.R., Kim, Y.S., 2005. Numerical and Experimental Study on Hydrodynamic Interaction of Side-by-side Moored Multiple Vessels. *Ocean Engineering*, 32(7), 783-801.
- Choi, Y.R., Hong, S.Y., 2002. An Analysis of Hydrodynamic Interaction of Floating Multi-body Using Higher-Order Boundary Element Method. *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 303-308.
- Claes, L., Messenger, J.C., Vaché, M., Lehalleur, J.P., 2007. GIFT (Gas Import Floating Terminal): A New Concept of Floating LNG Terminal. *Offshore Technology Conference, OTC-19114-MS*.
- Fang, M.C., Chen, G.R., 2001. The Relative Motion and Wave Elevation between Two Floating Structures in Waves. *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 361-368.
- Fang, M.C., Chen, G.R., 2002. On Three-Dimensional Solutions of Drift Forces and Moments between Two Ships in Waves. *Journal of Ship Research*, 46(4), 280-288.
- Fang, M.C., Kim, C.H., 1986. Hydrodynamically Coupled Motions of Two Ships Advancing in Oblique Waves. *Journal of Ship Research*, 30(3), 159-171.
- Kim, M.S., Ha, M.K., Kim, B.W., 2003. Relative Motions between LNG-FPSO and Side-by-Side positioned LNG Carrier in Waves. *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 210-217.
- Kim, M.S., Morilhat, E., Nguyen, X.C., Kim, B.H., Jang, J.M., Jeong, H.S., 2017a. Offloading Operability of Small Scale AG FLNG With Side-by-Side Moored Small Scale LNG Carrier in Offshore West Africa. *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2017-62608, V001T01A034*.
- Kim, Y.H., Cho, S.K., Jung, D.W., Jung, H.W., Park, I.B., Won, Y.Y., Jung, J.S., Jung, D.H., Sung, H.G., 2017b. An Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics in Waves of Four Floaters in Close Proximity. *Proceedings of KAOSTS 2017*, 279-282.
- Jung, D.W., Kim, Y.H., Jung, H.W., Park, I.B., Won, Y.Y., Jung, J.S., Jung, D.H., Cho, S.K., Sung, H.G., 2017. Assessment of Operability with Respect to the Location of Loading Arm of Floating LNG Bunkering Terminal. *Proceedings of KAOSTS 2017*, 69-72.

Development of Sea Surface Wind Monitoring System using Marine Radar

Jun-Soo Park^{ID*}

^{*}Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Kyungnam University, Changwon, Republic of Korea

선박용 레이더를 이용한 해상풍 모니터링 시스템 개발

박준수^{ID*}

^{*}경남대학교 조선해양시스템공학과

KEY WORDS: Sea surface wind 해상풍, Marine radar 선박용 레이더, Radar signal processing 레이더 신호 처리, 3D FFT 3차원 고속 푸리에 변환, Signal to noise ratio 신호대잡음비, Normalized radar cross section 정규화된 레이더 반사면적

ABSTRACT: A wave buoy commonly used for measurements in marine environments is very useful for measurements on the sea surface wind and waves. However, it is constantly exposed to external forces such as typhoons and the risk of accidents caused by ships. Therefore, the installation and maintenance charges are large and constant. In this study, we developed a system for monitoring the sea surface wind using marine radar to provide spatial and temporal information about sea surface waves at a small cost. The essential technology required for this system is radar signal processing. This paper also describes the analytical process of using it for monitoring the sea surface wind. Consequently, developing this system will make it possible to replace wave buoys in the near future.

1. 서 론

우리나라는 한반도에 위치해 지형적 특성상 해양 기후에 많은 영향을 받는다. 그래서 해양 기상을 관측하여 실생활 뿐 아니라 각종 산업에 활용하기 위해 많은 비용과 노력을 투자하고 있다.

해양 기상의 대표적인 자료에는 조위, 파고, 파주기, 파방향, 유향, 유속, 풍향, 풍속 등이 있다. 이들을 관측하기 위해 기상청, 국립해양조사원 등에서 다양한 장소에 다양한 장비를 설치해서 지속적으로 관측하고 있으며 관측한 자료를 바탕으로 생활 및 산업에 활용할 수 있는 예보 자료를 도출하고 있다.

해양 기상을 관측하는 대표적인 방법은 부이(해양기상부이, 파고부이를 통칭함)이나 등표에 관측 센서를 설치하여 계측하는 것으로 한반도의 삼면에 다수의 부이와 등표가 설치되어 운용되고 있다. 현재로서는 부이를 통해 계측한 값이 가장 신뢰성이 높다. 그런데 이런 장비들을 설치하고 유지하기 위해서 많은 비용이 지속적으로 발생하고 있다. 특히 선박과의 충돌이나 태풍과 같은 거대한 외력에 의해 파손되거나 유실되는 위험에 항상 노출되어

있다. 그래서 이를 대체하거나 보조할 계측 장비의 필요성이 대두되고 있다. 일반적으로 대양을 운항하는 선박은 연안에서와 같이 부이나 등표가 획득한 객관적인 파랑 정보를 이용하기 어렵다. 특히 지역적인 파랑 정보를 실시간으로 얻을 수 없다. 그래서 현재까지는 단순히 목측과 같은 주관적인 파랑 정보에 의존할 수밖에 없다. 이러한 현실정을 개선하고 선박, 인명 및 화물 등의 안전을 확보하기 위하여 IMO(International Maritime Organization)의 해양안전위원회(Maritime Safety Committee)에서는 해양 기상 예보를 활용하고 관측하는 것을 권고하고 있으며 선박의 성능을 좀 더 정확하게 평가하기 위하여 ISO(International Organization for Standardization)에서도 규정을 도입하여 해양 기상을 계측하는 것을 또한 권고하고 있는 상황이다(IMO, 2009; ISO, 2015).

이러한 권고에 적극적으로 대응하기 위해서 본 연구에서는 저가의 선박용 레이더를 이용한 원격 시스템으로 공간 및 시간상 해상 기상, 특히 해상풍의 계측 시스템 및 기술을 제안하려고 한다. 앞서 언급된 바 있는 선박의 속력 시운전 데이터 해석에 의한 속력, 동력 및 프로펠러 축 속력 성능 평가의 가이드라인 ISO 15016:2015에서 해양 환경 계측에서 해상풍을 언급하고 있다

Received 15 December 2017, revised 25 January 2018, accepted 25 January 2018

Corresponding author Jun-Soo Park: +82-55-249-2655, junsoopark@kyungnam.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6409-5721

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

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

(ISO, 2015). 기 서술된 과학적인 관점에서의 해양 기상뿐만 아니라 해양 공학에서 기상학과 해양학을 합쳐 해양기상(Metoccean)이라고 일컫는 분야에서 해상풍의 계측은 해양 자원 개발에 필요충분 요건의 중요한 자료로 활용된다.

아울러 선행 연구를 통해 선박용 레이더를 이용한 파랑 계측은 국산 상용제품이 이미 나와 있을 정도로 기술 수준이 향상되었다(Park et al., 2006a; Park et al., 2006b). 그에 반해 해상풍을 계측하는 기술은 거의 전무하며 아직 선진국 수준에 비견할 수 없는 상태이다.

2. 파랑 레이더 영상

파랑 레이더 영상이란 해수면에 반사된 레이더 후방산란 신호를 화면에 나타낸 영상으로 해수면의 상태를 직간접적으로 나타내는 해양 정보들이 내포되어 있기 때문에 이를 추출하는 기법 연구들이 많이 진행되었다. 가장 대표적인 것이 파고, 파주기, 파방향 등이고 이와 관련된 상용 제품도 다수 판매되고 있다(Young et al., 1985; Ziemer et al., 1987; Nieto et al., 1999; Hirayama et al., 2001; Park, 2005). 현재는 분석 기법을 고도화하여 해상풍의 방향 및 속력 성분을 추출하는 연구가 많이 진행되었다(Dankert et al., 2005; Dankert and Horstmann, 2007). 본 연구에서는 해상풍 모니터링 시스템을 개발하기 위해 진행된 계측 및 해석 기법 그리고 현장 실험에 대한 결과를 기술하려고 한다.

3. 해상풍 추정

해상풍은 해수면(Free surface or sea surface)과 관련된 대기의 움직임으로 정의되며 일반적으로 해상풍은 해수면에 매우 가깝게 측정한다. 통상 해수면에서 해발 10m 높이에서 계측하는 것이 보편적이다. 본 연구에서는 일반적으로 한 지점에서 계측하는 방법과는 달리 레이더를 이용하여 해상의 파도로부터 해상풍을 추정하는 것이다. 따라서 해상풍 추정은 파랑 레이더 영상으로부터 풍파(Wind wave)와 너울(Swell)을 구분할 수 있다(Park et al., 2006a). 이 중 풍파의 후방산란 신호의 수신 방향과 분포 및 강도를 활용하여 추정한다.

3.1 풍향

해수면 위로 바람이 불게 되면 Fig. 1과 같이 바람이 불어오는 방향으로 경사가 완만해지는 파면이 생기게 된다. 이로 인해 바람이 불어오는 방향으로 레이더 반사 신호가 강해지고 그

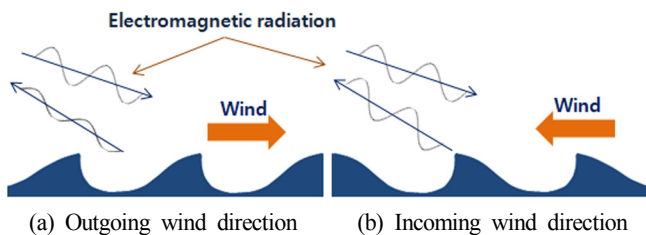


Fig. 1 Difference of radar signal reflection by wind direction

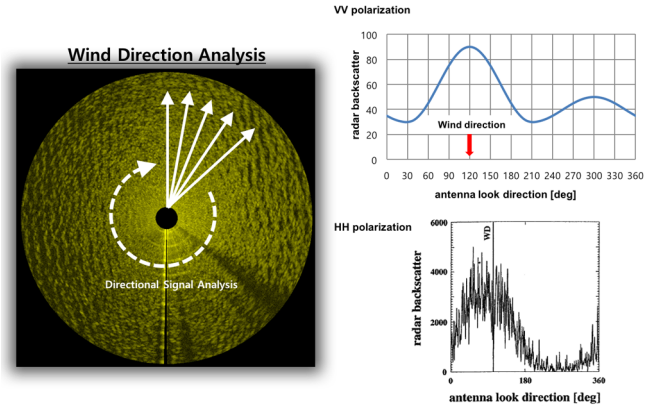


Fig. 2 Scheme of wind direction analysis and examples of azimuthal dependency of radar backscatter

