

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

한국해양공학회지

제32권 제3호 (통권 제142호)

2018년 6월

Journal of Ocean Engineering and Technology



Vol. 32, No. 3 (Serial Number 142)
June 2018

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장

김윤해 한국해양대학교

편집이사

정준모 인하대학교

신성원 한양대학교

안석환 중원대학교

최형식 한국해양대학교

편집위원

강희진 한국해양과학기술원

고대은 동의대학교

권순철 부산대학교

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

김현식 동명대학교

남보우 한국해양과학기술원

류용욱 부경대학교명

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

백광준 인하대학교

송창용 목포대학교

윤현규 창원대학교

이우동 경상대학교

이중현 제주대학교

이탁기 경상대학교

임영섭 서울대학교

정동호 한국해양과학기술원

정세민 조선대학교

하태민 강원대학교

허정원 전남대학교

국제저문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Gökhan Tansel, Tayyar Istanbul Technical University

Hooi-Siang Kang, Universiti Teknologi Malaysia

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

Norimi Mizutani, Nagoya University

연구윤리위원회

위원장

서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원

구원철 인하대학교

윤현규 창원대학교

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

Hee Jin Kang, KRISO, Korea

Daeun Ko, Dong-Eui University, Korea

Soonchul Kwon, Pusan National University, Korea

Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea

Younghun Kim, Kyungnam University, Korea

Jinwhan Kim, KAIST, Korea

Hyun-Sik Kim, Tongmyoung University, Korea

Bo Woo Nam, KRISO, Korea

Yong Uk Ryu, Pukyong National University, Korea

Kyung-Man Moon, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Jong Chun Park, Pusan National University, Korea

Kwang-Jun Paik, Inha University, Korea

Chang Yong Song, Mokpo National 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

Jeong Se-Min, Chosun University, Korea

Taemin Ha, Kangwon National University, Korea

Jungwon Huh, Chonnam National University, Korea

International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Gökhan Tansel, Tayyar Istanbul Technical University, Turkey

Hooi-Siang Kang, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Norimi Mizutani, Nagoya University, Japan

Research and Ethics Boards

Chief

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Management and Deliberative and Education Department

Weoncheol Koo, Inha University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, 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; Offshore process systems engineering;

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 June 30, 2018 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제32권 제3호 (통권 제142호)

2018년 6월

<학술논문>

스펙트럼을 이용한 피로손상도 계산과정 최적화 연구 김상우 · 이승재 · 최솔미	151
컨테이너 선박의 셀 가이드 정도 관리 시스템 개발 박봉래 · 김현철	158
수치 민감도 해석을 통한 파랑중 FPSO운동 시뮬레이션 김제인 · 박일룡 · 서성부 · 강용덕 · 홍사영 · 남보우	166
유빙 하중을 받는 계류된 반잠수식 시추선의 응답해석 김정환 · 김유일	177
깨어진 해빙의 사항조건에서 빙 하중 추정법 연구 김현수 · 이재빈	184
부산신항 건설이 진우도 주변 해저지형 변화에 미치는 영향 - 수치실험을 통한 정성적 평가 홍남식	192
부유식 가변 피치형 수직축 풍력발전기의 발전효율에 관한 실험 연구 김재희 · 조효제 · 황재혁 · 장민석 · 이병성	202
포텐셜함수 기반 초공동 수중운동체 플레잉 회피 제어 연구 김선홍 · 김낙완 · 김민재 · 김종혁 · 이진철	208
<논문정정>	
FLNG개념설계 단계에서 SMR 및 DMR 액화공정의 잠재적 폭발위험도 비교 유원우 · 채민호 · 박재욱 · 임영섭	213

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 32, Number 3

June, 2018

<Original Research Articles>

- Study on Optimization of Fatigue Damage Calculation Process Using Spectrum
Sang Woo Kim, Seung Jae Lee and Sol Mi Choi 151
- Development of Cell Guide Quality Management System for Container Ships
Bong-Rae Park and Hyun-Cheol Kim 158
- Motion Simulation of FPSO in Waves through Numerical Sensitivity Analysis
Je-in Kim, Il-Ryong Park, Sung-Bu Suh, Yong-Duck Kang, Sa-Young Hong and Bo-Woo Nam 166
- Numerical Simulation on the Response of Moored Semi-submersible Under Ice Load
Jeong-Hwan Kim and Yooil Kim 177
- Estimation Method for Ice load of Managed Ice in an Oblique Condition
Hyunsoo Kim and Jae-bin Lee 184
- Morphological Change in Seabed Surrounding Jinwoo-Island Due to Construction of New Busan Port
- Qualitative Evaluation through Numerical Simulation
Namseeg Hong 192
- Experimental Study on Efficiency of Floating Vertical Axis Wind Turbine with Variable-Pitch
Jae-Heui Kim, Hyo-Jae Jo, Jae-Hyuk Hwang, Min-Suk Jang and Byeong-Seong Lee 202
- Planing Avoidance Control for a Supercavitating Underwater Vehicle Based on Potential Functions
Seonhong Kim, Nakwan Kim, Minjae Kim, Jonghoek Kim and Kurnchul Lee 208
- ### <Corrigendum>
- Potential Explosion Risk Comparison between SMR and DMR Liquefaction Processes at
Conceptual Design Stage of FLNG
Wonwo You, Minho Chae, Jaek Park and Youngsub Lim 213

Study on Optimization of Fatigue Damage Calculation Process Using Spectrum

Sang Woo Kim^{id*}, Seung Jae Lee^{id*} and Sol Mi Choi^{*}

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

스펙트럼을 이용한 피로손상도 계산과정 최적화 연구

김상우^{id*} · 이승재^{id*} · 최솔미^{*}

^{*}한국해양대학교 조선해양시스템공학부

KEY WORDS: Fatigue damage model 피로손상모델, Correction coefficient method 수정계수법, Fourier transform 푸리에 변환, High frequency response 고주파수 응답, Rain-flow counting method 레인플로우집계법

ABSTRACT: Offshore structures are exposed to low- and high-frequency responses due to environmental loads, and fatigue damage models are used to calculate the fatigue damage from these. In this study, we tried to optimize the main parameters used in fatigue damage calculation to derive a new fatigue damage model. A total of 162 bi-modal spectra using the elliptic equation were defined to describe the response of offshore structures. To calculate the fatigue damage from the spectra, time series were generated from the spectra using the inverse Fourier transform, and the rain-flow counting method was applied. The considered optimization variables were the size of the frequency increments, ratio of the time increment, and number of repetitions of the time series. In order to obtain optimized values, the fatigue damage was calculated using the parameter values proposed in previous work, and the fatigue damage was calculated by increasing or decreasing the proposed values. The results were compared, and the error rate was checked. Based on the test results, new values were found for the size of the frequency increment and number of time series iterations. As a validation, the fatigue damage of an actual tension spectrum found using the new proposed values and fatigue damage found using the previously proposed method were compared. In conclusion, we propose a new optimized calculation process that is faster and more accurate than the existed method.

1. 서 론

해양 석유자원 생산용 해양구조물은 운영되는 동안 파랑, 조류 등 다양한 동적 하중에 노출된다. 이러한 하중들로 인해 발생하는 구조물의 응력, 장력 등의 응답들을 주파수 영역의 스펙트럼으로 나타내면, 두 개 이상의 주파수 성분으로 구성된 다봉형 스펙트럼이 된다. 특히, 라이저의 와류유기진동, 인장각식 구조물(Tension leg platform)의 스프링잉과 같은 고주파수 응답특성은 구조물의 응답스펙트럼을 광대역으로 만든다. 동적 하중에 의해 발생하는 구조물의 피로손상도를 비교적 빠르게 계산하기 위해서는 구조물의 응답 스펙트럼과 피로손상모델을 사용하여 통계학적 피로 분석법을 사용한다(DNV, 2010b). 이 방법을 통상 주파수 영역 피로해석이라 부르며, 정확한 주파수 영역 피로해석을 위해서는 해당 구조물의 응답 특성에 적절한 통계

모델을 사용해야 한다. 통상적으로 사용되는 피로손상모델들은 단일 피크나 연속형 스펙트럼에는 적절하나, 고주파수를 포함한 다봉형 응답 특성을 보이는 해양구조물에 대한 피로손상평가에는 적합하지 않은 면이 있다(Kim et al., 2016). 그러므로 고주파수, 다봉형 응답 특성을 갖는 구조물의 피로손상도를 평가하는 통계적 모델의 개발이 필요하다.

광대역 스펙트럼의 피로손상도 계산에 적절한 피로손상모델 개발에는 대표적으로 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 확률밀도 조합법으로, 응답의 시계열에 레인플로우집계법(Matsuishi and Endo, 1968)을 사용하여 집계한 응력 범의의 확률밀도분포를 여러 종류의 함수를 사용하여 유도하는 방법이다. 대표적인 확률밀도함수조합법에는 광대역 및 협대역 스펙트럼을 대상으로 개발된 Dirlik모델(Dirlik, 1985), 이봉형 스펙트럼의 피로손상 계산에 사용되는 Zhao-Baker 모델(Zhao and Baker, 1992), 그리고 삼

Received 13 April 2018, revised 5 May 2018, accepted 7 June 2018

Corresponding author Seung Jae Lee: +82-051-410-4309, slee@kmou.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8992-6915

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of SNAME 2017 in Houston, America

© 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.

봉형 스펙트럼을 대상으로 개발된 Park et al. 모델(Park et al., 2014)이 있다. 또 다른 방법인 수정계수법은 협대역 스펙트럼의 피로손상도를 결정하는 Rayleigh 방법에 수정계수를 곱하여 광대역 스펙트럼의 피로손상도를 평가하는 방법이다. 수정계수법을 사용하여 개발된 대표적인 모델에는 이봉형 스펙트럼을 대상으로 개발한 Jiao-Moan 모델(Jiao and Moan, 1990), 협대역 및 광대역 스펙트럼에 적합한 Benasciutti-Tovo 모델(Benasciutti and Tovo, 2005), Wirsching and Light 모델(Wirsching and Light, 1980) 등이 있다.

수정계수법을 이용하여 새로운 피로손상모델을 유도할 때에는 스펙트럼으로부터 대표피로손상도를 계산하는 과정이 필요하며, 선행연구들(Dirlik, 1985; Park et al., 2011)에서 제안된 바 있다. 그러나 기존의 방법은 정확도 높은 피로손상도 계산을 위해 많은 반복 계산이 수행되어 와류유기진동, 스프링잉과 같은 해양구조물의 고주파수 응답까지 포함하게 되면 상대적으로 많은 시간이 소요된다. 따라서 해양구조물 전용 피로손상모델을 개발하는 경우, 기존의 계산 과정보다 계산속도가 빠르면서도 높은 정확도를 유지하는 새로운 스펙트럼 대표피로손상도 계산 방법이 필요하다.

본 연구에서는 기존 방법에서 사용된 변수들을 최적화하기 위해 매개변수 연구를 수행하였다. 최적화 연구를 위해서 실제 해양구조물의 다봉형 응답을 묘사한 다양한 종류의 이봉형 스펙트럼을 생성하였으며, 생성된 스펙트럼들의 대표피로손상도는 시간영역 피로손상도계산법을 사용하여 계산하였다. 최적화 대상 변수는 스펙트럼으로부터 대표피로손상도를 계산하는 과정에서 소요되는 시간에 관련된 변수 3개를 선정하였다. 선정된 변수마다 기준값을 정의하고 이 값을 사용하여 계산된 피로손상도와 변화된 변수값을 사용하여 계산된 피로손상도를 비교하여 오차정도를 확인하며 변수의 최적화값을 결정하였다. 연구 결과를 검증하기 위해, 실제 스펙트럼의 피로손상도를 제안된 변수값과 기존의 방법을 사용하여 계산된 피로손상도와 비교하였다.

2. 연구 방법론

2.1 개요

연구에 사용된 이상화된 스펙트럼들은 총 162개로, 스펙트럼을 구성하는 세부 변수들을 조절하여 생성되었으며, 스펙트럼들의 대표피로손상도는 시간영역 피로손상도계산법을 사용하여 계산하였다. 시간영역 피로손상도계산법은 우선, 푸리에 역변환(Inverse fourier transform)을 사용하여 스펙트럼으로부터 시계열을 반복 생성한 뒤, 생성된 시계열에 레인플로우집계법을 적용하여 응력범위와 빈도수를 결정하고, 집계된 응력의 빈도수와 최대 파단 빈도수의 비를 집계된 모든 응력에 대해 계산하여 더하는 선형 누적법(Miner, 1945)을 사용하여 스펙트럼의 피로손상도를 계산하였다.

최적화 대상 매개변수는 푸리에 역변환에 사용되는 시간 증분(dt) 비율, 주파수 증분($d\omega$), 그리고 시계열의 생성 반복 횟수(R)가 있으며, 먼저 최적화된 R 의 값을 결정한 뒤 $d\omega$ 과 dt 비율을 최적화하였다. 변수의 최적화 값은 각 변수의 기준값을 일정

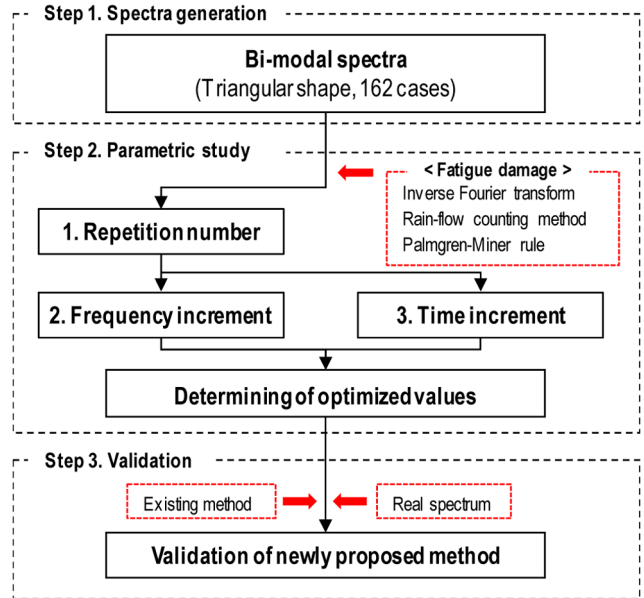


Fig. 1 Flow chart of research

간격으로 증가시키거나 감소시켜 계산된 피로손상도와 기준값을 사용하여 계산된 피로손상도를 비교하여 변수변화에 따른 오차율을 확인한 뒤 결정하였으며, 기준값은 선행연구를 참고하여 결정하였다.

최적화된 변수들을 검증하기 위해서 선행연구(Park et al., 2011)에서 제안한 방법과 비교하였다. 이를 위해 실제 부유식 저장설비(FSU, Floating storage unit)와 계류시스템의 연성 해석을 통해 얻은 계류라인의 장력 스펙트럼에 두 방법을 사용하여 피로손상도를 계산 비교하였다.

이상에서 설명한 본 연구의 진행순서는 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 푸리에 역변환

스펙트럼으로부터 시계열을 생성하기 위한 방법인 푸리에 역변환은 식 (1)-(3)와 같이 정의된다(Newland, 1993).

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S(\bar{\omega}_i)} d\omega \cos(\bar{\omega}_i t + \theta_i), \quad 0 \leq \theta_i \leq 2\pi \quad (1)$$

$$d\omega = \omega_i - \omega_{i-1} \quad (2)$$

$$\bar{\omega}_i = \frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2} \quad (3)$$

여기서 $X(t)$ 는 푸리에 역변환으로 생성되는 시계열, n 은 주파수 성분의 개수, 그리고 $S(\bar{\omega}_i)$ 는 i 번째 주파수 성분의 스펙트럼 밀도 값을 의미한다. 그리고 $\bar{\omega}_i$ 는 i 번째 평균 주파수, 그리고 θ_i 는 i 번째 주파수 성분의 무작위 위상각을 의미한다. 스펙트럼으로부터 생성되는 시계열 길이 즉, 앙상블 시간(t)의 경우, 통상적으로 계류된 부유체의 운동해석을 수행할 때, 저주파수(Low frequency) 그리고 파주파수(Wave frequency) 성분을 충분히 포함하는 3시간을 앙상블 시간(DNV, 2010a)으로 설정하는 점을 고려하여 3시간으로 결정하였다.

2.3 변수의 기준값

선정된 변수를 최적화하기 위해서는 기존의 연구에서 제시되었던 변수값들을 기준값으로 정의하고, 기준값의 크기 변화가 피로손상도에 미치는 민감도를 확인해야 한다. 이 민감도 해석 결과를 토대로 계산시간을 줄이도록 최적화를 수행하였다.

$d\omega$ 의 크기는 스펙트럼으로부터 생성되는 시계열의 에너지 손실 정도에 영향을 주는데, 그 크기가 과도하게 크면 에너지 손실이 발생할 수 있으며, 너무 작은 값을 사용하면 스펙트럼으로부터 시계열을 생성하는 과정에서 시간이 과도하게 소모되므로 적절한 값을 선택하여야 한다. 양상불 시간 동안 생성되는 시계열은 불규칙 시계열이 되어야 하며, 이를 만족시키기 위해서는 식 (4)의 최대 조건을 만족하는 주파수 증분의 크기를 사용해야 한다.

$$d\omega \leq \frac{2\pi}{Ensemble\ time} = \frac{2\pi}{10800s} \cong 0.000582\ rad/s \quad (4)$$

dt 는 생성되는 시계열의 조밀도를 결정하는 변수이다. 레인플로우집계법을 사용하여 피로해석을 수행할 때 시계열의 피크(Peak)와 밸리(Valley)값의 정확도에 따라 계산되는 피로손상도가 다르다. 그러므로 dt 의 정확도는 피로해석관점에서 중요하며, 선행 연구에서는 피크와 밸리 사이에 최소 3개의 점이(Dirlik, 1985) 있어야 함을 제시하였다. 또 다른 선행연구에서는(Park et al, 2011) 식 (5)와 같이 dt 의 비율을 최소 0.08로 사용할 것을 제시하였다.

$$dt \leq \frac{dtratio \times 2\pi}{Maximum\ frequency} \quad (5)$$

2.4 통계적 특성치

가우시안(Gaussian)과정에서 주파수 영역에서 스펙트럼의 통계적 특성치 계산을 위해서는 스펙트럼밀도의 스펙트럼의 분포 정도를 나타내는 스펙트럼 모멘트 계산이 필요하며, 식 (6)과 같이 정의된다.

$$m_k = \int_0^\infty \omega^k S(\omega) d\omega \quad (6)$$

여기서 m_k 는 k 차 스펙트럴 모멘트, ω 는 주파수성분, 그리고 $S(\omega)$ 는 스펙트럼밀도이다.

가우시안과정에서 단위 시간당 피크의 빈도수인 피크주파수(Peak frequency) ν_p 와 단위 시간당 영점 교차의 빈도수인 영점상교차주파수(Zero up-crossing frequency) ν_0^+ 는 주파수 영역과 시간영역에서 각각 식 (7), 식 (8)과 같이 정의되며, 이는 4.2절에서 스펙트럼과 생성되는 시계열의 통계적 특성을 비교하는데 사용된다(Newland, 1993).

$$\nu_{p(f)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}, \quad \nu_{0(f)}^+ = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (7)$$

$$\nu_{p(f)} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{x}}}{\sigma_x}, \quad \nu_{0(f)}^+ = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{x}}}{\sigma_x} \quad (8)$$

여기서 $\sigma_x, \sigma_{\dot{x}}, \sigma_{\ddot{x}}$ 는 각각 시계열 X, \dot{X}, \ddot{X} 의 표준편차를 의미한다.

3. 이봉형 스펙트럼 및 대표피로손상도

3.1 스펙트럼 및 스펙트럼 변수

본 연구에서는 삼각뿔 2개로 이루어진 이봉형 스펙트럼을 사용하였으며, 삼각뿔 형태는 타원을 횡, 종축으로 4등분하고 각각 하나를 좌우대칭으로 배치하여 생성하였다. 스펙트럼의 형상은 Fig. 2와 같으며, 스펙트럼밀도(Spectral density)는 식 (9), 식 (10)과 같이 정의된다.

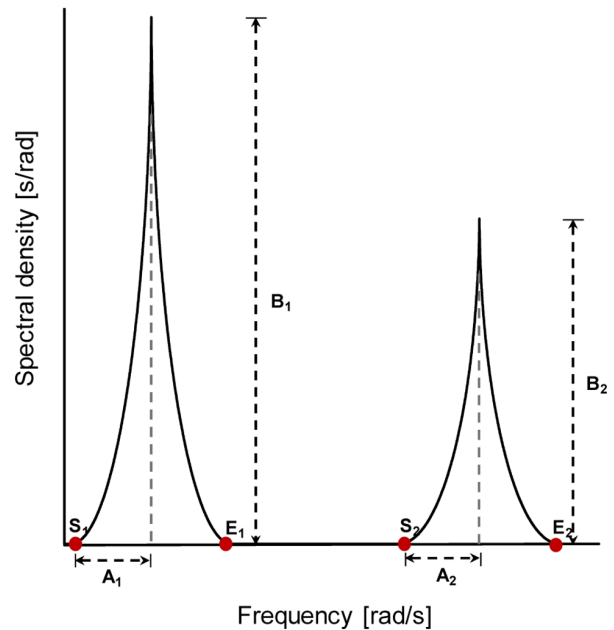


Fig. 2 Schematic of bi-modal spectrum

$$\omega < A \text{ 일 때, } S(\omega) = \sqrt{B^2 \left(1 - \frac{\omega - 0.05}{A^2}\right)^2} + B \quad (9)$$

$$\omega \geq A \text{ 일 때, } S(\omega) = \sqrt{B^2 \left(1 - \frac{-(\omega - 0.05) + 2A}{A^2}\right)^2} + B \quad (10)$$

여기서 A 와 B 는 각 삼각뿔 피크를 구성하는 타원 조각의 횡축, 종축 반지름을 뜻하며, S 와 E 는 각 피크의 시작 주파수와 끝 주파수를 의미한다. 아래 첨자는 피크의 번호를 의미하고 고려된 스펙트럼의 면적은 무차원이 되도록 변수들의 단위계를 설정하였다.

각 피크들의 위치는 해양구조물 응답의 현실적인 주파수 범위를 고려하였는데, 계류라인의 저주파수 운동은 통상적으로 최소 0.05rad/s이며 라이저 와류유기진동의 횡방향 진동으로 인한 운동 응답의 최대 주파수 범위는 9rad/s이다(Kim et al., 2016). 사용된 범값은 Table 1에 정리하였으며, 고려된 각 변수의 조합을 사용하여 총 162개의 이봉형 스펙트럼을 생성하였다.

Table 1 Spectral parameters of bi-modal spectra

Parameters	Values		
A_1, A_2 [rad/s]	0.2	0.6	1.0
B_1, B_2 [s/rad]	20	50	80
S_1 [rad/s]	0.05		
S_2 [rad/s]	$E_I \times 2$	$E_I \times 3$	

3.2 스펙트럼의 대표피로손상도

스펙트럼의 피로손상도는 2.2절에서 언급한 식 (1)-(3) 푸리에 역변환을 통해 얻은 시계열에 레인플로우 집계법과 선형 누적법을 통해 계산한다. 시계열의 레인플로우 집계법의 결과로부터 피로손상도를 계산하기 위해서 식 (11), 식 (12)의 선형 누적법이 사용된다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \tag{11}$$

$$N_i = \bar{a} S_i^{-m} \tag{12}$$

여기서 D 는 피로손상도, S_i 는 집계된 i 번째 응력범위, N_i 은 해당 응력범위에 대한 재료의 최대 사이클 횟수, 그리고 n_i 는 해당 응력범위에 집계된 사이클 횟수를 의미한다. 그리고 \bar{a} 와 m 은 재료의 파단실험을 통해 결정되는 $S-N$ 선도의 재료 상수와 기울기를 의미한다. 위의 과정을 거쳐 계산되는 D 는 한 개의 시계열의 피로손상도이다.

그러나 시계열을 반복적으로 생성해 피로손상도를 계산할 시 $d\omega$, dt 의 크기와는 무관하게, 사용된 무작위 위상각에 따라 생성되는 시계열의 형상이 달라지기 때문에 계산되는 피로손상도 값들은 달라진다. 그러므로 일정 횟수만큼 시계열을 생성하고 피로손상도를 계산한 뒤 횟수만큼 평균값을 취해야 스펙트럼을 대표할 수 있는 피로손상도를 결정할 수 있다. 그래서 기존 연구에서 제안한 스펙트럼의 대표피로손상도 계산 방법(Park et al., 2011)은 스펙트럼으로부터 3시간 시계열을 무작위 위상각 세트와 $d\omega$ 를 바꿔가며 총 20번을 생성하여 1 Block으로 정의하였다. 그리고 총 10 Block을 계산하여 10 Block의 평균값을 대표피로손상도로 정의하였다. 그러나 이 방법은 Block의 사이즈가 크고 반복 횟수가 많기 때문에 스펙트럼의 피로손상도 계산에 많은 시간이 소모된다. 본 연구에서 제안하는 방법은 식 (13)과 같이 1 Block을 3시간으로 정의하였으며, 무작위 위상각 세트를 바꿔가며 Block을 반복적으로 생성하였다.

$$D_R = \frac{\sum_{i=1}^R D_i \{Q_i(n)\}}{R} \tag{13}$$

$$Q_i(n) = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}, \theta_n \tag{14}$$

여기서 D_R 은 R 번 반복 생성된 시계열의 평균 피로손상도, D_i 은 i 번째 시계열의 3시간 피로손상도, $Q_i(n)$ 은 식 (14)와 같이 정의되는 i 번째 시계열 생성에 사용된 무작위 위상각 세트를 의미한다.

4. 변수 최적화 결과

4.1 최적화 방법

각 변수의 최적화를 위해서 2.3절에서 언급된 각 변수의 기준값을 증가 또는 감소시켜 경우를 세분화하였다. 시계열 생성 반복 횟수인 R 은 최대 50번을 기준으로 정하고 최소 10번부터 시작하여 10번씩 증가시켜 총 5개의 값을 선정하였다. 주파수 증분 $d\omega$ 은 식 (4)에서 정의된 최댓값 0.000582rad/s를 기준값으로 정하고, 0.000146rad/s씩 감소시켜 총 4개를, 그리고 시간 증분 dt 의 비율은 선행연구에서 제시한 비율인 0.08을 기준으로 0.01씩 증가시켜 총 4가지 경우를 고려하였다. 사용된 변수들은 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Values of parameters

Parameters	Values				
R	10	20	30	40	50
$d\omega$ [rad/s]	0.000582	0.000436	0.000290	0.00144	
$dtratio$	0.08	0.09	0.10	0.11	

본 연구는 실제 구조물의 피로손상도를 계산하는 것이 아닌 변수들의 변화에 따른 피로손상도의 민감도를 파악하는 것이 주목적이다. 따라서 피로손상도의 정확도와는 별개로, 응력범위에 대한 재료의 최대 사이클 횟수인, 식 (12)에서 구조의 재료 특성치를 나타내는 재료상수 \bar{a} 는 1, $S-N$ 선도의 기울기 m 은 해양구조물에 피로해석에서 통상적으로 사용되는 3과 5 두 값을 사용했다(DNV, 2011).

4.2 반복 횟수의 최적화

선정한 시계열 생성 반복 횟수 R 의 기준값 50이 적절한 기준값인지 판단하기 위해, 스펙트럼마다 50번 반복하여 생성된 시계열의 통계적 특성치를 나타내는 값인 ν_p , ν_0^+ 을 각각 식 (7)과 식 (8)을 사용하여 시간영역과 주파수영역에서 계산하고 평균을 취하여 비교한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 모든 스펙트럼에 대

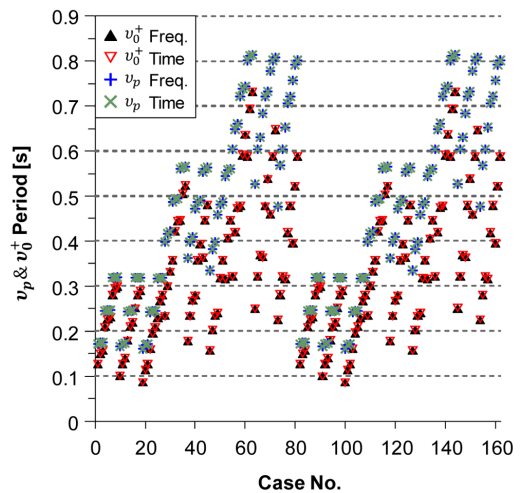


Fig. 3 ν_p and ν_0^+ comparison in time and frequency domain

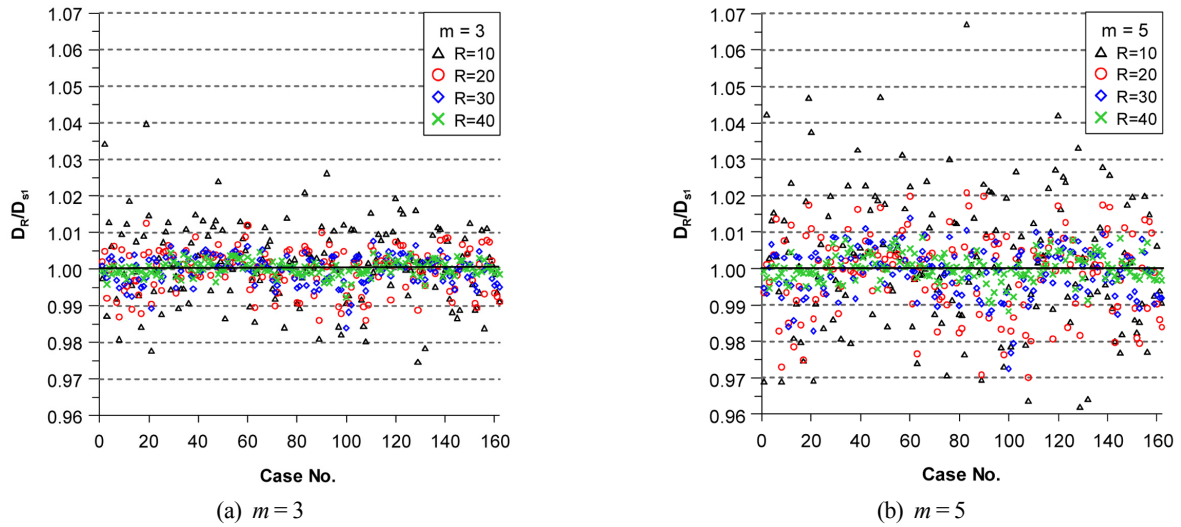


Fig. 4 Result of fatigue damages comparison according to R & m

해 계산된 ν_p, ν_0^+ 의 값이 시간영역과 주파수영역에서 일치하므로, 즉 통계적 특성치가 일치하므로, 시계열 생성 반복 횟수 기준값 50은 적절한 기준값이 될 수 있다고 판단된다.

시계열 생성 반복 횟수의 최적값을 결정하기 위해, R 은 50, 주파수 증분 $d\omega$ 와 시간 증분 dt 비율의 값들은 가장 작은 값인 0.000144rad/s와 0.08로 계산한 피로손상도를 기준 피로손상도 D_{s1} 으로 정의하였다. 그리고 시계열 생성 횟수를 50보다 작은 값인 10, 20, 30, 그리고 40의 총 4가지 값으로 변경하여 식 (13)으로 모든 스펙트럼의 피로손상도를 계산하였다. 각 반복 횟수로 계산된 피로손상도는 기준 피로손상도와 비교하였으며, $S-N$ 선도의 기울기 변화에 따른 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 세로축 값은 계산된 피로손상도 D_R 을 기준 피로손상도 D_{s1} 로 나누어 준 값을 의미하며, 이 값이 1에 가깝다는 것은 계산된 피로손상도값이 기준 피로손상도와 일치하여 최적의 반복 횟수가 결정되었음을 의미한다. 또한, 시계열 생성 반복 횟수에 상관없이 $S-N$ 선도의 기울기가 커지면 피로손상도의 편차가 커지기 때문에 통상적으로 m 이 3일 때보다 5일 경우 오차의

편차가 크다. 그러므로 선정되는 시계열 생성 반복 횟수는 기울기 값이 5일 때도 기준 피로손상도와 일치도가 높아야 한다. 결과에서 볼 수 있듯이 시계열 생성 반복 횟수가 10과 20인 경우에는 $S-N$ 선도의 기울기에 상관없이 상대적으로 오차가 크기 때문에 최적 반복 횟수로 선정하기에는 정확도가 떨어진다. 반면, 시계열 생성 반복 횟수가 30이상일 경우 오차범위 2% 이내로 기준값과 일치도가 높기 때문에 최적화 값의 범위이다. 하지만 높은 반복 횟수가 정확도를 높일 수 있으나 그만큼 추가로 계산 시간이 소요되기 때문에 정확도가 보장되면서도 시간이 상대적으로 적게 소요되는 30을 R 의 최적값으로 선정하였다.

4.3 주파수 증분 및 시간 증분 비율의 최적화

주파수 증분 $d\omega$ 와 시간 증분 dt 비율의 최적값을 결정하기 위해서, 시계열 생성 반복 횟수 R 은 최적화 값 30, 시간 증분의 비율은 0.08, 그리고 주파수 증분은 0.000144rad/s로 계산된 피로손상도를 기준피로손상도 D_{s2} 로 정의하였다. 반복 횟수의 최적화 경우와 동일하게 $S-N$ 선도의 기울기값 마다 주파수 증

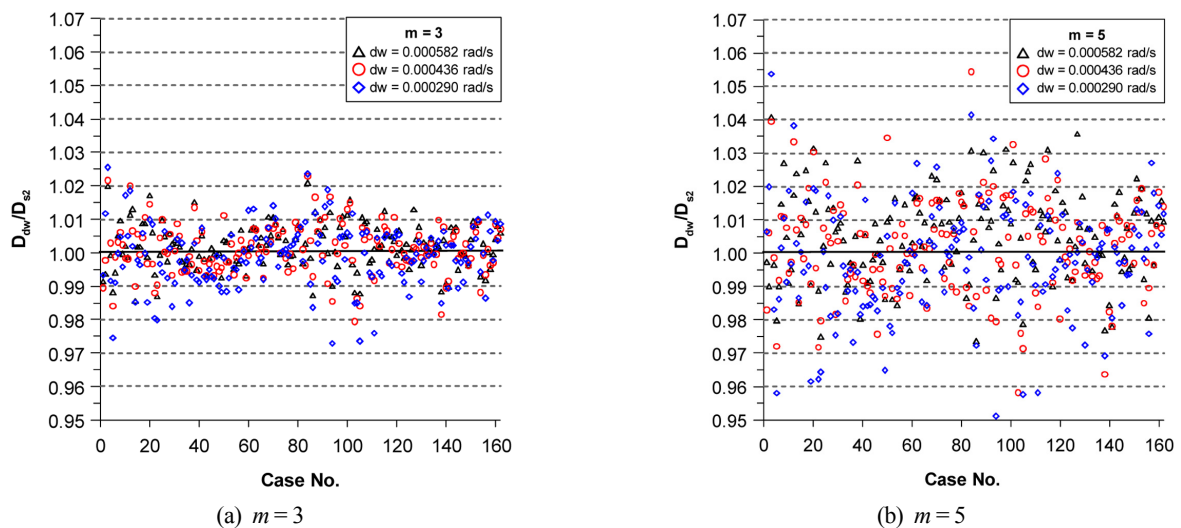


Fig. 5 Result of fatigue damages comparison according to $d\omega$ & m

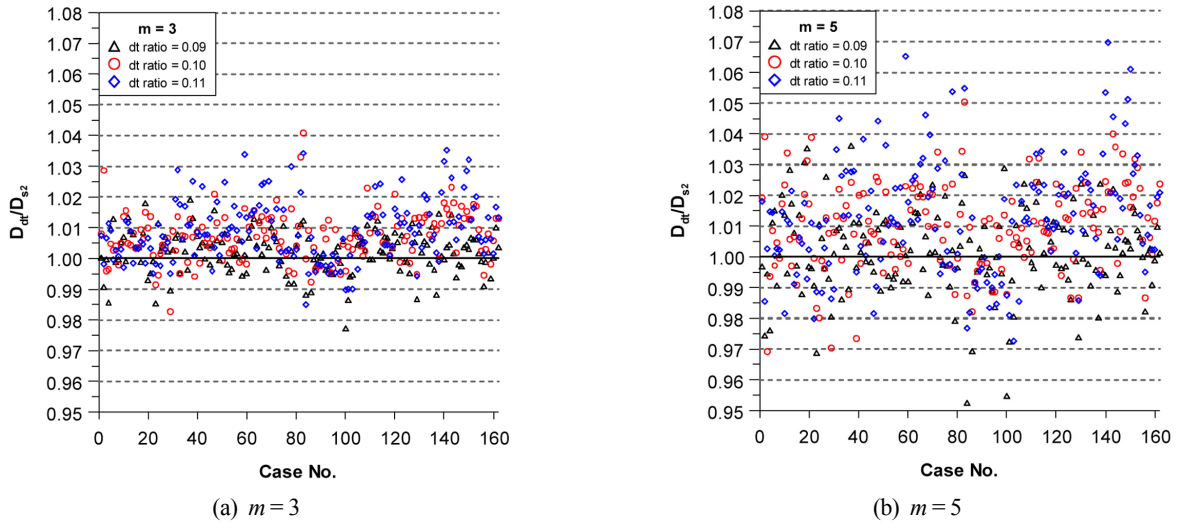


Fig. 6 Result of fatigue damages comparison according to dt ratio & m

분율을 기준값 0.000144rad/s보다 큰 3가지 경우 0.000290rad/s, 0.000436rad/s, 그리고 0.000582rad/s로 변화시키면서 계산된 평균 피로손상도와 기준 피로손상도를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

앞 절의 결과와 동일하게 Fig. 5에서 세로축의 값이 1에 가깝다는 것은, 각 주파수 증분에 따른 피로손상도값이 기준피로손상도와 일치도가 높아 최적의 주파수 증분이 될 수가 있음을 의미한다. 그러나 결과에서 볼 수 있듯이, 주파수 증분의 크기 변화나 $S-N$ 선도의 기울기에 상관없이 차이 정도는 비슷하다. 즉, 주파수 증분의 크기 자체가 피로손상도에 오차를 높이는 요인이 아니기 때문에 식 (5)의 최대 범위를 만족하는 주파수 증분의 크기를 사용하면 될 것으로 판단된다. 다만, Fig. 5에서 보이는 데이터의 분산 정도는 기준 피로손상도와 비교되는 주파수 증분에 따른 피로손상도들이 서로 다른 무작위 위상각 세트 $Qi(n)$ 을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 이 현상은 본 연구의 모든 변수의 민감도 테스트 결과에서 공통적으로 나타나고 있다.

시간 증분 dt 비율은 기준값 0.08보다 큰 값인 0.09, 0.10, 그리고 0.11 3가지 값을 사용하여 계산된 피로손상도를 기준 피로손상도 D_{s2} 와 비교하여 $S-N$ 선도의 기울기에 따라 Fig. 6에 나타내었다.

변수의 최적값 판단은 시계열 반복 횟수와 주파수 증분 크기의 판단 방법과 같다. Fig. 6의 결과에서 볼 수 있듯이 주파수 증분의 경우와 같이 무작위 위상각 세트에 따른 편차는 모두 존재하지만, 시간 증분의 비율이 커질수록 즉, 시간 증분의 크기가 커질수록 기준 피로손상도에 비해 오차도가 높아졌다. 이와 같은 현상의 원인은 시간 증분의 값이 커지면 생성된 시계열의 피크값 손실이 발생하기 때문이며, 시계열의 시간이 늘어날수록 지속해서 피크값의 손실이 누적되기 때문이라고 사료된다. 이러한 경향성은 $S-N$ 선도의 기울기 값에 상관없이 나타나고 있다. 고로 시간 증분 비율의 크기는 기존 선행연구에서 제안된 시간 증분 비율 0.08이 최적값이라 판단된다. 고로 시간 증분의 비율의 변화는 피로손상도의 정확도에 민감하기 때문에, 기준값 또는 기준값보다 더 작은 값을 사용해야 할 것으로 판단된다.

5. 검증

제안된 방법을 검증하기 위해 실제 해양구조물의 한 종류인 계류라인의 장력 스펙트럼에 제안된 방법을 사용하여 피로손상 해석을 수행하였다. 장력 스펙트럼은 구조물의 운동 특성으로 인해 저주파수 응답과 파랑 주파수 응답이 동시에 작용하여 스펙트럼의 형태가 광대역 이봉형 스펙트럼으로 나타난다. Fig. 7은 북해에 설치된 부유식 저장설비인 Sevan 1000 FSU의 계류선 장력 스펙트럼이다(Hanssen, 2013). 선행 연구에서 설계 조건을 참고하여 시간 영역 운동해석을 수행하였으며, 계류 시스템의 경우 14개의 다점 계류방식을, 시뮬레이션 환경 조건은 구조물의 100년 주기 파랑, 조류, 바람 조건을 적용하였다.

본 연구에서 제안하는 방법은 식 (13)과 같이 1 Block이 3시간으로 정의되는 반면, 기존의 연구에서는 1 Block을 60시간으로 정의하였다. 또한, 1 Block을 30번 생성하여 계산된 피로손상도들의 평균값을 대표피로손상도로 본 연구에서 제안했지만,

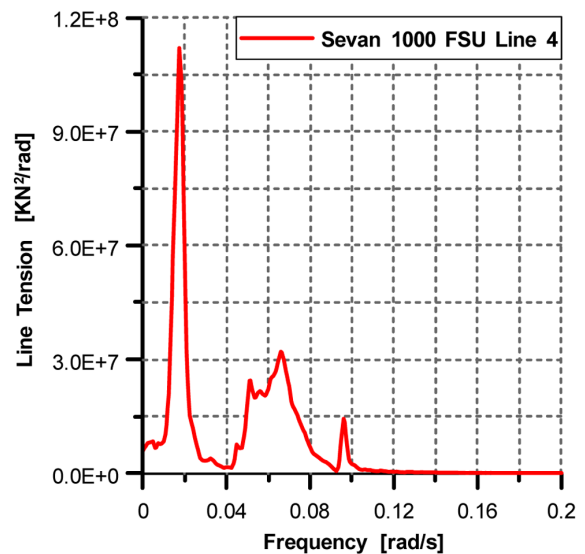


Fig. 7 Tension spectrum of Sevan 100 FSU's Mooring line

Table 3 Fatigue damage compared to existing method

m	$R=10[\%]$	$R=20[\%]$	$R=30[\%]$	$R=40[\%]$	$R=50[\%]$
3	92	98	100	100	100
5	84	96	100	102	101

기존 연구에서는 1 Block을 10번 생성하여 계산된 피로손상도들의 평균값을 스펙트럼의 대표피로손상도로 정의하였다. 이를 종합하면 기존의 연구에서는 1개의 스펙트럼에 대해 3시간 동안의 시계열을 200번 생성하였고, 본 연구에서는 3시간 동안의 시계열을 30번 생성하여 대표피로손상도를 계산하였다. 결론적으로, 선행 연구에서 제안한 방법으로 계산된 피로손상도는 60시간에 대한 피로손상도를, 본 연구에서는 3시간에 대한 피로손상도를 계산하였다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 방법과 기존의 방법을 비교 검증하기 위해서는 정의된 Block의 길이를 같게 해야 한다. 즉, 본 연구의 식 (13)에서 제안된 방법을 따른 계산 결과에 20배를 곱한 값을 기존의 방법과 비교하면 피로손상도의 계산 정확도 검증이 가능하다.