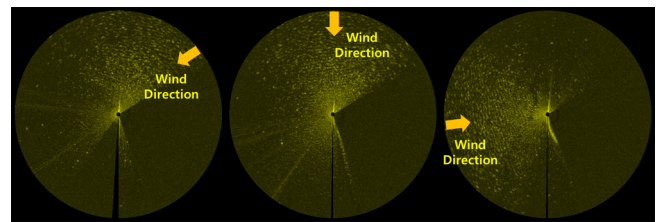


Fig. 3 Examples of PPI image including azimuthal dependency of radar backscatter by wind direction

반대 방향은 약해지는 현상이 발생한다(Hatten et al., 1998). 따라서 Fig. 2와 같이 레이더 후방산란 신호를 수신하는 방향별로 신호의 강도를 계측하고 그 강도가 가장 큰 방향을 풍향으로 정의하는 것이 이 기법의 주요 내용이다(Hatten et al., 1998). 다만 레이더 신호 안에 해수면 반사 신호 외의 잡음 성분이 포함될 경우가 많기 때문에 식 (1)과 같은 근사식으로 풍향을 추정한다(Moore and Fung, 1979).

$$\eta(\theta) = A + B\cos(\theta - \phi) + C\cos 2(\theta - \phi) \quad (1)$$

여기서 η 는 후방산란 신호 강도, θ 는 후방산란 신호 수신 방향, ϕ 는 해상풍 방향, A, B, C 는 계측 후방산란 신호와 식 (1)의 η 와의 오차가 최소가 되기 위한 계수들이다.

Fig. 3에 해상풍 방향에 따라 레이더 신호의 밝기가 달라지는 PPI(Plan position indicator) 영상의 예를 나타내었다.

3.2 풍속

레이더 신호를 이용하여 풍속을 계측하는 기법은 2가지가 있다. 첫 번째는 풍속과 파고와의 관계로부터 풍속을 추정하는 기법으로 레이더를 이용한 파고 추정 기법에서 착안한 것이다(Park et al., 2006a; Park et al., 2006b).

해상 또는 육상 의 풍속 상태를 12등급으로 나눈 보퍼트 스케일(Beaufort scale)에서 알 수 있듯이 등급이 증가할수록 풍속과 더불어 파고도 높아진다. 파고를 추정하는 기법에서 도입한 신호대잡음비(Signal to noise ratio, SNR)를 풍속 산정에 도입하여 이 값과 풍속과의 관계를 식 (2)과 같이 산정하게 된다면 SNR값을 구해서 파고를 추정하듯이 풍속도 추정이 가능하다. 이러한

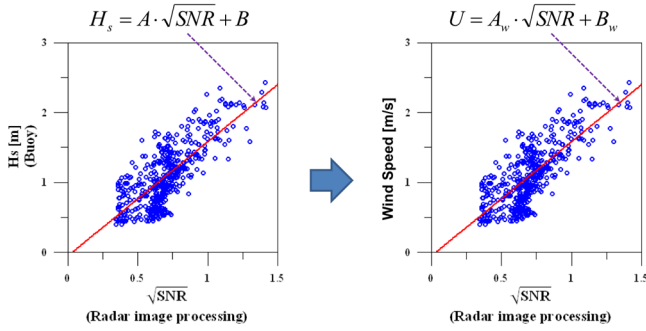


Fig. 4 Concept scheme of wind speed estimation similar to wave height estimation using \sqrt{SNR}

관계를 Fig. 4에 나타내었다.

$$U = A \sqrt{SNR} + B \tag{2}$$

여기서 U 는 풍속이고 SNR 은 식 (3)과 같이 정의한다. 그리고 A , B 는 계측을 통해 구할 수 있는 상수이다.

$$SNR = \frac{\Sigma(\text{Wave Energy})}{\Sigma(\text{Background Noise})} \tag{3}$$

풍속을 추정하는 두 번째 기법은 정규화된 레이더 반사면적 (Normalized radar cross section, NRCS)을 이용하여 추정하는 기법이다. 풍속에 따라 해수면이 거칠어지는 정도가 달라져 그에 따른 레이더 신호 반사율도 달라지므로 첫 번째 기법과 같은 방식으로 NRCS와 풍속과의 관계를 식 (4)과 같은 형태로 추정한다. Fig. 5에 개념적 기법을 소개하였다.

From radar eq. $\frac{P_r}{P_t} \propto \frac{\sigma}{R^4}$

- P_t : Transmitted power
- P_r : Received power
- σ : Radar cross section (RCS)
- R : Range [m]

Substitute $\sigma = \sigma_0 \cdot \Delta A$ at radar eq., consequently $\sigma_0 \propto \frac{P_r}{P_t} R^3$

From measured radar signal, calculate σ_0 (NRCS; Normalized Radar Cross Section) and it measures the actual velocity at that time to complete the estimation formula, as shown below

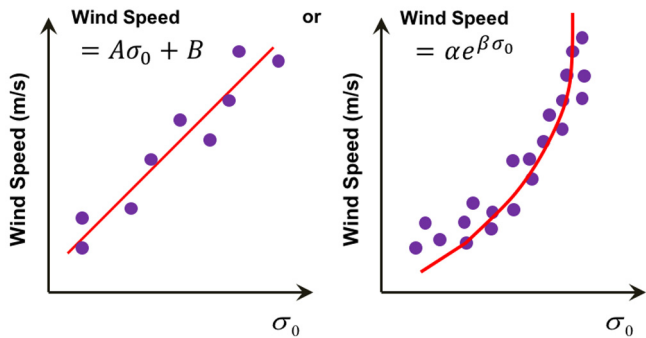


Fig. 5 Concept scheme of wind speed estimation similar to wave height estimation using NRCS

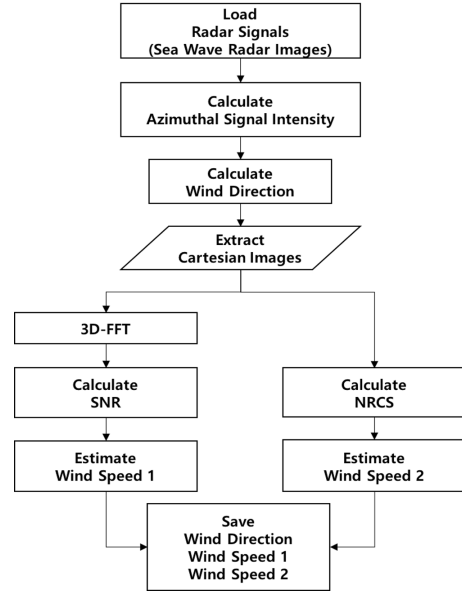


Fig. 6 Flowchart of estimation for sea surface wind of direction and speed

$$U = A\sigma_0 + B \text{ or } U = \alpha e^{\beta\sigma_0} \tag{4}$$

여기서 A , B , α , β 는 계측을 통해 구할 수 있는 상수이고 σ_0 는 NRCS이다.

이상과 같이 해상풍 추정과 관련한 파랑 레이더 영상으로부터 해상풍 풍향 및 풍속 추정의 과정을 Fig. 6에 흐름도로 표현하였다.

4. 결 과

현장 시험을 통하여 획득한 레이더 데이터는 2015년 4월초부터 9월초까지 계측한 것으로 울산 주전의 이덕서 등표 주변에서 계측되었다. 레이더로 계측할 수 있는 범위 내에 풍향, 풍속을 계측하는 등표가 있기 때문에 앞서 설명한 해상풍 추정 기

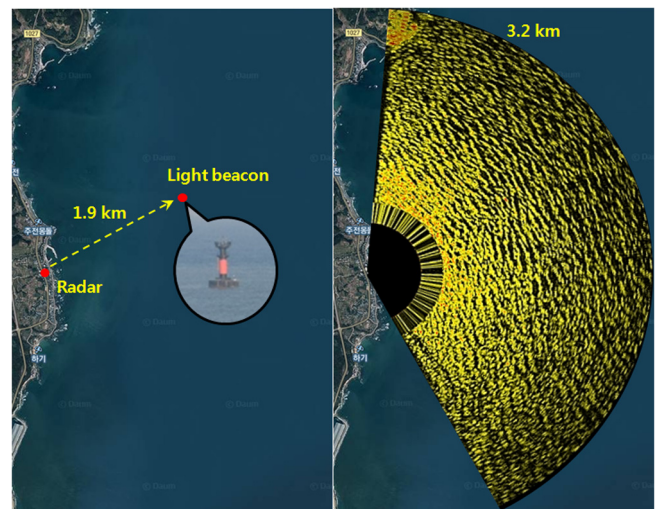


Fig. 7 Location of radar installation, light beacon and radar scanning range

Table 1 Specifications of marine radar

Antenna radiators	Length	2.65 m
	Beamwidth (H)	0.9°
	Beamwidth (V)	22°
Rotation		42 rpm
RF transceiver	Frequency	9375 MHz ± 50 MHz
	Output power	25 kW
	Pulselength & PRF	0.06 μs, 3000 Hz
	IF	60 MHz, Logarithmic
Noise figure		≤5 dB

법을 이용하여 레이더 신호를 분석한 결과와 등표에서 계측한 값을 비교할 수 있었다. Fig. 7에 레이더 설치 및 등표의 위치를 나타내었고 설치된 레이더 스캐닝 영역을 나타내며 해수면의 후방산란 신호 영상을 나타내었다.

Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 해수면의 정보는 약 180°이내에서 얻을 수 있기에 풍향이 0~180°인 경우에 대해서만 레이더 신호를 분석하여 비교하였다. 현장 시험에 사용된 레이더의 사양은 Table 1과 같다.

4.1 풍향

등표에서 계측한 풍향과 레이더 신호를 분석해서 추정한 결과의 산포도(Scatter diagram)를 Fig. 8에 나타내었다. 상관계수(Correlation coefficient)가 0.6678로 낮은 수준이다. 이러한 연유는 4. 결과에서 언급한 내용과 Fig. 7에서 레이더 스캐닝 영역에서 확인할 수 있는 바와 같이 해수면의 정보가 공간상 180°가 되지 않는다. Fig. 2와 같이 360°의 해수면 정보를 가지고 해석하지 못한 결과라고 유추된다. 향후 360°의 해수면 정보를 얻을 수 있는 현장을 확보하는 것이 해석 정확도를 높이기 위한 기본요건일 것으로 인식된다.