본 연구에서 제안한 반복 횟수인 30번 이외의 다른 반복 횟수의 결과도 포함하여 기존 피로도와 Table 3에 나타내었다. 이때, 사용된 주파수 증분은 0.0005rad/s, 시간 증분 비율은 0.08이다. 결과에서 확인할 수 있듯이, 계산시간을 줄였으며 생성 반복 횟수가 30 이상인 경우부터 기존 연구대비 오차율이 2% 내외가 됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 복합 동적 하중에 노출된 해양구조물의 피로손상도를 계산하기 위한 방법의 하나인 통계적 해석법에 사용되는 피로손상모델의 개발과정에 사용되는 스펙트럼의 피로손상도계산 과정을 최적화하였다.

응답스펙트럼으로부터 시계열 데이터를 산출하는 과정을 보다 합리적이고 효율성을 높이기 위해서 푸리에 역변환에 사용되는 변수들의 최적화 과정 및 방법을 제안하였다. 이를 위해서 실제 스펙트럼을 묘사한 곡선형 삼각뿔 형태의 이봉형 스펙트럼들을 정의한 후 주파수 증분, 시간 증분을 변경하며 시계열 데이터들을 생성하였으며, 생성된 시계열들은 각각 주파수영역과 시간영역에서의 기존 시계열 데이터와의 피로손상도 비교를 하였다. 비교 결과로부터, 주파수 증분과 시간 증분 비율은 기존의 제안된 값을 사용해도 계산되는 피로손상도는 큰 영향이 없으나, 반복 횟수 및 1 Block의 재정의의 통하여 피로손상도 계산 시간을 줄이는 방법을 제안하였다. 결과적으로 스펙트럼의 피로손상도의 정확성은 유지되 기존 데이터의 산출 시간 대비 약 20배의 시간을 절약한 시계열 데이터를 산출할 수 있었다.

본 연구의 결과는 푸리에 역변환 과정과 레인플로우집계법을 사용한 피로손상도 계산 시 사용되는 주요 변수의 기준을 제시하고 관련 연구에서 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 해양구조물의 고주파수 응답에 기인하는 피로손상도 계산에 적합한 피로손상모델 개발 과정의 기초 연구로 활용될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 산학융합지구조성 사업 (과제번호: 2017-0226-01) “해양구조물 피로손상모델개발 지원 프로그램 개발”과제의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Benasciutti, D., Tovo, R., 2005. Spectral Methods for Life Time Prediction under Wide-band Stationary Random Processes. *International Journal of Fatigue*, 27(8), 867-877.
- Dirlík, T., 1985. Application of Computers in Fatigue. Ph.D. Thesis, University of Warwick.
- DNV, 2010a. Recommended Practice DNV-OS-E301 Position Mooring. Det Norske Veritas(DNV), Norway.
- DNV, 2010b. Recommended Practice DNV-RP-F204 Riser Fatigue. Det Norske Veritas(DNV), Norway.
- DNV, 2011. Recommended Practice DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structure. Det Norske Veritas(DNV), Norway.
- Hanssen, E.B., 2013. Coupled Analysis of a Moored Sevan Hull by the Use of OrcaFlex. M.S. Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Jiao, G., Moan, T., 1990. Probabilistic Analysis of Fatigue Due to Gaussian Load Processes. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 5(2), 76-83.
- Kim, S.W., Lee, S.J., Choi, S.M., 2016. A Study on the Riser Fatigue Analysis Using a Quarter-modal Spectrum. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(6), 514-520.
- Matsuishi, M., Endo, T., 1968. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress. *Japan Society of Mechanical Engineers*, Fukuoka, Japan, 37-40.
- Miner, M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 12, 159-164.
- Newland, D.E., 1993. An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis. Mineloa, New York.
- Park, J.B., Choung, J.M., Kim, K.S., 2014. A New Fatigue Prediction Model for Marine Structures Subject to Wideband Stress Process. *Ocean Engineering*, 76, 144-151.
- Park, J.B., Kim, K.S., Choung, J.M., Yoo, C.H., Ha, Y.S., 2011. Data Acquisition of Time Series from Stationary Ergodic Random Process Spectrums. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25, 120-126.
- Wirsching, P.H., Light, M.C., 1980. Fatigue under Wide Band Random Stresses. *Journal of the Structural Division, ASCE (American Society of Civil Engineers)*, 106(7), 1593-1607.
- Zhao, W., Baker, M.J., 1992. On the Probability Density Function of Rainflow Stress Range for Stationary Gaussian Processes. *International Journal of Fatigue*, 14(2), 121-135.

Development of Cell Guide Quality Management System for Container Ships

Bong-Rae Park* and Hyun-Cheol Kim^{id**}

*WAPA SYSTEM, Busan, Korea

**Faculty of Mechanical Engineering, Ulsan College, Ulsan, Korea

컨테이너 선박의 셀 가이드 정도 관리 시스템 개발

박봉래* · 김현철^{id**}

*와파시스템

**울산과학교 기계공학부

KEY WORDS: Cell guide 셀 가이드, Quality management 정도 관리, Quality inspection 정도 검사, Container Ship 컨테이너 선박

ABSTRACT: Generally, container ships contain cargo holds with cell guides that serve to increase the container loading and unloading efficiency, minimize the space loss, and fix containers during the voyage. This paper describes a new quality management system for the cell guides of container ships (the so-called Trim Cell Guide system). The main functions of this system are the trimming of the point cloud obtained using a 3D scanner and an inspection simulation for cell guide quality. In other words, the raw point cloud of cell guides after construction is measured using a 3D scanner. Here, the raw point cloud contains a lot of noise and unnecessary information. Using the GUI interface supported by the system, the raw point cloud can be trimmed. The trimmed point cloud is used in a simulation for cell guide quality inspection. The RANSAC (Random Sample Consensus) algorithm is used for the transverse section representation of a cell guide at a certain height and applied for the calculation of the intervals between the cell guides and container. When the container hits the cell guides during the inspection simulation, the container is rotated horizontally and checked again for a possible collision. It focuses on a system that can be simulated with the same inspection process as in a shipyard. For a practicality review, we compared the precision data gained from an inspection simulation with the measured data. As a result, it was confirmed that these values were within approximately ± 2 mm.

1. 서 론

일반적으로 컨테이너 선박에는 컨테이너를 적재하는 화물창(Cargo hold)내에 격자형 구조물(Lattice type structure)인 셀 가이드(Cell guide)가 설치되어 있다. 셀 가이드는 컨테이너의 하역을 용이하게 하고 공간 손실을 최소화하여 적재 효율을 높이는 역할을 할 뿐 만 아니라, 항해 중 화물을 고정하는 역할을 한다. 셀 가이드는 화물창의 바닥면으로부터 하물창의 해치 코밍(Hatch coaming)에 있는 나팔 모양의 엔트리 가이드(Entry guide)까지 연결되어 있어서, 갠트리 크레인(Gantry crane)으로부터 내려오는 컨테이너가 엔트리 가이드를 통해 바닥면까지 컨테이너의 승·하강이 수직으로 원활하게 움직일 수 있도록 해야 한다.

그런데 실제 건조 현장에서 설치되는 셀 가이드는 다음과 같은 이유들로 설계도면과 편차(Deviation)가 발생하여 컨테이너를

적재할 때 끼는 현상이나 넓은 유격으로 인해 흔들림 현상이 발생할 수 있다. 첫째, 선박 블록 탑재의 정밀도(Precision)가 떨어지거나 연관된 블록의 용접 수축 및 팽창으로 인해 편차가 발생할 수 있다. 둘째, 선체 조립 과정에서 블록별 셀 가이드가 정확하게 정밀도 기준을 만족하더라도 선박 블록 탑재 조립 작업을 거치면서 블록과 블록의 편차가 누적되어 결국 셀 가이드와 셀 가이드 간의 편차를 가져올 수 있다. 따라서 컨테이너 선박 건조 시 셀 가이드들이 규격화된 컨테이너를 허용 범위 내에서 간섭 없이 적재될 수 있도록 정확히 시공되었는지를 측정하는 셀 가이드 정도 검사는 컨테이너 적재 가능성을 결정하는 중요한 작업 공정 중의 하나이다.

셀 가이드 정도를 검사하는 방법은 크게 실물 컨테이너(혹은 컨테이너 모형)(Container box)(SHI, 2000)을 사용하는 방법과 측정 캐리지(Measurement carriage)(SHI, 2000; DSME, 2012; STX,

Received 22 December 2017, revised 8 May 2018, accepted 1 June 2018

Corresponding author Hyun-Cheol Kim: +82-052-279-3103, hckim@uc.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9631-5645>

© 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.

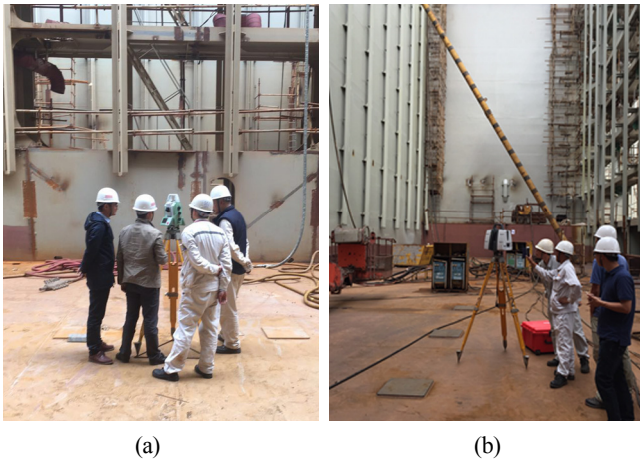


Fig. 1 Comparison of methods using a scan equipment - (a) Electro optical distance meter, (b) 3D scanner

2012), 측정센서 어셈블리(Measurement sensor assembly)(DSME, 2014), 광파기(Electro optical distance meter) 등 측정 장비를 사용하는 방법으로 구분할 수 있다. 실물 컨테이너를 사용하는 방법은 크레인(Crane)을 이용하여 실물 컨테이너(혹은 컨테이너 모형)를 셀 가이드가 설치되어 있는 장소에 직접 넣어서 실제로 적재될 수 있는지 여부를 검사하는 것으로, 작업자가 화물창의 각 층 높이 위치에서 셀 가이드와 컨테이너 사이의 간격(Interval)을 직접 측정한다. 이 방법은 시공된 셀 가이드의 정도를 가장 확실하게 검사할 수 있지만, 크레인의 과도한 대기시간으로 인한 타작업과의 마찰, 고소작업으로 인한 안전사고의 위험성, 기상환경으로 인한 작업지연, 작업자들 간의 상호 수신호에 의한 측정값 정밀도가 떨어지는 등의 단점들을 가지고 있다.

측정 캐리지나 측정센서 어셈블리를 사용하여 셀 가이드 사이의 간격을 측정하는 방법은 측정 작업의 안정성과 정확한 계측이 확보되는 장점이 있으나, 측정 장비의 설치 및 제거시 여전히 사고의 위험성이 있으며, 장비 유지 보수에 고가의 비용이 소요되는 단점이 있다. 그리고 광파기를 사용하는 방법은 가장 안전하게 측정이 가능하지만, 획득된 데이터를 작업자가 원하는 형태로 재가공하는 과정에서 많은 시간이 소요되고, 재가공 과정에서 입력 및 계산 오류의 발생 가능성을 포함하고 있어서 신뢰성 확보에 어려움이 있다(Fig. 1(a)).

최근에는 스캔장비(Scan equipment)(Fig. 1(b))를 이용하여 컨테이너의 적재 여부를 컴퓨터 내에서 시뮬레이션(Simulation)하여 검사하는 방법(HHI, 2014; HHI, 2015)이 소개되었다. 이것은 3D 스캐너를 이용하여 지상에서 셀 가이드를 계측하여 3D 데이터를 확보한 후, 3D 데이터로 구성된 셀 가이드를 컴퓨터 내에서 시뮬레이션을 통해 검사하는 방법으로, 안전사고의 위험이 거의 없고, 짧은 스캔 소요 시간으로 인해 타 작업 공정과의 간섭이 적다. 또한, 최소 2명의 인원으로도 검사가 가능하므로 작업 효율을 대폭 향상시킬 수 있는 장점을 가진다. 그러나 스캔된 데이터의 후처리 과정이 복잡하여 일부 조선소에서는 3D 스캐너 장비를 보유하고 있어도 실무에 적용하고 있지 않다. HHI(2014)에서 소개된 방법도 구체적인 데이터 후 처리 방법 및 검사 시뮬레이션 시스템에 대해 언급하고 있지 않으며, 현재 실용화 연구도 없는 실정이다.

본 연구에서는 3D 스캐너를 이용한 셀 가이드 정도 관리 시스템(TrimCellGuide system: Cell guide quality management system for container ships)을 구체적인 개발 내용과 그 결과에 대해 다루었다. 개발된 시스템의 구성, RANSAC(Random Sample Consensus) 알고리즘 적용 방법, 검사 시뮬레이션을 위한 컨테이너 조정 알고리즘을 소개하고, 실제 계측된 데이터와의 비교·분석함으로써 개발된 시스템의 성능과 신뢰성을 검증하였다.

2. 셀 가이드 정도 관리 시스템

2.1 3D 스캐닝 측정 방법

컨테이너 선박의 셀 가이드를 3D 스캐너로 계측할 때 화물창(Cargo hold) 전체를 스캔하는 방법과 4개의 셀 가이드를 하나의 그룹(이하 “셀 가이드 그룹”이라 함.)으로 하여 부분 스캔하여 전체로 결합하는 방법이 있다. 화물창 전체를 스캔하는 방법은 셀 가이드와 바닥부의 패드(Pad)와 소켓(Socket)을 포함하여 상세하게 스캔하기에는 한계가 있고 정밀도(Precision)도 떨어져 시뮬레이션을 위한 데이터로 사용하기가 어렵다. 또한, 스캔하는 데에도 많은 시간이 소요된다. 실제 컨테이너 선박에는 각 화물창에 15~18개의 셀 가이드 그룹이 설치되어 있는데, 화물창 전체를 스캔할 경우 약 2시간 정도, 셀 가이드 그룹은 약 8분 정도 소요되었다. Fig. 2는 3D 스캐너로 컨테이너 선박의 화물

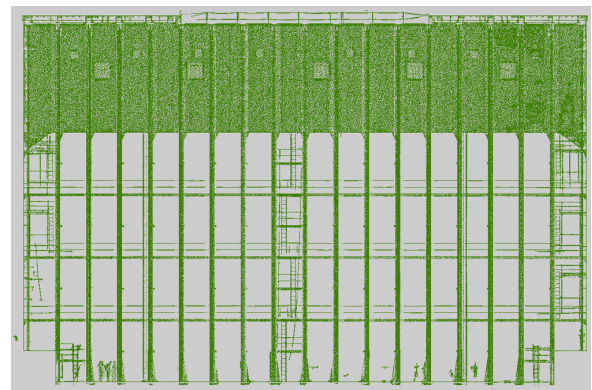
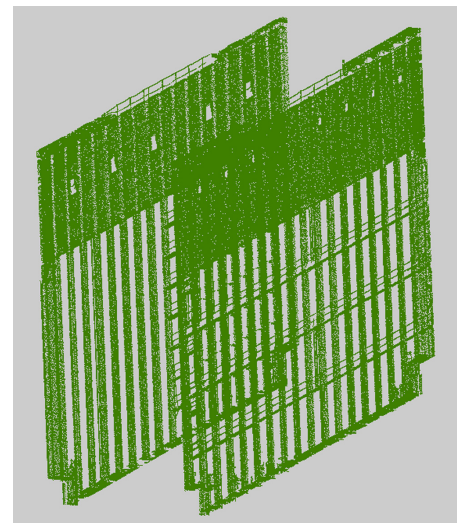


Fig. 2 3D scanned point cloud about cell guides within a cargo hold of container ship

창 내 트랜스버스 박스(Transverse box) 벽면을 스캔한 점군 데이터를 보여준다. 각 셀 가이드 그룹에 대해 형성된 점군 데이터는 약 300만개, 18개의 전체에 대해서는 약 4,000만 개 이상의 점군 데이터를 형성하였다.

조선소에서는 일반적으로 컨테이너 모형을 이용하여 셀 가이드들을 모두 검사하지 않고, 무작위로 샘플링(Sampling)하여 검사를 수행한다. 따라서 본 연구에서도 검사 시간 단축과 정밀도가 높은 측정을 위해 화물창 내에 임의의 셀 가이드 그룹을 샘플링한 후 스캔하여 시뮬레이션을 위한 데이터로 활용하였다.

셀 가이드 계측을 위한 3D 스캐너 설치 및 사용자 고려사항은 다음과 같다(Fig. 1(b)).

- ① 3D 스캐너는 셀 가이드의 대각선 교점인 중앙에 위치시키며, 스캐너 렌즈의 방향은 셀 가이드 정면을 바라보게 한다.
- ② 3D 스캐너 삼각대의 두 다리를 잡고 선정 위치 안착 후 중심을 잡으며 바닥에 완전히 고정시킨다. 이때 삼각대의 높이를 조절할 때에는 최대 높이로 설정하지 않는 것이 좋다. 최대 높이로 설정하게 되면, 바람이나 진동에 흔들려 정확한 데이터를 얻기 어렵기 때문이다.
- ③ 3D 스캐너의 점군 데이터 레벨을 고급 단계로 설정하면 정밀도가 높은 데이터를 확보할 수 있지만, 적재 시뮬레이션 위해서는 불필요한 정보를 많이 포함하므로, 일반적으로 중간 단계로 설정하여 스캔 작업을 수행하며 점군 데이터 양을 조절하여 필요한 정보를 필터링(Filtering)하여 사용한다. 중간 단계 설정의 경우에도 셀 가이드 그룹당 약 700만개 이상의 점군 데이터가 형성되므로, 일반 컴퓨터에서 사용하기 어렵다. 따라서 셀 가이드

부분만 따로 정리하여 약 300만 개 ~ 450만 개 점군 데이터를 활용한다. 이때 셀 가이드와 함께 양 끝에 구조물인 바닥부의 소켓(Socket)을 포함한 패드(Pad)와 해치커버(Hatch cover) 무게를 지탱하는 역할을 하는 트랜스버스 박스(Transverse box)가 모두 포함된다(Fig. 3). 여기서 셀 가이드만 따로 점군 데이터를 한 번 더 필터링(Filtering)하면 약 30-45만개 정도의 점군 데이터가 형성된다. 3D 스캐너의 성능은 기후에 따라 영향을 받기 때문에, 안개가 심하거나 흐린 날은 피하는 것이 좋다.

2.2 시스템 구성 및 기능 설계

본 연구에서 개발한 컨테이너 선박의 셀 가이드 정도 관리 시스템(Cell guide quality management system for container ships: TrimCellGuide system)은 3D 스캐너를 이용한 확보한 점군 데이터를 이용하여 적재 시뮬레이션을 통해 셀 가이드의 적재 여부를 검사하는 것을 목적으로 한다. 시스템의 내부 구성은 셀 가이드를 측정된 점군 데이터를 입력하여 검사 작업 준비를 하는 프로젝트(Project) 기능, 점군 데이터의 정합(Coordination) 혹은 노이즈 제거(Noise elimination) 등을 하는 필터링(Filtering) 기능, 점군 데이터, 좌표 변환, 모델링 결과를 그래픽을 통해 보여주는 뷰(View) 기능, 적재 시뮬레이션 기능 그리고 워크시트(Work sheet) 출력 기능 등으로 구성된다(Fig. 4, Fig. 5).

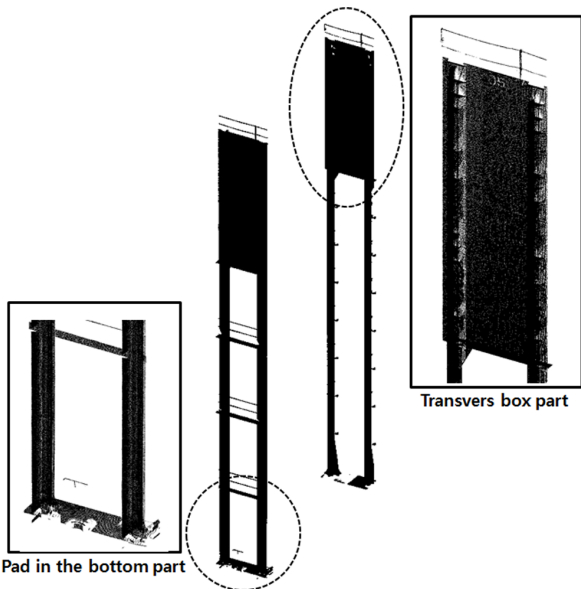


Fig. 3 An example of raw point cloud scanned about a cell guide group

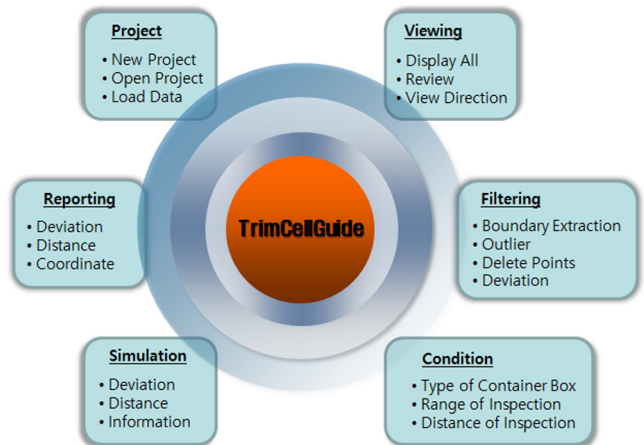


Fig. 4 Function diagram of TrimCellGuide System

2.3 점군 데이터 처리

2.3.1 스캔된 점군 데이터로부터 유효한 셀 가이드 정보 추출

실제 건조 현장에서 셀 가이드들은 여러 작업 환경 영향으로 인해 설계도면과 편차가 발생할 수 있다. Fig. 6에서 왼쪽의 검정색 수직선은 Fig. 3과 같이 스캔된 셀 가이드 그룹에서 “-” 형태의 셀 가이드 점군 데이터만을 필터링하여 나타낸 것이다. 그리고 오른쪽 점들은 바닥 하부로부터 높이 방향으로 5m, 10m, 15m, 20m, 25m인 지점의 셀 가이드 단면을 나타내는 점군 데이터

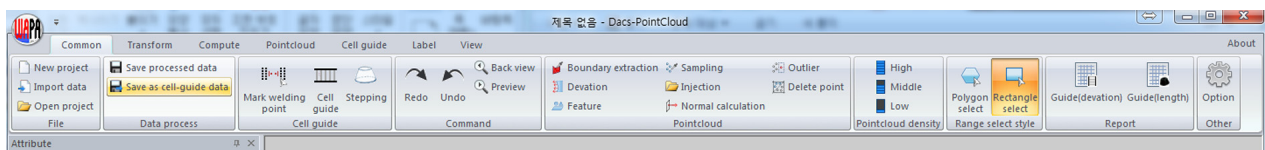


Fig. 5 Menu bar of TrimCellGuide System

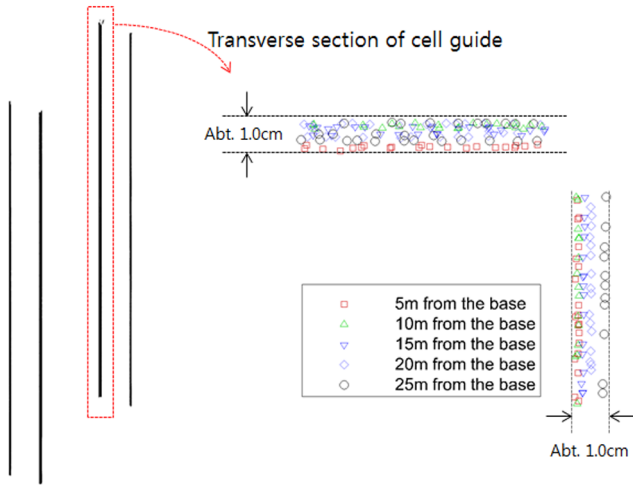


Fig. 6 Scanned point cloud at height 5m, 10m, 15m, 20m, 25m from bottom

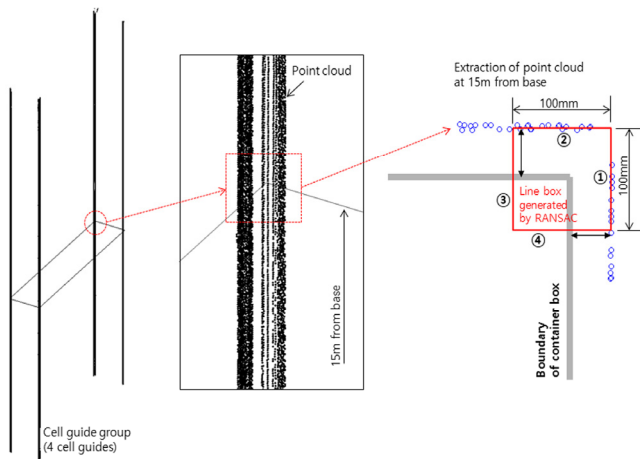


Fig. 7 Representation of a cell guide section at a certain height using RANSAC algorithm

터이다. 셀 가이드 단면들이 약 1.0cm 이내의 편차를 가지며 시공되어 있음을 알 수 있다.

이러한 높이에 따른 셀 가이드 단면을 정확히 표현하기 위해 본 연구에서는 셀 가이드 전체를 3D 모델링하지 않고 검사하고자 하는 높이에 해당하는 셀 가이드 정보만 추출하는 방법을 사용하였다(Fig. 7). 즉, 검사하고자 하는 높이에 해당하는 점군 데이터만을 추출하여 대표 직선식으로 표현하였다. Fig. 7은 높이 15m지점의 점군 데이터와 대표되는 직선 ①과 ②를 나타낸다. 이때 선택된 점군 데이터는 노이즈와 유효하지 않은 데이터도 모두 포함하고 있으므로, 일반적인 보간 혹은 근사법 대신 밀집도(Density)가 높은 유효한 데이터를 중심으로 대표 직선을 생성하는 RANSAC 알고리즘(Ransom sample consensus algorithm)을 사용하여 셀 가이드 단면 표현하였다(Fischler and Bolles, 1981). 여기서 밀집도가 높다는 것은 생성된 근사선을 중심으로 스캔된 값들이 집중되어 분포되어 있음을 의미한다. Fig. 7에서 RANSAC 알고리즘에 의해 생성된 사각형 영역(①, ②, ③, ④)은 100mm 이내의 유격 허용 범위(Allowance area)를 나타낸다. 이들 유격 허용 범위는 조선소의 상황에 따라 다르게 정의될 수 있다.

2.3.2 셀 가이드와 컨테이너 사이의 유격거리 계산

Fig. 7에서 보는 바와 같이 RANSAC 알고리즘에 의해 생성된 곡선식으로부터 컨테이너와의 유격거리(Interval)를 계산할 수 있다. 즉, 임의의 높이에서의 셀 가이드 직선식 $ax+by+c=0$ 과 컨테이너 상의 고정점 (x_1, y_1) 사이의 간격은 식 (1)과 같이 간단히 계산될 수 있다.

$$d = \frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (1)$$

그런데 컨테이너가 유격 허용 범위 내에 있는지를 검토해야 하므로 식 (1)은 식 (2)와 같은 조건이 시스템에 추가된다.

$$\begin{aligned} \tilde{d} &= d, \text{ if the container is in the allowance area} \\ \tilde{d} &= -d, \text{ if the container is outside the allowance area} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 간격 d 가 유격 허용 범위를 벗어난다면 “-”값을 부여한다. 이는 시스템 내에서 컨테이너 적재시 셀 가이드와 컨테이너 사이의 간격이 유격 허용 범위 밖에 있을 경우 수정 작업을 해야 함으로 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)로부터 컨테이너 네 모서리 근처에서의 셀 가이드 유격거리의 전체 합 δ 는 다음 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$\delta = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \frac{|a_i x_{ij} + b_i y_{ij} + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (3)$$

여기서 a_i, b_i, c_i 는 A, B, C, D 네 지점에 위치하는 셀 가이드를 나타내는 직선식의 계수들이다. 그리고 (x_{ij}, y_{ij}) 는 측정하고자 하는 위치의 컨테이너 좌표 X_1, X_2, Y_1, Y_2 를 나타낸다(Fig. 8).

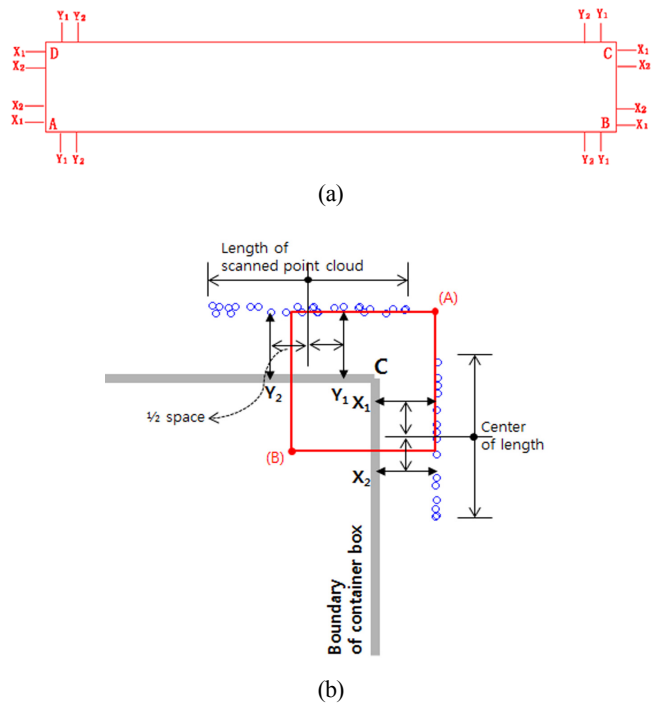


Fig. 8 Two positions at each corner for the interval calculation between cell guides and a container

2.3.3 컨테이너 적재 조정 방법

컨테이너 적재 시뮬레이션에서 컨테이너 중심점은 셀 가이드들의 교차점과 컨테이너 네 모서리의 교차점을 일치시켜 승/하강을 하여 적재 가능 여부를 검사한다. 이때 충돌이 발생할 경우 조선소에서는 컨테이너를 일정 각도로 회전하여 적재 여부를 재검사한다. 그리고 컨테이너가 내려갈 공간이 확인되면 셀 가이드 적재가 이상이 없는 것으로 판단한다. 따라서 본 연구에서 개발된 시스템에서도 적재 시뮬레이션에 이러한 조정 기능을 부여하여 자동적으로 컨테이너가 회전하여 적재 가능 여부를 검사하도록 하였다(Fig. 9).

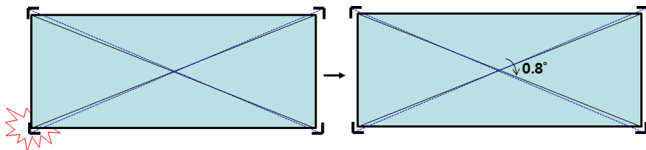


Fig. 9 Correction of container loading method using an automatic rotation

컨테이너 적재 조정 방법은 다음과 같다.

- Step 1: 임의 높이에 해당하는 셀 가이드 단면에 대해 컨테이너 네 모서리에서 식 (3)의 유격 거리 \tilde{d}_{ij} 를 계산한다.
- Step 2: 컨테이너 각 모서리에서 \tilde{d}_{ij} 에 대해 충돌 여부를 평가한다.
- Step 3: 충돌이 확인되면 식 (4)와 같이 유격 거리의 전체 합 (δ_θ)이 최대가 되도록 회전각을 결정한다.

$$\text{maximize } \delta_\theta \text{ at } \theta \tag{4}$$

여기서 δ_θ 는 임의 회전각 θ 에서의 유격거리의 전체 합을 나타낸다.

Step 4: 컨테이너 각 모서리에서 \tilde{d}_{ij} 에 대해 충돌 여부를 재평가한다.

Step 5: 검사 결과를 워크시트(Work sheet)로 출력한다.

2.4 컨테이너 적재 시뮬레이션

TrimCellGuide 시스템은 3D 스캐너로 확보된 점군 데이터를 기반으로 적재 시뮬레이션을 통해 셀 가이드의 시공 상태를 검사하는 것을 목적으로 개발되었다. Fig. 10은 컨테이너 적재 시뮬레이터를 이용한 셀 가이드 정도 검사 작업 과정 흐름도를 나타낸다. 컨테이너선 화물창 내에 셀 가이드들이 시공되면, 3D 스캐너를 통해 스캔하여 셀 가이드에 대한 점군 데이터를 확보한다. 확보된 점군 데이터를 바탕으로 TrimCellGuide시스템의 검사 시뮬레이션을 통해 적재 가능 여부를 검토한 후, 그 결과를 워크시트로 출력한다. 이때 워크시트에는 충돌이 생긴 셀 가이드 부분에 대해 수정 작업을 할 수 있도록 정확한 위치와 유격정보(Interval between cell guides and container box)를 나타낸다.

적재 시뮬레이션은 Fig. 11에서와 같이 왼쪽의 조건 설정 화면과 오른쪽 결과를 보여주는 메인 화면으로 구성된다. 조건 설정 화면에서는 시뮬레이션을 위해 필요한 조건들을 정의하며, 각 항목의 내용들을 살펴보면 다음과 같다.

- Container type : 컨테이너 규격 설정(여기서는 40fit로 정의되어 있음.)
- Container length, width, height : 컨테이너 크기 정의
- Longitudinal tolerance : 컨테이너 길이방향의 허용 오차 범위
- Horizontal tolerance : 컨테이너 횡방향의 허용 오차 범위

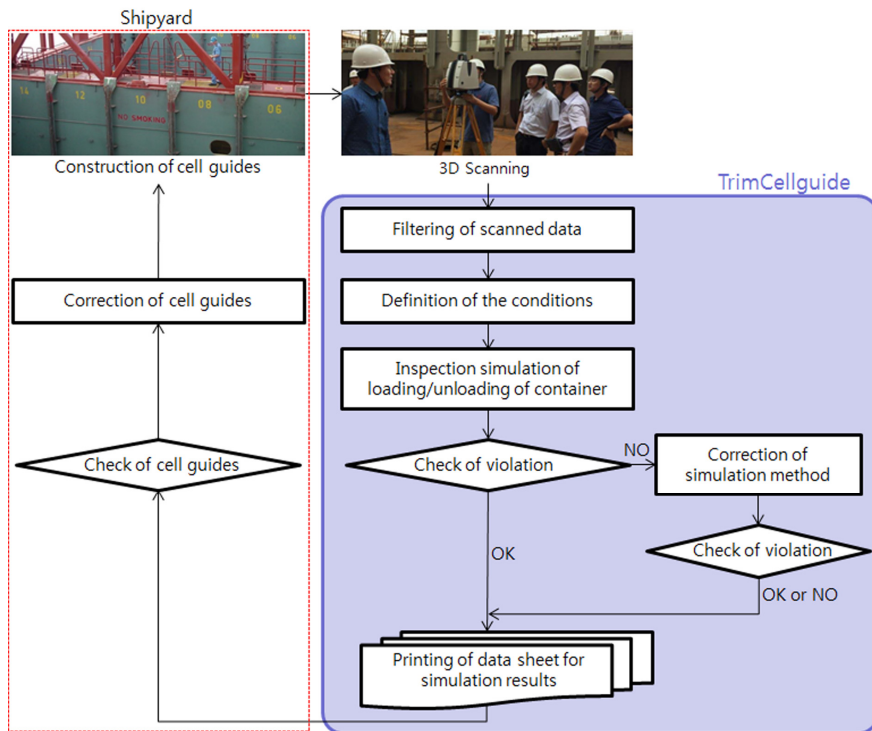


Fig. 10 Workflow of cell guides inspection test using 3D scanner and simulation

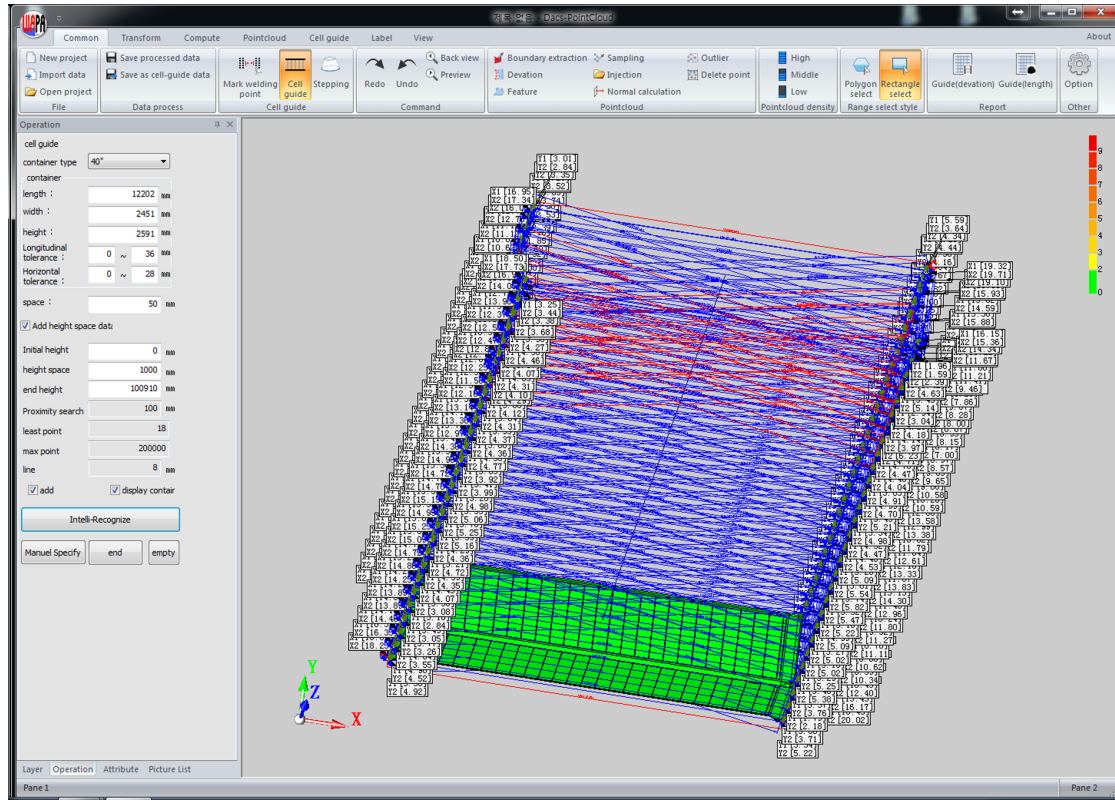


Fig. 11 Condition definition and result for the simulation of container cell guide inspection

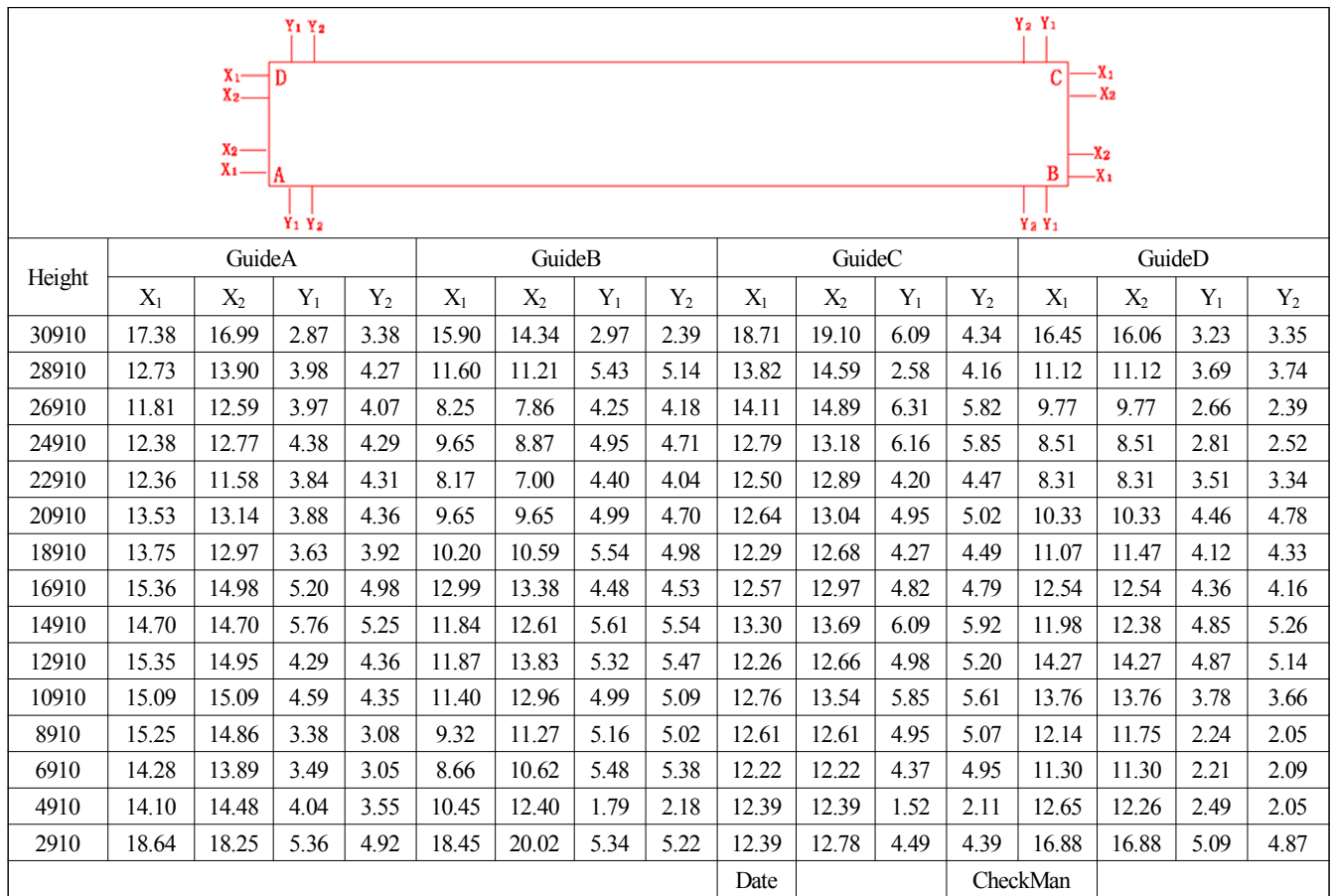


Fig. 12 Final report after the simulation of container cell guide inspection

- Space : 셀 가이드와 컨테이너사이의 간격을 계산할 위치
- Initial & End height : 검사할 시작과 끝 높이
- Height space : 검사 간격
- Inteli-Recognize : 시뮬레이션 실행
- 그 외 항목: Default로 주어지므로 사용자가 설정할 사항이 아님.