하지만 Fig. 9와 같이 계측 값과 추정 값을 비교해보면 유사한 경향을 보인다. 큰 오차를 보이는 특정 구간에서도 경향을 유지하는 것으로 보아 분석 기법을 보완하면 정도가 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

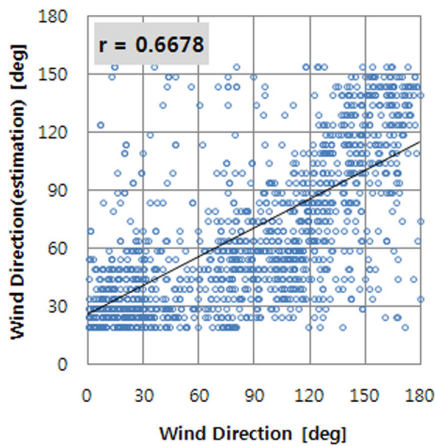


Fig. 8 Scatter diagram of wind direction (In situ measurement vs. radar estimation)

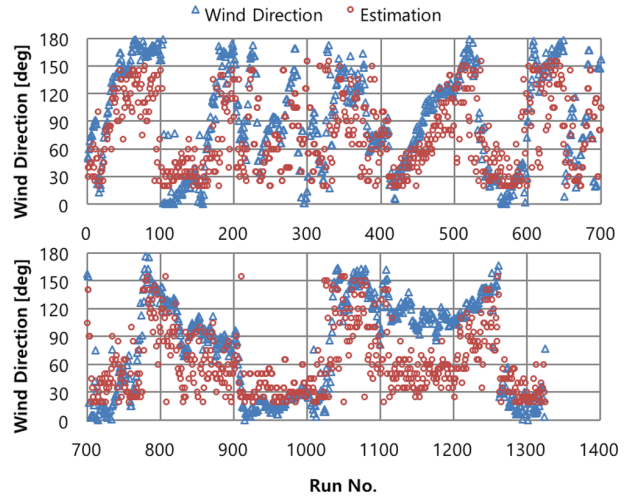


Fig. 9 Comparison of the wind direction (In situ measurement vs. radar estimation)

4.2 풍속

\sqrt{SNR} 과 풍속의 산포도 및 풍속 추정 식을 Fig. 10에 나타내었다. 그리고 이 추정 식을 레이더 신호 분석에 적용한 결과의 산포도를 Fig. 11에 나타내었다. 계측 값과 추정 값의 상관계수

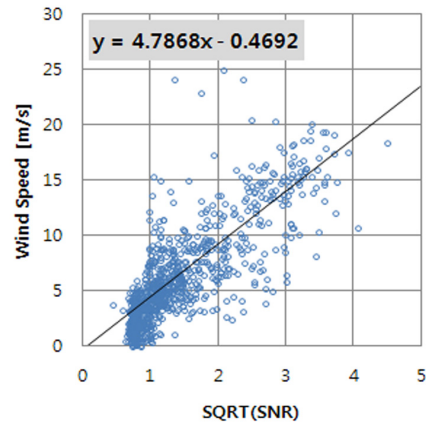


Fig. 10 Scatter diagram of \sqrt{SNR} versus measured wind speed in situ

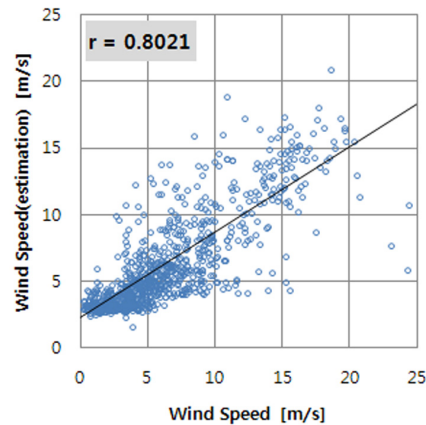


Fig. 11 Scatter diagram of wind speed (In situ measurement vs. estimation using \sqrt{SNR})

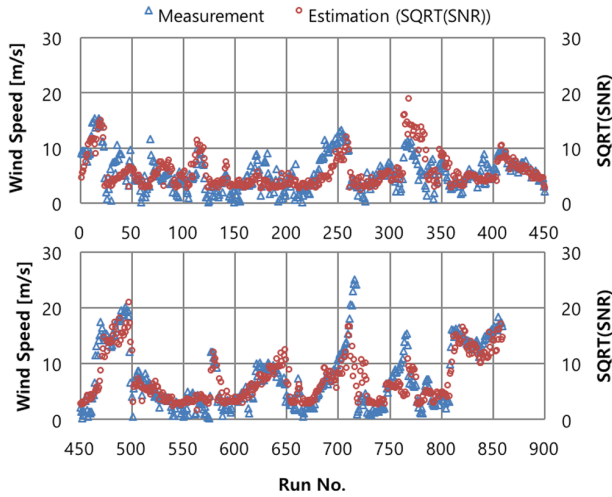


Fig. 12 Comparison of wind speed (In situ measurement vs. estimation using \sqrt{SNR})

가 0.8021의 높은 수준이며 Fig. 12을 통해서 두 데이터의 유사성을 한 번 더 확인할 수 있다.

NRCS와 풍속의 관계는 선형보다는 지수형태로 추정 식을 구할 경우 상관계수가 조금 더 높았다. Fig. 13에 NRCS와 풍속의 산포도 및 추정 식을 나타내었다. Fig. 14에는 계측 값과 추정

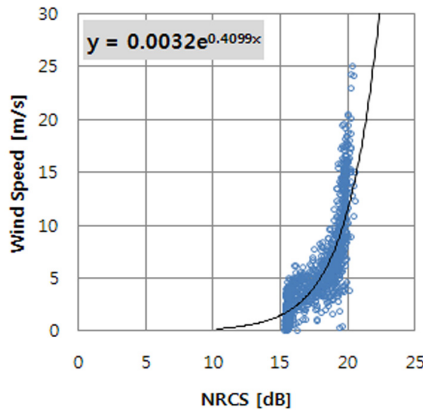


Fig. 13 Scatter diagram of NRCS versus measured wind speed in situ

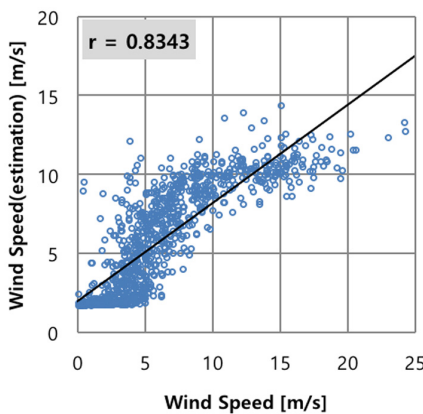


Fig. 14 Scatter diagram of wind speed (In situ measurement vs. estimation using NRCS)

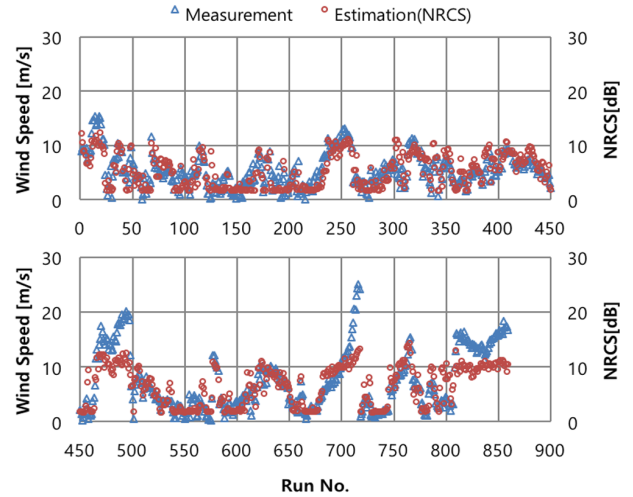


Fig. 15 Comparison of wind speed (In situ measurement vs. estimation using NRCS)

값의 산포도 및 상관계수를 나타내었다. 상관계수는 0.8343으로 \sqrt{SNR} 을 이용한 기법보다 약간 높은 수치이다. Fig. 15에 계측 값과 추정 값을 비교한 결과를 나타내었다.

Fig. 12와 Fig. 15를 비교해보면 두 기법의 단점이 그대로 나타나 있다. \sqrt{SNR} 은 레이더 신호에 3차원 FFT를 적용한 결과에서 파랑의 분산성 관계(Dispersion relation)를 만족하는 성분을 파랑 에너지 성분으로 정의하는데, 실제로는 해수면 반사 신호가 없는 경우라도 잡음성분이 전 주파수 영역에 존재하기 때문에 파랑의 분산성 관계를 만족하는 잡음성분이 반드시 존재하고 이로 인해 \sqrt{SNR} 은 항상 일정 값 이상이 된다. 따라서 풍속이 낮은 경우에 \sqrt{SNR} 은 0에 수렴하지 않고 일정 값 이상이 되기 때문에 Fig. 12와 같이 계측 값과의 오차가 크게 발생한다. 반면 NRCS의 경우는, 풍속이 높아질수록 NRCS값도 증가하지만 한계 값이 존재한다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 풍속이 12~15m/s 이상이 되면 NRCS값이 20dB 내외의 값으로 수렴하게 된다. 따라서 Fig. 15와 같이 풍속이 15m/s 이상인 경우에 계측 값과의 오차가 크게 발생한다.

5. 결 론

본 연구에서는 선박용 레이더로 해상풍을 계측하는 기법을 제안하였고, 현장 시험에 의한 해석 결과를 토대로 선박용 레이더를 이용한 해상풍 모니터링 시스템을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 풍향을 추정하는 기법은 풍향에 따라 해수면의 기울기가 달라지고, 그에 따른 레이더 후방산란 신호 강도가 달라지는 것으로 풍향을 추정하는 아주 간단한 방법으로 접근하였지만 풍향풍속계로 계측한 값과 의미 있는 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 분석 결과의 정도를 더 높이고 360° 모든 방향에 대해 레이더 신호를 받을 수 있는 해양 환경에서도 제 성능을 발휘할 수 있도록 추가적인 연구를 통하여 성능을 향상 시킬 필요가 있다.

(2) 풍속을 추정하는 두 기법들은 큰 오차가 발생하는 풍속 구간이 존재하지만 계측 값과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있

었다.

(3) 정도 높은 풍속을 추정하기 위하여 본 연구에서 기술한 두 기법을 함께 적용할 수 있는 적합한 최적화 알고리즘에 대한 추가 연구를 진행 중에 있으며 지속적인 연구로 완성된 높은 결과를 도출할 계획이다.

(4) 현재 본 연구의 정도 향상과 해석 기법의 범용성 확보를 위해 울릉도에서 현장실험을 진행하고 있으며 지속적인 계측을 통하여 다양한 해상풍(해상 상태)에 대한 연구를 할 계획이다.

후 기

이 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개발사업 (KMIPA 2014-22010)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Dankert, H., Horstmann, J., Rosenthal, W., 2005. Wind- and Wave-Field Measurements Using Marine X-Band Radar-Images Sequences. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3), 534-542.
- Dankert, H., Horstmann, J., 2007. A Marine Radar Wind Sensor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(9), 1629-1642.
- Hatten, H., Seemann, J., Horstmann, J., Ziemer, F., 1998. Azimuthal Dependence of the Radar Cross Section and the Spectral Background Noise of a Nautical Radar at Grazing Incidence. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5, 2490-2492.
- Hirayama, T., Park, S.G., Hirakawa, Y., Takayama, T., 2001. Development of a Wave Field Detector using the Marine Wave Radar and Measured Example. *Journal of Society of Naval Architecture of Japan*, 2002(191), 51-56.
- International Maritime Organization (IMO), 2009. Report of the Maritime Safety Committee on Its Eighty-fifth Session. [Online] Available at: <https://www.mpa.gov.sg/web/wcm/connect/www/dffd8a06-e82b-4cd5-a434-a3704834a272/MSC_85-26-Add.1.pdf?MOD=AJPERES> [Accessed January 2018].
- International Organization for Standardization (ISO), 2015. *Ships and Marine Technology – Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data*. [Online] Available at: <<https://www.iso.org/standard/61902.html>> [Accessed January 2018].
- Moore, R.K., Fung, A.K., 1979. Radar Determination of Winds at Sea. *Proceedings of the IEEE*, 67(11), 1504-1521.
- Nieto, J.C., Reichert, K., Dittmer, J., 1999. Use of Nautical Radar as a Wave Monitoring Instrument. *Coastal Engineering*, 37(3), 331-342.
- Park, G.I., Choi, J.W., Kang, Y.T., Ha, M.K., Jang, H.S., Park, J.S., Park, S.G., Kwon, S.H., 2006a. The Application of Marine X-band Radar to Measure Wave Condition during Sea Trial. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*, 10(4), 34-48.
- Park, J.S., Park, S.G., Kwon, S.H., Park, G.I., Choi, J.W., Kang, Y.T., Ha, M.K., 2006b. Development of a Wave Monitoring System Using a Marine Radar. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(1), 37-42.
- Park, J.S., 2005. Development of Sea Surface Wave and Current Monitoring System by Using X-band Nautical Radar. PhD Dissertation, Naval Architecture and Ocean Engineering in Pusan National University.
- Young, I.R., Rosenthal, W., Ziemer, F., 1985. A Three Dimensional Analysis of Marine Radar Images for Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Currents. *Journal of Geophysical Research*, 90(C1), 1049-1059.
- Ziemer, F., Rosenthal, W., 1987. On the Transfer Function of a Shipborne Radar for Imaging Ocean Waves. *Proceedings of IGARSS '87 : Remote Sensing : Understanding the Earth as a System*, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1559-1564.

Implementation of Heading Angle and Depth Keeping Control of ROV with Multiple Thrusters by Thrust Allocation

Suk-Min Yoon*, Chong-Moo Lee* and Kihun Kim^{id*}

*Marine Robotics Laboratory, KRISO, Daejeon, Korea

다수의 추진기를 지닌 ROV의 추력배분을 통한 정지 상태에서의 선수각 및 수심 제어 구현

윤석민* · 이종무* · 김기훈^{id*}

*선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Light work class ROV 경작업용 ROV, Thrust allocation 추력배분, Thruster configuration matrix 추진기 배치 행렬, Redundant actuating system 과구동기 시스템, Propulsion system 추진 시스템

ABSTRACT: This study deals with the heading angle and depth keeping control technique for an ROV with multiple horizontal and vertical thrusters by thrust allocation. The light work class ROV URI-L, which is under development at KRISO, is a redundant actuating system with multiple thrusters that are larger than the ROV's degree of freedom. In the redundant actuating system, there are several solutions for a specific ROV motion to be performed. Therefore, a thrust allocation algorithm that considers the entire propulsion system should be regarded as important. First, this paper describes the propulsion system of the ROV and introduces the thrust allocation method of each motion controller. In addition, the performance of the controller is examined using a heading angle and depth keeping control test in a stationary state.

1. 서 론

선박해양플랜트연구소와 레드윈테크놀로지(주)는 수중건설작업을 지원하기 위한 경작업용 ROV(Remotely operated vehicle), URI-L을 개발 중이다. 여기서 경작업은 수중 건설작업에서 요구되는 다양한 소규모 작업(경량물체 이동, 소형 작업틀을 이용한 작업, 수중지형정보 제공 등)을 의미하며, 경작업용 ROV는 원활한 수중작업을 위해 특정 자세 유지 및 다양한 동작 수행 능력이 요구된다. 이를 위해, URI-L은 움직일 수 있는 자유도보다 추진기 수가 많은 과구동기 시스템(Redundant actuating system)으로 개발되었다. 이러한 과구동기 시스템의 경우 특정 운동을 수행하기 위한 다양한 해법이 존재하므로, 추진 시스템(Propulsion system) 전체를 고려한 추력배분(Thrust allocation) 알고리즘이 중요하게 다루어져야 한다.

과구동기 시스템은 다음과 같은 특징을 가지고 있다(Johansen and Fossen, 2013).

- (1) 내고장성(Fault tolerance)과 추력배분을 위한 여분(Redundancy)의 작동기를 보유하고 있다.
- (2) 단일 작동기로 수행되는 운동을 여러 작동기의 작은 제어 입력으로 동일하게 수행 가능하므로, 단일 작동기의 부하를 줄일 수 있다.
- (3) 과구동기 시스템은 다수의 작동기를 가지지만, 추력을 배분하는 상위 제어기에서 전체 시스템의 자유도 수와 동일한 힘과 모멘트 τ 로 표현 가능하다. 이 경우 상위 제어기는 τ 의 제약 조건을 고려해야 한다.
- (4) 원하는 운동을 수행하기 위한 개별 운동에 대한 별도의 하위 제어기가 존재 한다. 특정 작동기는 여러 하위 제어기에 관여할 수 있으므로 중복되어 사용될 수 있다. 이 경우 특정 작동기에 과도한 부하가 발생할 가능성이 있다.
- (5) 최적 제어의 틀에서 가중치 행렬을 적절히 선택한 추력배분을 통해 제어 성능의 손실 없이 요구하는 운동 제어가 가능하다(Harkegard and Glad, 2005).

Received 7 August 2017, revised 14 February 2018, accepted 14 February 2018

Corresponding author Kihun Kim: +82-42-866-3814, khkim@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5852-3347

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE 2017 in Busan.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

과구동기 시스템의 제어력을 할당하기 위한 추력배분은 항공 (Oppenheimer and Doman, 2007) 및 우주(Henrik, 2005) 그리고 선박(Berge and Fossen, 1997; Fossen and Johansen, 2006; Ji and Kim, 2012) 및 수중로봇(Garus, 2004; Whitcomb and Yoerger, 1999) 분야뿐만 아니라, 자동차, 보행로봇, 멀티로봇(Pedrami et al., 2009)과 같은 다른 여러 분야로 확대되고 있는 추세이다. 또한 특정 작동기에 문제 발생시 나머지 작동기에 제어력을 재할당하는 추력 재배분 기법에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다 (Shen et al., 2017).

본 논문에서는 10개의 추진기를 가지는 경작업용 ROV의 6자유도 운동을 구현하기 위한 방법에 대해 다루고자 한다. 2장에서 다수의 수직·수평 추진기를 가지는 경작업용 ROV와 그 추진 시스템에 대해서 설명한다. 3장에서는 과구동기 시스템인 ROV의 운동을 제어하기 위해 설계된 제어기에 대해 소개한다. 이상적인 상태의 ROV를 대상으로 추진기 배치 행렬을 이용한 상위 추력배분 제어기와 ROV의 개별 운동을 제어하기 위한 하위 운동 제어기에 대해 설명하고 전체 제어기 구성을 제시한다. 4장에서는 이상적인 상태를 가정하고 설계된 제어기에 대한 성능을 확인하기 위해 ROV가 정지한 상태에서 선수각 및 수심 제어를 동시에 수행한 실험 결과를 고찰한다.

2. 다수의 수직·수평 추진기를 지닌 ROV

경작업용 ROV는 수중 건설에 필요한 다양한 경작업, 모니터링, 시공전후 해저면 정밀 매핑, 각종 유지보수 등의 작업이 가능하도록 개발 중인 수중로봇으로 그 외형은 Fig. 1과 같다. 본 연구의 ROV는 수중의 경작업을 위한 로봇 팔(Manipulator)을 전방에 2개 장착하였으며 각종 항법 센서와 주변 환경을 인지하기 위한 어라운드 뷰 카메라와 장애물 탐지 소나, 전방 주사 이미징 소나와 멀티빔 이미징 소나를 탑재하고 있다. ROV의 자세한 사양은 Table 1과 같다. 천해역에서 주기적으로 발생하는 대부분의 조류는 2knots(1.03m/s) 정도이므로 최대전진속도는 2.5knots(1.29m/s)로 설계되었다.