상기 조건들을 정의한 후, 시뮬레이션을 실행하면 그 결과로서 각 높이마다 셀 가이드와 컨테이너 사이에 간격과 기타 정보를 메인 화면에 나타낸다. 검사하고자 하는 높이가 많이 있을 경우 메인 화면에 도시된 결과를 사용자가 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 시뮬레이션 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 그 결과를 Fig. 12와 같이 워크시트로 출력하였다. Guide A, B, C, D는 각 컨테이너 모서리에서의 셀 가이드를 나타내고, X₁, X₂와 Y₁, Y₂는 각각 길이 방향과 폭 방향으로 두 군데에서 유격 거리를 계산한 값들을 나타낸다. X₁, X₂와 Y₁, Y₂ 값을 비교한 결과 각각 평균 -0.08mm ~ 0.45mm 범위에서 셀 가이드 유격 거리 계산 편차가 있음을 확인하였다.

3. 비교 및 분석

개발된 “TrimCellGuide시스템”의 성능 검증을 위해 실제 셀 가이드와 컨테이너 사이의 유격거리 측정값과 시뮬레이션을 수행하여 계산한 결과를 비교하였다. 조선소에서 실제 컨테이너를 이용하여 적재 검사를 할 경우 안전사고의 위험이 있으므로 충돌이 감지될 때에만 수정 작업을 위해 셀 가이드와 컨테이너 사이의 유격거리를 측정한다. 그러나 본 연구에서는 시뮬레이션 결과와의 실제 계측 값을 비교하기 위해 세 지점의 높이방향에서 유격거리를 측정하였다. 대상 선박은 S조선소의 2,500TEU 컨테이너 선박이며, 셀 가이드 계측 위치는 높이 방향으로는 3.0m 간격으로 3.2m, 6.2m, 9.2m 그리고 각 끝 단면으로부터 약 50mm지점(모서리에서 115mm지점)에서 유격 거리를 측정하였다(Fig. 13).

실제 계측할 때 컨테이너가 승/하강하는 중 안전사고 위험으로 인해 정해진 높이에서 정확히 동일한 위치에서의 셀 가이드와 컨테이너 간격을 계측하는 것이 현실적으로 어렵지만, 가능한 근접한 장소에서 계측하였다.

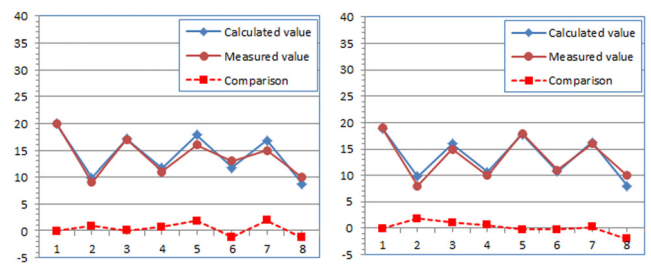
Table 1과 Fig. 14는 측정값과 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로, 그 차이가 약 ±2mm 범위에 있음 알 수 있다. 이는 3D 스캐너를 이용하여 안전하게 검사하고자 하는 화물창 내에서 셀 가이드를 측정 후, 시뮬레이션 과정을 거쳐 필요한 셀 가이드 시공 정보를 검사하는 데에 실제 적용 가능한 수준임을 보여준다.



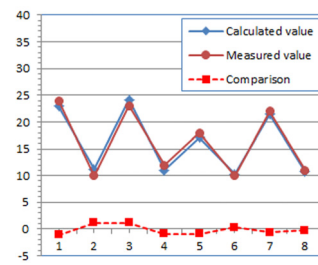
Fig. 13 Interval measurement between cell guide and container box

Table 1 Comparison between measured data and simulation results [unit: mm]

Height	Cell guide	Measured value	Calculated value	Difference	
9,200	A	X	20	19.97	-0.03
		Y	9	9.92	0.92
	B	X	17	17.08	0.08
		Y	11	11.72	0.72
	C	X	16	17.86	1.86
		Y	13	11.79	-1.21
	D	X	15	16.88	1.88
		Y	10	8.74	-1.26
6,200	A	X	19	18.93	-0.07
		Y	8	9.78	1.78
	B	X	15	16.03	1.03
		Y	10	10.64	0.64
	C	X	18	17.77	-0.23
		Y	11	10.78	-0.22
	D	X	16	16.24	0.24
		Y	10	8.01	-1.99
3,200	A	X	24	22.9	-1.10
		Y	10	11.16	1.16
	B	X	23	24.15	1.15
		Y	12	11.06	-0.94
	C	X	18	17.14	-0.86
		Y	10	10.28	0.28
	D	X	22	21.4	-0.60
		Y	11	10.72	-0.28



(a) Comparison of interval at height 3,200mm (b) Comparison of interval at height 6,200mm



(c) Comparison of interval at height 9,200mm

Fig. 14 Comparison between measured data and simulation results

4. 결 론

후 기

셀 가이드의 측정 및 적재 가능 여부에 대한 검사는 컨테이너 선박 건조에서 컨테이너 운송 및 적재 기능과 연관된 중요한 작업으로, 안전사고의 위험성을 가지며 많은 시간을 필요로 한다. 주로 조선소를 중심으로 연구가 수행되었기 때문에 학술 논문보다는 특허를 통해 실용적인 적용 방법이 소개되었다. 본 연구는 최근 급속하게 발달하고 있는 3D 스캐너 기술을 이용하여 컨테이너 셀 가이드를 계측한 후, 점군 데이터를 통해 적재 시물레이션을 수행하는 시스템을 개발하여, 실용적인 관점에서 그 결과를 검토하였다. 개발 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 3D 스캔한 셀 가이드의 점군 데이터로부터 컨테이너 적재 검사를 수행할 수 있는 자체 시스템을 구축하였다. 개발된 시스템은 컨테이너 적재 여부 검사, 컨테이너와 셀 가이드사이의 유격거리 출력, 보고서 작성 등을 효율적이고 간편하게 수행하게 한다.

둘째, 본 연구의 목적은 셀 가이드의 3D 모델링이 아니라, 시공 결과 검사를 목적으로 하므로 검사하고자 하는 높이에서의 정확한 단면 표현을 위해 RANSAC를 적용하여 셀 가이드들과 컨테이너와의 유격거리를 계산하였다.

셋째, 컨테이너 적재 시물레이션에서 컨테이너가 셀 가이드와 충돌 시 컨테이너를 회전하여 조정할 수 있도록 시스템을 구현하였다.

넷째, 개발된 시스템의 적재 시물레이션 결과를 실제 셀 가이드 계측값과 비교한 결과 약 $\pm 2\text{mm}$ 이내에서 일치함을 확인하였으며, 실용적인 측면에서 신뢰성 있는 결과임을 보여주었다.

본 연구에서의 개발한 방법은 화물창 바닥에 3D 스캐너를 설치하여 소수의 인원으로만 셀 가이드를 측정하므로 기존 방법들에 비해 안전사고의 위험이 거의 없다. 그리고 스캔된 점군 데이터로부터 1시간 이내에 시물레이션이 가능하므로 현장에서 효율적으로 적용 가능할 것으로 기대된다. 현재는 적재 시물레이션 과정에서 컨테이너가 셀 가이드에서 충돌 시 평면적으로 회전을 하여 적재 여부 가능성을 검사하지만, 향후에는 공간 회전도 수행함으로써 보다 조정 기능을 강화할 계획이다.

본 연구는 2017년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communication of the ACM*, 24(6), 381-395.
- Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering(DSME), 2012. Inspection Apparatus and Inspection Method of Container Cell Guide. Patent Application 10-2012-0008946, Korean Intellectual Property Office.
- Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering(DSME), 2014. System for the Measuring of Container Cell Guide Distance. Patent Application 10-2014-0068255, Korean Intellectual Property Office.
- Hyundai Heavy Industries(HHI), 2014. Container Loading Mistake Test Device of Containership and Test Method. Patent Application 10-2014-0074537, Korean Intellectual Property Office.
- Hyundai Heavy Industries(HHI), 2015. Virtual Inspection Method for Loading Container and Virtual Inspection System for Loading Container. Patent Application 10-2015-0181818, Korean Intellectual Property Office.
- Samsung Heavy Industries(SHI), 2000. Measuring System and Inspection Method of Container Guide. Patent Application 10-2000-0063742, Korean Intellectual Property Office.
- STX Daewoo Offshore & Shipbuilding(STX), 2012. Cell Guide measuring System for Ship. Patent Application 10-2012-0079095, Korean Intellectual Property Office.

Motion Simulation of FPSO in Waves through Numerical Sensitivity Analysis

Je-in Kim*, Il-Ryong Park^{ORCID}*, Sung-Bu Suh*, Yong-Duck Kang*, Sa-Young Hong** and Bo-Woo Nam**

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

**Korea Ocean Research & Development Institute, Korea research Institute of Ship & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

수치 민감도 해석을 통한 파랑중 FPSO운동 시뮬레이션

김제인* · 박일룡^{ORCID}* · 서성부* · 강용덕* · 홍사영** · 남보우**

*동의대학교 조선해양공학과

**선박해양플랜트 연구소

KEY WORDS: Wave propagation 파진행, Motion 운동, CFD 전산유체역학, Numerical sensitivity 수치 민감도, Error distribution 오차분포

ABSTRACT: This paper presents a numerical sensitivity analysis for the simulation of the motion performance of an offshore structure in waves using computational fluid dynamics (CFD). Starting with 2D wave simulations with varying numerical parameters such as grid spacing and CFL value, proper numerical conditions were found for accurate wave propagation that avoids numerical diffusion problems. These results were mapped on 2D error distributions of wave amplitude and wave length against the numbers of grids per wave length and per wave height under a given CFL condition. Finally, the 2D numerical sensitivity result was validated through CFD simulation of the motion of a FPSO in waves showing good accuracy in motion RAOs compared with existing potential flow solutions.

1. 서 론

최근, 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)의 다양한 해양공학문제에 적용, 큰 진폭의 비선형파(Nonlinear wave)에 의한 해양구조물의 파랑 충격력(Wave impact) 및 감관침수(Green water)와 같은 현상을 보다 정확히 추정하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다(Sato et al., 1999; Nielsen, 2003; Zhang et al., 2005; Yum and Yoon, 2008; Heo et al., 2011; Kim, 2011; Go et al., 2017; Nam et al., 2012; Park et al., 2013; Nam et al. 2017). CFD를 통해 파랑중 해양구조물 주위 유동에 대한 본격적인 해석에 앞서, 주어진 파에 대한 시뮬레이션에서 수치감쇠(Numerical damping)를 감소시키기 위한 적절한 수치 해석적 조건을 찾는 중요한 과정을 수행해야 한다. 관련된 수치 해석적 변수로는 계산영역의 크기, 격자수, 계산시간 간격 및 계산영역의 경계면에서 파의 반사를 피하기 위한 소파(Wave absorption)방법 및 그 영역의 크기 등이 해당된다. 물론 지배방정식의 공간과 시간에 대한 수치 이산화 기법과

자유수면 표현 기법의 정확도도 중요한 요소가 될 수 있다. 일반적으로, 파랑중 해양구조물의 운동해석은 긴 계산시간을 요구하기 때문에 유동장의 크기, 격자수 및 계산시간 간격은 전체 계산시간의 크기를 결정하는 중요한 요소가 된다. 앞서 본 논문에서는 CFD 기법이 큰 장점을 가지는 파와 구조물의 강한 비선형 상호작용 문제 해석에 앞서 해석해가 존재하는 문제를 먼저 다루고 그 결과를 검증하는 것으로 한정하고자 한다. 수치해석 결과에서는 2차원 비선형파 진행문제를 다루고 주어진 파조건에 대한 수치해의 정확도를 유지하는데 필요한 격자수 및 계산시간 간격의 민감도를 조사하였다. 여기서, 유동장의 하류에서 파를 소파시키기 위한 방법의 경우는 최근 수행된 타 연구자의 결과를 적용하고 본 연구에서 검증한 결과를 소개하였다. 본 논문에서 얻은 파 진행문제에 대한 2차원 수치 민감도 검토 결과는 3차원 파랑중 FPSO(Floating production storage and offloading) 운동 문제에 적용하고 구조물의 운동을 타당하게 추정하는 데 필요한 수치 격자의 민감도를 검토하였다.

Received 22 March 2018, revised 5 June 2018, accepted 7 June 2018

Corresponding author Il-Ryong Park: +82-051-890-2595, irpark@deu.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6194-5716

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 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.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배방정식

유동은 해석되는 문제에 따라 2차원 비선형과 진행 문제의 경우 비압축성 층류유동(Laminar flow)으로 가정하였으며, 파랑중 해양구조물 운동문제에의 경우 난류유동(Turbulent flow)으로 가정하였다. 난류유동의 경우 연속 방정식과 운동량 보존 방정식인 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 유동의 지배방정식으로 사용하고, 난류모형으로 Realizable k-ε 모형을 사용하였다(Shin et al., 1995). 지배방정식의 해는 유한체적법(Finite volume method)으로 이산화 하였으며, 시간적분 및 공간에 대해 2차 정도의 수치 이산화 기법이 사용되었다. 본 논문에서는 이러한 수치해석 기법들을 이용 하는 상용프로그램 STAR-CCM+(CD-adapco, 2015)를 이용하여 모든 수치해석을 수행하였다.

2.2 자유수면 및 입사파 모델링

수치해석을 통한 파 생성의 경우 자유수면의 운동학적 및 동역학적 조건을 정확히 만족시키는 것이 중요하다. 본 논문에서는 STAR-CCM+에 제공되는 2차 정확도의 VOF(Volume of fluid, Muzafferija and Perić, 1999)법을 사용하였다.

본 연구에서 입사파 진행 시뮬레이션의 수치 민감도 해석 및 FPSO의 파랑중 운동해석에 필요한 수치파는 모형시험과 같은 조건으로 조파기를 직접적으로 모델링하는 방법이 아닌 파 이론(Wave theory)에서 얻어진 파정보를 유동장 유입경계면에 입력하는 방법을 사용하였다. 비선형파의 경우 Stokes 5th파 방정식을 이용하였으며 파랑중 FPSO운동 문제의 경우 작은 파기울기를 고려할 때 선형파 방정식의 해를 이용하였다.

3. 수치 해석 결과

3.1 2차원 파 진행 문제 수치조건 민감도

본 절에서는 주어진 조건의 비선형파를 정확히 시뮬레이션하기 위해 필요한 격자수와 계산시간 간격 등의 수치해석 조건을 검토한 결과를 제공한다. 문제는 2차원 문제로 취급하고 유동은 층류로 가정하였다. 여기서, 본 연구의 수치 계산 조건에 따른 수치오차는 지배방정식의 이산화와 자유수면 처리 등의 적용된 수치기법들의 오차를 같이 동반한 결과임을 고려하여 이해되어야 한다. 대상으로 하는 파는 파장(λ) 4m, 파고(H) 0.16m인 Stokes 5th 파이다. 이 때, 유동장의 크기는 파장을 기준으로 파진행 방향인 x방향으로 $L_x = 6.5\lambda$, 높이 방향인 z방향으로 $L_z = 4.5\lambda$, 그리고 수심 $d = 4.0\lambda$ 이다. 여기서, 파의 감쇠를 유도하는 소파영역의 x방향 길이는 유동장의 유출면을 기준으로 $x_d = 2.5\lambda$ 이다. 지배방정식을 풀기 위한 수치해석 조건에서 하향완화계수(Under relaxation factor)의 경우 속도-압력 연성방정식은 0.5를 사용하고, 그 외 운동량방정식과 자유수면 모델에 대한 변수들에 대해서는 0.9를 사용했다. 총 시뮬레이션 시간은 파의 10주기에 해당하는 16초이다.

Table 1은 2차원 파 시뮬레이션을 통한 수치 민감도 분석을 위해 수행한 모든 해석 조건들을 나타내고 있다. 수치해석 조건은 파장당 격자수(N_x), 파고당 격자수(N_z), 그리고 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건에 따른 계산시간 간격(Δt) 그리고 전체 방정식들을 풀기위해 적용되는 내부 반복계산 횟수(Inner iteration)이며, 총 해석조건은 110가지이다. 표에서는 파장 4m, 파고 0.16m의 파에 대한 격자수 및 단위 격자의 크기($\Delta x, \Delta z$)를 볼 수 있다. 격자수는 파장당 40에서 160개, 파고당 격자수

Table 1 Test cases for the propagation simulation of the given Stokes 5th wave

No. of test cases	Δx (N_x)	Δz (N_z)	Δt (CFL = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)	Inner iteration	
1	10	0.1 m (40 cells)	0.00625 m (26 cells)	0.004s (0.1), 0.008s (0.2), 0.012s (0.3), 0.016s (0.4), 0.020s (0.5)	5, 10
2	10	0.07272 m (55 cells)	0.004545 m (35 cells)	0.00291s (0.1), 0.00582s (0.2), 0.00873s (0.3), 0.01164s (0.4), 0.01455s (0.5)	5, 10
3	10	0.05 m (80 cells)	0.00625 m (26 cells)	0.002s (0.1), 0.004s (0.2), 0.006s (0.3), 0.008s (0.4), 0.010s (0.5)	5, 10
4	5	0.0428 m (94 cells)	0.0107 m (15 cells)	0.001712s (0.1), 0.003424s (0.2), 0.005136s (0.3), 0.006848s (0.4), 0.008559s (0.5)	10
5	5	0.0428 m (94 cells)	0.00535 m (30 cells)	0.001712s (0.1), 0.003424s (0.2), 0.005136s (0.3), 0.006848s (0.4), 0.008559s (0.5)	10
6	10	0.04 m (100 cells)	0.01 m (16 cells)	0.0016s (0.1), 0.0032s (0.2), 0.0048s (0.3), 0.0064s (0.4), 0.0080s (0.5)	5, 10
7	10	0.04 m (100 cells)	0.005 m (32 cells)	0.0016s (0.1), 0.0032s (0.2), 0.0048s (0.3), 0.0064s (0.4), 0.0080s (0.5)	5, 10
8	15	0.0333 m (120 cells)	0.00833 m (19 cells)	0.001334s (0.1), 0.002668s (0.2), 0.004002s (0.3), 0.005335s (0.4), 0.008003s (0.5)	5, 10, 20
9	15	0.02858 m (140 cells)	0.00714 m (22 cells)	0.001144s (0.1), 0.002287s (0.2), 0.003431s (0.3), 0.004574s (0.4), 0.005718s (0.5)	5, 10, 20
10	20	0.025 m (160 cells)	0.00625 m (26 cells)	0.001s (0.1), 0.002s (0.2), 0.003s (0.3), 0.004s (0.4), 0.005s (0.5)	5, 10, 20, 30

는 15에서 35개의 변화 범위를 가진다. 각각의 격자조건에 사용한 계산시간 간격을 볼 수 있으며, 이 때 값들은 CFL값으로 표현하여 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 그리고 0.5에 해당한다. 전체 방정식에 대한 내부 반복계산 횟수는 5와 10을 사용하고, 격자수가 많아 수렴이 더 필요할 것으로 판단되는 조건에서는 20과 30까지 사용되었다.

수치해석 결과는 해당하는 파조건의 Stokes 5th파 이론해와 비교하였다. 수치해석에서 파진폭에 대한 오차는 파정과 파저 별도로 계산하였으며(Δ_{crest} , Δ_{trough}), 유입 경계면 및 소파영역에 인접한 파를 제외한 연속된 3개의 파의 파정 및 파고에 대한

해석 해와의 차이에 대한 평균을 %오차로 나타내었다. 파장의 오차는 유입 경계면에서 소파영역 시작점까지의 해석 해의 파 길이에 대한 수치해에서 얻은 파의 길이를 서로 비교하여 %오차(Δ_{phase})로 나타내었다.

파진행 시뮬레이션에서 중요한 수치 해석적 요소 중 하나로서 유동장 출구에서 파의 반사를 막아 반사파의 영향이 유동장 안으로 들어오지 못하도록 하는 것이다. 본 연구에서는 STAR-CCM+에서 제공하는 소파영역내 파감쇠함수를 사용하여 파의 진폭을 감소시키는 방법을 사용하였다(Peric and Abdel-Maksoud, 2016).

Fig. 1은 소파영역의 크기에 따른 파의 반사 영향을 시간변화에

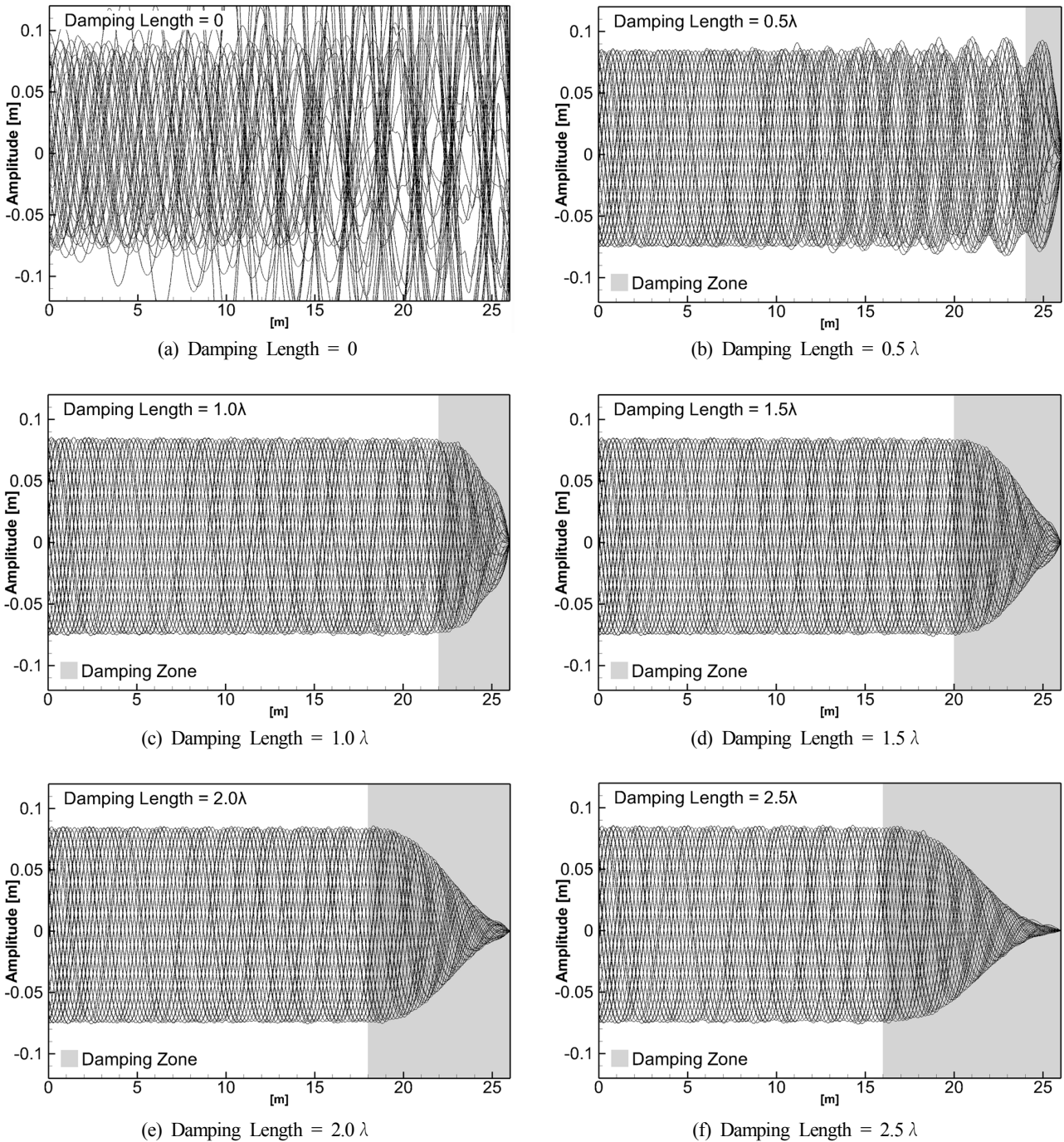
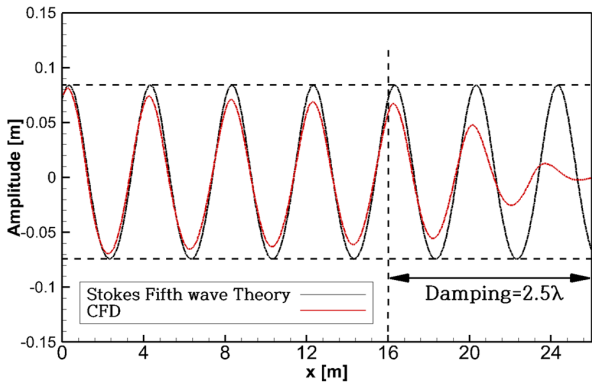
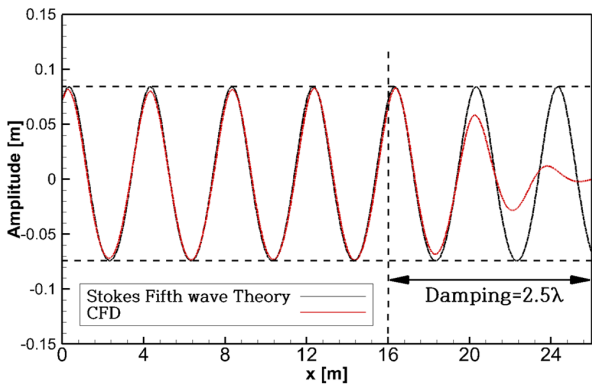


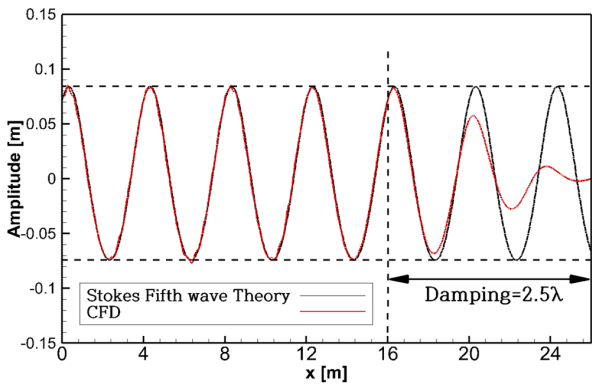
Fig. 1 Free surface elevation over x-location



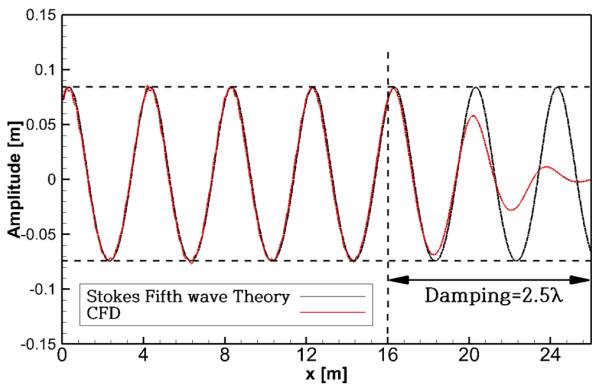
(a) $\Delta x = 0.1$ m (40 cells), $\Delta z = 0.00625$ m (26 cells), $\Delta t = 0.008$ s



(b) $\Delta x = 0.05$ m (80 cells), $\Delta z = 0.00625$ m (26 cells), $\Delta t = 0.004$ s



(c) $\Delta x = 0.0428$ m (94 cells), $\Delta z = 0.0107$ m (15 cells), $\Delta t = 0.001712$ s



(d) $\Delta x = 0.0333$ m (120 cells), $\Delta z = 0.0083$ m (19 cells), $\Delta t = 0.002668$ s

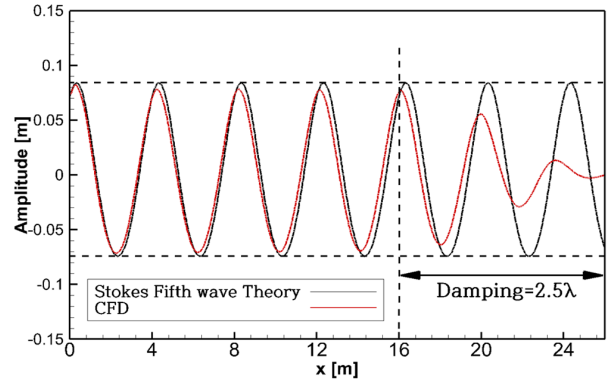
Fig. 2 Comparison of wave profiles ; CFL = 0.2, inner iteration = 10

다른 파형을 비교하여 나타내고 있다. 최종적으로 본 논문에서는 소파영역을 유동장 출구에서 상류 방향으로 파장의 2.5배로 설정하였다. 이 값의 타당성은 Peric and Abdel-Maksoud(2016)의 결과에서도 동일하게 소개하고 있으며, 소파영역이 파장의 1배 이상일 때 유출 경계면에서 반사율이 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 본 수치해석에서 사용된 파장당 격자수 $N_x = 100$ 개, 파고당 격자수 $N_z = 32$ 개 그리고 CFL조건으로 0.2의 값을 사용하였다.

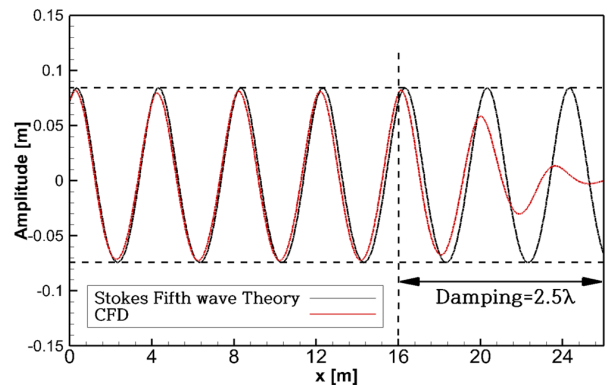
Fig. 2는 CFL 0.2, Inner iteration=10의 조건에서 파장당 격자수의 증가에 따른 10주기 시간인 16s 때 해석 공간상에서 수치해와 해석해의 파형을 비교하고 있다. 계산 시간 간격이 작은, 낮은 CFL조건임에도 파장당 격자수 40의 결과는 해석해와 진폭과 파장의 차이를 보이고 파장당 격자수가 80개 이후 해석해와 비교적 좋은 일치율을 보여주고 있다. 다만, 파장당 격자수 120개 이상의 경우 파 표면에 불규칙한 수치적 Wiggle(Irregular point to point oscillation)현상이 발생하였다. 이 현상은, 우선은 수렴문제로 판단되며 수렴을 위해 더 많은 Inner iteration이 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 Inner iteration에 따른 해의 수렴 정도를 비교하고 있다. 파장당 격자수 80개와 파고당 격자수 26개 그리고 CFL 조건 0.3에서 Inner iteration 5와 10의 결과를 비교하고 있다. Inner iteration의 증가로 파형의 진폭 및 파장의 정도가 해석해와 비교해 높아진 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 주어진 파장당 격자수와 파고당 격자수 조건에서 CFL 값을 변화시켜 얻어진 수치해들을 파장과 파저에서의 파



(a) Inner iteration = 5



(b) Inner iteration = 10

Fig. 3 Effect of inner iteration; $N_x = 80$, $N_z = 26$, CFL = 0.3

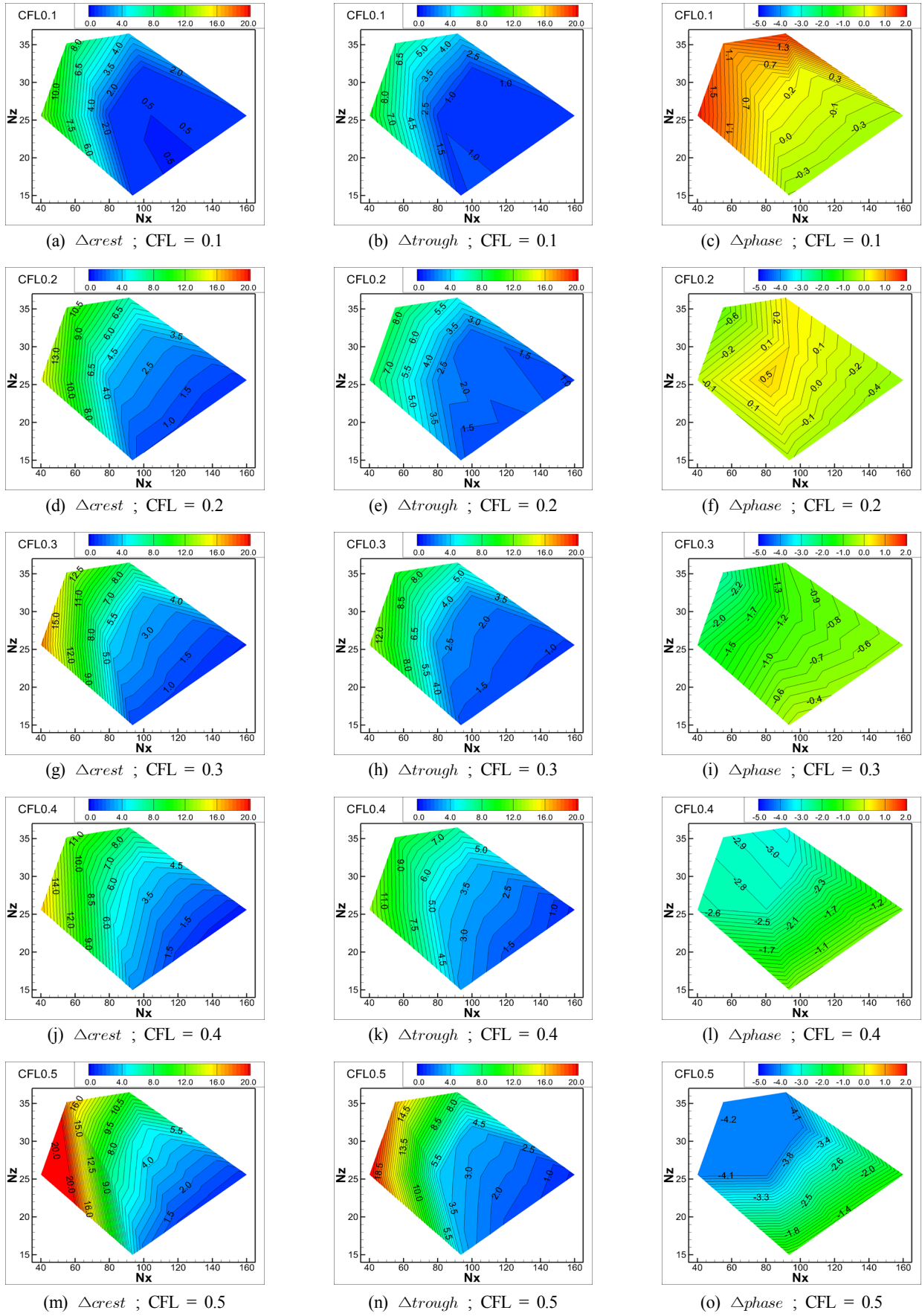
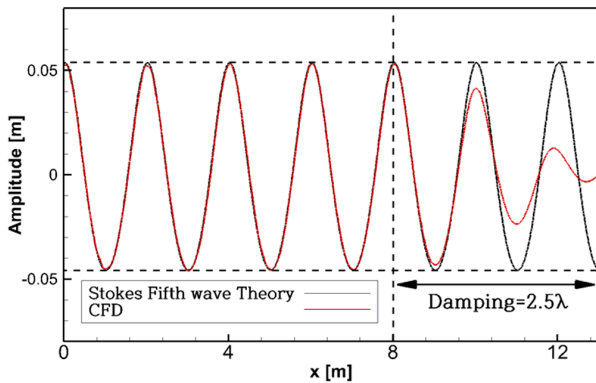


Fig. 4 Error distributions of wave amplitude and wave length

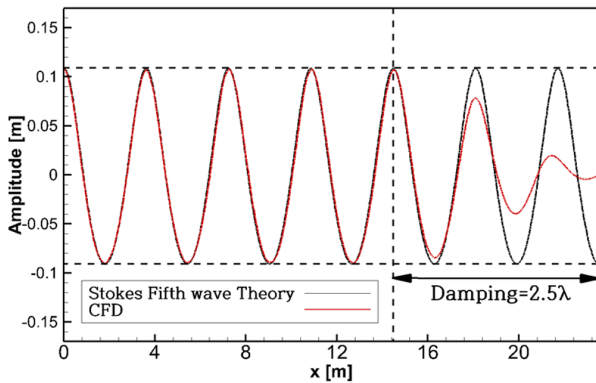
진폭 오차와 파장에 대한 위상오차를 CFL조건에 따라 %오차 분포도를 작성한 결과를 보여주고 있다. 이 분포도를 통해 격자 수 및 CFL조건에 따른 수치해의 민감도를 파악할 수 있도록 하였다.

Table 2 Additional test cases for the validation of wave propagation simulation

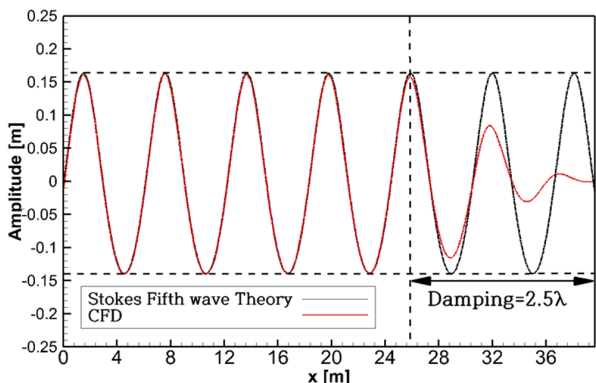
Test case	λ	H	Wave steepness
1	2.00	0.100	0.0500
2	3.62	0.200	0.0550
3	6.10	0.304	0.0498



(a) $\lambda = 2 \text{ m} \ \& \ H = 0.1 \text{ m}$

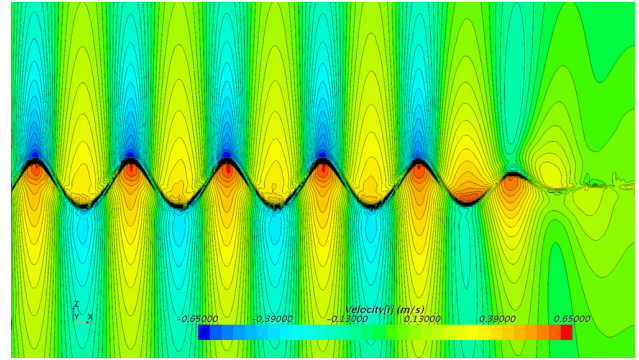


(b) $\lambda = 3.62 \text{ m} \ \& \ H = 0.2 \text{ m}$

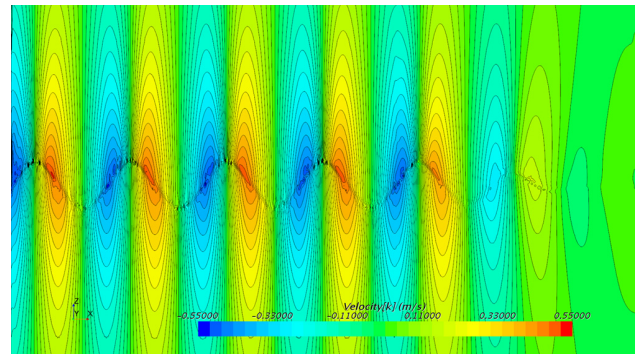


(c) $\lambda = 6.1 \text{ m} \ \& \ H = 0.304 \text{ m}$

Fig. 5 Comparison of wave profiles for different wave conditions



(a) velocity X



(b) velocity Z

Fig. 6 Fluid velocities computed for the wave of $\lambda = 6.1 \text{ m} \ \& \ H = 0.304 \text{ m}$

CFL 0.1에서 0.5의 각각의 오차 분포도를 살펴볼 때 파장과 파고당 격자수에 대한 해의 정확도 분포가 선형적인 특성이 아닌 것을 볼 수 있다.

Table 2는 Fig. 4의 오차 분포도 결과를 대상 조건의 파가 아닌 다른 파 조건들에 적용하고 검증을 수행한 세 가지 파를 설명하고 있다. 여기서, 오차는 2%내외가 될 수 있는 범위의 격자수를 선택하고 CFL 0.2조건을 선택하였다.