ROV의 운동 성능을 확보하기 위해 6자유도보다 많은 수의 추진기를 이용해 설계된 유영속도로 움직이고, 정지된 자세를 유지할 수 있도록 제작되었다. 이를 위한 ROV의 추진 시스템

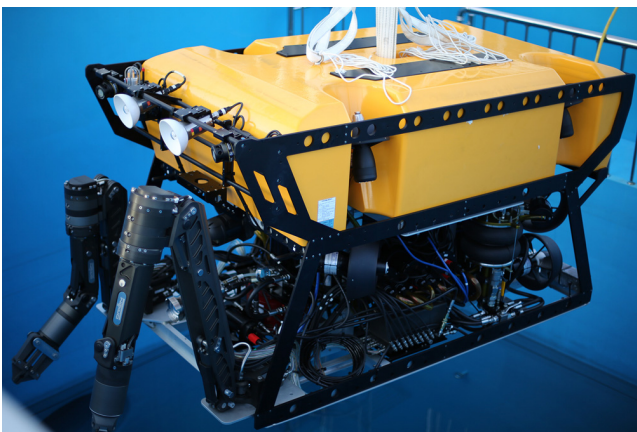


Fig. 1 Appearance of light work class ROV

Table 1 Specifications of light-work-class ROV

Item	Specifications	Item	Specifications
Design depth	3,000 m	Length	2.3 m
Working depth	2,500 m	Width	1.27 m
Forward speed	2.5 knots (1.29 m/s)	Height	1.3 m
Vertical speed	2.0 knots (1.03 m/s)	Weight	1.48 ton
Lateral speed	2.0 knots (1.03 m/s)	Payload	110 kgf

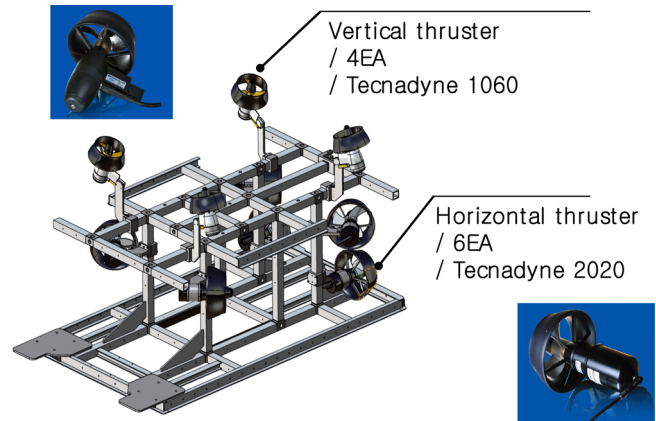


Fig. 2 Configuration of propulsion system for LWC ROV

Table 2 Specifications of vertical & horizontal thrusters

	Vertical	Horizontal
Model	Tecnadyne 1060	Tecnadyne 2020
Electric power	2.7kw	5.5kw
Forward thrust	105lbf (48 kgf)	250lbf (116 kgf)
Reverse thrust	65lbf (29.5 kgf)	160lbf (73 kgf)
Feature	DC brushless thruster Stainless steel propellers Analog or RS485 speed control	

(Propulsion system)은 Fig. 2와 같이 4개의 수직(VERTICAL) 추진기와 6개의 수평(HORIZONTAL) 추진기로 구성되어 있다. 수직 및 수평 추진기는 Tecnadyne의 전기모터 추진기로 자세한 사양은 Table 2와 같다. 정지된 상태에서 로봇 팔을 이용하여 작업할 경우 ROV의 자세에 영향을 줄 수 있기 때문에, 수직 운동에 필요한 추력을 용량이 작은 4대의 추진기로 분산 확보하여 종경사각과 횡경사각에 대한 가제어성을 확보하였다. ROV가 수평 운동을 하기 위해서는 4대의 추진기만으로도 가능하지만, 최대 전진속도를 달성하기 위해 전진방향 추력을 증가시키는 수평 추진기 2대가 후미에 배치되었다. 그리고 모든 추진기는 프로펠러 회전에 대해 반작용으로 발생하는 모멘트를 상쇄시키기 위해 인접한 추진기의 프로펠러 날의 각도(Blade angle)가 서로 상반되도록 설계되었다(Lee et al., 2017).

Fig. 3은 본 연구에서 다루고 있는 ROV의 좌표계를 도시한 결과이며, 수직 추진기와 수평 추진기는 각각 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 배치되어 있다. 여기서 수직 추진기에 경사각을 준 이유는 ROV 선체와 추진기의 간섭을 최소화하기 위함이다. 본 연구에

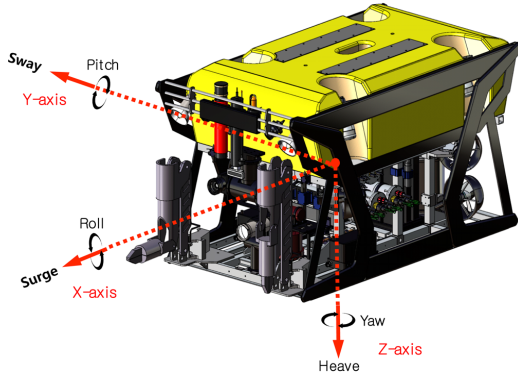


Fig. 3 Coordinate system of 6DOF ROV

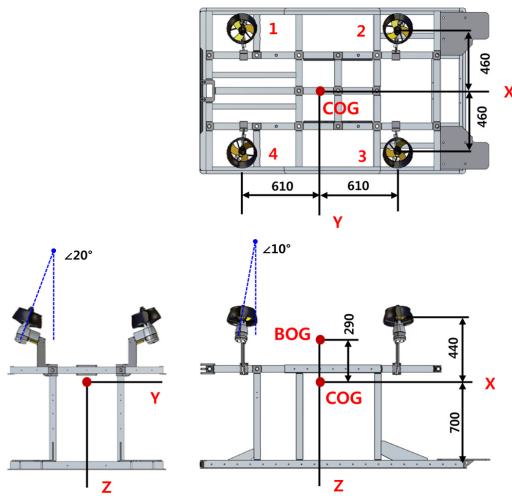


Fig. 4 Geometry of vertical thrusters

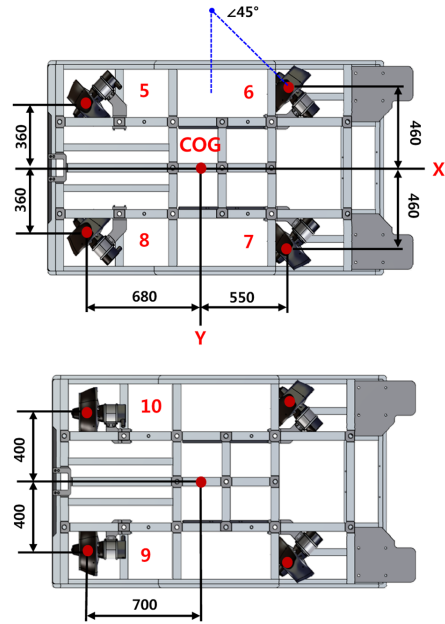


Fig. 5 Geometry of horizontal thrusters

서는 ROV의 수직 추진기와 수평 추진기는 각각 수직 운동과 수평 운동에만 영향을 준다고 가정하였다. 여기서, 수직 운동은 Heave, Roll, Pitch 방향의 운동을 의미하고, 수평 운동은 Surge, Sway, Yaw 방향의 운동을 의미한다. 또한, 수평 추진기인 9, 10번 추진기는 전진 방향 속도에만 관여한다고 가정하였다. 즉, Surge 운동 방향의 부스터 개념으로 운용되어진다.

추진기의 특성을 확인하기 위해 추진기의 PWM(Pulse width modulation) 입력에 대한 RPM(Revolution per minute) 출력 실험

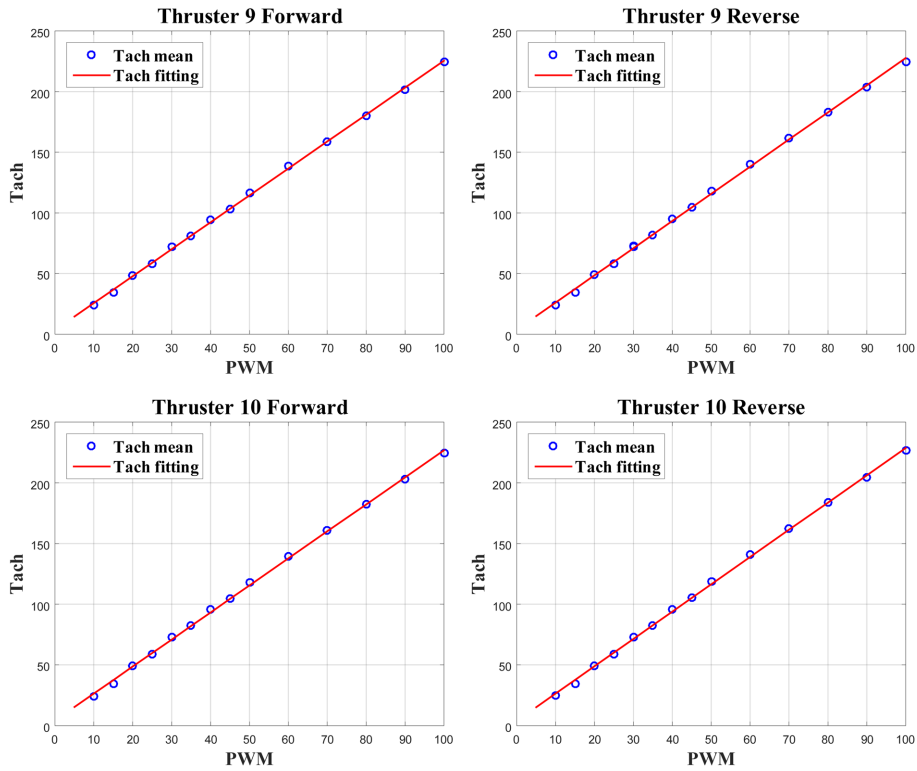


Fig. 6 PWM vs. Tachometer graph of 9 & 10 thrusters

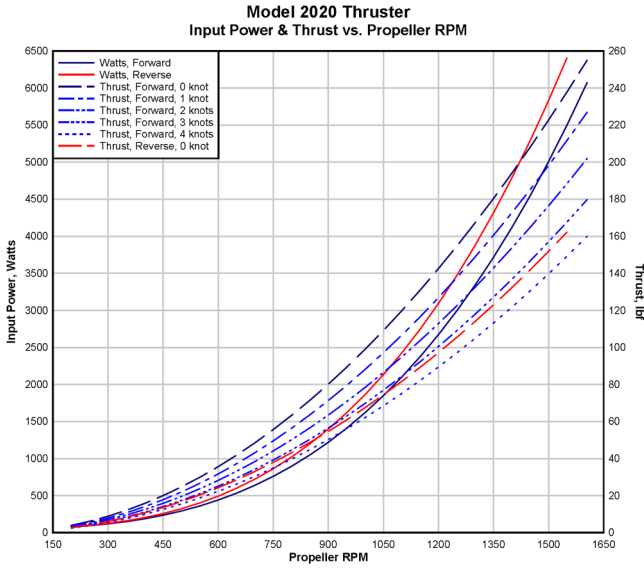


Fig. 7 RPM vs. Thrust graph of horizontal thruster

을 수행하였다(Yoon et al., 2017). 실제 추진기 출력은 초단위의 회전속도계(Tachometer)로 측정되므로 식 (1)을 통해 RPM으로 변환된다.

$$\text{Vertical thruster : RPM} = \text{Tach} \times 60 / G_v \quad (1)$$

$$\text{Horizontal thruster : RPM} = \text{Tach} \times 60 / G_h$$

여기서, G_v 및 G_h 는 수직 및 수평 추진기의 1회전 당 측정되는 회전속도계의 값을 의미하며, 각각 6과 20.1의 상수 값을 가진다.

Fig. 6은 9, 10번 추진기의 입출력 실험 결과를 나타내고 있으며, 이를 통해 PWM 입력에 대한 RPM 출력이 선형이고 정/역방향에서 동일함을 확인할 수 있다. 그러나 RPM 출력의 선형성과 별도로 추진기 프로펠러의 방향에 따라 추진기의 추력이 달라지므로, 프로펠러 정/역방향에 대한 추력 그래프를 적용하여 이를 보정할 필요가 있다. Fig. 7은 경작업용 ROV의 수평 추진기인 Model 2020의 RPM 입력에 대한 Thrust 출력 그래프이다. 동일한 RPM에서 역방향 추력은 정방향 추력의 70% 정도로 관측되므로, 동일한 추력을 발생시키기 위한 보상이 필요하다.

3. 추력배분 및 제어

경작업용 ROV는 작동기가 움직일 수 있는 자유도보다 많은 과구동기 시스템으로, 이러한 경우 추진기를 개별적으로 제어하기 보다는 통합하여 관리하는 것이 유리하다. 추력배분은 이러한 추진기 통합관리 방법 중에 하나이다(Craven et al., 1998). 본 연구에서는 추력배분을 위한 이상적인 ROV의 상태와 같이 가정하고 제어를 설계하였다.

(1) ROV 선체와 추진기는 독립되어 있으며, 상호 간의 간섭은 없다.

(2) 수직 운동과 수평 운동은 독립적인 운동이다.

(3) 수직 운동 및 수평 운동은 각각 수직 추진기와 수평 추진기에 의존적이다.

(4) ROV의 운동은 추진기의 추력 한계 내에서 구현 가능하다.

(5) ROV의 형상은 좌우 대칭이다.

ROV의 수직 운동 τ_v 와 수평 운동 τ_h 는 수직 및 수평 추진기의 추력 벡터 f_v 및 f_h 를 이용하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다(Garus, 2004).

$$\tau_v = [F_z \ M_x \ M_y]^T = T_v f_v \quad (2)$$

$$\tau_h = [F_x \ F_y \ M_z]^T = T_h f_h$$

여기서, $f_v = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_4]^T$, $f_h = [f_5 \ f_6 \ \dots \ f_8]^T$ 이며, T_v 와 T_h 는 각각 수직 및 수평 추진기 배치 행렬(Thruster configuration matrix)을 의미하고 식 (3)과 같이 계산된다.

$$T_v = \begin{bmatrix} \sin\alpha_{y1}\cos\alpha_{z1} & \dots & \sin\alpha_{y4}\cos\alpha_{z4} \\ d_{y1}\sin(\beta_{y1}) & \dots & d_{y4}\sin(\beta_{y4}) \\ d_{z1}\sin(\beta_{z1}) & \dots & d_{z4}\sin(\beta_{z4}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_h = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{x5} & \dots & \cos\alpha_{x8} \\ \sin\alpha_{x5} & \dots & \sin\alpha_{x8} \\ d_{x5}\sin(\beta_{x5}) & \dots & d_{x8}\sin(\beta_{x8}) \end{bmatrix}$$

여기서, 아래 첨자인 x, y, z 는 각각 XY 평면, YZ 평면, ZX 평면을 의미한다. d_{xi} 는 XY 평면에서 무게중심(COG)으로부터 i 번째 추진기까지의 거리이고, α_{xi} 는 XY 평면에서 X축에 대한 i 번째 추진기의 추진방향의 각도이며, β_{xi} 는 XY 평면에서 추진기의 추진방향에 대한 무게중심과 추진기를 이은 선분의 각도로 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\beta_{xi} = \pi - (\alpha_{xi} - \gamma_{xi}) \quad (4)$$

여기서, γ_{xi} 는 XY 평면에서 X축에 대한 무게중심과 추진기를 이은 선분의 각도이다. α_{xi} , β_{xi} , γ_{xi} 의 기하학적 관계는 Fig. 8과 같이 표현된다.

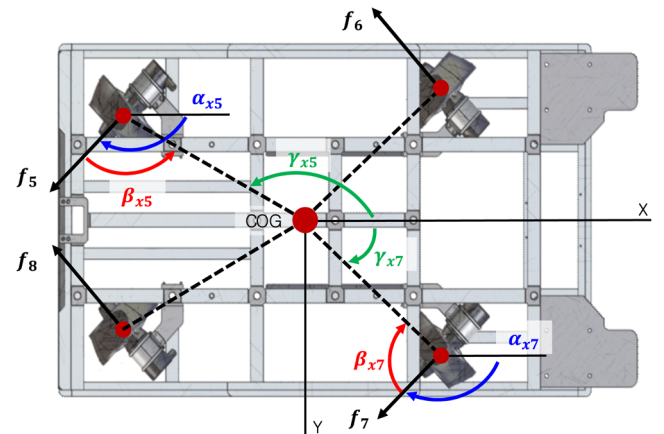


Fig. 8 Definition of β_{xi} in XY plane

계획된 수직 및 수평 운동을 개별 추진기의 추력으로 변환하기 위해서는, 식 (3)의 추진기 배치 행렬 T_v 와 T_h 을 이용하여 식 (2)의 추력 벡터 f_v 및 f_h 을 계산해야한다. ROV의 계획된 수직 및 수평 운동이 τ_v 및 τ_h 일 때, 추력의 한계를 가지는 추진기의 추력배분 문제는 다음과 같이 표현된다(Fossen and Johansen, 2006).

$$\begin{aligned} \text{minimize } J &= \frac{1}{2} f_v^T H_v f_v \\ \text{subject to } T_v f_v - \tau_v &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{minimize } J &= \frac{1}{2} f_h^T H_h f_h \\ \text{subject to } T_h f_h - \tau_h &= 0 \end{aligned}$$

이때, H_v 와 H_h 는 가중행렬로 Positive definite matrix이다.

가중행렬을 $H_v = H_h = I$ 라고 가정하면, 식 (6)을 이용하여 계산된 f_v 와 f_h 는 식 (5)의 최적해가 된다.

$$f_v = T_v^T (T_v T_v^T)^{-1} \tau_v = T_v^+ \tau_v \quad (6)$$

$$f_h = T_h^T (T_h T_h^T)^{-1} \tau_h = T_h^+ \tau_h$$

여기서, $+$ 는 의사역행렬을 의미하고, 식 (6)은 ROV의 운동을 구현하기 위해 추진기의 추력을 배분하는 상위 제어기 역할을 수행한다.

이러한 최적화 방법은 f_v 와 f_h 가 추진기의 추력 범위 내에 존재할 때에만 유효하며, 한계를 벗어나는 경우 최적해에 근접하기 위한 재배분 기법이 필요하다. 본 연구에서는 추력 범위 내에서 운동 구현이 가능하다고 가정하고, 의사역행렬을 이용하여 T_v^+ 및 T_h^+ 을 구하였다.

ROV 추진기의 기하학적 배치(Fig. 4 및 Fig. 5)를 이용하여 추진기 배치 행렬의 의사역행렬을 구한 결과는 다음과 같다.

$$T_v^+ = \begin{bmatrix} 0.2701 & -0.5170 & 0.3989 \\ 0.2701 & -0.5170 & -0.3989 \\ 0.2701 & 0.5170 & -0.3989 \\ 0.2701 & 0.5170 & 0.3989 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_h^+ = \begin{bmatrix} 0.3536 & -0.3484 & 0.3449 \\ 0.3536 & 0.3587 & 0.3449 \\ 0.3536 & -0.3587 & -0.3449 \\ 0.3536 & 0.3484 & -0.3449 \end{bmatrix}$$

과구동기 시스템인 경작업용 ROV의 운동을 제어하기 위해 추력을 배분하는 상위 제어기와 원하는 운동을 수행하기 위한 하위 제어기를 구현하였으며, 제어 블록선도는 Fig. 9와 같이 표현된다. 식 (6)의 상위 제어기에서 계산된 추진기의 추력 벡터에 의해 ROV는 운동하게 되고 그 결과가 각종 센서의 의해 측정된다. ROV의 개별 운동을 담당하는 하위 제어기는 제어목표치와 현재 데이터를 비교하여 목표치를 달성하기 위해 요구되는 ROV의 운동을 계산한다. 본 연구에서는 ROV의 선수각 및 수심을 제어하기 위한 하위 제어기를 대표적인 피드백 제어방법인 PD(Proportional-derivative) 제어기를 적용하여 설계하였다.

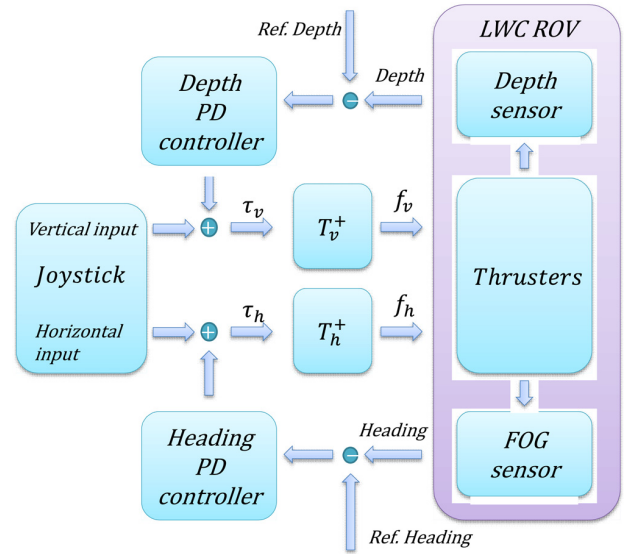


Fig. 9 Block diagram for heading and depth control

Table 3 Specifications of heading and depth sensors

Heading sensor (Advanced navigation spatial FOG)	
- Included	accelerometer, gyroscope, magnetometer
- Accuracy	Roll & Pitch : 0.01° Heading (north seeking only) : 0.25° Heading (GNSS aided) : 0.05°
Depth sensor (Paroscientific 8CB400-I)	
- Operation depth	: 4000m
- Measurement range	: 40 to 20,000 psi
- Accuracy	0.01 percent of reading above 200 psi 0.02 psi at lower pressure
- Calibrated temperature	: -2 °C to 40 °C

이때, 제어이득(Gain)은 시행 착오법(Trial and error method)을 통해 선정하였으며, 선수각 및 수심을 측정하기 위한 센서의 사양은 Table 3과 같다. 제어 블록선도에서 상위 제어기의 입력 τ_v 및 τ_h 는 하위의 PD 제어기 입력과 외부의 조이스틱 입력의 합으로 생성되도록 설계되었다. 이는 ROV의 선수각과 수심은 PD 제어기를 통해 자동으로 유지하면서, ROV의 Roll, Pitch 및 Surge, Sway 방향의 운동을 운용자가 조이스틱을 통해 조작할 수 있다는 것을 의미한다. 이 경우 특정 작동기는 중복되어 사용되어 과도한 부하가 발생할 가능성이 있지만, 본 연구에서는 추진기의 추력 한계 내에서 ROV가 운동한다고 가정한다.