Fig. 5는 각각 파장 2m, 파고 0.1m 파, 파장 3.62m, 파고 0.2m 파 그리고 파장 6.1m, 파고 0.304m 파에 대한 10주기 시뮬레이션 이후 파형을 해석해와 비교하고 있다. 파장 2m, 파고 0.1m 파의 경우 파 기울기는 0.05이고 파장당 격자수는 125개, 파고당 격자수는 25개이다. 파장 3.62m, 파고 0.2m 파의 경우 파 기울기가 0.055이고 파장당 격자수 113개, 파고당 격자수 25개이며, 파장6.1m, 파고 0.304m 파의 경우 파 기울기는 0.0498, 파장당 격자수 118개 그리고 파고당 격자수는 24개로 구성되어 있다. 결론적으로, Fig. 4의 분포도를 활용하여 격자를 결정한 세 가지 해석의 결과에서 파정과 파저에서의 진폭 및 파장에 대한 위상차이가 매우 작은 양상으로 Stokes 5th 해석해와 좋은 일치를 보이고 있다.

Fig. 6은 파장 6.1m, 파고 0.304m 파 주위 운동장에서의 잘 수렴된 x축 방향 및 z축 방향 유체의 속도분포를 보여주고 있다.

3.2 파랑중 FPSO 운동 해석 수치격자 민감도

본 절에서는 앞선 2차원 파 시뮬레이션을 통한 수치 해석조건 민감도 분석 결과를 바탕으로 파랑중 FPSO 운동 시뮬레이션

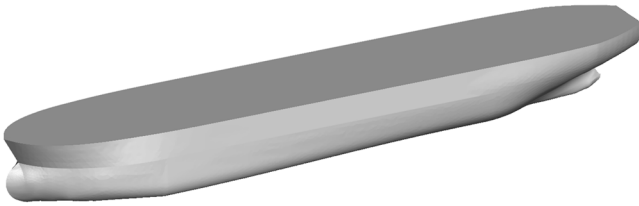


Fig. 7 Hull form of KRISO FPSO

Table 3 Main dimensions of KRISO FPSO

Item	Unit	Full load 140 K (1/60)	
		Ship	Model
Length, Lpp	m	239.0	3.983
Breadth, B	m	45.82	0.764
Draft(FP)	m	15.82	0.264
Draft(Mid)	m	15.82	0.264
Draft(AP)	m	15.82	0.264
Displacement	m ³	139,585	0.6462
LCG	m	+9.636	0.1606
GM	m	6.028	0.0838
KG	m	14.54	0.2423
Kyy = Kzz	m	59.75	0.996
Kxx	m	16.04	0.267

의 수치격자 민감도 검토 결과를 제공한다. Fig. 7은 해석의 대상이 되는 FPSO 선형의 모습을 보여주고 있다. Table 3에서 길이 239m인 FPSO선형의 주요제원을 나타내고 있다. 선폭은 45.82m이고 흘수가 15.82m 그리고 운동해석에 필요한 회전반경 및 중심의 위치를 확인할 수 있다. 수치해석은 축척비 1/60인 3.983m의 모형선에 대해 수행하였다.

Table 4는 수치해석에서 사용한 FPSO로 유입되는 파 조건으로서 실선을 기준으로 하였을 때 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 파진동수에 해당하는 선수 규칙파의 파고, 파주기 그리고 파장을 모형선시험 조건과 비교하고 있다. 여기서, 선체의 위치 유지를 위해 계류선이 사용되고 본 수치해석은 스프링 모델로 이를 재현하였다(Hong et al. 2002). 참고로 모형선의 길이가 약 4m일 때, 0.4는 파장이 7.6m, 0.5는 4.1m, 0.6은 2.9m, 0.7은 약 2.1m이다. 파고는 0.033m이다. 이 때 각 파진동수에 해당하는 파기울기들은 앞서 수치 해석조건 민감도 분석을 위해 수행한 2차원 문제의

Table 4 Wave conditions for the numerical simulations

Freq. [rad/s]	Wave Height [m] [proto/model] (*Wave steepness)	Wave Period [s] [proto/model]	Wave length [m] [proto/model]
0.4	2 / 0.033 (*0.00437)	15.71 / 2.028	453.4 / 7.556
0.5	2 / 0.033 (*0.00804)	12.56 / 1.622	246.4 / 4.106
0.6	2 / 0.033 (*0.01157)	10.47 / 1.352	171.2 / 2.853
	3 / 0.050 (*0.01753)	10.47 / 1.352	171.2 / 2.853
0.7	4 / 0.067 (*0.02348)	10.47 / 1.352	171.2 / 2.853
	2 / 0.033 (*0.01574)	8.98 / 1.159	125.8 / 2.096

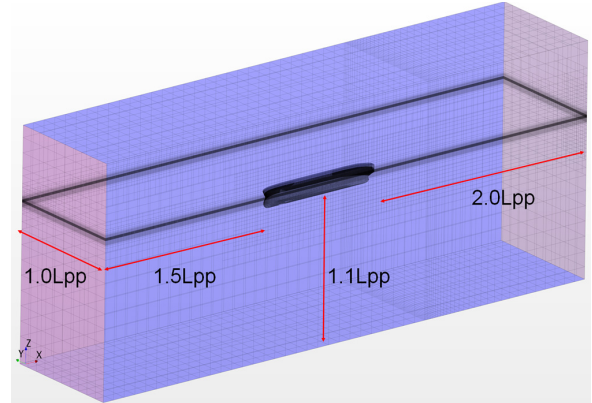


Fig. 8 Size of flow domain

파들 보다 작은 조건이다. 파 진동수 0.6의 경우 파고 변화에 따른 해의 변화를 살펴보기 위해 파고 0.05m와 0.067m의 두 가지 계산 조건을 추가되었다.

Fig. 8은 FPSO 선체를 중심으로 유동장의 크기를 설명하고 있다. 유동장에 파가 입사되는 유입경계면은 상류쪽으로 1.5Lpp에 위치해있으며, 유출경계면은 하류 2.0Lpp의 거리에 떨어져 있다. 선체의 측면으로는 1.0Lpp, 길이방향으로는 1.1Lpp의 크기를 가진다.

파랑중 FPSO 운동해석에서는 유동장 경계에서 파의 수치적 반사현상을 막기 위해 STAR-CCM+에 프로그램 되어있는 다른 소파방법을 활용하였다. 앞서 2차원 연구에서 입사파의 파장의 2.5배의 소파영역을 두는 방법과는 달리, 경계면 부근에서 유동장 내부의 파와 주어진 입사파가 일정 영역에서 수학적으로 조화시켜 반사파를 강제하는 일명 Wave forcing법을 사용하였다. 본 방법을 이용한 2차원 진행과 검증은 Enger et al.(2014)의 연구결과를 참조할 수 있다. 이 방법은 앞선 방법보다 Forcing영역을 짧게 할 수 있어 격자의 수를 줄일 수 있다. Forcing영역의 크기는 유입경계면에서 0.9Lpp, 유출경계면에서 0.5Lpp, 측면에서 0.25Lpp의 크기를 가지도록 설정하였다.

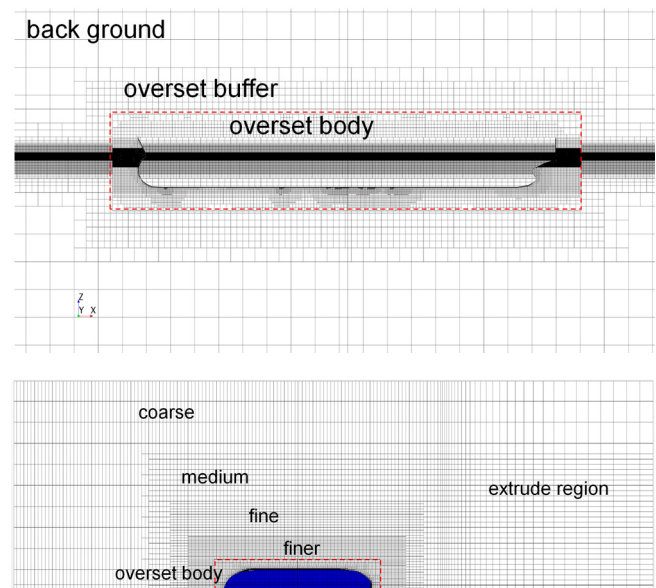


Fig. 9 Strategy of grid generation

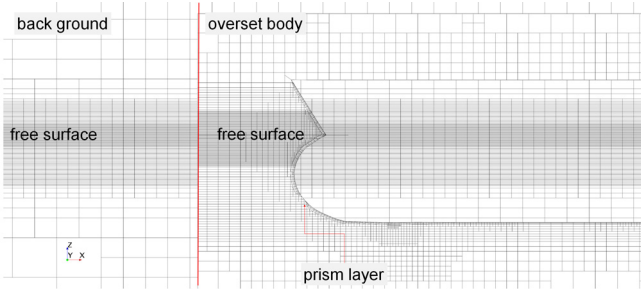


Fig. 10 Overset grid distribution around the hull

Table 5 Grid conditions for each wave condition

w	Grid size		Total No. of grids	Δt (CFL = 0.3, inner iteration = 7)	
	N_x	N_z			
0.4	100	14	Grid 1	1.69M	0.0066
	129	18	Grid 2	2.95M	0.0050
	172	24	Grid 3	5.58M	0.0038
0.5	109	14	Grid 1	2.08M	0.0045
	137	18	Grid 2	3.58M	0.0036
	179	23	Grid 3	6.48M	0.0028
0.6	81	15	Grid 1	2.70M	0.0048
	102	19	Grid 2	4.37M	0.0040
	124	23	Grid 3	6.50M	0.0033
0.7	71	18	Grid 1	3.88M	0.0040
	83	21	Grid 2	5.30M	0.0036
	95	24	Grid 3	7.52M	0.0030

Fig. 9는 선체 주위 격자 분포 모습을 보여주고 있다. 수치격자는 크게 배경격자와 운동을 하는 내부격자 그리고 두 격자간 내삽(Interpolation)이 이루어지는 완충(Buffer)영역으로 나누었다. 자유수면에 대한 격자 조밀도는 그림과 같이 여러 영역으로 나누어 조정하였다.

Fig. 10은 선체 주위 배경격자 및 선체를 포함하는 운동 격자 내 자유수면 영역의 격자 분포 상황을 보여주고 있다.

Table 5는 2차원 문제를 통해 검토한 수치 민감도 분석 결과를 바탕으로 결정된 파랑중 FPSO운동 해석에 사용된 격자 조건들을 나타내고 있다. 각각의 파 진동수 조건에 대해 세 가지 격자를 생성하였다. 이는 전체 격자수가 작은 경우 해석시간을 줄일 수 있지만 해의 정도를 검토하고자 하였다. 파장당 격자수는 71에서 179까지 그리고 파고당 격자수는 14에서 24까지 사용되었다. 전체 격자수는 대략 작은 경우 1백6십만개에서 3백9십만개, 중간크기는 2백9십만개에서 5백3십만개, 가장 조밀한 경우 5백5십만개에서 7백5십만개이다. 전체 격자수는 파진동수가 클 때 파장당 격자수가 작아도 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

CFL조건은 0.3, Inner iteration은 7로 설정하여 계산을 수행하였다. Table에서 각 격자에 대해 CFL 0.3에 해당하는 계산시간 간격을 볼 수 있다.

Figs. 11-14은 파 진동수 0.4, 0.5, 0.6 그리고 0.7에서 FPSO의 운동응답을 격자 조건에 대해 비교하고 있다. Fig. 11는 파 진동수 0.4의 선수와 조건에서 계산된 시간에 따른 상하동요(Heave), 종동요(Pitch) 그리고 전진동요(Surge) 운동의 시간에 따른 진폭 변화를 보여주고 있다. 각 조건에서 약 20초 이후 운동들이 수

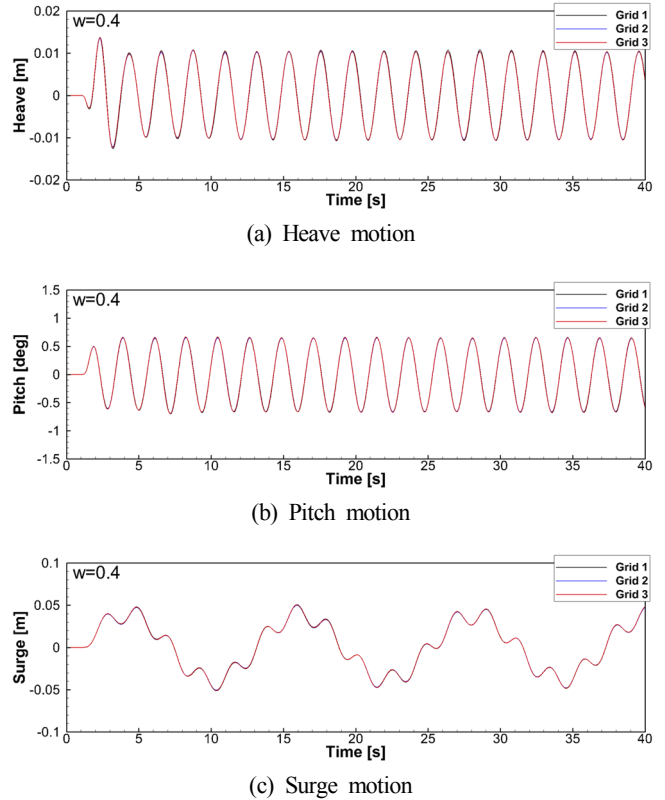


Fig. 11 Motion results at $\omega = 0.4$

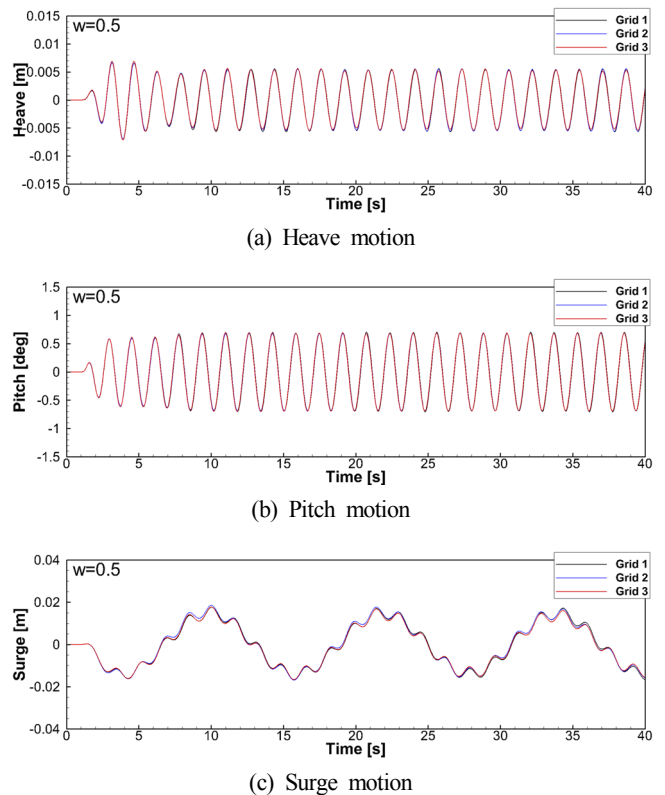


Fig. 12 Motion results at $\omega = 0.5$

렴하고 있으며, 세 가지 격자 조건에서 계산된 결과들은 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 유동의 선형성(Linearity)이 지배

적인 낮은 파 진동수 조건에서는 격자간 해의 차이는 크지 않은 것을 볼 수 있다.

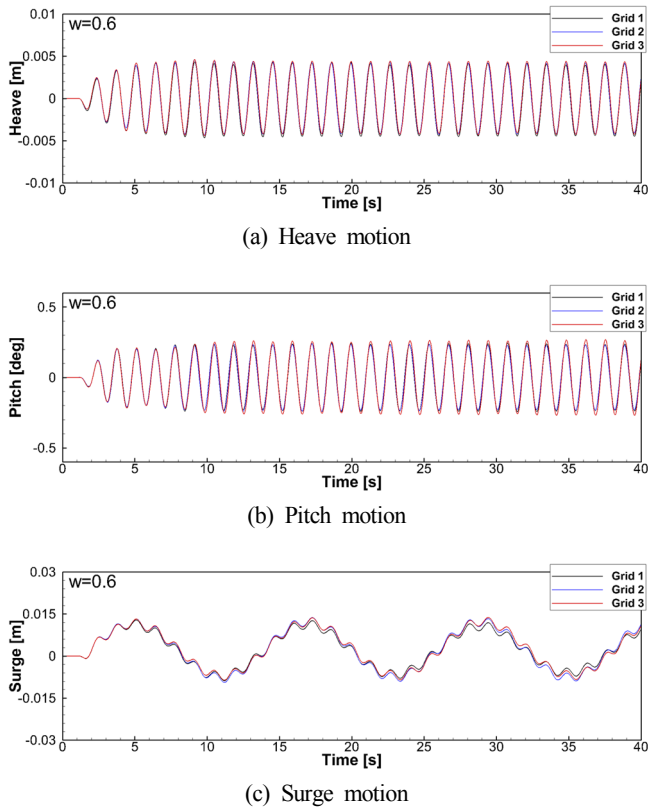


Fig. 13 Motion results at $\omega = 0.6$

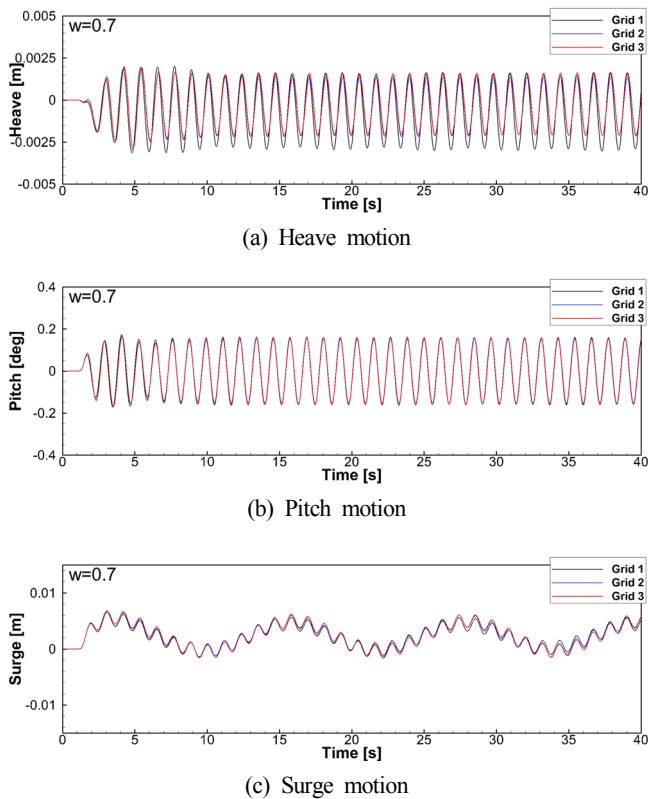


Fig. 14 Motion results at $\omega = 0.7$

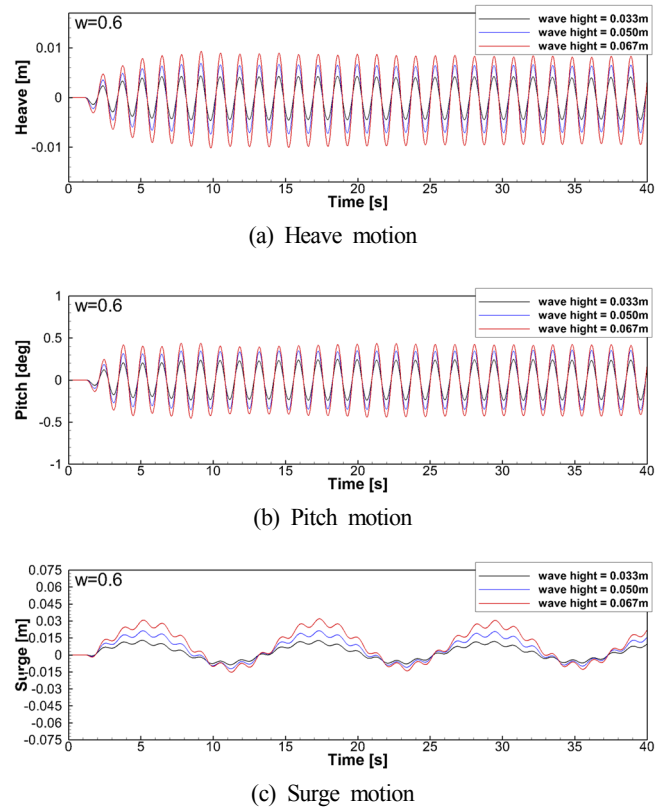


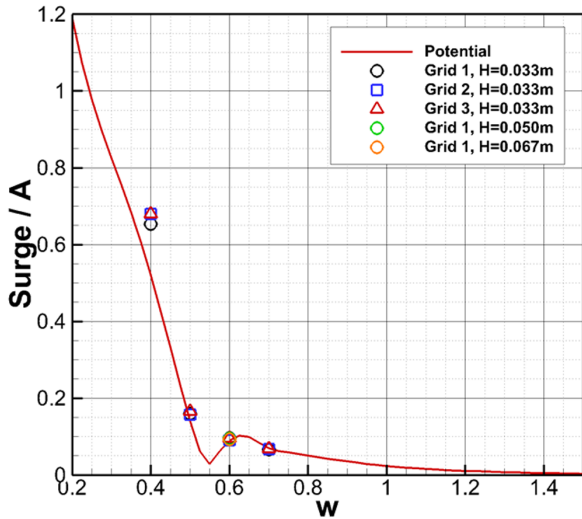
Fig. 15 Motion results varying wave height at $\omega = 0.6$

Fig. 12은 파 진동수 0.5의 결과를 비교하고 있다. 파 진동수 0.4의 결과와 마찬가지로, 본 조건의 경우에도 세 가지 격자에서 얻어진 결과들이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

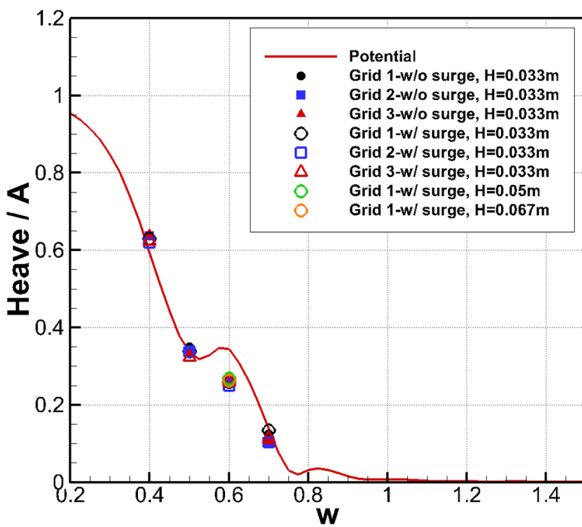
Fig. 13과 14는 파 진동수 0.6과 0.7 운동의 시간에 따른 진폭변화를 각각 비교하고 있다. 파의 기울기와 비선형 특성이 커지면서 격자 간 운동진폭의 차이가 약간 나타나는 것을 볼 수 있다. 파 진동수 0.7의 경우 가장 작은 격자수의 상하동요 운동진폭이 다른 격자들과는 조금 더 차이를 보이고 있다. 그러나 이러한 차이는 다음에 비교하게 될 운동의 RAO(Response amplitude operator) 관점에서는 큰 차이가 아닌 것으로 판단된다. 그 외 다른 운동의 진폭들의 차이는 앞선 파 진동수 0.4와 0.5보다는 크지만 비교적 서로 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 15는 파 진동수 0.6에 대해 파고의 변화에 따른 FPSO의 상하동요, 중동요 및 전진동요 운동의 시간에 따른 진폭변화를 비교하고 있다. 본 계산에서는 성긴 격자를 사용하였다. 일반적으로 대진폭 운동이 아닌 경우 파 진동수에 따른 선체의 운동은 선형특성이 지배적으로 파고의 증가에 따른 배수만큼의 운동진폭의 증가 현상이 본 결과에도 나타나고 있다.

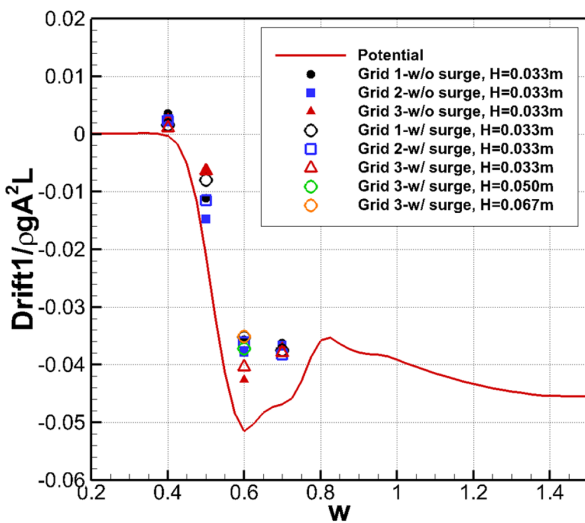
Fig. 16은 앞서 계산한 FPSO 운동의 RAO를 포텐셜유동 해석 결과 비교하고 있다. 그림에는 선체의 전후동요를 구속한 경우의 결과를 포함하고 있다. 파 진동수 0.4에서 전진동요와 중동요 운동이 그리고 진동수 0.6에서 상하동요 운동이 포텐셜유동의 결과와 다소 차이를 보이는 것 외 각 파 진동수에 대해 모든 격자조건의 결과들이 비교적 만족스런 일치를 보여주고 있습니다. 전후동요를 구속하였을 때 상하동요의 경우 큰 차이가 없고 낮은 파 진동수의 중동요 운동이 전후동요를 고려했을 때보다



(a) Surge



(b) Heave



(c) Pitch

Fig. 16 Comparison of motion RAOs

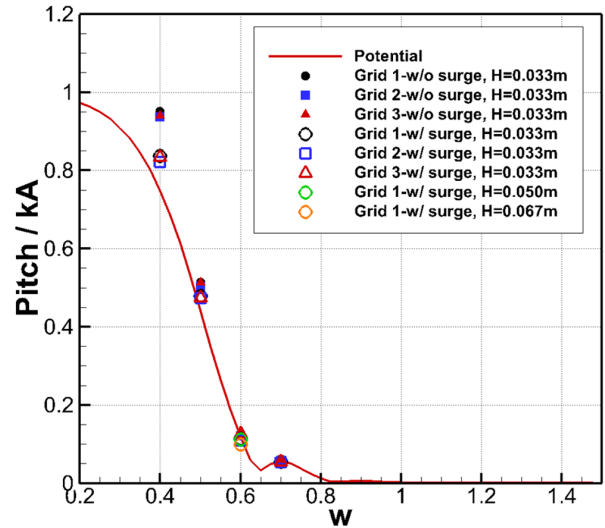


Fig. 17 Comparison of mean drift force RAO

커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 17은 전진동요 방향으로 선체에 작용하는 시간 평균한 표류력을 포텐셜유동의 해와 비교하고 있다. 본 수치해석의 경우 포텐셜유동 해석보다 다소 작게 예측되고 있다. 이는 파와 선체가 상호작용하는 선체 근방의 유동이 두 수치해석법에서 다른 것이 그 원인으로 추측된다.

4. 결 론

본 논문의 2차원 파 진행문제에 대한 수치 민감도 해석을 통해 파 시뮬레이션에 참조될 수 있는 수차격자 및 CFL조건에 대한 수치오차 분포도를 완성하였다. 파진폭 및 파장의 오차는 파장당 격자수 80개 이상에서 많이 감소하였으며, 이보다 큰 파장당 격자수 95개 이상에서 CFL 조건에 따른 오차 폭이 대체로 작았다. 파고당 격자수의 경우 파장당 격자수 조건이 충분할 경우 15~25개의 범위에서 적절한 정확도를 보였다. 이러한 수치 민감도 검토 결과를 바탕으로 대상 파가 아닌 파장과 파고가 서로 다른 파들에 대한 별도의 검토를 수행하여 파의 진폭과 위상에 대한 오차가 적은 해를 구할 수 있었다.

마지막으로, 2차원 문제에서 얻은 수치 민감도 분석결과를 다양한 파 진동수 조건의 파랑중 FPSO 운동해석에 적용하여 그 유효성을 확인하였다. FPSO 운동해석을 위해 각 파진동수 조건에 대해 세 가지 수차격자 조건들을 결정하였으며 그 결과 각각의 격자계에 대한 운동응답이 포텐셜유동의 해 비교적 좋은 일치성을 보이는 것을 확인하였다. 다만, 파의 기울기가 상대적으로 큰 파 진동수 0.6과 0.7조건에서 각각의 진동수에 대한 세 가지 격자중 대체로 전체 격자수가 작은 격자계의 운동의 시계열 거동이 다른 파 진동수의 결과와 비교했을 때 격자간 다소 차이를 보이는 것을 볼 수 있었다. 그러나 포텐셜유동과 비교하여 운동의 RAO들은 대체로 만족스러운 일치를 보여주었다. 선체에 작용하는 전진동요 방향의 시간평균 표류력의 RAO는 점성을 고려한 본 수치해석 결과가 진동수 0.4를 제외하고 포텐셜유동의 결과보다 다소 작은 추정치 특성을 보였다.

향후, 본 수치해석 결과를 바탕으로 구조물과 비선형파의 상호작용이 큰 문제에서 높은 정도의 해를 얻기 위해 필요한 수치 민감도 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 SHI-KRISO 해양공학수조 활용 해양설계엔지니어링 공동연구와 국제적 수준의 안전성을 확보한 GT 15,000급 카페리 설계 과제의 지원으로 작성되었습니다.

References

- CD-adapco, 2015. STAR-CCM+ 10.04 User's Manual.
- Enger, S., Perić, M., Monteiro, H., 2014. Coupling of 3D Numerical Solution Method Based on Navier-Stokes Equations with Solutions Based on Simpler Theories. Proceedings of XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Fortaleza, CE, Brazil.
- Go, G.S., Ahn, H.T., Ahn, J.H., 2017. Simulation-Based Determination of Hydrodynamic Derivatives and 6DOF Motion Analysis for Underwater Vehicle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(5), 371-377.
- Heo, J.K., Park, J.C., Kim, M.H., 2011. CFD Analysis of Two-Dimensional Floating Body with Moon Pool under Forced Heave Motion. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), 36-46.
- Hong, S.Y., Kim, J.H., Kim, H.J., Choi, Y.R., 2002. Experimental Study on Behavior of Tandem and Side-by-side Moored Vessels. Proceedings of 12th ISOPE, Kita-Kyushu 3, 841-847.
- Kim, S.E., 2011. CFD as a Seakeeping Tool for Ship Design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3(1), 65-71.
- Nielsen, K.B., 2003. Numerical Prediction of Green Water Load on Ships. Ph.D. thesis, Technical University of Denmark.
- Nam, B.W., Kim, Y.H., Yang, K.K., Hong, S.Y., Sung, H.G., 2012. Numerical Study on Wave-induced Motion of Offshore Structures Using Cartesian-grid based Flow Simulation Method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(6), 7-13.
- Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, H.J., 2017. A Numerical Study on Slow-Drift Motion and Wave-in-Deck Impact Event of a Tension Leg Platform in Extreme Waves. Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim, Norway.
- Muzaferija, S., Perić, M., 1999. Computation of Free Surface Flows Using Interface-tracking and Interface-capturing Methods, *Nonlinear Water Wave Interaction*, Mahrenholtz, O., Markiewicz, M., (Eds.), WIT Press, Southampton, UK, Chapter 2, 59-100.
- Perić, R., Abdel-Maksoud, M., 2016. Reliable Damping of Free-surface Waves in Numerical Simulations. *Journal of Ship Technology Research*, 63(1), 1-13.
- Park, I.R., Kim, J., Kim, Y.C., Kim, K.S., Van, S.H., Suh, S.B., 2013. Numerical Prediction of Ship Motions in Wave using RANS Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(4), 232-239.
- Shih, T.H., Liou, W.W., Shabir, A., Zhu, J., 1995. A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation. *Computers and Fluids*, 24(3), 227-238.
- Sato, Y., Miyata, H., Sato, T., 1999. CFD Simulation of 3-Dimensional Motion of a Ship in Waves : Application to an Advancing Ship in Regular Heading Waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 4(3), 108-116.
- Yum, D.J., Yoon, B.S., 2008. Numerical Simulation of Slamming Phenomena for 2-D Wedges, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), 477-486.
- Zhang, S., Liut, D., Weems, K., Lin, W.M., 2005. A 3-D Finite Volume Method for Green Water Calculation. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece.

Numerical Simulation on the Response of Moored Semi-submersible Under Ice Load

Jeong-Hwan Kim* and Yooil Kim^{ORCID}*

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

유빙 하중을 받는 계류된 반잠수식 시추선의 응답해석

김정환* · 김유일^{ORCID}*

*인하대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Ice load and behavior 빙하중 및 거동, Semi-submersible rig 반잠수식 시추선, Pack ice condition 유빙조건, Finite element method 유한요소법, Drag force coefficient 항력 계수, Pressure-penetration relation 압력-침투 관계

ABSTRACT: This study simulated ice load and the motion response of a moored semi-submersible rig in pack-ice conditions using a finite element method. Ice flows of random size and shape were modeled, and interactions for ice-sea, ice-structure, ice-ice were simulated using a simplified method. Parameters for the simplified method such as drag force coefficient and the pressure-penetration relation were obtained based on the result of detailed analysis using the coupled Eulerian-Lagrangian method. The mooring lines were modeled by spring elements based on their stiffness. As a result of the simulation over 1,400 seconds, the force and motion response of the rig were obtained and validated using discrete elements and compared with the results found by the Krylov State Research Centre.

1. 서 론

지구온난화로 인해 극지 자원개발에 대한 기대가 커지면서, 극지에서의 석유자원 시추를 위한 드릴쉽(Drillship)이나 반잠수식 시추선(Semi-submersible rig)에 대한 관심은 나날이 증가하고 있다. 특히 반잠수식 시추선은 선박 형태의 드릴쉽에 비해 수선 면적이 적어 파랑 및 빙하중을 적게 받기 때문에 극지의 시추 작업을 위한 해양구조물로 각광을 받고 있다.

극지용 반잠수식 시추선은 그 환경의 특수성으로 인해 일반 해역에 설치되는 것과 달리 추가로 고려해야 할 사항들이 있는데 그 중 가장 중요한 요소가 바로 빙하중이다. 특히 유빙(Pack ice)에 의한 빙하중은 그 발생 빈도가 높고 선체와 계류라인에 영향을 줄 수 있어 설계단계에서 정확한 예측이 필요하다.

빙하중을 예측하기 위한 수치해석법의 개발은 컴퓨터의 계산 성능이 발달하면서 활발히 진행되고 있다. Metrikin et al.(2015)은 최근의 빙하중 예측용 수치해석법을 유한요소법(Finite element method), Particle-in-cell(PIC) 그리고 개별요소법(Discrete element method)으로 크게 세 가지로 나누었다. Kim et al.(2013), Wang and Derradji-Aouat(2011) 그리고 Millan and Wang(2011)은 유한

요소법의 ALE(Arbitrary lagrangian eulerian) 기법을 적용하여 얼음과 물과 구조물의 상호작용을 구현하였다. Particle-in-cell 기법은 Sayed(1997)에 의해 개발된 방법으로 Semi-lagrangian이라고 할 수 있다. 즉, 이 기법에서는 얼음을 개별입자로 묘사하고, 이들 입자들이 Eulerian 도메인으로 구현된 바다 위에서 움직이도록 하였다. 개별요소법은 Cundall and Strack(1978)에 의해 개발되어 수많은 입자들의 움직임과 충돌을 구현하기 위한 수치해석법으로 널리 알려져 있다. Sun and Shen(2012)은 개별요소법을 이용하여 Pancake ice에 대한 빙하중을 계산하였다. 이 밖의 방법으로, Alawneh(2014)은 GPU(Graphics processing unit)를 이용하여 빙하중을 계산하는 GPU-based event mechanics을 개발하였다. 이 방법은 2D로 구현되는 단점이 있지만 실시간 시뮬레이션이 가능할 정도로 매우 빠르게 계산할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 유빙(Pack ice) 조건에서 계류된 반잠수식 시추선에 대한 빙하중과 거동을 계산하였다. 해석시간의 절감을 위해, 얼음과 해수, 얼음과 구조물 그리고 얼음들 간의 상호작용을 간략화된 방법(Simplified method)을 통해 구현하였고, 정확성의 향상을 위해 간략화 방법에 사용되는 주요 계수(Coefficient)들은 별도의 상세 해석을 통해 계산된

Received 4 April 2018, revised 16 June 2018, accepted 18 June 2018

Corresponding author Yooil Kim: +82-32-860-7347, yooilkim@inha.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7540-761X

© 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.

후 적용되었다. 최종적으로 계산된 빙하중은 러시아의 Krylov 연구소에서 수행된 해석의 결과와 비교하여, 제안된 방법의 적용성을 평가하였다.

2. 빙하중 계산 방법

계산에 사용된 프로그램은 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit이며, 자동 모델링 기법을 개발하여 임의의 형상을 가진 유빙을 모델링하였다. 유빙의 거동은 User subroutine을 이용하여 모사하였으며, 유빙의 충돌로 인해 발생하는 얼음의 국부적 손상(Local failure)은 압력-침투량(Pressure-penetration) 관계를 통해 구현하였다.

2.1 해수-얼음의 상호관계(Interaction) 모델링

얼음은 대부분 해수에 부분적 또는 전체적으로 잠겨있기 때문에 이로 인해 발생하는 Drag force, 부가질량(Added mass), 관성력(Inertia) 그리고 부력(Buoyancy force)과 같은 유체역학적 하중을 받게 된다. 본 연구에서는 이러한 하중으로 인한 얼음의 거동을 구현하기 위해 Fig. 1과 Fig. 2 그리고 식 (1)-(3)에서 나타낸 바와 같이 6자유도를 고려한 식을 적용하였다. 먼저, 식 (1)과 식 (2)의 Drag force(\vec{F}_d)와 Drag moment(\vec{M}_d)는 Surge, Sway, Yaw와 같은 평면운동(Planar motion)에 적용되었다 (Hopkins and Shen, 2001). 반면, Heave, Roll, Pitch는 식 (3)에서 나타낸 바와 같이 얼음의 표면에 부력(P)의 형태로 적용하였다. 또한, Roll과 Pitch와 같이 얼음이 기울어진 상황을 고려하기 위해 해당 면(Surface)에 국부좌표계 x' 와 y' 를 따라 압력을 계산하여 적용하였고, 대변형을 고려하기 위해 얼음의 모든 면에 압력이 적용되도록 하였다. 부가질량의 구현을 위해 기존 질량에 $1+c_m$ 을 곱한 값을 질량으로 대체하였으며, 여기서 c_m 은 Newman(1977)에 따라 0.41을 적용하였다.

$$\vec{F}_d = -\frac{1}{2} C_d^f \rho_w A_s (\vec{V} - \vec{V}_w) |\vec{V} - \vec{V}_w| \quad (1)$$

$$\vec{M}_d = -\frac{1}{2} C_d^f r^2 \rho_w A_s \vec{w} |\vec{w}| \quad (2)$$

$$P(x', y') = \rho_w g h(x', y') \quad (3)$$

여기서 C_d^f 는 Drag force 계수를 나타내며, ρ_w 는 해수의 밀도, A_s 는 투영면적을 의미한다. \vec{V} 는 얼음의 속도, 그리고 \vec{V}_w 는 조

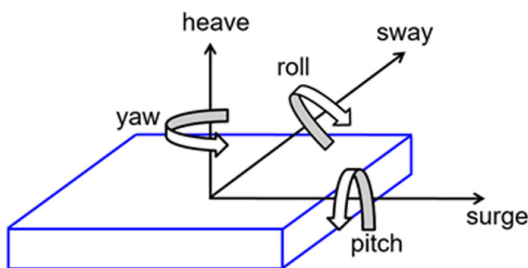
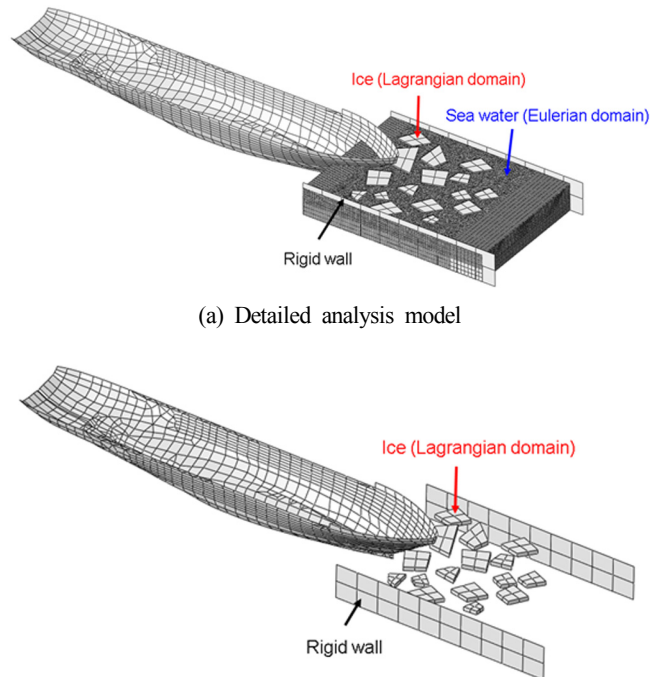


Fig. 1 Orientation of floe describing 6 degrees of freedom

류의 속도를 나타낸다. r 은 얼음의 중심점과 꼭지점들 사이의 거리를 평균한 값이며, \vec{w} 는 각속도를 나타낸다. g 와 h 는 각각 중력가속도와 해수면으로 부터의 거리를 의미한다. Drag force 계수(C_d^f)는 Coupled Eulerian-Lagrangian 방법을 이용한 상세 해석을 통해 얻었다. Fig. 2은 Drag force 계수를 얻기 위한 상세해석(a)과 본 연구에서 제안한 방법을 이용한 해석(b)의 모습을 나타내고 있다. 상세해석에서는 얼음을 Lagrangian 도메인, 그리고 해수를 Eulerian 도메인으로 구현하여 얼음을 해수에 뜨도록 한 후 강체로 구현된 선박모델을 전진시켜 충돌하게 하였다. 선박 모델로는 대한민국 최초의 연구용 쇄빙선인 아라온호를 적용하였다. 제안된 방법을 이용한 해석모델에서는 얼음과 선박모델은 동일하게 생성한 후 해수를 모델링하는 대신 식 (1)-(3)에서



(a) Detailed analysis model

(b) Proposed model

Fig. 2 FE models for obtaining drag force coefficient

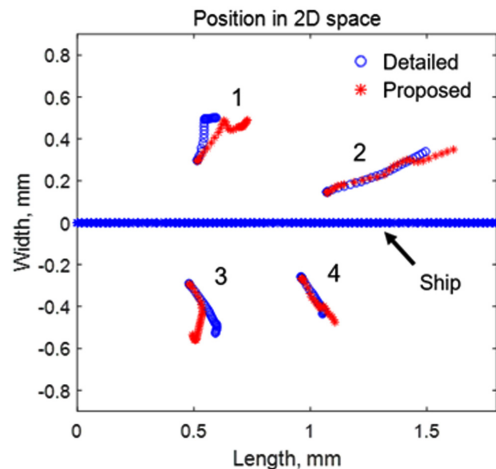


Fig. 3 Comparison of positions between detailed analysis model and proposed model

설명한 Drag force와 부력, 부가질량을 적용하여 얼음과 해수와 의 상호작용을 구현하였다. Drag force 계수는 두 해석모델에 대해 일련의 파라메트릭 연구를 수행하여 유사한 얼음들의 거동을 만드는 값으로 정하였다. 최종적으로 얻어진 Drag force 계수는 10.5이며, 선박과 가장 가까운 곳에 위치한 4개의 얼음의 거동을 비교한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 결과적으로 회전운동을 주로 하는 얼음들(1번과 3번)에 비해 직선운동을 주로 하는 얼음들(2번과 4번)에 대한 정확도가 더 높은 경향을 보였다.