4. 성능시험 결과

경작업용 RO의 추력배분 상위 제어기와 선수각 및 수심 제어를 위한 하위 제어기의 성능을 확인하기 위해, Fig. 10과 같이 포항의 수중로봇복합실증센터(UTEC)에서 수조시험을 수행하였다. 성능시험은 이상적인 상태의 ROV를 대상으로 설계된 제어기의 실제 성능을 분석하기 위해, 정지 상태에서 단일 수직운동

과 단일 수평운동을 다음의 2가지 방법으로 수행하였다.

- (1) 수심 목표치 고정 상태에서 선수각 목표치 변경(Fig. 11)
- (2) 선수각 목표치 고정 상태에서 수심 목표치 변경(Fig. 12)

Fig. 11은 목표 수심이 2.5m로 고정 된 상태에서 목표 선수각을 변경한 결과이다. 선수각의 목표치는 110°와 270°로 반복적으로 설정되었으며, 약 15초 이후에 5°이내로 목표치에 수렴하였음을 확인할 수 있다. 이때, 수심은 $\pm 0.2\text{m}$ 정도의 오차로 제어되고 있음을 관측할 수 있다. 참고로 1200초 부근에서 선수각의 목표치가 일시적으로 27°로 설정되어 ROV가 실제로 반응하였다. 제어입력의 경우 역방향의 최대 추력을 기준으로 정방향의 추력을 제한하였기 때문에 정역방향의 PWM 값이 다르게 나오고 있다. 수심의 변화 없이 선수각만 변경했기 때문에, 속도

를 확인할 수 있다. 이때, 수심은 $\pm 0.2\text{m}$ 정도의 오차로 제어되고 있음을 관측할 수 있다. 참고로 1200초 부근에서 선수각의 목표치가 일시적으로 27°로 설정되어 ROV가 실제로 반응하였다. 제어입력의 경우 역방향의 최대 추력을 기준으로 정방향의 추력을 제한하였기 때문에 정역방향의 PWM 값이 다르게 나오고 있다. 수심의 변화 없이 선수각만 변경했기 때문에, 속도

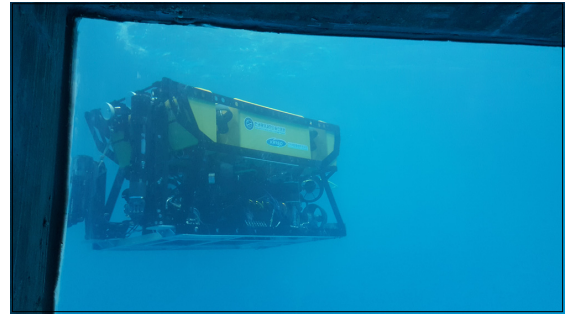
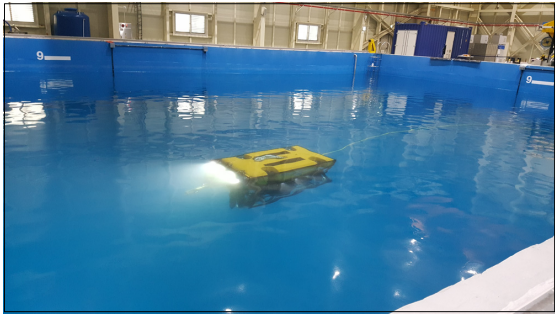