2.2 얼음-구조물의 상호관계(Interaction) 모델링

일반적으로 얼음과 구조물 또는 얼음들 간의 충돌 시에 발생하는 국부적 손상(Local failure)은 일반적으로 얼음의 다양한 물성치를 고려한 상세한 해석을 통해 구현된다. 하지만, 이러한 상세 해석은 막대한 해석 시간을 요구하기 때문에 수많은 얼음의 충돌을 구현하는 유빙 상태에서의 해석 시에는 적합하지 못하다. 대신, 본 연구에서는 얼음의 충돌 시 발생하는 국부적 손상을 충돌하는 요소들 간의 침투(Penetration)를 통해 구현하도록 하였다. Fig. 4에서는 본 연구에서 적용한 압력-침투 관계(Pressure-penetration relation)를 설명하고 있다. 즉, 얼음의 충돌 시 발생하는 압력에 따라 침투량을 다르게하여 국부적 손상에 의한 하중과 얼음 거동의 변화를 구현하였다. 하중이 아닌 압력과 침투 간의 관계를 사용하는 것은 다양한 충돌의 상황을 고려하기 위해서이다. 즉, 압력은 하중과 접촉면으로 계산되기 때문에 충돌

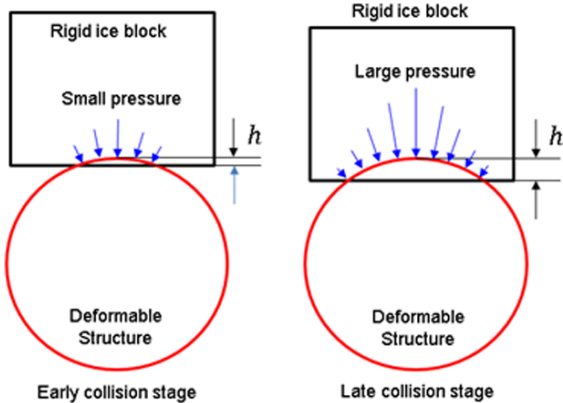


Fig. 4 Contact pressure-penetration relation

Table 1 Condition for pressure-penetration relation

Number	Thickness [m]	Size [m]	Collision angle [°]
1	0.3	3 × 3	0
2	0.6	3 × 3	0
3	0.6	6 × 6	0
4	0.9	4.5 × 4.5	0
5	0.9	9 × 9	0
6	0.3	3 × 3	45
7	0.6	3 × 3	45
8	0.6	4.5 × 4.5	45
9	0.9	6 × 6	45
10	0.9	9 × 9	45

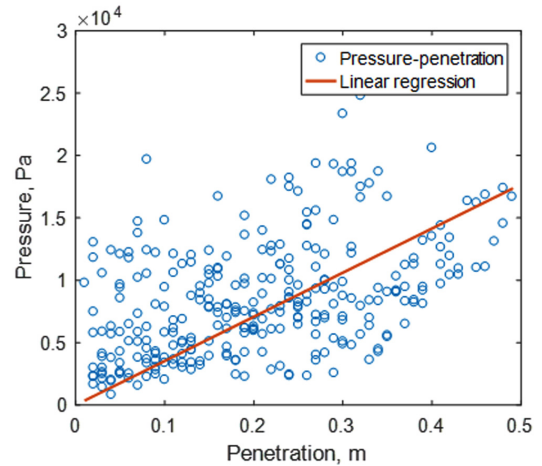


Fig. 5 Derived pressure-penetration curve

하는 면의 형상에 상관없이 일관된 상관관계를 얻을 수 있다. 얼음의 압력-침투 관계는 여러 가지 충돌 시나리오를 고려한 탄소성해석을 통해 구하였다. 본 연구에서는 Table 1에서 나타난 10가지 상황에 대해 탄소성해석을 수행하였다. 1년생 빙(First-year ice)의 경우 최대 두께가 2m이지만 1m이하가 대부분을 차지하므로 두께는 0.3m, 0.6m, 0.9m를 선택하였다. 얼음의 크기는 각 얼음두께에 대해 Lindseth(2013)의 기준에 따라 더이상 깨지지 않는 얼음의 최대 크기와 그 최대 크기의 반으로 선택하였다. 마지막으로, 각 경우에 대해 정면충돌과 45° 충돌 경우를 추가하였다.

최종적으로, 해석을 통해 얻은 각 Time step별 압력과 침투량과의 관계를 Fig. 5와 같이 나타낸 후 Kärnä(1993)에 따라 선형회귀(Linear regression)하여 압력-침투 관계를 얻었다. 도출된 압력-침투 곡선의 기울기는 35,367Pa/m이다.

3. 대상 구조물과 계류시스템

본 연구에 적용된 대상 구조물은 Fig. 6과 같이 4개의 칼럼(Column)을 가진 반잠수식 시추선이다. 주요제원은 Table 2에 나타내었으며, 좌표계는 Fig. 7과 같이 얼음의 진행방향을 x축으로 놓았다.



Fig. 6 Semi-submersible rig

Table 2 Main dimensions of target structure

Dimension	
Length [m]	80.6
Width [m]	73.6
Draft [m]	23.0
Weight [Ton]	67,000
Inertia moment against the vertical central axis [Ton·m ²]	3,062,394
Waterline area [m ²]	1,282.9

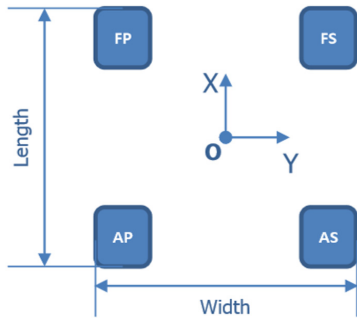


Fig. 7 Coordinate system of target structure

Fig. 8에서는 대상 시추선에 적용된 계류라인을 나타내고 있다. 각 칼럼 당 2개씩 총 8개의 계류라인이 45° 간격으로 적용되었으며, 라인의 총 길이는 1,920m이고, 수중단위중량(Submerged weight per unit length)은 1,511kg/m이다. 계류라인의 강성(Stiffness)은 모든 방향에 동일하게 Fig. 9와 같이 적용하였다.

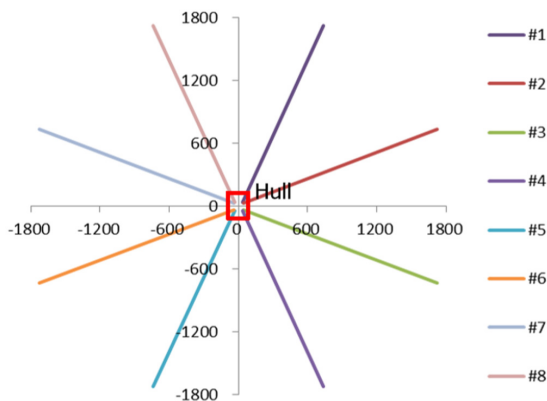


Fig. 8 Mooring line layout

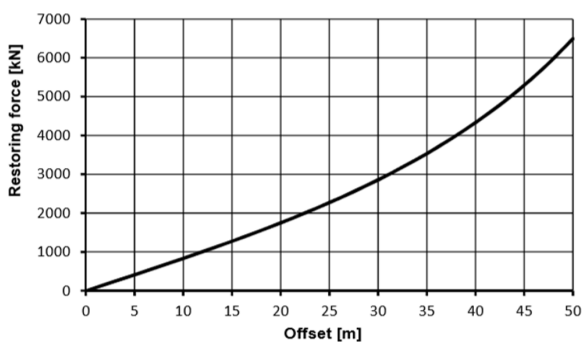


Fig. 9 Stiffness characteristic of the mooring system

4. 수치해석

4.1 해석 조건

본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 유빙 조건에서의 수치 해석을 수행하였다. 본 연구에 적용된 해석 조건은 Table 3과 같다. 다른 조건은 모두 동일하며 얼음의 속도만 다른 두 개의 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Table 3 Analysis condition

	Ice thickness [m]	Concentration [%]	Floe size [m]	Ice velocity [m/s]	Ice direction [°]
Case 1	2.1	80	40	0.5	0
Case 2	2.1	80	40	0.8	0

4.2 유한요소모델

먼저, 반잠수식 시추선과 계류라인을 Fig. 10과 같이 단순화하여 모델링하였다. 4개의 칼럼을 강체(Rigid body)로 모델링한 후, 이 칼럼들이 시추선의 중심(Center of gravity, COG)을 따라 움직이도록 연결(Coupling) 하였다. 시추선의 질량과 관성모멘트는 COG에 적용하였으며, 계류라인은 각 칼럼에 연결된 X, Y방향

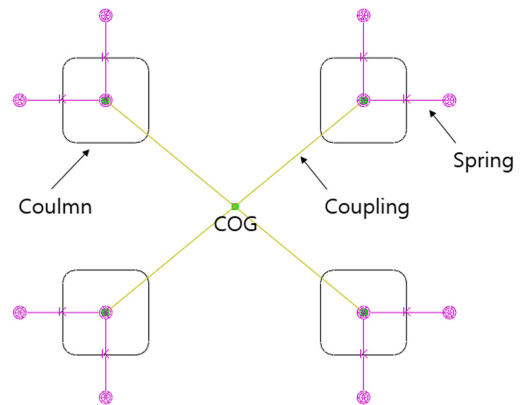


Fig. 10 Modeling of target structure and mooring system

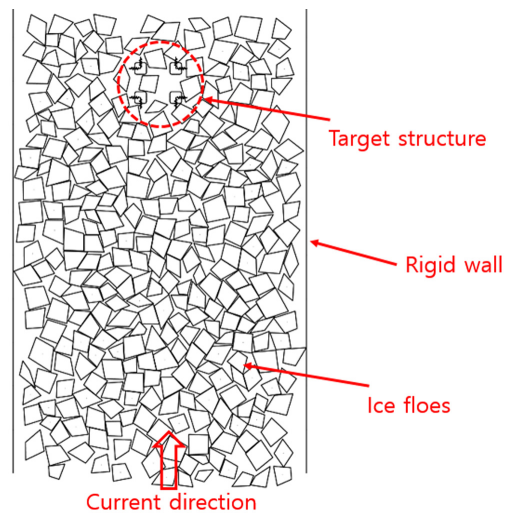


Fig. 11 Analysis model

스프링을 통해 구현하였다. 얼음은 2장에서 소개한 방법을 이용하여 모델링하였다. 임의의 형상을 가진 사각형으로 구현하였으며, 대상 시추선 주변에 80%의 밀집도(Concentration)로 배치하였다. 모델의 가장자리 얼음들의 경계조건을 구현하기 위해 강체의 벽(Rigid wall)을 생성하였으며, 경계조건 효과(Boundary effect)를 최소화 하기 위해 유빙과 구조물의 의 크기를 고려하여 채널의 폭은 500m로 정하였다. Fig. 11에서는 전체모델의 모습을 나타내고 있다.

4.3 해석 결과 및 KSRC(Krylov State Research Centre) 결과와의 비교

1,400초 동안 해석을 수행하였으며, 해당시간 동안 대상 시추선이 받는 빙하중과 움직임의 변화를 측정하였다. Fig. 12는 해석의 절반이 진행되었을 때 얼음의 분포와 시추선의 움직임을 보여주고 있다.

해석을 통해 도출된 결과는 러시아 크릴로프 연구소(Krylov State Research Centre, KSRC)에서 최근 수행한 결과와 비교하였다. KSRC에서는 동일한 조건에 대해 개별요소법(Discrete element method, DEM)을 이용하여 계산을 수행하였으며, 각 얼음은 2차원의 원형으로 모델링하였다. 또한, 현실적인 조류(Current)의 적용을 위해 정지상태부터 서서히 속도를 올려 0.5m/s 조건의 경우는 900초, 0.8m/s 조건의 경우는 500초에 목표속도에 도달하도록 하였다(Karulin and Karulina, 2013). Fig. 13에서는 Case 1의 조건에 대해 각각의 방법으로 계산된 대상 시추선의 거동과 하중을 비교하였다. 본 논문에서 소개된 방법을 통해 계산된 결과는 'FEM', 그리고 KSRC에서 계산한 결과는 'KSRC'로 각각 표시하였다. 먼저, X방향(빙하중을 받는 방향)을 살펴보면, 두 경우 모두 목표속도에 도달하게 되는 900초가 지난 이후부터 일정한 주

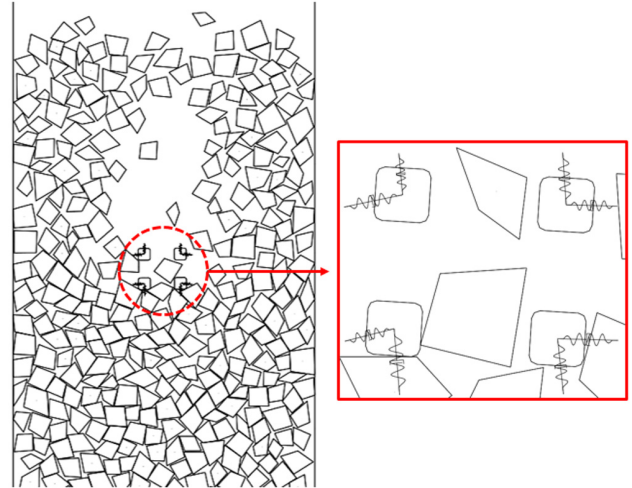


Fig. 12 Motion of target structure during simulation

기를 가지고 진동하는 것을 볼 수 있다. 대상 시추선의 질량과 계류라인의 강성을 고려해 계산된 고유주기는 약 170초이며, 두 결과 모두 고유주기와 유사한 주기로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 해석의 초기에 900초까지의 결과가 다소 차이를 보이는데, 이것은 두 해석의 얼음의 초기 분포와 형상이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 일단 목표 속도에 도달하면 두 경우가 서로 유사한 진폭으로 거동하는 것을 볼 수 있다. 반면, Y방향(빙하중을 받는 방향과 직각인 방향)으로는 움직임이 매우 적은 것을 알 수 있다. 다음으로 X방향의 하중을 살펴보면, 해석시간 동안 발생한 최대 빙하중이 유사한 것을 확인할 수 있다. 다만, 'KSRC'

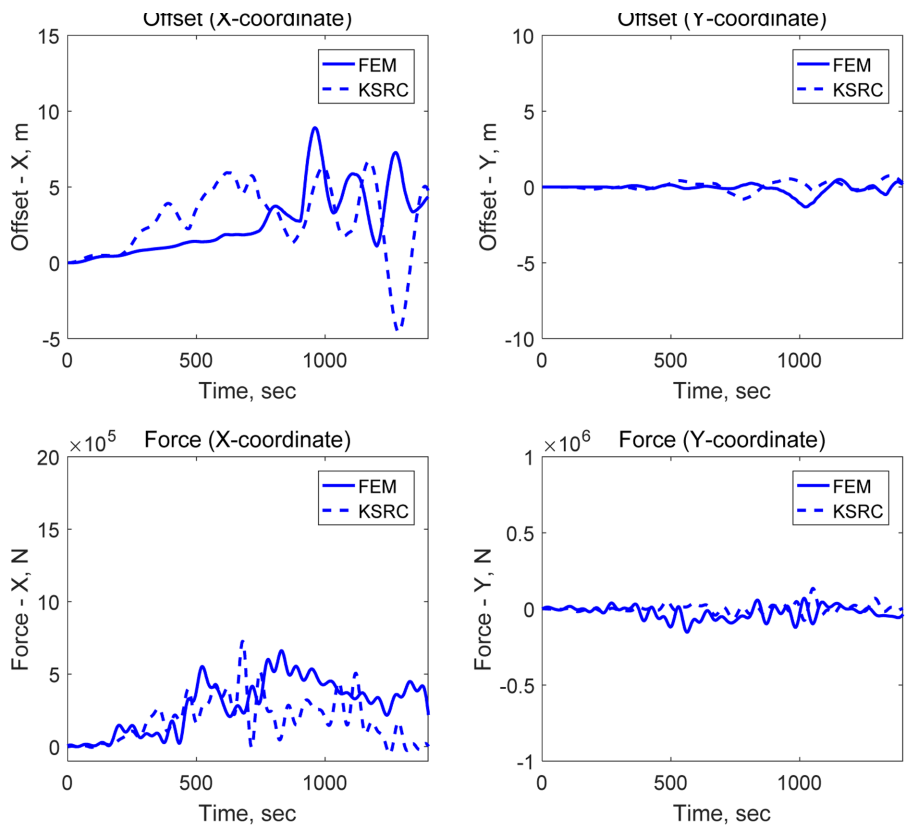


Fig. 13 Comparison of results at current velocity of 0.5m/s condition

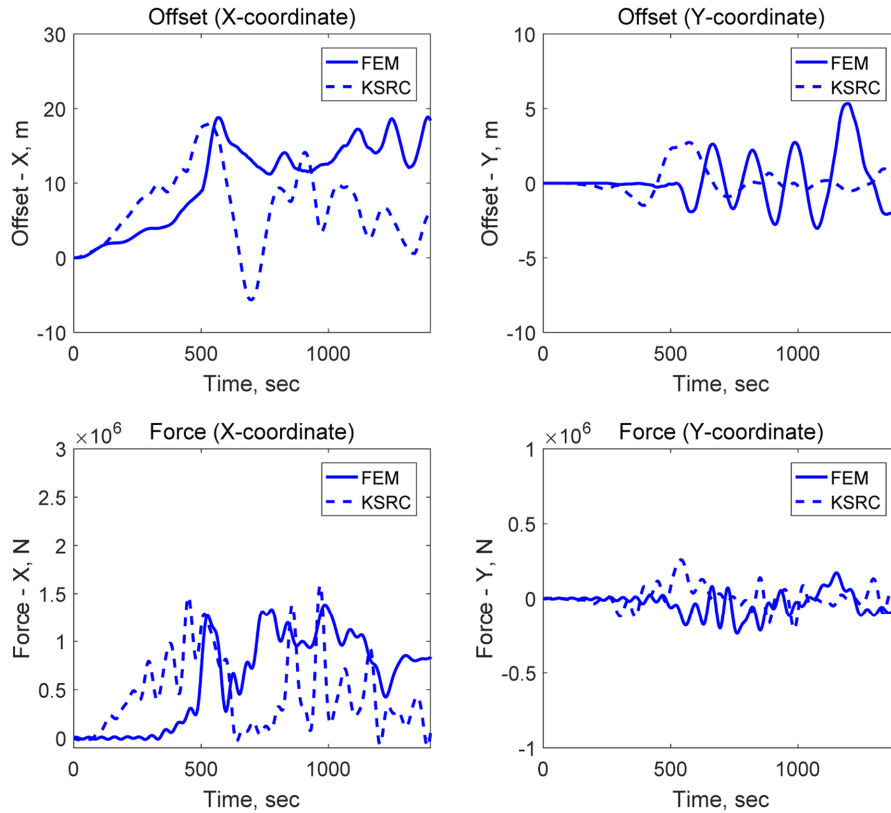


Fig. 14 Comparison of results at current velocity of 0.8m/s condition

의 경우가 하중의 변동성이 더 큰 모습을 보였다. 마찬가지로 Y 방향의 하중은 X방향에 비해 무시할 정도로 적은 값을 보였다. 이는 대상 구조물의 칼럼(Coullmn)의 경사각이 0°이기 때문으로 판단된다. 경사각이 큰 구조물의 경우는 Y방향의 움직임도 증가할 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 14에서는 Case 2의 조건에 대해 각각의 방법으로 계산된 대상 시추선의 거동과 하중을 비교하였다. 먼저, X방향을 살펴보면, 두 경우가 모두 목표속도에 도달하게 되는 500초가 되는 시점에서 최대 변위를 보이고, 그 값 역시 유사한 수준을 보였다. 진동하는 주기는 유사한 경향을 보이거나 그 값은 Case 1에 비해 다소 큰 차이를 보였다. Y방향 거동의 경우 ‘KSRC’는 500초가량에서 최대 변위를 보인 이후에는 적은 거동을 보인데 반해 ‘FEM’의 경우는 계속해서 일정한 주기를 가지고 비교적 큰 거동으로 움직이는 것을 알 수 있다. X방향의 하중은 Case 1과 유사하게 최대 빙하중이 유사한 반면 변동성에는 비교적 큰 차이를 보였다. 역시 Y방향의 하중은 X방향에 비해 무시할 정도로 적은 값을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 유빙 상태에서의 빙하중을 계산하는 새로운 방법을 제안하고, 이를 이용하여 계류된 반잠수식 시추선의 빙하중 계산 및 모션 해석에 적용하였다. 상기의 연구를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 자동 모델링 기법을 적용하여 임의의 형상 및 크기를 가지는 얼음을 모델링하였다. 이로 인해, 유빙상태의 모델링에 필요한 시간을 대폭 절감하였다.

(2) 얼음과 해수, 얼음과 구조물, 얼음들 간의 상호작용은 간략화 기법(Simplified method)을 적용하여 모델링하였다. 이 때 필요한 여러 중요한 계수들은 상세한 해석을 통해 도출하였다.

(3) 얼음의 충돌로 인해 발생하는 국부손상(Local failure)은 압력-침투 관계(Pressure-penetration relation)를 통해 구현하였다. 얼음과 구조물의 압력-침투 관계는 발생 가능한 상황에 대해 상세 해석을 수행한 후 계산된 결과들을 선형회귀하여 도출하였다. 상세해석에는 얼음의 탄소성이 고려된 물성치를 사용하였으며, Coupled Lagrangian-Eulerian 기법을 적용하였다.

(4) 얼음과 해수의 상호작용 모델링에 중요한 역할을 하는 Drag force coefficient 또한 Coupled Lagrangian-Eulerian 기법을 이용한 상세해석을 통해 얻었다. 상세해석에서는 얼음을 Lagrangian 도메인, 그리고 해수를 Eulerian 도메인으로 구현하여 얼음을 해수에 뜨도록 한 후 강제로 구현된 선박모델을 전진시켜 충돌하게 하였으며, 본 연구에서 제안된 방법을 이용한 결과와의 비교를 통해 Drag force coefficient를 최종 도출하였다.

(5) 제안된 방법을 유빙 조건에 계류된 반잠수식 시추선에 적용하였다. 해석을 통해 도출된 결과는 러시아 크릴로프 연구소에서 최근 수행한 결과와 비교하였다.

(6) 동일한 조건에 대해 해석을 수행하여 대상 시추선의 거동과 빙하중을 비교한 결과, 두 경우 모두 고유주기와 유사한 주기로 진동하는 것을 확인할 수 있었으며 움직임의 최대값은 유사하나 변동폭은 다소 차이가 있었다. 빙하중도 마찬가지로 해석 기간 동안 예측된 최대값은 두 경우가 유사한 결과를 보였으나 변동폭에서는 차이를 보였다. 전체적으로 0.8m/s보다는 0.5m/s 속도 조건에서 더 유사한 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업핵심기술개발사업(10063417, ARC7 극지 환경용 해양플랜트 내빙구조 설계기술 개발)의 재정지원을 받아 수행된 연구 결과의 일부임을 밝힙니다.

References

- Metrikin, I., Gurtner, A., Bonnemaire, B., Tan, X., Fredriksen, A., Sapelnikov, D., 2015. SIBIS : A Numerical Environment for Simulating Offshore Operations in Discontinuous Ice. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions(POAC), Trondheim, Norway.
- Kim, M., Lee, S., Lee, W., Wang, J., 2013. Numerical and Experimental Investigation of the Resistance Performance of an Icebreaking Cargo Vessel in Pack ice Conditions. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5(1), 116-131.
- Wang, J., Derradji-Aouat, A., 2011. Numerical Assessment for Stationary Structure (Kulluk) in Moving Broken Ice. Proceedings of the international Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, POAC11-172.
- Millan, J., Wang, J., 2011. Ice Force Modeling for DP Control Systems. Proceedings of the Dynamic Positioning Conference 2011, Houston, Texas, USA.
- Sayed, M., 1997. Discrete and Lattice Models of Floating Ice Covers. International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Honolulu, Hawaii, USA, 428-433.
- Cundall, P., Strack, O., 1978. The Distinct Element Methods as a Tool for Research in Granular Media. Part I, Report to NSF.
- Sun, S., Shen, H., 2012. Simulation of Pancake Ice Load in a Circular Cylinder in a Wave and Current Field. Cold Regions Science and Technology 78, 31-39.
- Alawneh, S., 2014. Hyper-Real-Time Ice Simulation and Modeling Using GPGPU(Ph D. Thesis). Memorial University of Newfoundland.
- Hopkins, M.A., Shen, H.H., 2001. Simulation of Pancake-ice Dynamics in a Wave Field. Annals of Glaciology, 33, 355-360.
- Newman, J., 1977. Marine Hydrodynamics. MIT Press.
- Lindseth, S., 2013. Splitting as a Load Releasing Mechanism for a Floater in Ice(Master thesis). Norwegian University of Science and Technology.
- Kämä T., 1993. Finite Ice Failure Depth in Penetration of a Vertical Indentor into an Ice Edge. Anals of Glaciology, 19, 114-120.
- Karulin, E.B., Karulina, M.M., 2013. Determination of Loads on Mooring System During the Semisubmersible Interaction with Ice. International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2013), 1288-1294.

Estimation Method for Ice load of Managed Ice in an Oblique Condition

Hyunsoo Kim* and Jae-bin Lee^{ORCID}**

*Department of Ship and Ocean System, Inha Technical College, Incheon, Korea

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

깨어진 해빙의 사향조건에서 빙 하중 추정법 연구

김현수* · 이재빈^{ORCID}**

*인하공업전문대학 조선해양과

**인하대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Ice load 빙 하중, Oblique condition 사향조건, Ice breaker 쇄빙선, Pack ice 빙편, Arctic ocean 북극해

ABSTRACT: Recently, as sea ice in the Arctic has been decreasing due to global warming, it has become easier to develop oil and gas resources buried in the Arctic region. As a result, Russia, the United States, and other Arctic coastal states are increasingly interested in the development of oil and gas resources, and the demand for offshore structures to support Arctic sea resources development is expected to significantly increase. Since offshore structures operating in Arctic regions need to secure safety against various drifting ice conditions, the concept of an ice-strengthened design is introduced here, with a priority on calculation of ice load. Although research on the estimation of ice load has been carried out all over the world, most ice-load studies have been limited to estimating the ice load of the icebreaker in a non-oblique state. Meanwhile, in the case of Arctic offshore structures, although it is also necessary to estimate the ice load according to oblique angles, the overall research on this topic is insufficient. In this paper, we suggest algorithms for calculating the ice load of managed ice (pack ice, 100% concentration) in an oblique state, and discuss validity. The effect of oblique angle according to estimated ice load with various oblique angles was also analyzed, along with the impact of ship speed and ice thickness on ice load.

1. 서 론

지구 온난화로 북극의 해빙이 가속화되면서 전 세계적으로 북극지역 자원 개발 가능성에 대한 관심이 증가하고 있다. 기온 상승에 따른 북극 해빙 면적의 감소 속도는 이론적인 기후 모델을 이용한 추정치보다 빠르게 나타나고 있어 북극지역 자원 개발 사업화 가능시점도 2020년 전후로 예상되고 있다. 실제로 러시아에서 출발한 쇄빙수송선이 단독으로 북극해를 통과하여 기존 항로에 비해 30% 단축된 시간에 충남 보령에 도착한 사례가 있다. 또한 미국 지질조사국(USGS, United States Geological Survey)의 북극 자원 탐사보고서에 따르면 지금까지 발견되지 않은 석유와 가스의 약 22%가 북극에 매장되어 있는 것으로 밝혀지면서, 북극해 연안국들(러시아, 미국, 캐나다 등)은 북극지역 자원개발을 위한 극지용 해양구조물의 수요가 크게 증대될 것으로 예상하고 있다.

북극 해양구조물은 빙해에 노출되어 있으므로 빙에 의한 외부 충격으로부터 해양구조물의 안전성을 확보하기 위해 해양구조물에 작용하는 빙 하중 산출이 우선적으로 고려되어야 한다. 빙 하중 산정에 관한 연구는 세계 각국에서 진행되어 왔지만, 기존까지 이루어진 100% concentration인 대부분의 연구는 쇄빙선 박이 빙 해역을 통과할 때의 추진력을 계산하기 위한 빙 하중 추정과 쇄빙선박의 쇄빙성능 관점에 대해서 진행되어 왔다. 최근까지 모형시험을 통해 쇄빙선박에 대한 빙 하중을 추정하기 위한 연구가 발표되고 있으며(Jian and Li, 2015; Jeong et al., 2017), 한편 사향각도에 따른 빙 하중을 추정하기 위해서 평탄 빙에 대해서 모형시험을 통해 빙 하중을 분석한 연구가 진행되어 왔다(Li et al., 2013). 그러나 실제로 극지 해양구조물의 경우 다양한 방향에서 접근하는 유빙과의 충돌이 발생하기 때문에 유빙의 충돌로 인한 피해를 최소화하기 위한 연구가 필요하다. 즉, 유빙 조건에 대한 다양한 사향각도에 따른 해양구조물의 빙

Received 5 January 2018, revised 16 June 2018, accepted 22 June 2018

Corresponding author Jae-bin Lee: +82-032-860-7346, beeny06@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7224-0770

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

© 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.

하중 산정이 요구되지만, 현재까지 이에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 극지 해양 분야의 빙 하중 예측 기술을 정립하기 위해서 빙 하중 추정에 관한 이론을 설명하고, 기 발표된 경험식을 기반으로 다양한 빙 입사 조건에 대한 수정된 빙 하중 계산식을 제시하고 타당성을 검토하였다. 또한, 유빙 조건 중에서 빙편(Pack ice, 100% concentration)에 대해 다양한 사향각도에 따른 극지용 FPU(Floating production unit) 선형의 빙 하중을 산정하여 사향각도가 빙 하중에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 선속 및 빙 두께에 따른 빙 하중을 계산하여, 임의의 사향각도에서 선속 및 두께가 빙 하중에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 빙편(Pack ice, 100% concentration)에 대한 사향조건에서 빙 하중 추정법

빙편 중에서 집적도 100%를 Pre-sawn이라 하며, 이에 대한 빙 하중을 계산하기 위해서 기 개발된 평탄빙에 대한 빙 하중 추정 알고리즘(Kim et al., 2013; Kim et al., 2014)을 기반의 빙 하중 추정 알고리즘을 개발하였다. 비사향조건에서 빙편에 대한 빙 하중 추정 알고리즘은 모형시험을 통해 비교 검증(Kim et al., 2017)된 것으로 사향조건에 적합하도록 수정 및 변형하였다. Fig. 1은 비사향조건에서 Araon 쇄빙선에 대한 Pre-sawn, 즉 Pack ice 집적도 100%에 대한 빙 하중 모형시험을 수중에서 촬영한 사진이다.

기 개발된 평탄빙(Level ice)에 대한 비사향조건에서의 발생하는 전체 빙 하중 추정 알고리즘 구성방정식은 Spencer(Spencer, 1992) 추정 이론을 기반으로 하였으며, 평탄 빙에 대한 비사향조건 빙 하중 모형실험과 비교 검증을 통해 각각의 다른 경험식을 적용하여 빙 하중의 정확도를 향상하였다. 평탄빙에 대한 전체 빙 하중은 다음 식 (1)과 같이 4개의 독립적인 빙 하중 성분들의 선형합으로 산출된다.

$$R_T = R_{OW} + R_{BU} + R_{CL} + R_{BR} \quad (1)$$

여기서 R_{BU} 는 선체 밑으로 흘러들어간 얼음의 부력에 의해 발생하는 부력 하중으로 Enkvist(Enkvist, 1972)의 추정법을 적용하

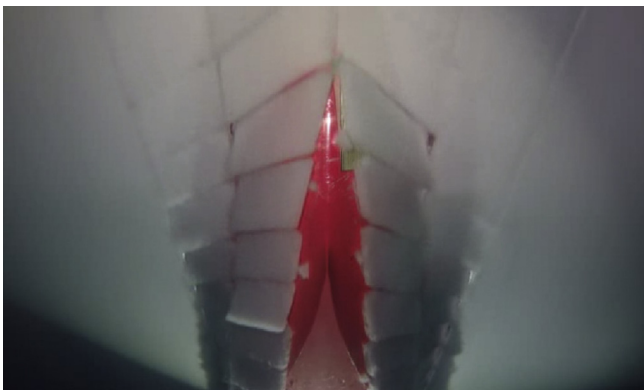


Fig. 1 An underWater view of a photograph of the pre-sawn ice (Kim et al., 2017)

였으며, R_{CL} 은 선체의 진행방향에 존재하는 얼음 조각들을 밀어내며 발생하는 빙 제거 하중으로 Ionov(Poznyak and Ionov, 1981)의 추정법을 적용하였다. 그리고 쇄빙 하중인 R_{BR} 은 평평한 얼음판을 부술 때 발생하는 것으로 Shimanskii(Shimanskii, 1938)의 경험식을 이용하였다. 한편, 유체 하중(R_{OW})은 선체와 유체 사이의 점성에 의해 발생하는 하중으로 전체 빙 하중에서 매우 작은 비중을 차지하고 있기 때문에 기 개발된 빙 하중 알고리즘에서는 고려하지 않았으며, 나머지 3가지 빙 하중 요소 (R_{BU} , R_{BR} , 그리고 R_{OW})의 합으로 평탄빙에서의 빙 하중 추정식을 구성하였다.

식 (1)에서 전체 빙 하중은 각각의 빙 하중 요소들의 선형합으로 계산되기 때문에, 각각의 빙 하중 요소들은 서로 독립적이다. 그러므로 쇄빙 하중인 R_{BR} 을 전체 빙 하중 구성방정식에서 제외함으로써 Pre-sawn의 사향조건에서 전체 빙 하중을 계산할 수 있으며, 언급한 유체 하중을 제외하여 최종적으로 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$R_T = R_{CL} + R_{BR} \quad (2)$$

Pre-sawn의 전체 빙 하중을 계산하기 위해 빙 제거 하중은 Ionov의 추정법을 이용하여 계산하였으며, 아래의 식 (3)과 같이 정의된다.

$$R_{CL} = 2\rho_i g h B \cdot Fr_B \left[K_3' \int_0^{L/2} \frac{[y'(x)]^2}{\cos\alpha} dx + K_3'' f_g \int_0^{L/2} \frac{y'(x)}{\cos\alpha} dx \right] \quad (3)$$

여기서 y 는 선폭을 나타내는 길이 함수, ρ_i 는 얼음의 밀도, h 는 빙 두께, f_g 는 마찰계수, 그리고 g 는 중력가속도이고 K_3' 와 K_3'' 는 실험적 경험으로 결정되는 계수로 각각 1.0과 0.5이다. Fr_B 는 선체의 폭 B 와 중력가속도 g 에 대한 프루드수(Froude number)로 식 (4)에 나타내었으며, 빙 제거 하중의 경우에만 계산되는 파라미터 V_s 는 선속으로 빙 제거 하중에 비례한다.

$$Fr_B = \sqrt{\frac{V_s}{gB}} \quad (4)$$

Fig. 2에 빙 하중을 계산하기 위한 선체 흘수(Draft)에 해당하는 Water line과 Section line을 도식화하였으며, Water line과 Section line 위의 임의의 빙 하중 계산점에 대해서 기준축과의 각도 α 와 β 를 나타내었다. 식 (3)으로 정의된 빙 제거 하중 추정식의 파라미터인 α 는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 정의되며 Water line의 선 수형상을 결정하는 주요 파라미터이다.

본 논문에서 제시하고자하는 사향조건을 고려하면 빙 제거 하중은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 Water line의 임의의 빙 하중 계산점에 대해서 기준축과의 각도 α 는 사향각도 θ 만큼 회전하여 새로운 α' 으로 정의된다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 기존의 비사향조건에서는 $B/2$ 는 Water line에서 추진축과의 최대거리로 정의되지만, 사향조건에서는 추진축에서 선속을 중심으로 사향각도 θ 만큼 회전하여 추진축과의 최대거리는 $W_{max}/2$ 로 가정할 수 있다. 사향각도 θ 만큼 회전 시 기준축 x 축

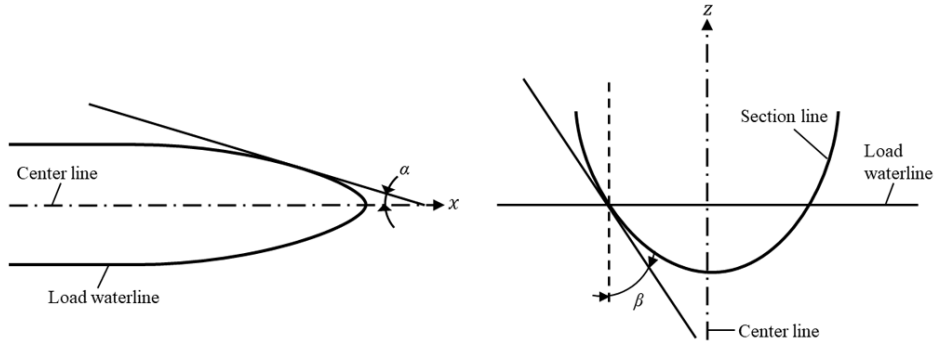


Fig. 2 The definition of the parameter for ice load

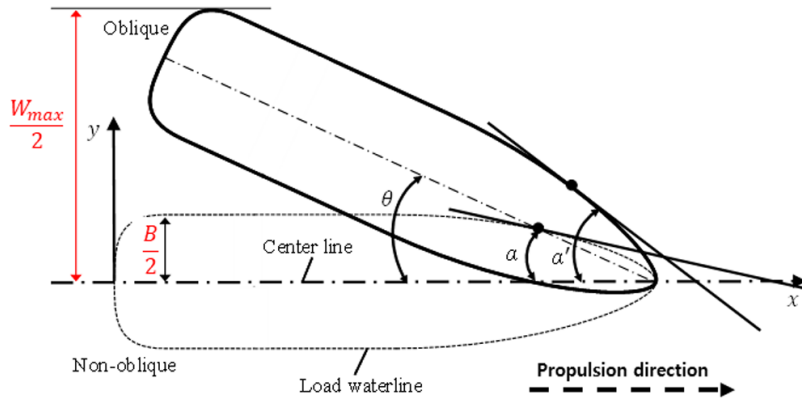


Fig. 3 Schematic of α' and W_{max} in oblique condition

과의 각도 α 와 배의 폭 B 의 변화를 도식적으로 나타내었으며, 기준축 x 는 배의 추진방향 또는 얼음의 진행방향이다. 기존 비사향조건에서의 빙 제거 하중 추정식인 식 (3)-(4)는 사향조건에서의 수정된 빙 제거 하중 추정식, 식 (5)로 정의하였다.

$$R_{CL} = 2\rho gh W_{max} Fr_{W_{max}} \left[K_3' \int_0^{L/2} \frac{[y'(x)]^2}{\cos\alpha} dx + K_3'' f_g \int_0^{L/2} \frac{y'(x)}{\cos\alpha} dx \right] \quad (5)$$

$$Fr_{W_{max}} = \sqrt{\frac{V_S}{g \cdot W_{max}}}$$

$$W_{max} = L \sin\theta + 0.5B \cos\theta$$

부력 하중의 경우에는 Enkvist의 추정법을 적용하여 아래의 식 (6)과 같이 정의되며, Fig. 2에서 언급한바와 같이 Section line 위의 임의의 빙 하중 계산점에서 기준축(흘수 방향)과의 각도 β 를 빙편 기준으로 Fig. 4에 구체적으로 나타내었다. R_{sp} 는 빙편의 위치에너지에 의한 하중성분이며, R_{sf} 는 선체와 얼음사이의 마찰에 의한 하중으로 두 가지 성분의 합으로 정의된다.

$$R_{BU} = R_{sp} + R_{sf}$$

$$R_{sp} = \frac{\sum_0^{L/2} L_i \sum_0^B \rho_{\Delta} g h \bar{s} b_i}{L/2}, \quad R_{sf} = \sum_0^{L/2} L_i \sum_0^B f_g \rho_{\Delta} g h b_i \sin\beta \quad (6)$$

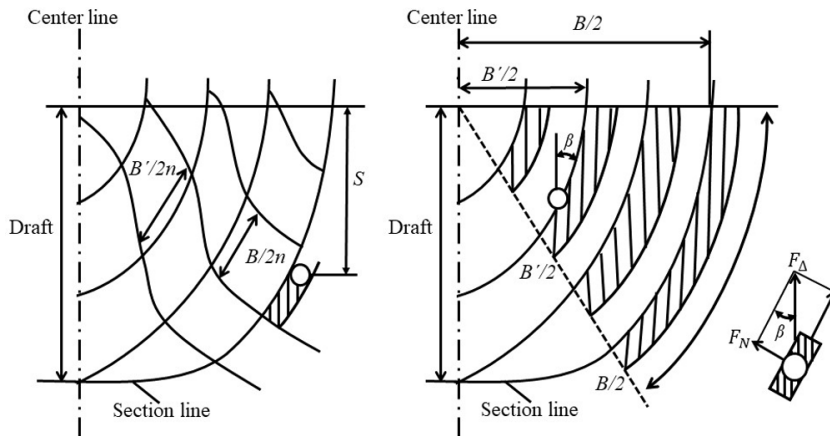


Fig. 4 Schematic of Section line for buoyancy ice load

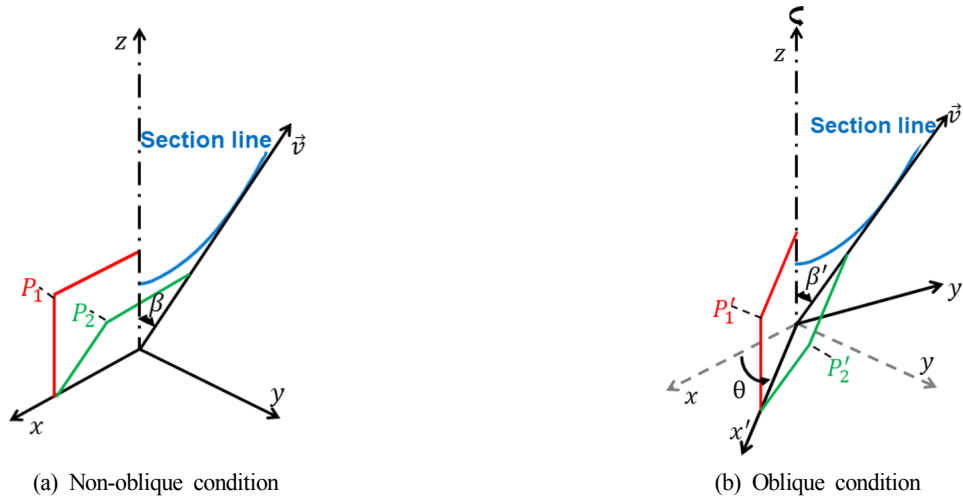


Fig. 5 Schematic of β' in oblique condition for buoyancy ice load

여기서 ρ_{Δ} 는 물과 얼음의 밀도차이를 나타내며, L_i 는 각 Section line 사이의 길이, b_i 는 각 Section line의 둘레 길이이고, \bar{s} 는 얼음조각이 물에 잠긴 평균 깊이를 나타낸다. h 는 빙 두께, g 는 중력가속도, B 는 선체의 폭, 그리고 f_y 는 마찰계수를 나타낸다.