Fig. 10 Test scene in basin of UTEC

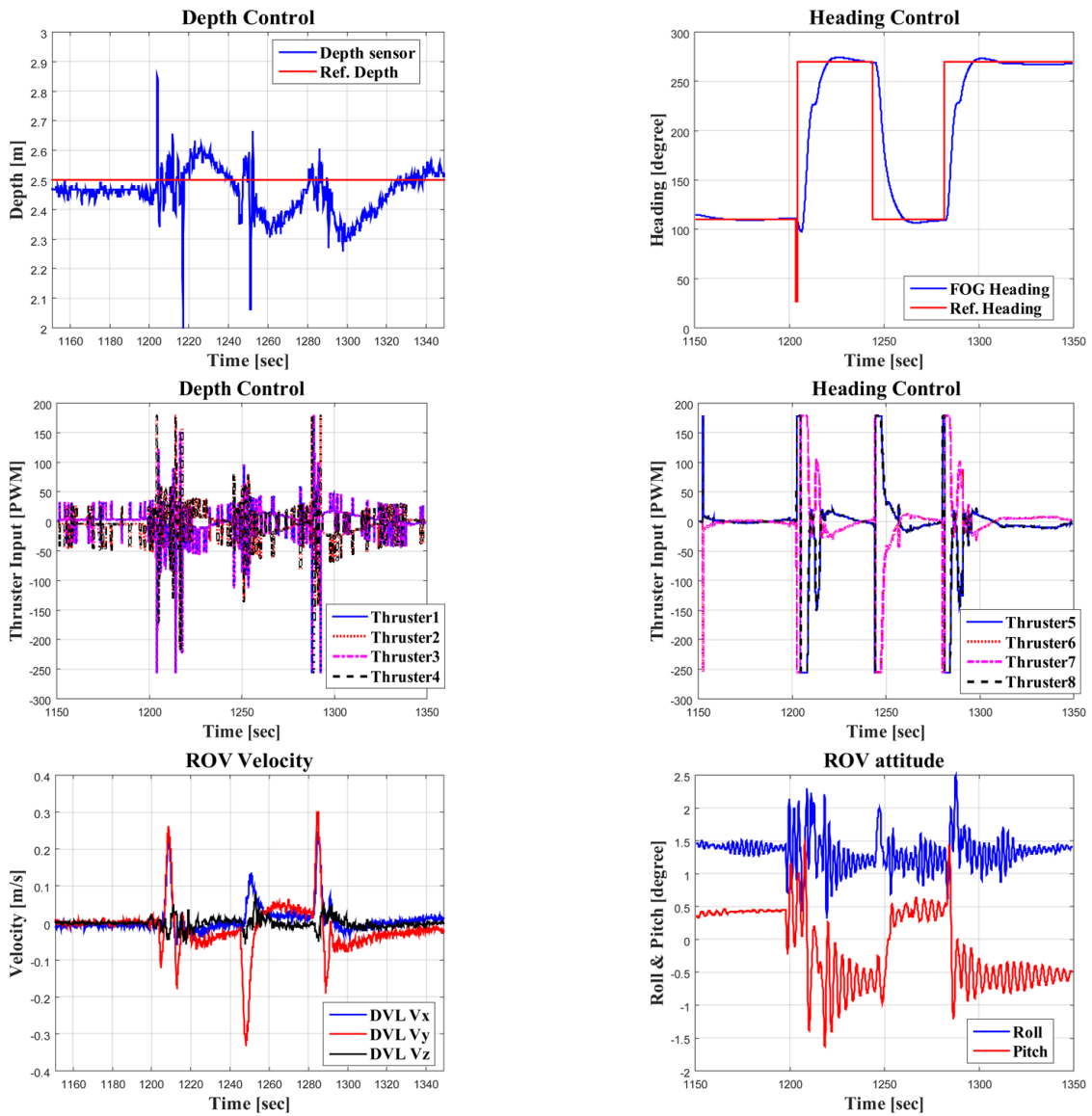


Fig. 11 Experiment data with changed reference heading and fixed reference depth

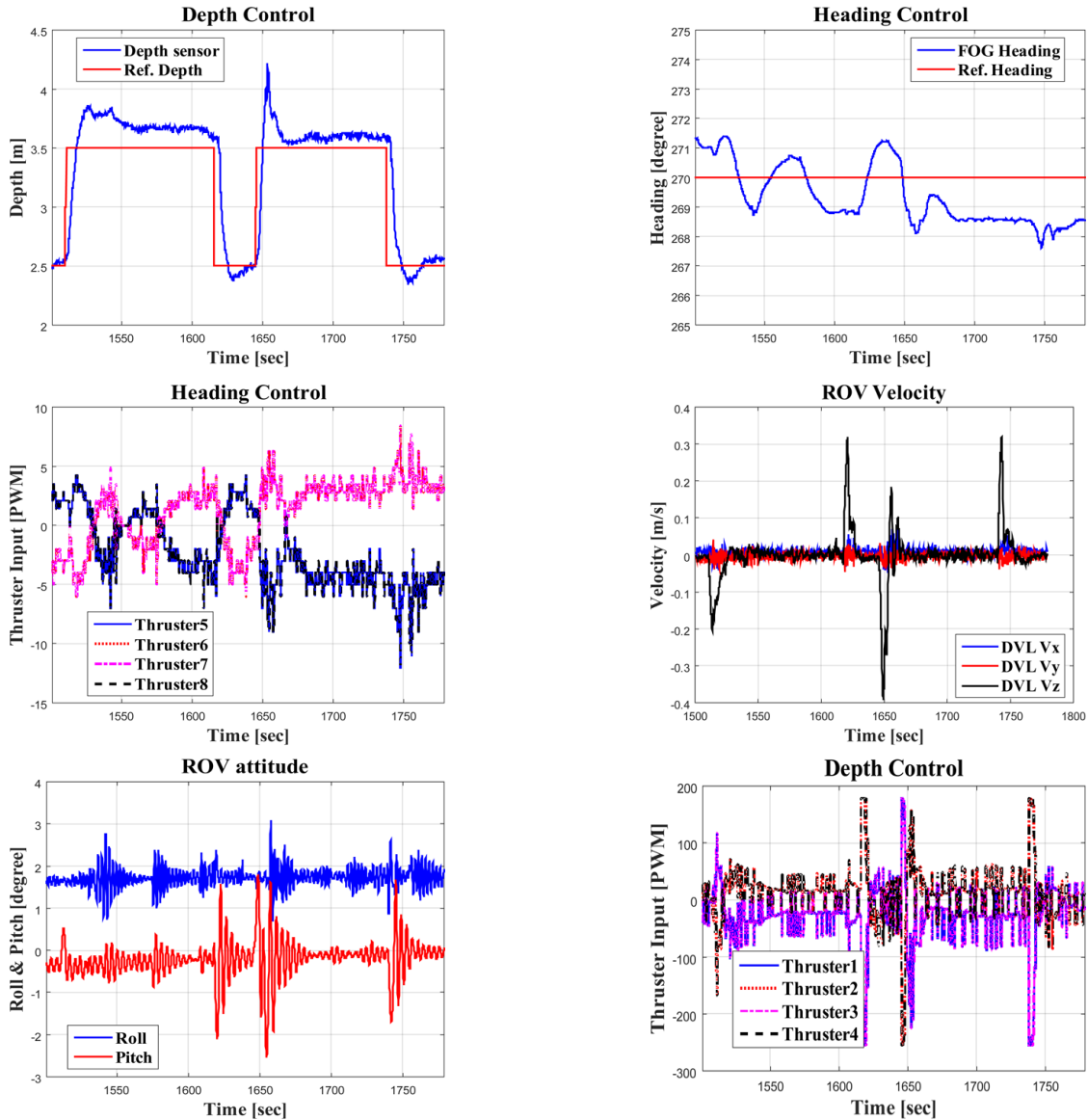


Fig. 12 Experiment data with fixed reference heading and changed reference depth

그래프에서 큰 폭으로 변하는 Y축 속도와 거의 변동이 없는 Z축 속도를 관측할 수 있다. 이 시험의 특이점은 우측 방향으로 선회시에는 230°부근에서 일시적인 언더슈트가 관측되지만 좌측 방향으로 선회시에는 관측되지 않는다는 점으로, Pitch 데이터에서도 우측방향 선회와 좌측방향 선회시의 특징이 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 전방에 장착된 로봇팔에 영향을 받은 것으로 예상되며, 추후 이러한 ROV의 특징을 추력배분시에 고려하고자 한다. 제어시 언더슈트가 발생하는 이유는 반복적인 선수각의 변화는 ROV의 작업에 방해가 되므로 이를 억제하는 방향으로 제어이득을 설정하였기 때문이다.

Fig. 12는 목표 선수각을 270°로 고정 한 상태에서 목표 수심을 변경한 결과이다. 이때, 수심의 목표치는 2.5m와 3.5m로 반복적으로 설정되었다. 제어결과로부터 상승 및 하강시의 제어 특성이 매우 다르다는 것을 확인 할 수 있으며, 하강시에 비해 상승시의 제어 성능(정착시간, 오버슈트, 오차 등)이 더 양호함을 관측 할 수 있다. 상승 및 하강시 특성이 다른 원인은 프로

펠러 정/역방향에 의한 추력 차이로 예상되며, 수심 제어시 정상상태 오차는 I 제어를 적용하여 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 반복적으로 수심이 변경되는 동안, 선수각은 상대적으로 매우 작은 제어입력만으로 $\pm 3^\circ$ 이내에서 제어되고 있음을 관측할 수 있다. 선수각의 변화 없이 수심만 변경했기 때문에, 속도 그래프에서 큰 폭으로 변하는 Z축 속도와 거의 변동이 없는 X, Y축 속도를 관측할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 과구동기 시스템인 경작업용 ROV의 운동을 제어하기 위해 추력을 배분하는 상위 제어기와 선수각 및 수심 제어를 위한 하위 제어기를 구현하고, 이를 적용한 성능시험 결과를 제시하였다.

경작업용 ROV는 수중에서 정지된 자세로 작업하기도 하고 탐사를 위해 일정한 자세를 유지하면서 이동하기도 한다. 이러

한 작업을 수행하기 위해서는 ROV의 자세가 우선적으로 제어되어야 한다. 이를 위해, 경작업용 ROV의 추진 시스템에 대해 설명하고 추진기의 특성 분석을 위한 입출력 실험을 수행하였다. 경작업용 ROV는 작동기가 움직일 수 있는 자유도보다 많은 과구동기 시스템이므로, 이를 통합 관리하기 위해 추력배분기법을 적용한 상위 제어기로 원하는 운동을 개별 추진기의 추력으로 배분하였다. 또한, ROV의 선수각 및 수심을 제어하기 위한 하위 제어기에 PD 제어기를 적용하여 수조에서 2가지 방법으로 실험을 수행하였다. 실험결과로부터 정지 상태에서 선수각 및 수심이 각각 $\pm 5^\circ$, $\pm 0.2\text{m}$ 정도의 오차를 가지며 제어되지만, 운동 방향에 따른 특성이 다름을 확인할 수 있었다.

향후에는 ROV의 조종성 향상을 위하여 종경사각 제어, 경로 제어, 속도제어, 외란 중 위치유지 기능 등을 개발할 예정이다. 또한 과구동기 시스템의 장점을 활용하기 위하여 추력 재배분 및 내고장성에 대한 연구를 수행할 계획이다. 이는 특정 추진기가 추력 한계를 벗어나거나 고장 등의 문제 발생 상황에서 다른 추진기의 여유(Redundancy) 추력을 이용하는 것으로, ROV 운용에 있어 응급 상황에서 필수적인 요소이다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D 사업인 ‘수중건설로봇공통기술 및 경작업용 ROV 기술개발’에 의해 수행되었습니다 (PMS3700).

References

- Berge, S., Fossen, T.I., 1997. Robust Control Allocation of Overactuated Ship: Experiments with a Model Ship. IFAC Proceedings Volumes, 30(22), 193-198.
- Craven, P.J., Sutton, R., Burns, R.S., 1998. Control Strategies for Unmanned Underwater Vehicles. The Journal of Navigation, 51(1), 79-105.
- Fossen, T.I., Johansen, T.A., 2006. A Survey of Control Allocation Methods for Ships and Underwater Vehicles. In 14th Mediterranean Conference on Control and Automation.
- Garus, J., 2004. Optimization of Thrust Allocation in the Propulsion System of an Underwater Vehicle. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 14(4), 461-467.
- Harkegard, O., Glad, T., 2005. Resolving Actuator Redundancy-optimal Control vs. Control Allocation. Automatica, 41(1), 137-144.
- Henrik, J., 2005. Optimal Thruster Actuation in High Precision Attitude and Orbit Control Systems. Master of Science Programme in Space Engineering, Lulea University of Technology.
- Ji, S.W., Kim, Y.B., 2012. Control Allocation and Controller Design for Marine Vessel based on H^∞ Control Approach. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(3), 20-25.
- Johansen, T.A., Fossen, T.I., 2013. Control Allocation - A Survey. Automatica, 49(5), 1087-1103.
- Lee, C.M., Kim, K.H., Yoon, S.M., Kim, S.M., Byun, S.H., Moon, Y.S., 2017. A Fundamental Test of The Underwater Construction Light Work Class ROV. Proceedings of Fall Conference of the Korean Society of Ocean Engineers 2017, Busan, 231-235.
- Oppenheimer, M.W., Doman, D.B., 2007. A Method for Including Control Effector Interaction in The Control Allocation Problems. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit.
- Pedrami, R., Wijenddra, S., Baxter, J., Gordon, B.W., 2009. A Control Allocation Approach for Energetic Swarm Control. American Control Conference, 5079-5084.
- Shen, Q., Wang, D., Zhu, S., Poh, E.K., 2017. Robust Control Allocation for Spacecraft Attitude Tracking Under Actuator Faults. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 25(3), 1068-1075.
- Whitcomb, L.L., Yoerger, D.R., 1999. Preliminary Experiments in Model-based Thruster Control for Underwater Vehicle Positioning. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 24(4), 495-506.
- Yoon, S.M., Lee, C.M., Kim, K.H., Kim, S.M., Byun, S.H., Moon, Y.S., 2017. Motion Control of a Light-work-class ROV for Underwater Working: Heading and Depth Control. Proceedings of Fall Conference of the Korean Society of Ocean Engineers 2017, Busan, 244-247.

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)

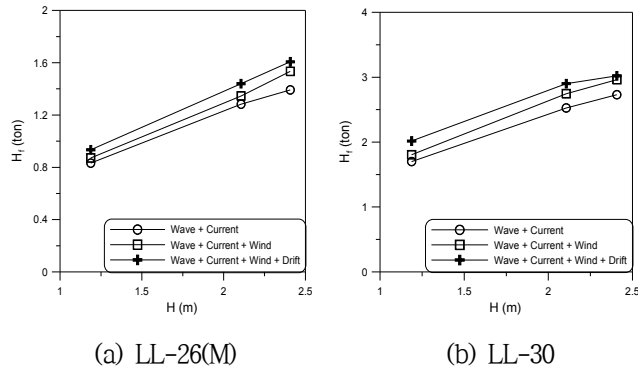


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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 파랑조건의 차이가 커서 부표의 동력학적 거동을 추정하기 위한 외삽 시 대체로 과대 평가하는 경향이 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

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

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

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

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

(example for proceedings) ⇒

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

(example for journals) ⇒

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

(example for books) ⇒

Schlichting, H., 1968. Boundary Layer Theory. 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 Communication*. 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 disclosed during review process to reviewers. The review process can be repeated till three times if the request of revision is suggested by reviewers. If the re-review is repeated more than three times, it may not be considered for publication. If two reviewers do not agree to accept the journal, it may not be also considered for publication. Usually the first review process ends within one month. Statistical Review: If there are any complicated statistical analyses in the manuscript, it may be reviewed by statistical editor.

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

Page charge

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

Editing checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Transfer of copyright

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

Authors' Checklist

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

< Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

< **Submission checklist** >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Ethical Codes of Research

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

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

A. Foundational Spirit

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

B. Fundamental Canons

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

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

C. Practical Platforms

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

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

D. The Scope of Manuscript

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

E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research

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

F. Screening System, Processing Criteria and Procedure

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

contributor a chance to defend him/herself.

2. Processing Criteria

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

3. Processing Procedure

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

G. Ethical codes of Editing

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

Supplementary Provisions

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

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

Publishing Agreement

Article details

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

YOUR STATUS

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

ASSIGNMENT OF COPYRIGHT

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

SCHOLARLY COMMUNICATION RIGHTS

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

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

Corresponding author :

name

signature

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

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

USER RIGHTS

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

The CC-BY-NC license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode>.

REVERSION OF RIGHTS

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

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

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

한국해양공학회지

제32권 제1호(통권 제140호)

인 쇄 : 2018년 2월 26일

발 행 : 2018년 2월 28일

발행인 : 윤중성

편집인 : 김윤해

발 행 소 : 사단법인 한국해양공학회

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

전 화 : (051)759-0656 FAX : (051)759-0657

담 당 : 사무국장 이희진

E - mail : ksoehj@ksoe.or.kr

Homepage : www.ksoe.or.kr

인 쇄 소 : 한림원(주)

서울특별시 중구 퇴계로51길 20 1303(오장동, 넥서스타워)

전 화 : (02)2273-4201 FAX : (02)2179-9083

E - mail : hanrim@hanrimwon.co.kr



사단법인 **한국해양공학회**
The Korean Society of Ocean Engineers