사항조건 적용 시에는 선박의 Section line이 기준축(홀수 방향)에 대해서 사항각도 θ 만큼 회전하며, 회전으로 변환된 Section line의 기하학적 정보들이 부력 하중 추정 경험식 식 (6)에 적용된다. 이 때, 기준축(홀수 방향)에 대하여 좌우 비대칭 현상이 발생한다. Fig. 5는 사항각도 적용 전후에 대한 β 가 다르게 추출되는 것을 도식적으로 나타내었다. Fig. 5(a)는 비사항조건일 때 P_1 평면과 P_2 평면 사이의 각을 구하여 β 를 도출할 수 있으며, Fig. 5(b)는 사항각도 θ 만큼 회전하였을 경우 회전변환된 P'_1 평면과 P'_2 평면사이의 각을 구하여 사항된 β' 을 도출할 수 있다.

3. 사항조건을 빙 하중 추정 프로시저

앞장에서 언급한 경험식을 기반으로 사항조건에 적용 가능한 알고리즘을 정립하였고, 기 개발된 프로그램을 활용하여 사항조건을 빙 제거 하중과 부력 하중을 계산하여 Pre-sawn의 전체 빙 하중을 추정하였다. 기 개발된 프로그램은 비사항조건을 빙 하중 추정 모듈을 기반으로 모형실험과 비교검증을 통해 평균 약 10%의 정확도를 보였다(Kim et al., 2014). 본 논문에서는 비사항조건을 빙 하중 추정 모듈을 사항각도에 따른 선형데이터가 출력 가능하도록 수정하여 사항조건을 빙 하중 추정 모듈을 개발하였으며, 사항조건을 빙 하중 추정 순서는 Fig. 6에 나타내었다. 우선 빙 하중 추정 대상을 실스케일로 3D 모델링하여 선형정보 추출 모듈을 통해 Section line과 Water line의 정보를 추출한다. Section line은 추진방향 또는 얼음의 진행방향에 대해 수직하게 교차하는 선형의 단면 라인으로, 이 라인에서 추출되는 데이터는 부력 하중 추정식에 적용된다. Water line은 선형의 홀수에 해당하는 라인으로, 이 라인에서 추출되는 데이터는 수정된 빙 제거 하중 추정식에 적용된다. 사항조건에서의 빙 하중 추정 알고리즘은 비사항조건에서의 빙 하중 추정 알고리즘과

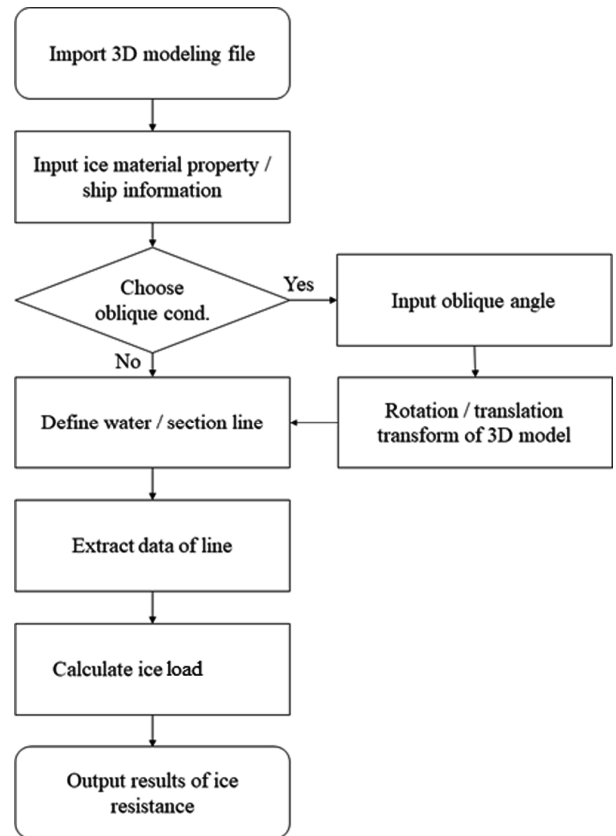


Fig. 6 Flowchart of estimation for the ice load

동일한 순서이지만, 3D모델에 대한 선형정보가 Fig. 3과 Fig. 5에 보인 바와 같이 사항각도에 대한 새로운 정보로 변형되어 경험식 모듈의 입력값으로 적용된다.

Fig. 7은 추진방향 또는 얼음의 진행방향에 따라 추출된 Section line, Water line 데이터를 나타낸 것으로 좌표값 (x, y, z) 법선벡터 (n_x, n_y, n_z) , 그리고 기준축과의 각도 (α, β, γ) 가 사항각도만큼 회전변환되며, 변환된 사항조건을 선형정보는 빙 하중 계산모듈을 통해 최종적으로 사항조건을 빙 제거 하중 및 부력 하중 추정에 사용된다.

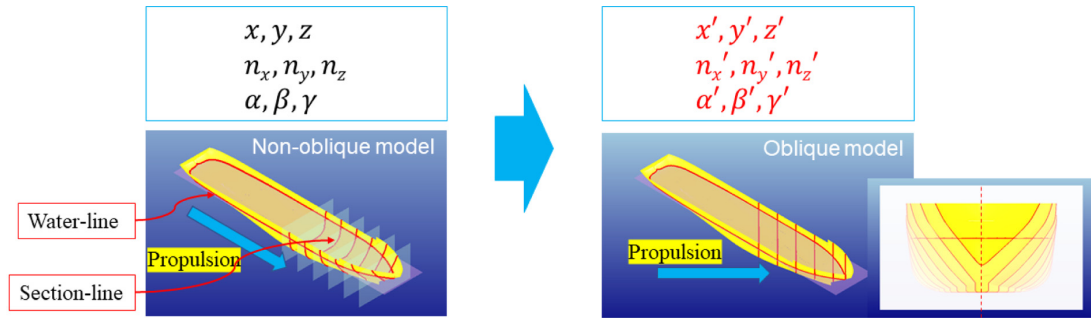


Fig. 7 Extraction of data with 3D model for ice load in oblique condition

4. 사항조건의 빙 하중 추정

본 논문에서는 사항각도가 빙 하중에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두 가지 변수를 고려하였다. 빙 두께와 선속이 증가함에 따라 사항각도가 빙 하중에 미치는 영향을 분석하여 정리하였으며, 이를 통해 경험식을 이용한 사항조건의 빙 하중 추정 연구방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

4.1 사항조건 빙 하중 계산 조건

평탄빙에서의 빙 두께 및 선속별 사항각도에 따른 빙 하중을 추정하여 각 인자가 빙 제거 하중과 부력 하중 성분에 미치는 영향을 각각 평가하였다. 사항조건의 빙 하중 계산 조건을 Table 1에 정리하였으며, Fig. 8은 사항조건의 빙 하중 추정 대상인 FPU 선형 정보를 나타낸다. 얼음 조건은 빙편(Pack ice) 직접도 100%인 Pre-sawn으로 하였으며, 빙 강도는 800kPa, 얼음과 물의 밀도는 각각 880, 1000kg/m³, 탄성계수는 2GPa, 그리고 마찰계수 0.05로 고려하였다. 빙 두께는 1~2m로 0.5m 간격, 선속은 1~3knots (1.852 ~ 5.556km/h)로 1knots(1.852km/h) 간격으로 빙 하중을 추정하였으며, 사항각도는 0°~30°로 10° 간격을 고려하였다.

Table 1 Input variables for calculation of ice load in oblique condition

Items	Values
Ship speeds	1 ~ 3 knots (1.852 ~ 5.556 km/h) (interval: 1)
Flexural Strength	800 kPa
Ice thickness	1 ~ 2 m (interval: 0.5)
Elastic modulus	2 GPa
Friction coefficient	0.05 (Ice and Ship)
Density	880 (ice), 1000 (Water) kg/m ³

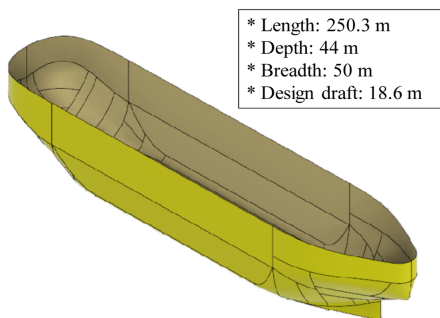


Fig. 8 Information of the FPU

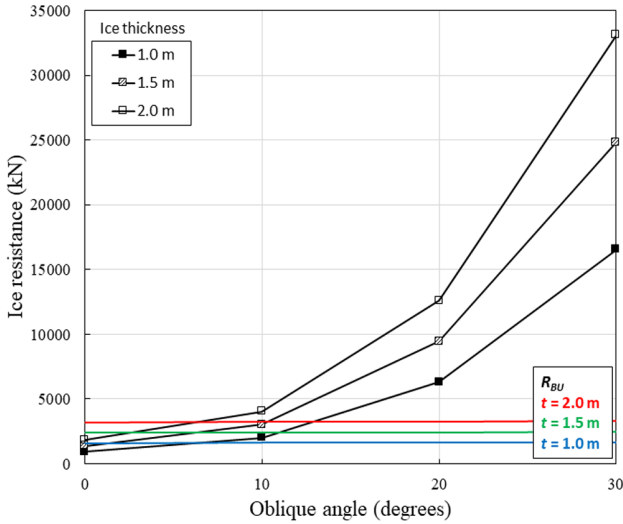
4.2 사항각도와 빙 두께가 빙 하중에 미치는 영향

선속이 2knots(3.704km/h)일 때, 사항각도가 증가함에 따라 빙 두께별로 Pre-sawn의 빙 하중을 추정하여 Fig. 9에 정리하였다. Spencer의 빙 하중 추정 이론을 기반으로, 유체 하중과 쇄빙 하중을 제외한 2개의 독립적인 빙 하중 성분들(빙 제거 하중, 부력 하중)의 합으로 전체 빙 하중을 나타내었다.

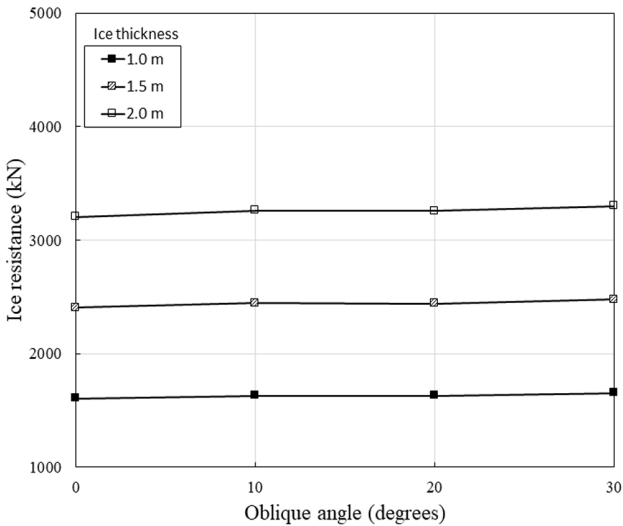
사항각도가 증가함에 따라 빙 제거 하중 및 부력 하중은 전체적으로 증가하였으나, 사항각도에 따른 증가량은 다르게 나타났다. Fig. 9(a)는 빙 제거 하중을 나타낸 것으로 사항각도가 10°씩 증가함에 따라 빙 제거 하중은 두께와 상관없이 평균 약 2.6배 증가하였으나, 상대적으로 부력 하중은 증가량은 평균 약 1.01배로 나타났다(Fig. 9(b) 참조). 이는 두께와 상관없이 사항각도가 빙 제거 하중이 미치는 영향이 부력 하중보다 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 사항조건의 빙 하중 계산 시 사항각도에 따라 Water line상의 선형 데이터의 변화량이 Section line상의 선형 데이터 변화량보다 크기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3과 Fig. 5 참조). 또한, 비사항조건(사항각도 0°)에서는 부력 하중이 빙 제거 하중보다 크게 계산되었으나, 사항각도 10°이후부터 빙 제거 하중이 부력 하중보다 크게 계산되어 사항각도에 따라서 전체 빙 하중 대비 부력 하중 성분의 우선 위가 다르게 평가될 수 있음을 나타낸다.

Fig. 9(a)-9(b)에 나타난 바와 같이 빙 두께가 증가함에 따라 빙 제거 하중 및 부력 하중은 증가하였으며, 임의의 사항각도에서 빙 두께에 따른 빙 제거 하중과 부력 하중의 증가량은 유사하게 계산되었다. 빙 제거 하중은 빙 두께 1.0m에서 1.5m 증가 시 모든 사항각도에서 약 1.5배 증가하였으며, 빙 두께 1.5m에서 2m 증가 시 모든 사항각도에서 약 1.3배 증가하였다. 부력 하중도 모든 빙 두께에서 같은 경향을 보이고 있으며, 정략적으로도 빙 두께 증가에 따른 부력 하중 증가량은 유사한 값으로 평가되었다.

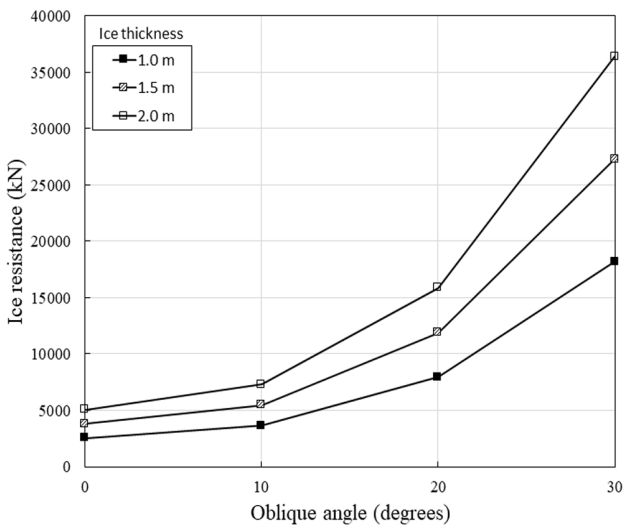
Fig. 9(c)는 사항각도가 증가함에 따라 빙 두께별 Pre-sawn의 전체 빙 하중을 나타낸 것으로, 빙 제거 하중은 전체 빙 하중에서 차지하는 비율이 부력 하중에 비해 상대적으로 크고, 사항각도에 따른 증가량도 많기 때문에 빙 제거 하중 그래프 경향과 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 모든 사항각도에 대하여 부력 하중이 전체 빙 하중에서 차지하는 비율은 최대 약 10% 미만으로 평가되며, 이는 사항조건을 고려하여 Pre-sawn의 전체 빙 하중을 평가 시 빙 제거 하중을 최우선적으로 고려해야 한다. Fig. 10은 빙 두께에 따른 사항각도별 Pre-sawn의 빙 하중을 정리한



(a) Clearing (vs buoyancy)



(b) Buoyancy



(c) Total

Fig. 9 The ice loads with oblique angles (ice thickness = 1, 1.5, and 2 m)

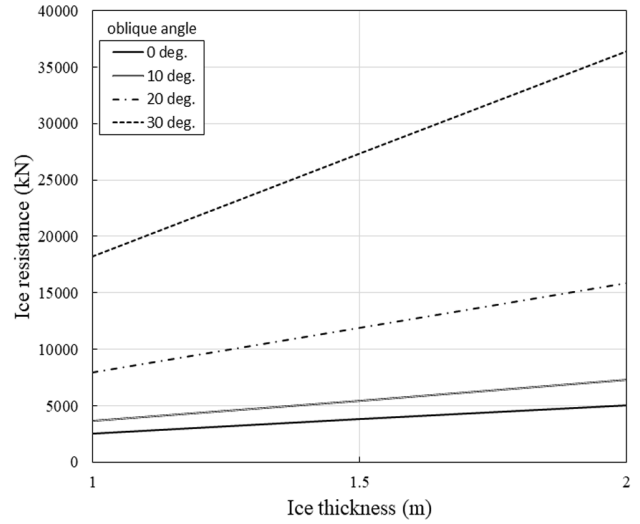


Fig. 10 Variations of the pre-sawn ice load with ice thickness

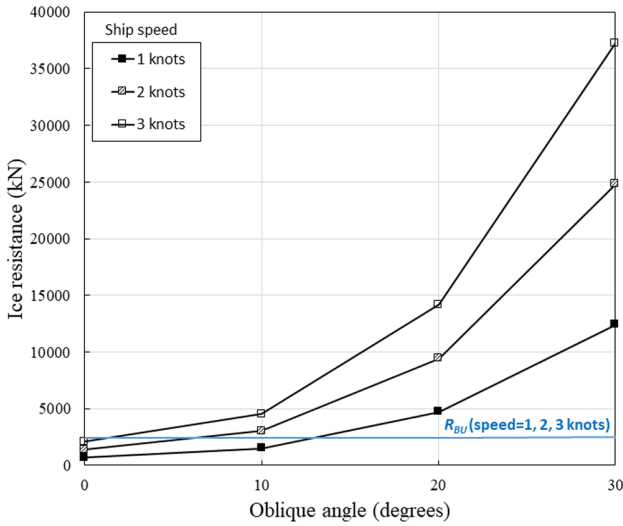
것으로, 빙 두께에 따른 전체 빙 하중의 증가율은 선형적으로 나타났으며, 빙 두께에 따른 전체 빙 하중은 사향각도가 10°씩 증가함에 따라 최소 약 1.4배에서 최대 2.3배 증가하는 것으로 평가되었다.

4.3 선속과 사향각도가 빙 하중에 미치는 영향

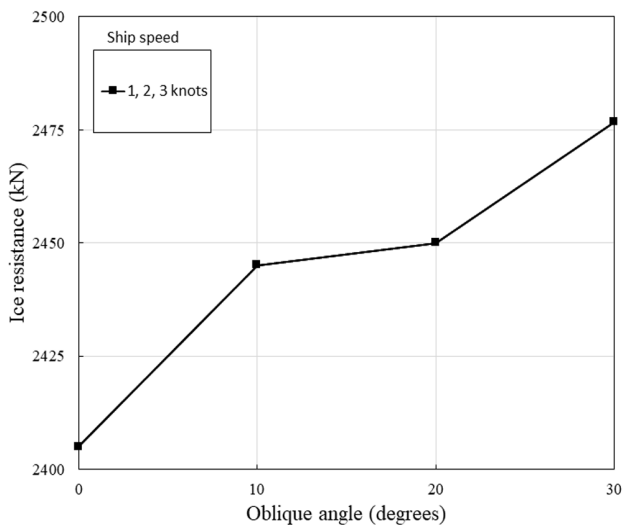
빙 두께가 1.5m일 때, 사향각도가 증가함에 따라 선속별로 Pre-sawn의 빙 제거 하중 및 부력 하중을 추정하여 Fig. 11에 정리하였으며, 앞장에서 언급한바와 같이 유체 하중과 쇄빙 하중을 제외한 2개의 독립적인 빙 하중 성분들(빙 제거 하중, 부력 하중)의 합으로 전체 빙 하중을 계산하였다.

사향각도가 증가함에 따라 빙 제거 하중 및 부력 하중은 전체적으로 증가하였으나, Fig. 11(b)에 나타난 바와 같이 사향각도 30°도 증가 시 부력 하중의 증가량은 최대 약 100kN 미만으로 빙 제거 하중에 비해 상대적으로 적은 증가량을 나타냈다. 또한, 사향각도 10°에서 20°구간의 증가량이 다른 구간(0°~10°, 20°~30°)보다 상대적으로 적게 평가되었는데, 그 이유는 FPU 선형의 기하학적 특성이 기인한 것으로 판단된다. 한편 Fig. 11(a)에서 빙 제거 하중은 사향각도가 10°씩 증가함에 따라 빙 제거 하중은 선속과 상관없이 평균 약 2.6배 증가하였다. 이는 앞장에서 언급한 두께에 상관없이 사향각도가 증가함에 따라 빙 제거 하중이 평균 약 2.6배 증가한 경향과 유사하나, 정략적인 빙 제거 하중값은 차이가 있었다. 그리고 사향각도 0°에서는 부력 하중이 빙 제거 하중보다 모든 속도에 대해서 크게 예측되었으나, 사향각도가 증가함에 따라 반대의 경향을 나타냈다.

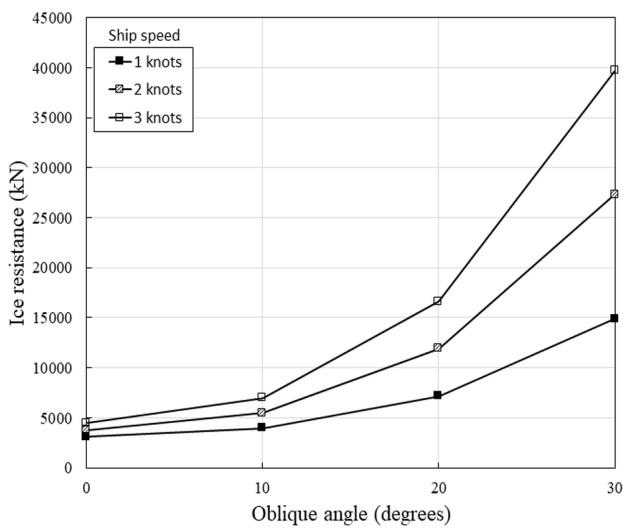
선속의 영향을 살펴보면 선속이 증가함에 따라 빙 제거 하중은 증가하였으나, 부력 하중은 변화가 없는 결과를 나타냈다. 그 이유는 식 (6)에서 부력 하중 계산 시에 속도를 고려하지 않기 때문으로, 부력 하중 추정식에서는 빙편이 정적상태에서 홀수이하의 선저 전체를 감싸고 있다고 가정하기 때문이다. 반면에 빙 제거 하중은 속도를 고려한 프루드수 파라미터를 사용하고 있다. 임의의 사향각도에서 빙 두께에 따른 빙 제거 하중은 Fig. 11(a)에 나타난 바와 같이 선속 1knots(1.852km/h)에서 2knots(3.704km/h) 증가 시 모든 사향각도에서 약 2배 증가하였



(a) Clearing (vs buoyancy)



(b) Buoyancy



(c) Total

Fig. 11 The ice load with oblique angles (ship speeds = 1, 2, and 3 knots)

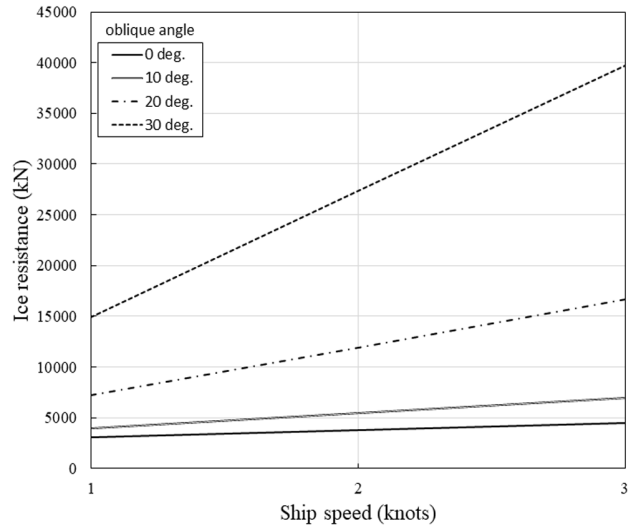


Fig. 12 Variations of the pre-sawn ice load with ship speeds

으며, 빙 두께 2knots(3.704km/h)에서 3knots(5.556km/h) 증가 시 모든 사향각도에서 약 1.5배 증가하였다.

Fig. 11(c)는 사향각도가 증가함에 따라 선속별 Pre-sawn의 전체 빙 하중을 나타낸 것이며, 선속과 상관없이 부력 하중이 일정하므로 선속이 증가함에 따라 전체 빙 하중에서 부력 하중이 차지하는 비중은 감소한다. Fig. 12는 선속에 따른 사향각도별 Pre-sawn의 빙 하중을 정리한 것으로, 선속에 따른 전체 빙 하중의 증가율은 앞장에서 언급한 두께에 따른 경향과 비슷하게 선형적으로 나타났으며, 선속에 따른 전체 빙 하중은 사향각도가 10°씩 증가함에 따라 최소 2.2배에서 최대 약 3.1배 증가하는 것으로 평가되었다. 이것은 두께에 따른 Pre-sawn의 빙 하중 증가량보다 많은 값으로 선속이 두께보다 사향각도에 따른 Pre-sawn의 빙 하중 결과에 미치는 영향이 더 크다고 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 극지에서 운용하는 해양구조물에 대해 사향조건에 따른 빙 하중 산정의 필요성을 설명하였으며, 사향조건에 따른 빙 하중 산정을 위해서 비사향조건(일반적인 쇄빙선)의 빙 하중 추정 이론을 사향조건에 적합하도록 수정하였다. 기 검증된 빙 하중 산정 프로그램을 이용하여 사향조건에 따른 빙 하중 추정 알고리즘을 제시하였으며, 이론적인 설명을 통해 이 알고리즘의 타당성을 검토하였다. FPU 선형에 대한 다양한 사향조건에 대해서 Pre-sawn의 빙 전체 하중을 추정하기 위하여 빙 제거 하중 및 부력 하중을 계산하였으며, 다음과 같이 결론을 요약 정리하였다.

(1) FPU 선형의 경우, 빙 두께 및 선속에 상관없이 사향각도가 증가함에 따라 빙 제거 하중과 부력 하중은 일정한 증가율로 커졌으며, 빙 제거 하중의 증가량은 비선형적으로 많아졌으나, 부력 하중의 증가량은 매우 적은 것으로 평가되었다. 따라서 사향각도에 따른 Pre-sawn의 빙 하중 산정 시 부력 하중은 전체 빙 하중에서 작은 비중을 차지하며, 이는 사향각도에 따른 선형정보(Section line)의 비대칭성이 부력 하중 결과에 미치는 영향은 작은 것으로 판단된다.

(2) 빙 두께에 따른 Pre-sawn의 빙 하중 증가량은 최대 사향각도 30°에서 최대 약 1.5배로 평가되었으며, 선속에 따른 Pre-sawn의 빙 하중 증가량은 최대 사향각도 30°에서 최대 약 2배로 평가되었다. 따라서 선속이 사향각도에 따른 Pre-sawn의 빙 하중에 미치는 영향이 빙 두께보다 더 크게 작용할 것으로 판단된다.

따라서 본 논문은 경험식을 이용한 사향조건의 빙 하중을 추정 방법을 제시하였고, FPU의 사향조건 빙 하중 추정하여 사향각도에 따른 영향을 평가하였다. 이 결과는 FPU의 사향조건 빙 하중 추정 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 추후 이에 대한 모형실험과 비교검증을 통해 사향조건에 따른 정량적인 빙 하중을 도출할 수 있을 것이라고 예상되며, 향후 다른 극지 해양구조물의 사향조건 빙 하중 추정 시에도 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2017년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원 및 2017년도 산업통상자원부 연구비 지원에 의한 연구임. (‘북극항로 운항선박용 항해안전지원시스템 개발’, ‘위치유지와 계류 시스템을 적용하여 ARC7 조건에서 연중운용이 가능한 북극해 기반 부유식 해양구조물 형상 개발’)

References

- Jian, H., Li, Z., 2015. Experimental And Numerical Study On Ice Resistance For Icebreaking Vessels. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(5), 626-639.
- Jeong, S.Y., Jang, J.H., Kang, K.J. Kim, H.S., 2017. Implementation Of Ship Performance Test In Brash Ice Channel. *Ocean Engineering*, 140, 57-65.
- Li, Z., Kaj, R., Rüdiger, B.P., Torgeir, M., Biao, S., 2013. Experiments On Level Ice Loading On An Icebreaking Tanker With Different Ice Drift Angles. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 79-93.
- Kim, H.S., Ryu, C.H., Park, K.D., 2013. Development of Ice Resistance Estimation Program of Icebreaking Vessels Using Ship CAD Data. *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*, Pyeongchang, Korea, 501-504.
- Kim, H.S., Ryu, C.H., Park, K.D., Lee, J., 2014. Development of Estimation System of Ice Resistance with Surface Information of Hull Form. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(5), 371-377.
- Kim, H.S., Jeong, S.Y., Woo, S.H., Han, D., 2017. Study On The Procedure To Obtain An Attainable Speed In Pack Ice. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, in Press. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.09.004>.
- Enkvist, E., 1972. On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of Icebreaking. *The Swedish Academy of Engineering Sciences*, 24.
- Poznyak, I.I., Ionov, B.P., 1981. The Division Of Icebreaking Resistance Into Components. *Proceeding of the 6th STAR Symposium*, New York, U.S., 249-252.
- Spencer, D., 1992. A Standard Method for the Conduct and Analysis of Ice Resistance Model Tests. *Proceeding of the 23rd American Towing Tank Conference*, New Orleans U.S., 301-307.
- Shimanskii, Yu.A., 1938. *Conditional Standards Of Ice Qualities Of A Ship*. Engineering Consulting and Translation Center (ECTC), New York.

Morphological Change in Seabed Surrounding Jinwoo-Island Due to Construction of New Busan Port - Qualitative Evaluation through Numerical Simulation

Namseeg Hong^{ORCID*}

*Department of Civil Engineering, Donga University, Busan, Korea

부산신항 건설이 진우도 주변 해저지형 변화에 미치는 영향 - 수치실험을 통한 정성적 평가

홍남식^{ORCID*}

*동아대학교 토목공학과

KEY WORDS: Busan new port 부산신항, Nakdong river estuary dam 낙동강 하구둑, Morphological change of seabed 해저지형 변화, Qualitative Evaluation 정성적 평가

ABSTRACT: In this study, a qualitative evaluation of the morphological changes in the seabed surrounding Jinwoo-Island due to the construction of the new Busan port were determined through a numerical simulation. Various scenarios for the discharge of the Nakdong river estuary dam and construction stage of the new Busan port were established and utilized for an indirect and qualitative investigation through simulation using the numerical model implemented in this study. It was concluded through a qualitative study that the morphological changes in the seabed surrounding Jinwoo-Island were typical estuary seabed changes due to the discharge of the Nakdong river estuary dam and waves from the open sea. The effects from the construction of the new Busan port were relatively small.

1. 서 론

낙동강 하구 울타리섬 주변해역의 지형변화는 수리역학적 환경(하구둑 방류, 조석, 파랑 등)에 의하여 활발하게 진행되어 왔으며 여러 연구(Kim and Ha, 2001; Kim et al., 2005; Jang and Kim, 2006; Oh et al., 2010; Jeon et al., 2010)에서 확인되었다. 낙동강 하구 울타리섬의 지형변화에 영향을 미치는 인자 중 낙동강 하구둑 방류는 인위적인 요인으로 분류된다. 즉, 하계 태풍이후 토사농도가 큰 인위적인 대량 방류수와 함께 하구둑 외해로 이송된 토사가 하구둑 인근에 퇴적되고, 다시 외해파랑 및 조류에 의하여 이송되어 울타리섬 주변지역의 지형변화에 영향을 미치게 되는 역학적 특성을 확인하였다(Kim and Hong, 2008).

부산항 신항만 건설은 자연 상태의 지형을 변화시키기 때문에 이로 인한 수리역학적 환경 변화(흐름의 양상과 크기, 파고 등)가 불가피하게 발생된다. 이러한 수리역학적인 변동은 퇴적

물의 이동현상을 통하여 기존의 평형을 이루던 자연지형 및 저질 상태로부터 새로운 평형 상태를 이루게 하는 원인이 된다. 따라서 신항만 건설로 인하여 인근 해역인 낙동강 하구 울타리섬 영역에서 국지적인 침식 또는 퇴적 현상이 예상된다.

부산항 신항만 건설 이후 진우도 협수로의 지형변화로 소형 선박의 항행에 불편을 겪었다는 민원이 꾸준히 현재까지 제기되어 오고 있다. Yonn et al.(2005)은 진우도 주변의 단기간(3개월)의 퇴적환경 변화를 진우도 주변 해안선 변화를 통하여 확인하였으며, Kim et al.(2008)은 2008년 지형(낙동강 하구둑부터 부산신항을 포함하는 영역)을 적용하여 연간 진우도 주변의 지형변화를 수치시뮬레이션을 통하여 조사하였으며, 협수로의 지형 변화 양상을 확인하였다.

진우도를 포함한 낙동강 하구지역은 장기 및 단기적인 지형 변화 폭이 큰 지역으로, 장기지형변화를 정량적으로 정확하게 평가하기 위해서는 정확하고 다양한 입력 자료, 즉 조사 과업기간 내의 수심 분포 및 변화, 과업대상해역의 외력인 바람, 파랑

Received 14 February 2018, revised 31 May 2018, accepted 7 June 2018

Corresponding author Namseeg Hong: +82-10-2585-0817, hns0817@dau.ac.kr ORCID : https://orcid.org/0000-0002-1589-2617

© 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.

(평상시, 이상시), 조류 이외에도 해저질의 분포 및 물리적 특성, 지층분포 및 최상층두께, 낙동강으로부터 유입되는 유량, 토사 성분 및 농도의 시계열자료 등이 필요하다. 그러나 충분한 자료 확보가 이루어지지 않은 상태로 정확한 정량적 평가는 무리라 판단하여 Hong(2010a)은 정성적 평가를 실시한 바 있다. 즉, 부산항 신항의 건설로 인해 발생하는 조석 및 파랑에 의한 흐름장(해저토사의 이송외력)의 변화로 인한 지형변화 차이만을 평가한 것으로서, 대상해역을 진우도 주변에 한정하였으며, 미비 자료는 경험치나 주변자료로부터 유추, 적용하여 가능한 한 실제적인 장기지형 변화를 나타내고자 하였다. 즉, 부산항 신항 건설 전과 2008년의 수심도에 각각 동일한 인자, 즉 동일한 파랑 및 조류, 동일한 해저질 분포 및 물리적 특성, 동일한 지층의 최상층 두께 및 지질, 동일한 유입유량, 토사성분 및 농도자료를 적용하여 각각 1년간의 지형변화를 시뮬레이션하였으며, 진우도 인근해역의 지형변화는 신항 건설로 인한 조류 등의 흐름 변화에 기인했다기보다는 외해파랑에 의해 발생하는 과정 중에 있는 것으로서, 전형적인 외해파랑에 의한 지형변화 중에 있는 것으로 판단하였다.

상기의 정성적 평가의 문제는 진우도 주변 협수로 지형변화의 주된 원인이 외해파랑이라는 것을 추론한 것으로서, 이미 기술하였듯이 부산항 신항 건설 전과 2008년의 수심도에 동일한 해양환경을 적용한 것으로 10여년에 걸친 부산항 신항 건설기간을 고려하지 않았다. 그러므로, 본 연구의 목적은 건설 이전부터 2016년까지의 단계별 수심자료를 최대한 적용하여 부산항 신항 건설 단계별로 진우도 주변해역의 지형변화를 정성적으로 좀 더 정확하게 조사하였으며, 여러 영향 인자 중 낙동강 하구 독 방류 영향과의 상대적 비교를 위하여 방류유무에 따른 영향도 조사하였다.

2. 모델 개요

본 연구의 모델은 Hong et al.(2008)에 의해 개발된 해수유동 모델, Hong(2010b)에 의해 개발된 이류·확산 및 퇴적물 이송 모델에 파랑모델인 SWAN(Simulating waves nearshore)에 적용된 근해풍파 모델을 결합한 것이다.

2.1 해수 유동

해수유동 모델은 수심평균된 2차원 비선형 지배방정식을 2차항 정밀도를 가진 음해 ADI유한차분법(Implicit ADI finite difference scheme of second order accuracy)을 이용하여 계산하여, 해수유동 현상을 재현하는 모델이다. 지배방정식은 식(1)-(3)과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_a) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_a) = 0 \quad (3)$$

상기식에서,

$h(x, y, t)$: 수심 [m]

$\zeta(x, y, t)$: 해수면변화 [m]

$p, q(x, y, t)$: $[m^3/s/m] = (u_h, v_h)$ 방향 유량

(u, v) = 수심평균된 x 와 y 방향 유속

$C(x, y)$: chezy저항계수 $[m^{1/2}/s]$

$C = M \cdot h^{1/6}$ M : Manning No.

g : 중력가속도 $[m/s^2]$

$f(v)$: Wind 마찰계수

$V, V_x, V_y(x, y, t)$: x, y 풍속성분 [m/s]

$\Omega(x, y)$: Coriolis parameter (s-1)

$P_a(x, y, t)$: 대기압 $[kg/m^2]$

ρ_w : Density of water $[kg/m^3]$

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$: 유효전단응력 성분

2.2 이류 확산 및 퇴적물 이송

상기의 유동모델에 추가하여 용해되어 있거나 부유되어 있는 물질의 이류 및 확산을 예측하기 위하여 다음의 식 (4)와 같은 이류-확산식을 지배방정식으로 한다. 여기서, 식 (4)는 물질의 이류항과 확산항 뿐만 아니라, 물질의 용출 및 흡입에 대한 항 또한 포함하고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (hC) + \frac{\partial}{\partial x} (uhC) + \frac{\partial}{\partial y} (vhC) + \frac{\partial}{\partial z} (whC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - FhC + S \quad (4)$$

여기서, C : 혼합농도

u, v, w : x, y, z 방향 속도 성분 [m/s]

h : 수심 [m]

D_x, D_y, D_z : x, y, z 방향에서 확산계수 $[m^2/s]$

F : 선형감소계수 [1/s]

S : $Q_s(C_s - C)$

Q_s : 용출 또는 용입량 $[m^3/s/m^2]$

C_s : 용출 또는 용입 유량에서의 혼합농도

위의 식 (4)에서 u 와 v, w 는 각각 x, y 및 z 방향으로의 유속으로 유동결과로부터 그 값을 얻는다. 확산계수 D_x, D_y, D_z 등은 등방난류확산과 수심평균화에 따른 분산을 포함한다.

식 (4)를 수치해석적으로 풀어내기 위하여 3차 양해유한차분법인 Ultimate 방식(Leonard, 1991)을 사용하였다. 이 수치해석 기법은 Quickest 방법으로부터 변형된 것으로 오염물질의 이동 및 확산을 예측하는 데 많이 사용된다.

비점차성 퇴적물의 침강속도는 Van Rijn(1993)의 방법에 따라 계산된다. 즉, 부유물 또는 퇴적물의 직경에 따라 식 (5)-(7)이 적용된다.

$$w_{s,0}^{(\ell)} = \frac{(s^{(\ell)} - 1)gd_s^{(\ell)2}}{18\nu}, \quad 65 \mu m < d_s \leq 100 \mu m \quad (5)$$

$$w_{s,0}^{(\ell)} = \frac{10\nu}{d_s} \left[\left(1 + \frac{0.01(s^{(\ell)} - 1)gd_s^{(\ell)3}}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right], \quad 100 \mu m < d_s \leq 1000 \mu m \quad (6)$$

$$w_{s,0}^{(\ell)} = 1.1[(s^{(\ell)} - 1)gd_s^{(\ell)}]^{0.5}, \quad 1000 \mu m \leq d_s \quad (7)$$

상기 식에서,

$s^{(\ell)}$ 퇴적물 (ℓ) 상대밀도 $\rho_s^{(\ell)}/\rho_w$

$d_s^{(\ell)}$ 퇴적물 직경 (ℓ)

ν 물의 동점성계수 [m^2/s]

소류사량의 이송크기와 방향을 포함하기 위한 시뮬레이션을 위하여 Van Rijn(1993)이 개발한 근사법이 적용되어진다(식 (8)-(11)).

$$|S_b| = 0.006 \rho_s w_s d_{50}^{(\ell)} M^{0.5} M_e^{0.7} \quad (8)$$

여기서, S_b = 소류사량 [$kg/m/s$]

M = Wave와 Current에 의한 퇴적물 유동수

M_e = 초과된 퇴적물 유동수

$$M = \frac{\nu_{eff}^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (9)$$

$$M_e = \frac{(\nu_{eff} - \nu_{cr})^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (10)$$

$$\nu_{eff} = \sqrt{\nu_{cr}^2 + U_{on}^2} \quad (11)$$

여기서, ν_{cr} 는 초기운동을 위한 한계수심평균속도(m/s)이며, ν_{R} 은 같은 수심평균속도의 크기로 바닥층에 속도 또는 가상로그 속도 분포로부터 계산된다.

2.3 근해 풍파 파랑

본 연구에서 적용한 근해 풍파 모델은 네덜란드에서 개발되어 공개된 SWAN으로 근해지역에서 단주기 Short crested 파랑들의 전파, 생성과 소멸을 산정하는 모델이다. 이 모델은 수심 변화에 의한 굴절과 천수 효과, 그리고 바닥마찰과 파랑의 붕괴에 인한 에너지 분산을 포함한다. 또한 이 모델은 파랑과 해류의 상호작용에 의한 효과도 포함하고 고정된, 매개변수의 방향이 분리된 모델이다. 해류의 영향을 참조하기 위해서, 이 모델에서의 기본 방정식들은 스펙트럼 파동 밀도에 관한 보존방정식을 사용한다. 보존방정식의 매개변수화는 독립변수로서 파동 스펙트럼의 영번째와 첫번째 모멘트를 사용함으로써 얻어진다.

이것은 다음과 같은 두 개의 편미분 방정식으로 식(12)-(13)과 같다.

$$\frac{\partial(c_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial(c_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (13)$$

여기서, $m_0(x,y,\theta)$: 파랑작용 스펙트럼의 0차 모멘트
 $m_1(x,y,\theta)$: 파랑작용 스펙트럼의 1차 모멘트
 c_{gx} 와 c_{gy} : 각각 군속도 c_g 의 x,y 방향의 성분들
 c_θ : θ 방향의 전파속도
 x 와 y : 직교 좌표계
 θ : 파랑전파의 방향
 T_0 와 T_1 : Source 모멘트 $m_n(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$m_n(\theta) = \int_0^\infty \omega^n A(\omega,\theta) d\omega \quad (14)$$

여기서, ω 는 절대 주파수이고 A 는 스펙트럼 파장 작용 밀도이다. 전파속도 c_{gx} , c_{gy} 와 c_θ 는 선형과 이론에 사용하여 구해진다. 기본방정식의 좌측항은 굴절과 천수 효과를 고려한 것이다. T_0 와 T_1 은 바닥마찰과 쇄파에 기인한 국부적인 바람의 발생과 에너지 손실을 고려한 것이다. 이런 현상들에 대한 흐름의 영향들도 내포되어 있다.

기본방정식들은 Eulerian 유한차분법을 이용함으로써 풀며 파동 스펙트럼의 영 번째와 첫 번째 모멘트는 다수의 분리된 방향들에 대한 사각형의 격자에서 계산되어진다. Once-through marching procedure는 파랑전파의 주된 방향에 대해 적용한다. 모델로부터 유의파고, 평균파주기, 평균파향, 방향표준편차, 잉여응력과 같은 적분된 파랑 매개변수가 얻어지며 방향을 가진 파랑에너지의 분산 형태의 스펙트럼 출력 데이터도 얻을 수 있다.

3. 정성적 평가 비교 방안 수립

부산항 신항 건설 단계별 진우도 주변 지형변화 및 낙동강 하구둑 방류 영향과의 상대적 비교를 위하여 정성적 평가방안을 수립하였다.

우선, 부산항 신항 건설 단계별에 따는 진우도 주변 지형변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 주된 인자를 건설 이전부터

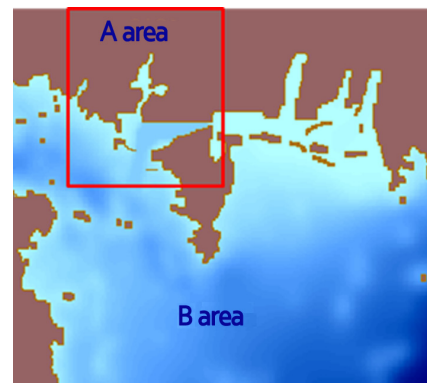
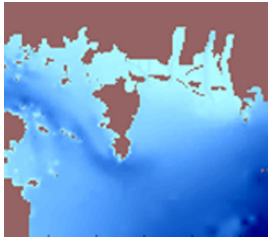
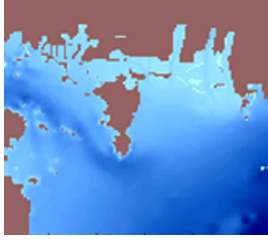
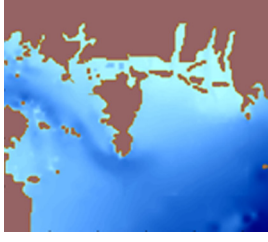
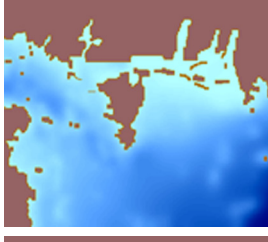
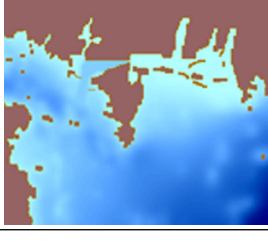


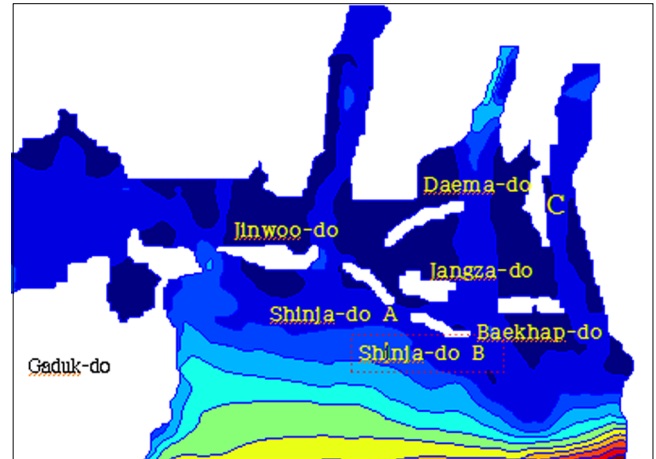
Fig. 1 Area for this study

Table 1 Five main stage for construction of Busan New Port

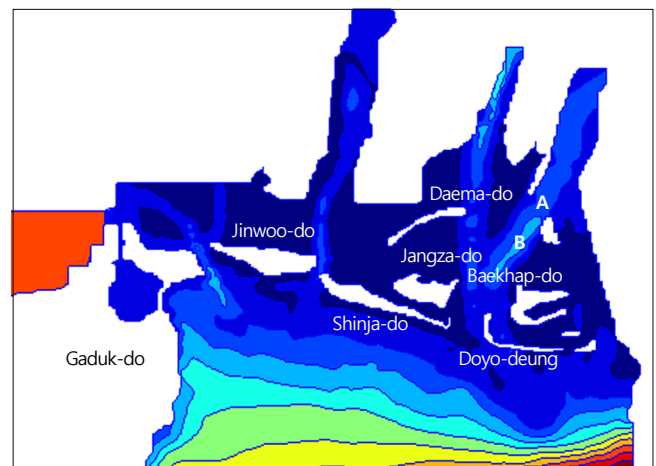
Stage	Layout	Feature
1		Before constructi-on
2		During constructi-on of dumping area of dredged soil and north dock
3		Starting of dredgin-g in port area
4		Completion of north dock and 1st dredging work
5		During construction of south dock

2016년까지의 단계별 수심자료로 보았다. 그러나 확보할 수 있는 단계별 수심자료는 Fig. 1에 나타난 A영역에 한정되어 있으므로 B영역의 해저지형은 일정 시점(신항 건설 전)에서의 수심으로 고정하고 A영역의 해저지형 변화만 반영하여 시뮬레이션을 수행하였다. A영역의 해저 지형은 Table 1의 주요 5단계를 고려(신항 건설 전, 투기장 조성, 복천 조성, 준설 단계, 현상태) 하며, 외해 파랑 및 조류 조건, 홍수기 하천 유입 토사 및 공사 중 부유토사는 가능한 한 많은 자료를 확보하여 각 단계별로 동일한 입력 자료를 사용하였다. 장기 지형변화 시뮬레이션을 수행한 후, 각 단계별 진우도 주변 해저지형의 침·퇴적 특성을 정량적으로 상대 비교함으로써 부산항 신항 건설이 진우도 주변 협수로 지형에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

앞서 언급한 동일한 모델을 적용하여 하구둑 방류만을 제거



(a) Bathymetry before the construction of Busan New Port



(b) Bathymetry of 2008

Fig. 2 Bathymetry before the construction of Busan New Port and 2008

하고 수행한 결과와 하구둑 방류를 포함하여 얻은 결과를 정량적으로 상대 비교함으로써 하구둑 방류의 영향도 조사하였다. 이 경우에는 부산항 신항 건설 전의 수심도는 1980년 발행 해도를 기준으로 수립하였고, 2008년 수심도는 2006년 발행 수심도를 기본으로 2008년까지의 변화를 반영하여 수립한 것으로 그림 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)를 비교하면 낙동강 하구지역의 지형변화가 활발히 일어나고 있음을 알 수 있다. 즉, 그림의 놀차만 해역은 부산항 신항 건설로 인해 협수로 폭이 급격히 감소하였으며, 진우도는 북동쪽 일부 해안 형상이 변하며 외해방향으로 진우도 전체가 전진하는 양상을 보여준다. 또한, 신자도 A, B구역은 병합되어 신자도가 하나의 섬으로 이어지며 장자도, 대마등 및 백합등은 형상 및 크기가 변하고, 백합등 남쪽에 도요등이 새로 생성된다.

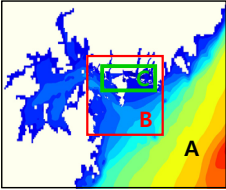
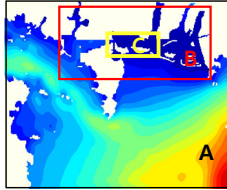
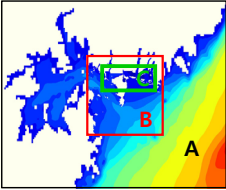
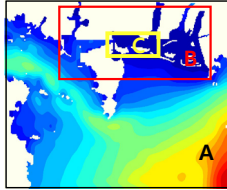
이외에도, 주목할 만한 현상으로 Fig. 2(a)의 낙동강 하구둑 근처 C구역의 모래톱이 Fig. 2(b)에서 보듯이 A와 B구역으로 분리되어 지류를 형성하게 되어 낙동강 하구 주변의 하구둑 방류에 의한 유속장이 건설 전에 비하여 차이가 나게 됨을 추측할 수 있다.

4. 수치모델 수립 및 시뮬레이션 시나리오 작성

4.1 모델 영역, 격자체계 및 외해 경계조건

Table 2에서 보듯이 파랑의 경우 세부역에 3가지 종류의 Dynamic nesting 격자시스템을, 조석의 경우 3가지 종류의 Dynamic nesting 격자시스템을 적용하되, 각 격자시스템간의 자료교환은 자동경계전이 방식(Dynamic nesting method)을 적용하여 시뮬레이션 시간을 단축하고 결과의 정확성을 증가시켰다. 이때, 자동경계전이(Dynamic nesting)는 경계에서의 유속장을 자동전이(Dynamic transfer) 할 수 있게 하였다. 앞서 Table 2에서 기술하였듯이 Grid 간격이 일정한 Dynamic nesting 격자시스템을 사용하였으며, 외해경계조건으로 조석모델의 경우 Hong(2010a)의 광역격자체계에서 얻은 결과로부터 산정하여 사용하였다, 즉, 조화상수를 적용하여 만든 시간이력 조위에 항류에 의한 추가조위를 합산하여 얻었다. 파랑모델의 경우는 해양연구원의 Hinding casting 모델로부터 Table 1의 각 시점의 자료를 활용하여 계산한 결과를 12시간 간격으로 선취하고, 각 지점간의 파랑조건은 보간법을 적용하여 사용하였다.

Table 2 Model area, grid system and boundary condition for wave and tide

	Wave		Tide	
Model area				
Dynamic nesting grid system	A 500 m × 500 m	B 100 m × 100m	A 100 m × 100 m	B 50 m × 50 m
Boundary condition	From results from KORDI		Hong (2010a)	

4.2 입력자료 및 시뮬레이션 시나리오

낙동강 하구둑에서 방류되는 유량은 Fig. 3 및 Fig. 4에서 보듯이 2015년 수자원공사 자료를 사용하여, 하구둑 방류 구간 전

체에 균일하게 방류하는 것으로 가정하였으며, 방류 SS농도는 Hong(2010a)에서 적용했던 토사농도를 사용하였다. 이외에도 낙산배수펌프장 및 서낙동강 지류로부터 유입되는 유량은 낙동강 하구둑 방출유량의 10%로 보았으며, 해저질은 신히내 점토와 실트 혼합지역으로, 이외 지역은 사토로 보았으며, 표층두께분포는 2005년 부산신히 남권(2-2 단계) 진우도 전면해상 지반조사(동아지질) 자료와 Hong(2010a) 시뮬레이션 결과로부터 유추하여 세부역에 대하여 Fig. 5와 같이 수정함으로써 장기지형 변화의 지역적인 패턴을 반영하였다.

배경농도는 연결잔교 내외측 관측(2013.04-2014.02) 부유사농도 관측치중 Fig. 6(a)에서 보듯이 10ppm~60ppm사이의 농도중

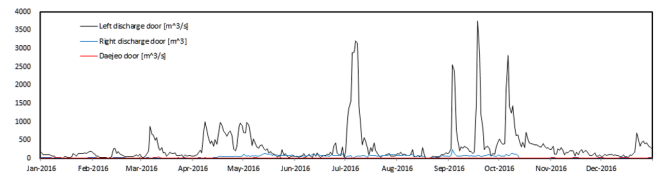


Fig. 3 Discharge from Nakdong estuary dam [m³/sec]

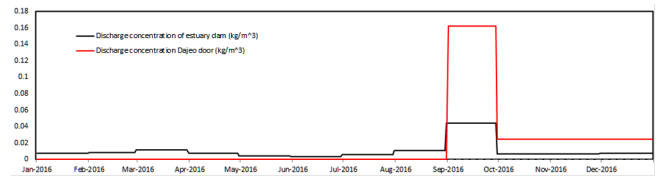


Fig. 4 SS concentration of discharge from Nakdong dam

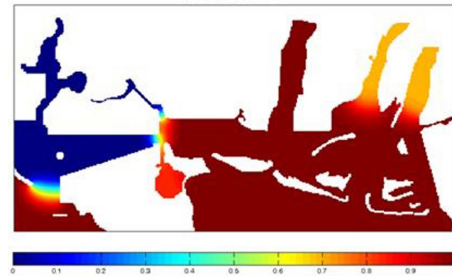


Fig. 5 Seabe thickness of nested model area B [m]

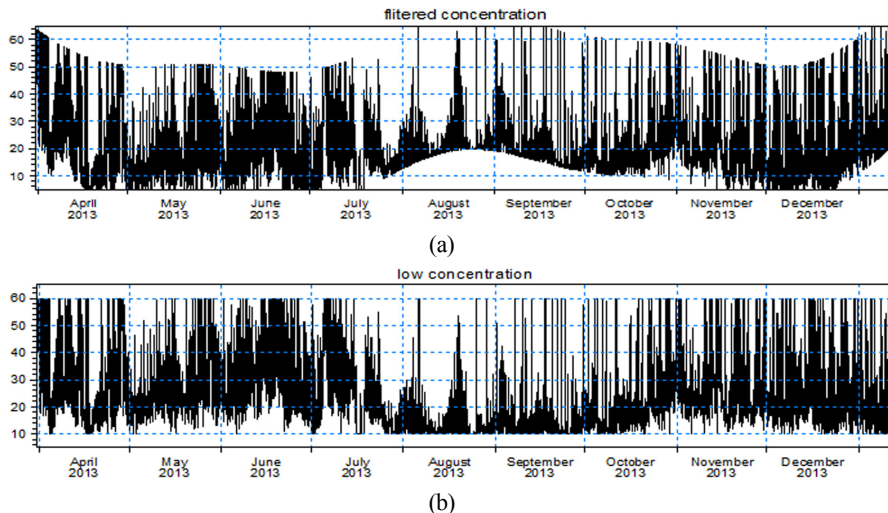


Fig. 6 Evaluation of background SS cocentration [mg/l]

Table 3 Bathymetry and discharge state for simulation cases

Simulation case #	Bathymetry		Existence of discharge of estuary dam	
	Busan New Port area	Fencing island area		
Existence of discharge of estuary dam	1-1	Before construction, bathymetry of 1996	1980 nautical chart	O
	1-2	2008 construction stage	2006 nautical chart	O
	2-1	Before construction, bathymetry of 1996	1980 nautical chart	X
	2-2	2008 construction stage	2006 nautical chart	X
Construction stage of Busan New port	3-1	Before construction, bathymetry of 1996	1980 nautical chart	O
	3-2	Construction of North container and starting dumping area	1980 nautical chart	O
	3-3	Starting dredging in port area	1980 nautical chart	O
	3-4	Finishing 1 st dredging and north container area	1980 nautical chart	O
	3-5	during south container	1980 nautical chart	O

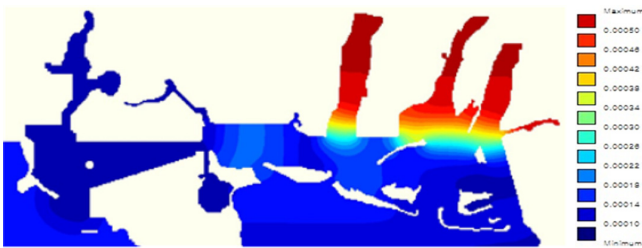


Fig. 7 Distribution of D50 grain size [mm]

1.8×10⁻⁶ 이상 Frequency를 제거하여 사용하였으며(Fig. 6(b)), 해저질 입경 중 D50 분포는 금번 연구에서 관측한자료 및 수자원공사 낙동강 하구둑 인근 해저질 자료를 바탕으로 정성적 추정하여 Fig. 7과 같이 작성하였다.

Table 3은 시뮬레이션 시나리오별 하구둑 방류유무 및 적용수심을 나타낸 것으로, 크게 낙동강 방류 유무 및 부산항 신항 건설 단계별로 나누어진다. 부산항 신항 건설 단계별의 경우는 전술한 부산항 신항 영역(Table 2의 A영역)의 지형 변화에 따른 B영역의 1년간의 지형 반응을 조사하였다.

하구둑 방류유무의 경우는 Hong(2010a)이 수립하여 적용했던 모델에 하구둑 방류만을 제거하여 하구둑 방류에 의한 지형반응만을 조사하기 위한 것으로, 부산항 신항 건설 단계별의 경우와는 전혀 다른 입력인자를 가지고 수립된 모델이다. 즉, 주요 인자중 하구둑 방류유량 적용시기가 부산항 신항 건설 단계별의 경우와는 관계가 없는 경우이다.

5. 진우도 협수로 지형에 미치는 영향조사 및 분석

5.1 유속장의 변화

부산항 신항 건설 및 낙동강 하구둑 방류가 진우도 주변 지역의 지형변동에 미치는 유속장(파랑에 의한 유동장 포함)의 변화를 조사하기 위하여 Fig. 8에서 보듯이 늘차만 협수로 인근 3개 지점 및 진우도-신자도 사이 중간 3개 지점의 연간 절대평균유속의 크기를 비교하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보듯이 신항 건설단계에 따른 유속의 변화는 늘차만 북안 협수로 일부 지역에서 약간 변화할 뿐 다른 정점에서는 거의 미미한 것으로 나타났다. 그러나 낙동강 하구둑 방류유무에 따른 유속의

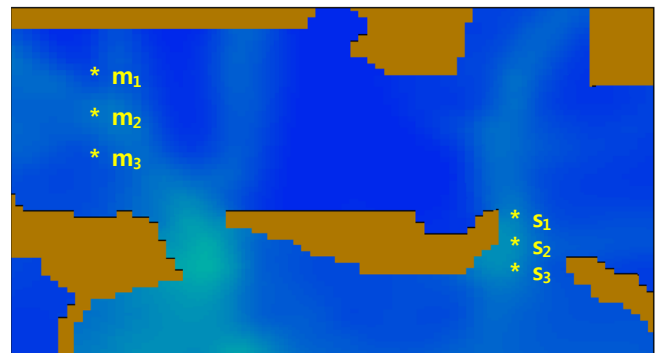


Fig. 8 Location for comparison of year-average current velocity

Table 4 Year-average current velocity at location of comparison of year-average current velocity for simulation cases

	Year average current speed for each construction stage [m/sec]					Year average current speed to existence of discharge of estuary dam [m/sec]			
						Bathymetry before construction of port		Bathymetry of 2008	
	1st	2nd	3rd	4th	5th	with	without	with	without
m ₁	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.08	0.09	0.12	0.13
m ₂	0.04	0.04	0.05	0.06	0.08	0.25	0.25	0.22	0.24
m ₃	0.33	0.34	0.25	0.27	0.28	0.25	0.25	0.15	0.15
s ₁	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.18	0.18	0.37	0.49
s ₂	0.20	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.46	0.58
s ₃	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.18	0.21	0.38	0.47

변화는 신항 건설 전의 지형을 적용하였을 경우는 차이가 거의 나지 않는데 반하여 2008년 지형을 적용하였을 경우는 진우도와 신자도 사이의 협수로 지역에서는 뚜렷하게 차이가 남을 알 수 있었다. 이유는 전술한 것처럼 낙동강 하구둑 근처 모래톱이 분리되어 지류를 형성하게 됨으로써 낙동강 하구 주변의 하구둑 방류에 의한 유속장이 차이가 나는 것으로 판단되었다.

결론적으로, 진우도 주변해역에서의 부산항 신항 건설로 인한

장기 유속장의 변화는 미미하며, 낙동강 하구둑 방류유무에 의한 장기유속장의 변화 또한 울타리섬 인근 지형의 형상에 따른 지류 형성 등에 의하여 차이가 나는 것으로 판단되었다. 본 연구에서 조사 분석한 절대 연평균 유속의 변화는 장기지형의 변화에 미치는 영향의 정도를 단순하게 판단하는 기준으로 사용할 수 있으나, 국부적인 장기 침·퇴적 양상을 나타내지는 못한다. 그러므로 다음절에서 시뮬레이션 시나리오별 장기(연간) 침·퇴적 양상을 조사하였다.

5.2 부산항 신항 건설단계별 침·퇴적 변화

Fig. 9에 나타낸 A, B 및 C영역에서의 부산항 신항 건설단계별 침식 및 퇴적량을 Table 5에, 1단계 대비 침식 및 증감비율을 Table 6에 나타내었다. 부산항 신항 건설로 인하여 건설단계가 진행될수록 대부분 퇴적이 증가하는 경향을 보이며, 그런 경향은 A영역이 가장 크게 나타나며, 다음으로 B영역, C영역의 순서로 작게 나타났다. 즉, 부산항 신항에서 멀어질수록 영향이 줄어들음을 알 수 있었다.

영역내 지역별 침·퇴적 양상을 조사하기 위하여 1단계 대비 침·퇴적 증감 두께분포를 Fig. 10부터 Fig. 12에 나타내었다.

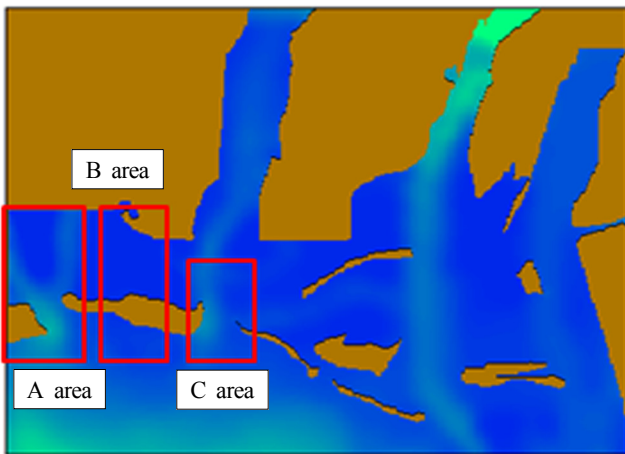


Fig. 9 Area for comparison of year-erosion and deposition

Table 5 Erosion and deposition rate for construction stage

Area	Erosion and deposition rate for each stage [m ³]					
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
A	Deposition	70984	62594	51393	53893	47861
	Erosion	-82537	-69548	-61740	-60048	-54375
	Total	-11553	-6953	-10347	-6155	-6514
B	Deposition	8170	8289	8466	9210	9795
	Erosion	-7156	-7202	-7395	-8114	-8582
	Total	1014	1086	1071	1095	1212
C	Deposition	24614	24981	24332	26650	27612
	Erosion	-25232	-25617	-24949	-27335	-28322
	Total	-617	-636	-617	-685	-710

Table 6 Erosion and deposition rate for each construction to 1st stage

Area	Erosion and deposition percent rate to 1 st stage [%]				
		2 nd	3 rd	4 th	5 th
A	Deposition	-11.82	-27.60	-24.08	-32.57
	Erosion	15.74	25.20	27.25	34.12
	Total	39.81	10.44	46.72	43.62
B	Deposition	1.45	3.62	12.72	19.88
	Erosion	-0.65	-3.33	-13.39	-19.93
	Total	7.13	5.61	8.00	19.52
C	Deposition	1.49	-1.15	8.27	12.18
	Erosion	-1.53	1.12	-8.33	-12.25
	Total	-2.99	0.05	-10.91	-15.01

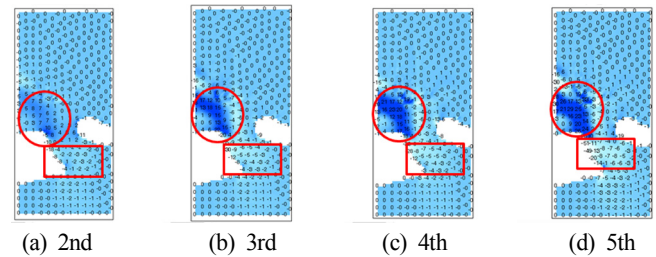


Fig. 10 Distribution of thickness of erosion and deposition for each construction stage to 1st construction stage at A area

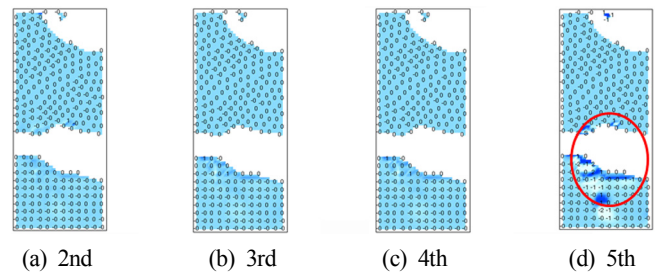


Fig. 11 Distribution of thickness of erosion and deposition for each construction stage to 1st construction stage at B area

Fig. 10는 A영역의 1단계 대비 증감 두께분포를 각 단계(2단계부터 5단계)별로 나타낸 것으로 ○표식 지역은 퇴적우세영역, □표식 영역은 침식우세영역으로 놀차만 입구 남측 해안의 협수로 지역에 주로 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 반면, 놀차도와 진우도 사이는 침식이 주로 발생하며 놀차도 주변 해안에 집중되는 경향을 띠고 있다. Fig. 11은 B영역의 1단계 대비 증감 두께 분포를 각 단계(2단계부터 5단계)별로 나타낸 것으로 건설이 진행됨에 따라 거의 변화가 나타나지 않다가 5단계에 접어들어 진우도 남측 전면(○표식 지역)에 약간의 지형변화가 나타났다.

Fig. 12는 C영역의 1단계 대비 증감 두께분포를 각 단계(2단계부터 5단계)별로 나타낸 것으로 4단계부터 5단계에 와서 ○표식 지역에 퇴적이 집중되어 나타난다. 즉, 진우도 동측 및 신자도 서측 끝부분에 국부적으로 퇴적이 집중되어 나타날 뿐 다른

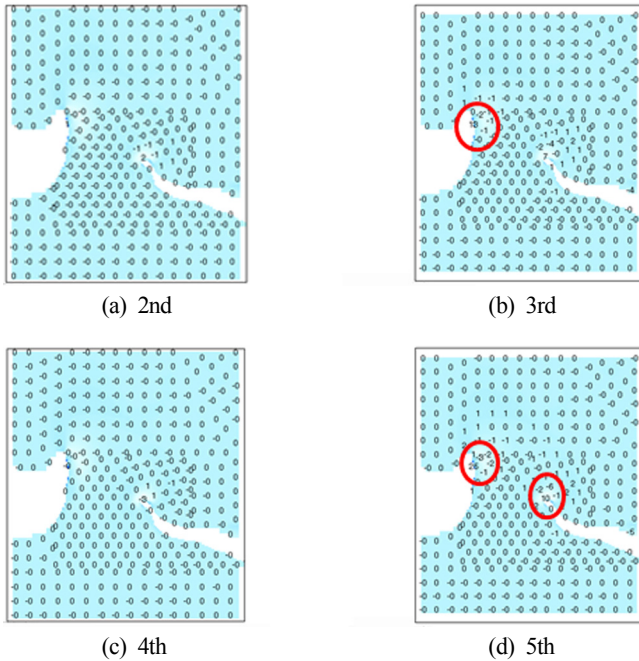


Fig. 12 Distribution of construction stage at C area. thickness of erosion and deposition for each construction stage to 1st

지역의 침·퇴적 양상에는 거의 변화가 없었다. 결론적으로, 부산항 신항 건설이 진우도 주변 지형에 미치는 영향은 놀차만 인근 지역에서만 나타나며, 진우도 및 신자도 주변에서는 극히 일부분(진우도 동측 및 신자도 서측 끝 해안)에 국부적으로 나타나는데 이는 앞 절에서 기술한 바와 같이 진우도 주변해역에서의 부산항 신항 건설로 인한 장기 유속장의 변화는 크지 않다는 결론과 일맥 상통하는 결과이다.

5.3 낙동강 하구둑 방류유무에 따른 침·퇴적 변화

낙동강 하구둑 방류유무에 따른 침·퇴적 변화를 조사하기 위하여 Hong(2010a)에 수립하여 적용했던 모델 결과와 동일 모델에 하구둑 방류만을 제거하여 하구둑 방류에 의한 지형반응만을 조사하였다. 2010년 수립된 모델의 경우 수심 및 지형은 부산항 신항 건설 전과 2008년 수심 및 지형을 적용하였으므로, 본 과업에서도 동일한 수심 및 지형에 하구둑 방류만을 제거하여 방류를 포함

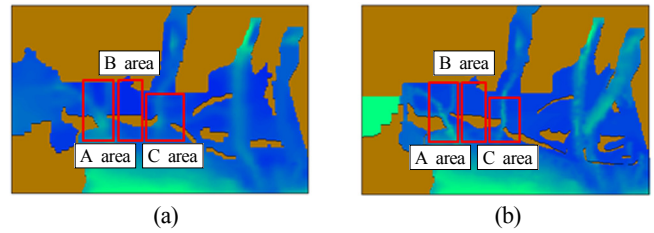


Fig. 13 Area for comparison of year-erosion and deposition; (a) before construction, (b) bathymetry of 2008

하였을 경우와 비교하였다. Fig. 13은 부산항 신항 건설 전 및 2008년 경우의 지형 및 침·퇴적 변화 조사를 위한 3개 영역(A, B 및 C영역)을 나타내었으며, A, B 및 C영역에서의 방류유무에 따른 침식 및 퇴적 변화 비교를 Table 7에 나타내었다.

Table 7에서 보듯이 신항 건설 전과 2008년의 경우 경향상 뚜렷한 차이는 나지 않으나, 방류로 인한 영향은 C영역에서 지배적으로 나타났다. 세부영역별 방류유무에 따른 침·퇴적 특성을 조사하기 위하여 Fig. 14부터 Fig. 16에 방류의 경우 미방류 대비 토사 증감 두께 분포도를 신항 건설 전 지형 및 2008년 지형의 각각의 경우에 대하여 나타내었다.

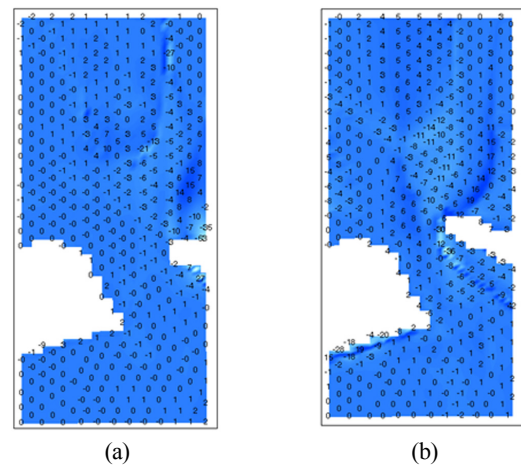


Fig. 14 Distribution of thickness of erosion and deposition due to discharge at A area.; (a) before construction, (b) bathymetry of 2008

Table 7 Comparison of erosion and deposition rate due to discharge of estuary dam

Area	Classification	Bthetry before construction			Bathetry of 2008		
		with [m ³]	without [m ³]	percent to without [%]	with [m ³]	without [m ³]	percent to without [%]
A	deposition	88933	75367	18	-149738	-118857	-26
	erosion	-109003	-94483	-15	121932	98969	23
	total	-20070	-19117	-5	-27806	-19888	-40
B	deposition	157697	123776	27	-356189	-320834	-11
	erosion	-349327	-319768	-9	83139	102268	-19
	total	-191630	-195992	2	-273050	-218566	-25
C	deposition	177007	182007	-3	-244214	-201062	-21
	erosion	-560977	-334950	-67	181875	62566	191
	total	-383970	-152943	-151	-62339	-138496	55

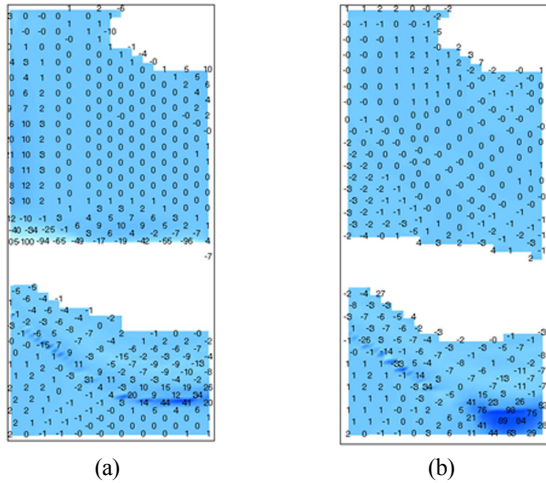


Fig. 15 Distribution of thickness of erosion and deposition due to discharge at B area; (a) before construction, (b) bathymetry of 2008

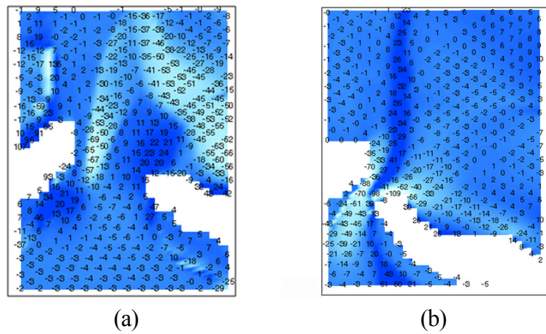


Fig. 16 Distribution of thickness of erosion and deposition due to discharge at C area.; (a) before construction, (b) bathymetry of 2008

A영역에서는 방류로 인해 전반적으로 지형변화가 발생하며, 특히 2008년 지형을 적용한 경우가 좀 더 크게 발생함을 알 수 있다. B영역에서도 A영역과 유사한 경향을 보이며 A영역에 비하여 영향이 좀 더 증가함을 알 수 있다. 그러나 C영역에서는 방류로 인한 영향이 신항 건설 전 지형을 적용한 경우나 2008년 지형을 적용한 경우 둘 다 상당히 크게 미침을 알 수 있으며, 신항 건설 전은 진우도와 신자도 북쪽 영역에서, 2008년의 경우는 진우도와 신자도 사이 및 남쪽 영역에서 방류로 인한 영향이 두드러짐을 알 수 있다.

결론적으로 낙동강 하구둑 방류로 인한 영향은 놀차만 주변 지형에 비해 진우도와 신자도 주변지형에 지배적인 영향을 미치며, 파랑 및 방류 등에 의한 낙동강하구 지형의 전반적인 지형변화가 유속장의 변화를 발생하고, 이것이 방류로 인한 지형변화 양상에도 영향을 미침을 알 수 있다.

5.4 신항 건설 영향과 낙동강하구둑 방류 영향의 정성적 비교

Table 3에서 보듯이 본 과업에서 수행한 시뮬레이션은 ①올타리섬 영역은 부산항 신항 건설 전의 지형을 적용하면서 부산항 신항 영역만 건설단계별로 변화시켜 진우도 주변 지형변화를 조사하는 것과, ②과업 전체영역을 부산항 신항 건설 전과 2008

년 지형을 적용하여 낙동강 하구둑 방류유무에 따른 진우도 주변 지형 변화를 조사하는 것으로 ①의 경우와 ②의 경우 시물레이션의 주요 조건이 서로 다르므로 정량적 상대비교 대신 정성적 상대비교를 통하여 신항 건설(신항 영역은 현상태, 올타리섬 영역은 신항 건설 전)로 인한 영향과 낙동강 하구둑 방류 영향을 정성적으로 비교하였다.

Fig. 17부터 Fig. 19는 A, B 및 C영역에서 신항 건설단계별 영향의 시물레이션 결과 중에서 1단계 대비 5단계 증감 분포와 하구둑 방류의 영향으로 인한 증감 분포 비교를 나타낸 것이다. Fig. 17에서 보듯이 A영역에서는 신항 건설로 인한 영향이 하구둑방류에 의한 영향보다 우세하나, Fig. 18의 B영역에서는 신항 건설보다 하구둑 방류의 영향이 진우도 주변 지역에 한정되어 우세하게 나타남을 알 수 있었다.

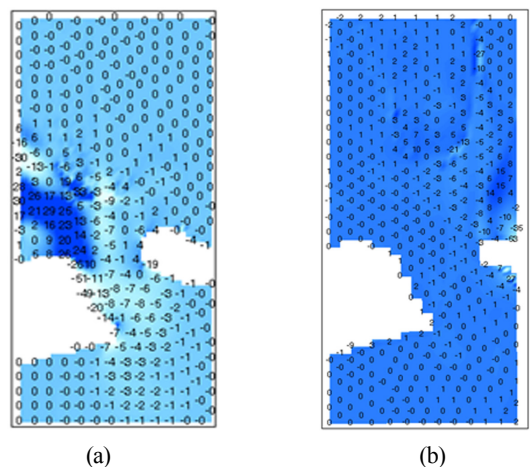


Fig. 17 Comparison at A area between effect of port construction and effect of discharge of estuary dam.; (a) Change of thickness of erosion and deposition due to port construction (b) Change of thickness of erosion and deposition due to port construction

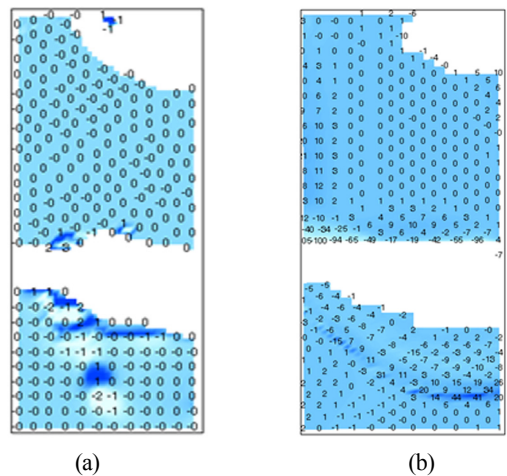


Fig. 18 Comparison at B area between effect of port construction and effect of discharge of estuary dam.; (a) Change of thickness of erosion and deposition due to port construction (b) Change of thickness of erosion and deposition due to port construction

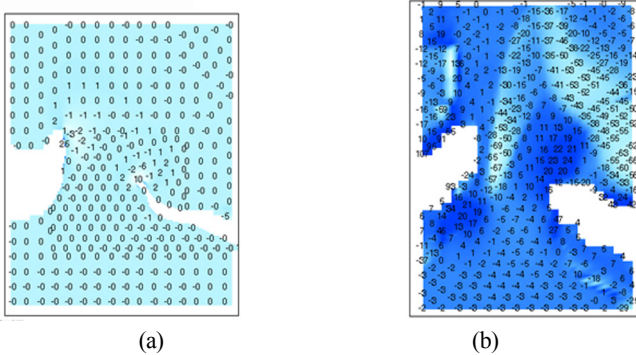


Fig. 19 Comparison at C area between effect of port construction and effect of discharge of estuary dam.; (a) Change of thickness of erosion and deposition due to port construction (b) Change of thickness of erosion and deposition due to discharge of estuary dam

이런 경향은 동진할수록 더 증가하여 Fig. 19에서 보듯이 하구둑 방류 영향이 상대적으로 신항 건설의 영향보다 두께 분포 변화가 상당히 많이 차이남을 알 수 있다. 즉, 진우도 주변지형의 변화에 미치는 영향은 부산항 신항 건설보다 낙동강 하구둑 방류에 의한 영향이 상대적으로 지배적이라고 판단되었다.

지금까지의 결과 분석으로부터, 진우도 주변의 지형변화는 부산항 신항 건설로 인한 영향이 적으며, 하구지역의 방류 및 외해파랑에 의한 전형적인 하구지역에서 발생하는 하구지형 변화 중에 있는 것으로 판단되었다.

6. 결 론

본 연구에서 부산항 신항 건설이 진우도 주변 지형에 미치는 영향을 조사하기 위하여 간접적 정성적인 검토를 위한 시나리오 작성 및 모델을 수립하여 시뮬레이션을 수행함으로써, 하구둑 방류유무에 따른 진우도 주변 지형 반응과 신항 건설단계별 진우도 주변 지형의 침·퇴적 양상을 상대적으로 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 신항 건설의 영향은 놀차만 인근 지역이 영향이 크고 진우도 주변 지역으로 동진할수록 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

(2) 하구둑 방류의 영향은 진우도와 신자도 주변에서 크고 서진할수록 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

(3) 신자도 동쪽 지형의 변화는 하구둑 방류로 인하여 발생하며, 낙동강 울타리섬의 지속적인 지형변화로 인한 유속장의 변화가 진우도 주변 지형의 변화를 발생시키는 것으로 판단된다. 또한, 하구둑 방류로 인한 토사공급과 이를 운반하는 파랑의 작용도 영향을 미치는 것으로 보인다.

결론적으로, 진우도 주변의 지형변화는 부산항 신항 건설로 인한 영향이 상대적으로 적으며, 하구지역의 방류 및 외해파랑에 의한 전형적인 하구지역에서 발생하는 하구지형 변화 중에 있는 것으로 판단되었다.

References

- Kim, S.Y., Ha, J.S., 2001. Sedimentary Faces and Environmental Changes of Nakdong River Estuary and Adjacent Coastal Area. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 34(3), 268-278.
- Kim, B.W., Kim, B.G., Lee, S.Y., 2005. Development of Mosaic Aerial Photographs for Shoreline Change Study in Nakdong Estuary. *Ocean and Polar Research*, 27(4), 497-507.
- Jang, S.T., Kim, K.C., 2006. Change of Oceanographic Environment in the Nakdong Estuary. *The Sea*, 11(1), 11-20.
- Oh, C.Y., Park, S.Y., Choi, C.U., Jeon, S.W., 2010. Change Detection at the Nakdong Estuary Delta Using Satellite Image and GIS. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, 18(1), 21-29.
- Jeon, Y.H., Yoon, H.S., Lee, K.S., 2010. Spatiotemporal Variations of Coastal Sediment Transport at Barrier Islands in the Nakdong River Estuary. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 16(2), 161-168.
- Kim, K.S., Hong, N.S., 2008. The Change of Ocean around Estuary Caused by Change of Shape of Nokdong River Estuary a Sandy Plain. *Proceedings of the 17th Conference of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Mokpo, 100-103.
- Kim, K.S., Hong, N.S., Chae, J.W., Lee, J.M., 2008. Morphological Simulations near Coastal Area of Jinwoo-do. *Proceedings of 12th Conference of the Korean Association of Ocean and Technology Societies*, Jeju, 374-377.
- Yoon, H.S., Yoo, C.I., Ryu, C. R., Lee, I.C., 2005. Sediment Environmental Change around Jinwoo-do in Nakdong River Estuary. *Proceedings of Spring Conference of the Korean Society of Marine Environment and Energy*, 44-49.
- Hong, N.S., 2010a. The 4th Project Report of Research and Development for Ocean Environmental Hydraulics of Busan New Port - Spreading of Suspended Sediment and Morphological Change. *Busan Port Construction Office*, Ministry of Ocean and Fisheries
- Hong, N.S., 2010b. Investigation of Reducing Characteristics for the Spreading of Dredging Soil and the Diffusion of Contaminant by Silt Protector Curtain through Three Dimensional Numerical Model Experiment. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(4), 78-85.
- Hong, N.S., Kim, G.Y., Kang, Y.G., 2008. Three Dimensional Numerical Model for Flow with Silt Protector. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(3), 1-7.
- Leonard, B.P., 1991. The Ultimate Conservative Difference Scheme Applied to Unsteady One-Dimensional Advection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(1), 17-74.
- Van Rijn, L.C., 1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. AQUA Publications, The Netherlands.

Experimental Study on Efficiency of Floating Vertical Axis Wind Turbine with Variable-Pitch

Jae-Heui Kim*, Hyo-Jae Jo^{ID**}, Jae-Hyuk Hwang**, Min-Suk Jang** and Byeong-Seong Lee***

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

**Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

***Research Institute of Medium and Small Ship-Building, Busan, Korea

부유식 가변 피치형 수직축 풍력발전기의 발전효율에 관한 실험 연구

김재희* · 조효재^{ID**} · 황재혁** · 장민석** · 이병성***

*한국해양대학교 조선해양시스템공학부

**한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

***중소조선연구원

KEY WORDS: Variable-pitch 가변 피치, Vertical axis wind turbine 수직축 풍력발전기, Model test 모형시험, Mechanical power test 기계적 출력 실험

ABSTRACT: This paper presents the efficiency of a floating vertical axis wind turbine with variable-pitch. A model was designed to use the lift force and drag force for blades with various pitch angles. The blade's pitch angle is controlled by the stopper. To validate the efficiency of the wind turbine discussed in this paper, a model test was carried out through a single model efficiency experiment and wave tank experiment. The parameters of the single model efficiency experiment were the wind speed, electronic load, and pitch angle. The wave tank experiment was performed using the most efficient pitch angle from the results of the single model efficiency experiment. According to the results of the wave tank experiment, the surge and pitch motion of a structure slightly affect the efficiency of a wind turbine, but the heave motion has a large effect because the heights of the wind turbine and wind generator are almost the same.

1. 서 론

최근 무분별한 화석 에너지 사용에 따른 자원 고갈 및 지구온난화 문제로 신재생 에너지에 관한 관심과 수요가 증대되었다. 그 중 풍력 에너지는 한때 경제적 효율성을 갖추지 못해 주목받지 못했지만, 오늘날 관련 기술의 발달로 효율성이 증대되어 전 세계적으로 주목받고 있다. 특히 유럽 및 미국과 같은 기술 선진국에서는 이미 소형풍력발전 시스템부터 5MW급 이상의 대형풍력발전 시스템까지 개발이 완료되어 실증 단계에 있다. 하지만 풍력발전 시스템의 대형화는 소음, 전파, 경관 등의 민원문제를 발생시킨다. 또한 우리나라와 같이 협소한 국토로 인한 육상풍력발전 보급 제한은 풍부한 부지, 양질의 풍력자원을 이용할 수 있고 민원문제를 해결할 수 있는 해상풍력발전에 대한 관심을 증가시켰다.

풍력발전의 원리는 바람이 갖는 운동에너지(Wind kinetic energy)

를 터빈을 통해 기계적 에너지로 변환시키고, 변환된 기계적 에너지를 다시 전기에너지로 변환시키는 것이다. 일반적으로 풍력발전기는 기동풍속(Cut-in wind speed)과 정격풍속(Rated wind speed) 사이에서 풍속의 제곱과 터빈의 면적에 비례하는 에너지를 생성하고, 정지풍속(Cut-out wind speed)까지 일정한 출력이 유지되다가 그 이상이 되면 시스템의 안전을 위하여 멈추도록 설계된다.

풍력발전기는 회전축의 방향과 형상에 따라 수평축 풍력발전기(Horizontal axis wind turbine, HAWT)와 수직축 풍력발전기(Vertical axis wind turbine, VAWT)로 분류 된다. 수평축 풍력발전기는 수직축 풍력발전기에 비해 풍속 대비 효율은 높으나, 바람의 방향과 각도에 따라 그 효율이 크게 좌우되어 요 시스템(Yaw system) 혹은 꼬리날개가 필요하기 때문에 구조적으로 복잡해지는 단점이 있다. 수직축 풍력발전기는 바람의 방향에 영향을 받지 않아 요 시스템이 필요하지 않고 비교적 낮은 풍속

Received 2 January 2018, revised 18 May 2018, accepted 7 June 2018

Corresponding author Hyo-Jae Jo: +82-051-410-4302, hjo@kmou.ac.kr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7847-0462

© 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.

의 바람과 풍향에 관계없이 발전이 가능하다는 장점이 있다. 특히 우리나라와 같이 기후변화가 심하고 계절풍의 영향을 받는 지역은 수직축 풍력발전기가 수평축 풍력발전기에 비해 더 유용하다(Sim, 2013).

수직축 풍력발전시스템에 대한 선행연구로 Sheldahl and Klimas(1981)은 서로 다른 에어포일을 적용한 수직축 풍력발전기의 레이놀즈 수에 따른 공력특성을 파악하였다. Martin(2011)은 NREL 5MW급 해상용 풍력발전기를 1/50로 축소 제작하여 실험을 실시하였고, 실험 결과를 통해 부유식 풍력발전기의 효율을 분석하기 위한 시뮬레이션 코드를 검증 하였다. Oh and Kim(2012)은 해양용 소형 수직축 풍력발전기를 설계하고 파랑 및 바람으로 인한 구조물 운동응답이 발전효율에 미치는 영향을 파악하였다. Kim et al.(2011)은 5MW급 스파(Spar)타입 부유식 해상 풍력발전시스템의 파랑 및 바람 중 구조물의 운동성능을 수치해석 결과와 모형시험 결과를 비교하였다.

일반적으로 항력을 이용하는 수직축 풍력발전기는 토크가 큰 반면 발전 효율이 매우 낮고 양력을 이용하는 수직축 풍력발전기는 높은 풍속에서는 발전 효율이 좋으나 낮은 풍속에서는 기동이 어렵고 효율이 매우 낮은 단점이 있다. 본 연구에서 사용한 가변 피치형 수직축 풍력발전기는 블레이드에 대한 바람의 방향과 로터의 회전에 따른 원심력에 의하여 블레이드의 피치각이 실시간으로 자율적으로 조정됨에 따라, 양력과 항력 모두를 회전력으로 전환시켜 발전효율이 증가하도록 설계하였다.

본 연구에서는 자체 개발한 가변 피치형 수직축 풍력발전기의 단독 발전효율 성능을 파악하기 위해 풍동실험을 실시하였고, 원형실린더 형태의 부유체와 결합 후 파랑과 바람 중 부유체의 운동에 따른 발전효율 성능을 수조실험을 통해 파악하였다. 단독 발전효율 실험에선 블레이드의 피치 가변 범위에 따른 분당회전수(Revolutions per minute, RPM)와 기계적 출력(Power)을 비교·분석 하였다. 부유식 풍력발전 실험에서는 단독효율 실험결과 중 가장 우수한 발전 성능의 피치 가변 범위에 대해 파랑과 바람 중 부유체 운동이 발전효율에 미치는 영향을 비교·분석 하였다.

2. 풍력발전의 이론적 해석

바람은 공기라는 질량을 가지는 물질의 운동이므로 운동에너지 공식으로 바람의 운동에너지를 정의할 수 있다. 공기의 질량을 m (kg), 속도를 v (m/s)라고 할 때 바람의 운동에너지 E 는 식 (1)과 같다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

질량 흐름률(Mass flow rate) \dot{m} 은 공기밀도 ρ (kg/m³)와 풍속 v (m/s) 그리고 바람의 방향과 수직인 블레이드의 면적 A (m²)의 곱으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho Av \tag{2}$$

공기의 흐름에 의한 에너지 출력 $P(W)$ 는 단위시간당 에너지의 변화량으로 정의되고 운동에너지 식을 출력으로 변형시키면 식 (3)과 같다.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \tag{3}$$

따라서 식 (1)에 식 (2)를 대입하면 바람에 의한 에너지 출력 $P(W)$ 는 식 (4)와 같다.

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \tag{4}$$

블레이드의 기계적 출력 $P_{mechanical}$ 은 토크 $T(N \cdot m)$ 와 풍력발전기의 회전 각속도 ω (rad/s)의 곱으로 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. 풍력발전기의 회전 각속도를 분당 회전수 RPM으로 환산하여 계산하면 식 (6)과 같다(Hwang, 2014).

$$P_{mechanical} = T \cdot \omega \tag{5}$$

$$P_{mechanical} = T \cdot RPM \cdot \frac{\pi}{30} \tag{6}$$

풍력발전기의 출력 성능을 평가하는 방법에는 발전기의 전력을 측정하는 방법과 회전축의 토크를 측정하는 방법이 있다. 발전기의 전력을 측정하면 기계적 손실과 전기적 손실을 모두 고려한 전력을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 회전축의 토크를 측정하는 방법은 블레이드에서 회전축의 토크로 전환되는 효율만을 평가할 수 있다. 즉 회전축의 토크를 전기 에너지로 변환하며 생기는 변수를 무시할 수 있다는 장점이 있다(Lee, 2014). 본 연구에서는 풍력발전기의 출력 성능을 평가하기 위해 기계적인 효율만을 평가하는 회전축의 토크를 측정하는 방법을 사용하였다.

3. 실험

실험 모델의 블레이드 길이는 0.28m, 폭은 0.225m이고 블레이드의 형상은 Fig. 1과 같다. 블레이드 상·하판(Top and bottom plates)의 지름은 0.5m로 제작되었고 총 5엽의 블레이드를 원형판의 중심으로 부터 0.22m 떨어져 있는 위치에 결합하였다. 코드 길이는 0.225m, 앞전부터 회전축 중심까지의 거리와 무게중심까지의 거리는 각각 0.065m, 0.096m이다. 블레이드는 알루미늄(Aluminium)재질로 블레이드 상·하판은 충격강도가 크고 가벼운 폴리카보네이트(Polycarbonate)재질로 제작하였다. 또한 블레이드의 피치 가변 범위를 제어하기 위해 블레이드 상판에 고정나사를 삽입한 스톱퍼(Stopper)를 설치하였다.

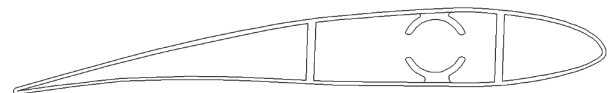


Fig. 1 Shape of the blade

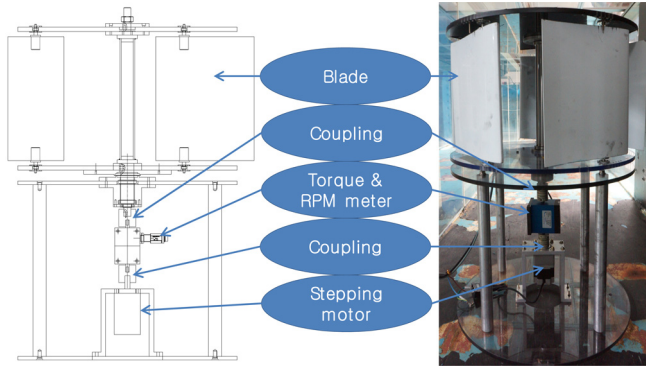


Fig. 2 Mechanical measuring systems

본 연구에 사용된 풍력발전기의 기계적 출력을 측정하는 실험 장비는 RPM과 토크를 동시에 측정할 수 있는 토크센서와 측정값을 실시간으로 확인할 수 있는 모니터로 이루어져 있으며, 전기적 부하 장치로 스텝핑 모터(Stepping motor)를 장착하여 Fig. 2와 같이 구성하였다.

Fig. 3은 로터의 회전에 따른 블레이드 1개의 움직임의 위치별로 도식화 한 것이다. 블레이드의 유선형 단면을 따라 흐르는 바람에 의한 양력구간, 블레이드가 바람의 저항을 받아 생기는 항력구간, 블레이드가 회전하며 양력구간과 항력구간이 연결되

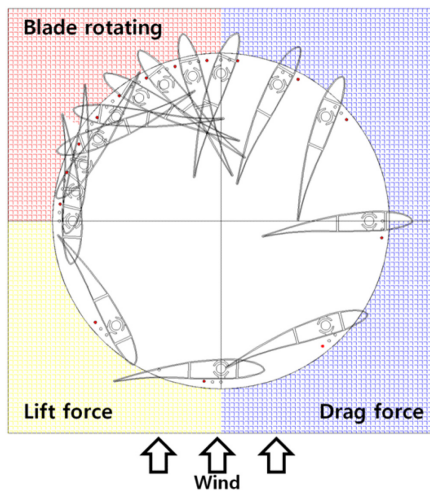


Fig. 3 The condition of the blade position following one rotation

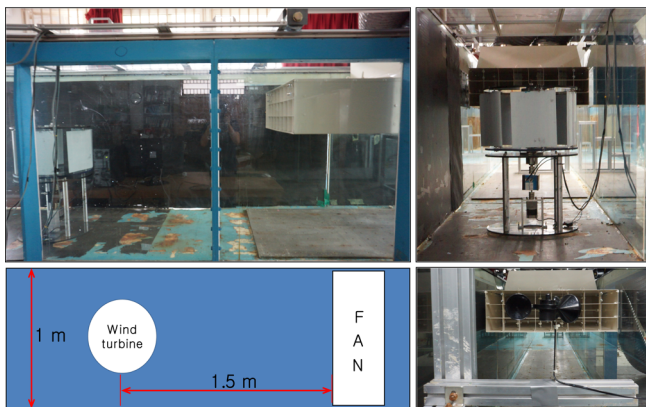


Fig. 4 Configuration of the single VAWT experiment

는 날개회전구간으로 구분 할 수 있다. 일반적으로 수직축 풍력발전기는 양력 혹은 항력 중 하나만을 사용한다. 그러나 자체 개발한 수직축 풍력발전기는 바람 및 원심력에 의해 블레이드 피치각이 시간에 따라 변화하면서 양력과 항력 모두를 회전력으로 전환시켜 최적의 에너지 변환 효율을 낼 수 있도록 설계되었다.

풍력발전기 단독 발전효율 실험을 위해 Fig. 4와 같이 한국해양대학교 해양시스템연구실의 2차원 조파수조를 활용하여 간이형 풍동실험(Wind tunnel test) 환경을 조성하였다.

바람 발생장치에서 생성된 바람이 2차원 조파수조를 따라 균일하게 흐를 수 있도록 조파수조 상단부에 덮개를 설치하였다. 또한 후류에 발생하는 바람 에너지를 최소화하기 위하여 풍력발전기와 벽 사이에 약 15m의 공간을 두었다. Table 1은 단독 발전효율 실험 조건을 나타내고, Fig. 5는 각 실험 조건에 따른 피치 가변 범위를 나타내고 있다. 실험 풍속 범위는 1m/s 간격으로 3~10m/s이고 풍력터빈의 위치에서 5분간 3회에 걸쳐 측정 한 값을 평균 하였다.

실험은 전기적으로 무부하 상태 그리고 부하상태에 대하여 수행되었다. 무부하 상태에서는 전기적인 부하의 연결이 없기 때문에 발전기 베어링 마찰을 제외한 순수 풍력발전기의 공력 성능을 측정할 수 있다. 따라서 전기적 부하 없이 풍속별 RPM을 측정함으로써 터빈의 회전이 시작되는 풍속인 기동풍속(Cut-in speed)을 측정할 수 있다. 실제 해상풍력 발전기의 경우 초기 기동풍속을 낮추기 위해 코깅토크를 저감시키는 다양한 장치가 사용된다. 그러나 본 연구에서는 축소 제작된 실험 모델의 특성상 코깅토크 저감 장치를 사용할 수 없어 수동으로 스텝핑 모터의 전기적 부하 여부를 선택하여 실험을 수행하였다.

Table 1 Design parameters for experimental condition in wind tunnel

Wind speed [m/s]	Variable-pitch range [deg]	Electronic Load
3 ~ 10	-35 ~ +25	X
	-15 ~ +65	
	-10 ~ +105	
	-35 ~ +25	O
	-15 ~ +65	
	-10 ~ +105	

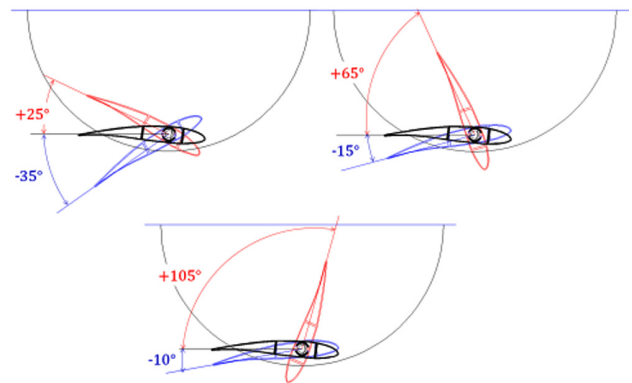


Fig. 5 Variable-pitch range of the blade

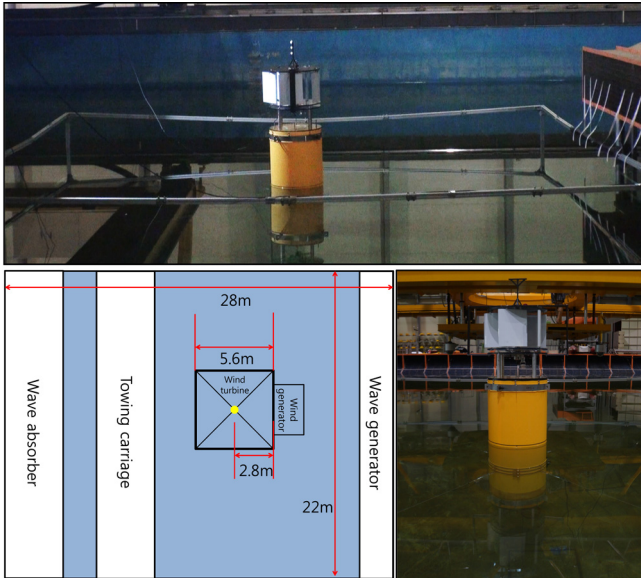


Fig. 6 Configuration of the floating VAWT experiment

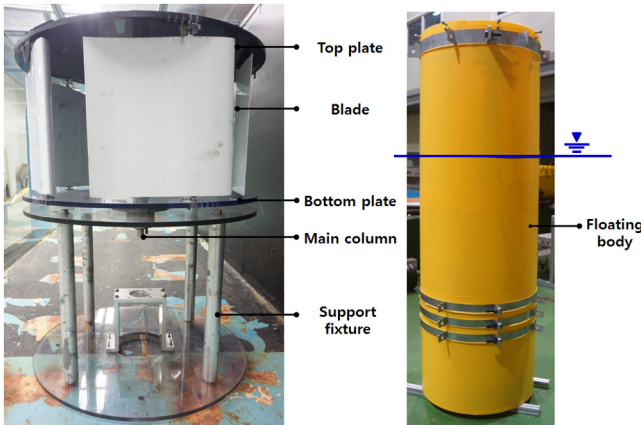


Fig. 7 Prototype of the wind turbine and the cylindrical type floating body

본 실험에서 사용된 풍력발전기는 자체 개발하였다. 실증단계 전 사전연구로서 축소모형 수준에서의 성능을 파악하기 위해 설계되고 제작되었다. 부유식 풍력발전 실험은 Fig. 6과 같이 중소조선연구원(Research Institute of Medium & Small Shipbuilding)의 길이 28m, 폭 2m, 수심 2m의 해양 공학수조에서 진행하였다. 부유식 풍력발전에 적용된 부유체는 Fig. 7과 같이 원형실린더 형태의 구조물로, 다른 형태의 구조물보다 흘수가 깊어 상대적으로 상하동요에 대한 응답성능이 좋다는 장점이 있다. 그러나 무게중심의 위치가 구조물의 운동성능을 크게 좌우하기 때문에 무게중심을 낮추기 위해 토크센서를 제거하고 지지부(Support fixture)의 길이를 최소화하여 풍력발전기를 경량화 하였다. 경량화를 위해 토크센서를 제거하였기 때문에 비접촉식 RPM 측정기를 이용해 RPM을 측정하여 각 실험조건에 대해 비교하였다.

Table 2는 부유식 풍력발전 각 실험 조건들을 나타낸다. 실험 풍속은 8m/s로 풍력터빈 위치에서 5분간 3회에 걸쳐 측정된 값을 평균하였다. 규칙파(Regular wave) 실험은 1.6sec부터 3sec까지 0.2sec 간격으로 8개의 규칙파에 대해 실시하였으며, 불규칙파

Table 2 Design parameters for experimental condition in wave tank

Variable-pitch range [deg]	Wave type	Wind speed [m/s]
-10 ~ +105	Regular wave	8
	Irregular wave	

(Irregular wave)는 유의파고($H_{1/3}$, Significant wave height) 0.1235m와 평균주기(T , Mean period) 1.76sec인 ITTC(International towing tank conference)스펙트럼을 사용하였다. 파랑 조건은 구조물의 주파수영역 수치해석 결과를 바탕으로 실험 수조의 조파 범위 내에서 구조물의 운동을 전반적으로 관찰 할 수 있는 조건으로 선정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 단독 발전효율 실험

Fig. 8은 기동풍속을 측정하기 위해 전기적 무부하 상태에서 풍속별 RPM만을 측정한 결과이다. 실험결과 모든 피치 가변 범위에서 풍동시스템의 최저 풍속 3m/s일 때 최초기동이 일어남을 확인 하였다. 또한 모든 피치 가변 범위에서 풍속이 증가함에 따른 RPM 증가의 양상은 비슷한 경향을 보였고 이로서 피치 가변 범위가 기동풍속을 낮추는 것에는 거의 영향을 주지 않음을 확인 하였다. 피치 가변 범위 중 -10°~ +105°의 경우가 가장 높은 RPM 결과를 나타내었다.

Fig. 9는 전기적 부하 상태에서 피치 가변 범위에 따라 풍속별 출력 결과값을 나타내었다. 앞선 실험결과와 마찬가지로 피치 가변 범위 -10°~ +105°의 경우 가장 높은 출력을 가지고 가장 낮은 풍속에서 발전이 시작된다. 따라서 본 연구에서 사용된 가변 피치형 수직축 풍력 발전기는 가변 범위 -10°~ +105°의 경우가 최대 효율을 가지는 것을 확인하였다. 또한 풍속이 증가할수록 피치 가변 범위에 따른 발전 가능 풍속범위와 발전 효율의 차이가 커지는 것을 확인 할 수 있다.

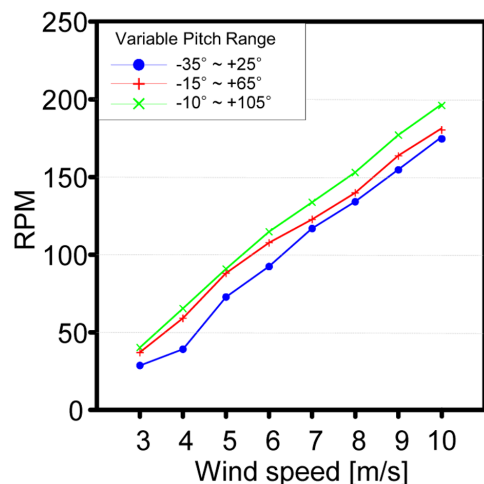


Fig. 8 The RPM by the wind speed following variable-pitch range in no load condition

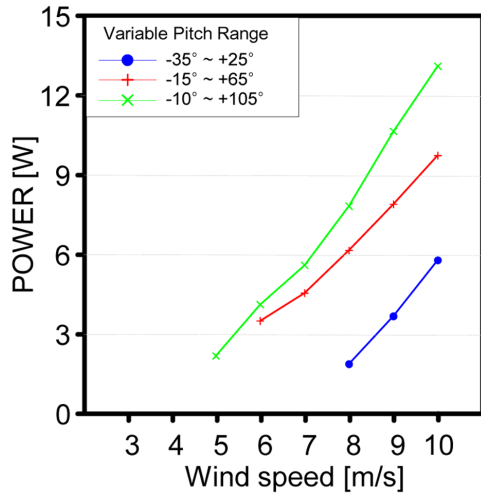


Fig. 9 The power by the wind speed following variable-pitch range in load condition

4.2 부유식 풍력발전 실험

해양 공학수조에서 실시한 부유식 풍력발전 실험은 단독 발전 효율 실험결과 발전 효율이 가장 좋은 피치 가변 범위 -10°~+105°의 경우에 대해 실시하였다. Fig. 10은 파랑 조건에 따른 풍력발전기의 RPM응답을 나타낸 것이며, Fig. 11은 부유식 풍력발전시스템의 규칙파 중 운동응답 이론해석 및 실험결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 11에 따르면 구조물의 Heave 운동응답은 2.4sec의 규칙파에서 가장 크게 나타났으며, Surge와 Pitch 운동응답은 3.0sec의 규칙파에서 가장 크게 나타났다. Fig. 10의 풍력발전기의 RPM응답과 Fig. 11의 구조물의 운동응답을 비교한 결과, 규칙파 실험 범위 중 Surge와 Pitch 운동이 가장 크게 일어나는 3.0sec의 규칙파에서 RPM응답과 파가 없을 경우의 RPM응답은 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 Heave운동이 가장 큰 2.4sec의 규칙파에서 RPM응답이 가장 작게 나타난 것을 알 수

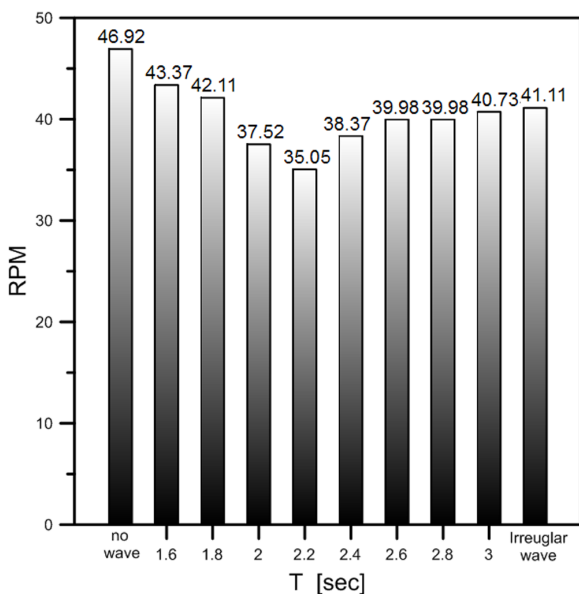


Fig. 10 The RPM responses on each experimental case in 8 m/s wind speed

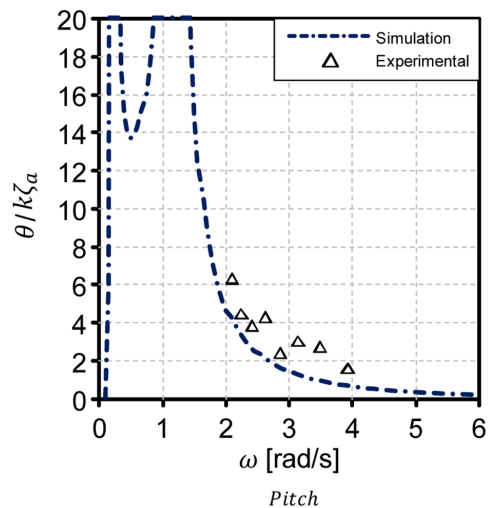
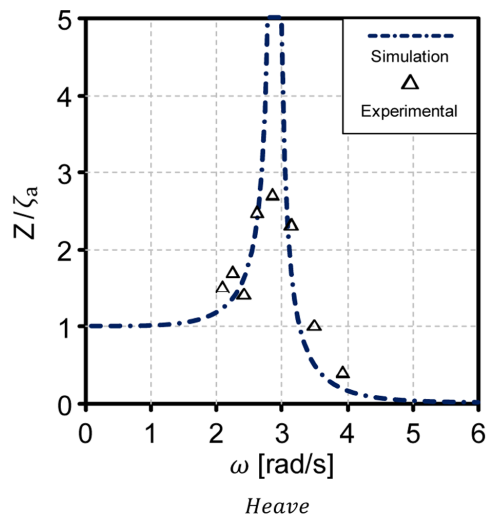
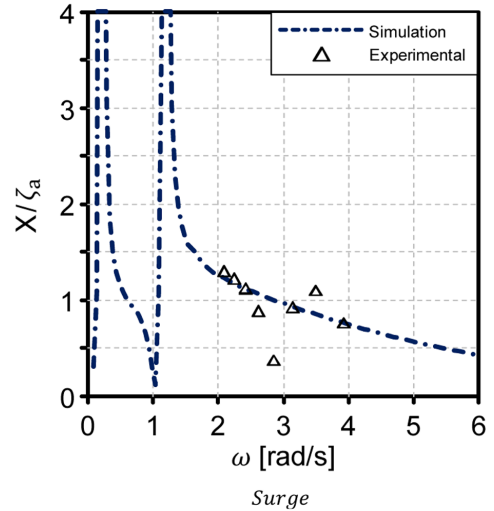


Fig. 11 Dynamic response of simulation and experiment of floating VAWT in regular waves

있다. 이는 바람 발생장치의 바람 출구와 풍력발전기의 높이가 거의 유사하여, 구조물의 상하동요에 의해 풍력발전기가 유효 바람 면적을 벗어나기 때문으로 판단하였다. 또한 단독 발전 효율 실험의 RPM응답과 Fig. 10의 부유식 풍력발전실험의 RPM응

답을 비교하면 부유식 풍력발전실험의 RPM응답결과가 현저히 낮게 나타난다. 이 결과에 대한 이유로, 단독 발전효율 실험에선 풍력발전기와 바람 발생장치간의 거리가 1.5m이나, 풍력발전 실험에선 부유체의 위치유지를 위한 계류시스템 때문에 설치거리가 2.8m로 약 2배 정도 멀어짐에 따라 RPM응답 결과가 약 75% 감소하였다. 비록 두 실험을 동일한 풍속에서 수행하였지만 떨어진 거리로 인한 풍량 감소를 가장 큰 원인으로 판단하였다. 여기서 풍량이란 바람 발생장치의 덕트를 통해 이동한 공기의 양이다. 부유식 풍력발전 실험의 경우 개방된 공간에서 수행되어 바람의 집중도가 떨어졌기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 가변 피치형 수직축 풍력발전기에 대해 실험을 통하여 단독 발전 효율을 파악하고, 파랑 및 바람 중 부유체 동적거동과 RPM운동응답을 비교하였다. 각각의 실험을 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 단독 발전 효율 실험 결과 모든 피치 가변 범위에서 풍동 시스템의 최저 풍속인 3m/s에서 기동이 일어남을 확인하였고, 피치 가변 범위 -10° ~ $+105^{\circ}$ 에서 최고 효율을 나타내었다.

(2) 부유식 풍력발전 실험결과 Surge와 Pitch 운동이 가장 큰 3.0sec의 규칙파에 대한 RPM응답은, 파가 없는 경우의 RPM 응답과 큰 차이를 보이지 않았다.

(3) 반면, Heave운동이 가장 큰 2.4sec의 규칙파에 대한 RPM 응답은 모든 실험 case 중 가장 낮게 나타났다. 이는 부유체 Heave운동으로 인해 풍력발전기의 유효 바람 면적을 벗어났기 때문으로 보여 진다.

추후 풍력발전기 블레이드 형상 및 크기에 따른 발전효율에 대한 연구가 필요하다.

References

- Hwang, B.S., 2014. Introduction to Wind Energy and Technology. A-JIN, Korea.
- Kim, M.S., Lee, M.S., Kim, M.W., Shin, H.G., 2011. Motion Analysis of 5MW Spar Type Floating Offshore Wind Turbine. The Proceedings of the Society of Naval Architects of Korea, 804-808.
- Lee, K.J., 2014. A Study on Characteristics of Electrical and Mechanical Properties for Small-Scaled Wind Turbines (M.S. Thesis). Changwon National University, Korea.
- Martin, H.R., 2011. Development of a Scale Model Wind Turbine for Testing of Offshore Floating Wind Turbine Systems. Electronic Theses and Dissertations, The Graduate School of the University of Maine, 1578.
- Oh, M.W., Kim, D.H., 2012. Design and Computational Analysis of Small Vertical-Axis Wind Turbine for Ocean Buoy System. Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, 16(2), 58-64.
- Sheldahl, R.E., Klimas, P.C., 1981. Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. Sandia National Laboratories Energy Report, SAND-80-2114.
- Sim, J.P., 2013. Experimental and CFD Analysis of V-Shape Vertical Axis Wind Turbine (M.Sc. thesis). Gyeongsang National University, Korea.

Planing Avoidance Control for a Supercavitating Underwater Vehicle Based on Potential Functions

Seonhong Kim*, Nakwan Kim^{ID**}, Minjae Kim^{***}, Jonghoek Kim^{***} and Kurnchul Lee^{***}

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul national university, Seoul, Korea

**Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul national university, Seoul, Korea

***Agency for Defense Development, Changwon, Korea

포텐셜함수 기반 초공동 수중운동체 플레이닝 회피 제어 연구

김선홍* · 김낙완^{ID**} · 김민재^{***} · 김종혁^{***} · 이진철^{***}

*서울대학교 조선해양공학과

**서울대학교 해양시스템공학연구소

***국방과학연구소

KEY WORDS: Planing avoidance 플레이닝 회피, Supercavitating underwater vehicle 초공동 수중운동체, Potential function 포텐셜 함수, Planing estimation 플레이닝 예측, Planing protection 플레이닝 보호

ABSTRACT: In this paper, we focus on planing avoidance control for a supercavitating underwater vehicle based on the potential function method. The planing margin can be calculated using the relative position between the cavity center and vehicle center at the end of the vehicle. The planing margin was transformed into a limit variable such as the pitch angle and yaw angle limit. To prevent the vehicle attitude from exceeding the limit variable, a potential function based planing envelope protection method was proposed. The planing envelope protection system overrides commands from the tracking controller, and the vehicle attitude converges to a desired angle, in which the potential function is minimized. Numerical simulations were performed to analyze the physical feasibility and performance of the proposed method. The results showed that the proposed methods eliminated the planing, allowing the vehicle to follow tracking commands.

1. 서 론

초공동 수중운동체는 공동으로 운동체를 감싸 물과 접촉하는 면적을 없애므로써 동일한 추력에서도 월등한 전진속도를 얻을 수 있다. 초공동 수중운동체의 경우 운동체의 몸체가 공동안으로 들어와 있어 유체력을 발생시키지 않고 전면부의 캐비테이터와 제어편의 일부만 공동 밖으로 나와 물과 접촉하면서 제어력을 발생시킨다. 이 때 공동 내부에서 주행하는 운동체의 몸체가 공동 벽과 충돌하면 플레이닝(Planing)이 발생하게 된다. 초공동 수중운동체는 일반적인 수중운동체 이상의 빠른 속도(100m/s 이상)에서 운용하기 때문에 플레이닝에 의한 유체력의 크기가 매우 크다. 따라서 플레이닝이 발생한 상황에서 운동체를 제어하는 것은 제어로직 및 제어관 성능의 한계 때문에 수행하기 어렵다. 따라서 플레이닝의 발생을 사전에 차단하기 위

한 플레이닝 회피 제어 연구가 필요하다.

최근 국내에서도 초공동 관련 기초연구가 국방과학연구소 주관으로 꾸준히 수행되고 있고 관련 논문도 다수 발표된 바 있다(Ahn et al., 2012; Kim and Lee, 2014; Kim and Kim, 2015a; Kim and Kim, 2015b). 초공동 수중운동체의 플레이닝 회피에 관한 연구도 국외에서 수행된 바 있다. Vanek(2008)에 의해 제안된 방법은 Receding-Horizon-control기법을 사용하였고 플레이닝을 목적함수에 포함시켰다. 플레이닝이 일어나는 조건에 대한 metric을 구하여 플레이닝 회피 제어를 수행하는 연구(Sanarria et al., 2014)도 수행된 바 있다.

본 연구에서는 초공동 수중운동체가 주행 중 플레이닝이 일어나지 않도록 운동체의 자세를 제한하는 플레이닝 회피 제어 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 기존에 수행된 연구는 공동의 크기 변화 및 공동 중심축 이동을 고려하지 않고 일정한

Received 18 December 2017, revised 23 May 2018, accepted 7 June 2018

Corresponding author Nakwan Kim:+82-02-880-7293, nwkim@snu.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9378-8372

© 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.

크기의 공동을 가정하여 연구를 수행하였다. 또한, 플레이닝을 회피하기 위하여 새로운 제어기를 설계하였는데, 이러한 기법은 제어기 설계에 사용된 초공동 수중운동체의 동역학의 정확도가 제어기의 성능을 결정하기 때문에 실제 운용 상황에서 제어기의 성능을 보장할 수 없다. 본 연구에서 제안된 기법은 공동의 크기 및 중심축 변화를 모두 고려한 상태에서 수행되었으며, 포텐셜 기반 플레이닝 회피 알고리즘은 기존에 설계된 제어기와 독립적으로 작용하는 유도법칙을 생성하기 때문에 운동체 동역학에 대한 정보가 부족한 상황에서도 성능을 보장할 수 있다. 플레이닝 회피 알고리즘은 크게 플레이닝 예측과 플레이닝 보호로 나눌 수 있다. 플레이닝 예측은 공동과 운동체 사이의 상대위치를 통해 계산된 여유를 한계변수로 변환하여 수행하였고 플레이닝 보호는 포텐셜 함수를 기반으로 명령을 제한하는 방식을 사용하였다. 제안된 플레이닝 회피 제어기법은 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

2. 플레이닝 회피 제어기 설계

초공동 수중운동체의 플레이닝을 방지하기 위한 플레이닝 회피 제어 시스템 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 Tracking controller는 운동체에 인가된 명령(z_d, y_d)을 추종하기 위한 제어 입력을 결정하는 제어기이다. 플레이닝 예측(Planing estimator)은 플레이닝이 발생하는 순간의 상태변수 값(한계변수; θ_{lim}, ψ_{lim})을 예측, 계산하여 플레이닝 보호(Planing protection) 시스템으로 전달한다. 플레이닝 보호 시스템에서는 Tracking controller에 의해 결정된 제어 입력에 의한 운동체 자세 변화가 운동체 한계변수를 넘지 않도록 제어 입력(제어 명령)을 수정하는 역할을 수행한다. 이를 통해 수정된 제어 입력은 운동체 동역학 모델링에 전달되어 운동체의 상태변수를 계산하게 된다. 운동체 동역학 모델링은 Kim and Kim(2015a)의 모델링 기법을 통해 수행되었다.

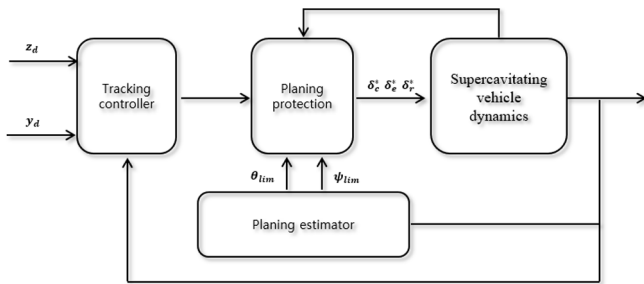


Fig. 1 Planing avoidance control system architecture for a supercavitating underwater vehicle

2.1 플레이닝 예측

운동체의 자세 변화가 플레이닝을 발생시키는지 여부를 판단하는 것이 플레이닝 예측이다. 그렇기 위해서는 플레이닝 발생하는 순간의 운동체 상태변수를 계산하여 이를 한계변수로 정의해야 한다. 본 연구에서는 운동체 한계변수를 종방향/횡방향으로 나누어 계산하였다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 운동체와 공동의 상대위치에 따른 종/횡축 회피한계를 나타내고 Fig. 2(c)는 종축 한계변수(θ_{lim})를 나타낸다. 플레이닝은 주로 운동체 후

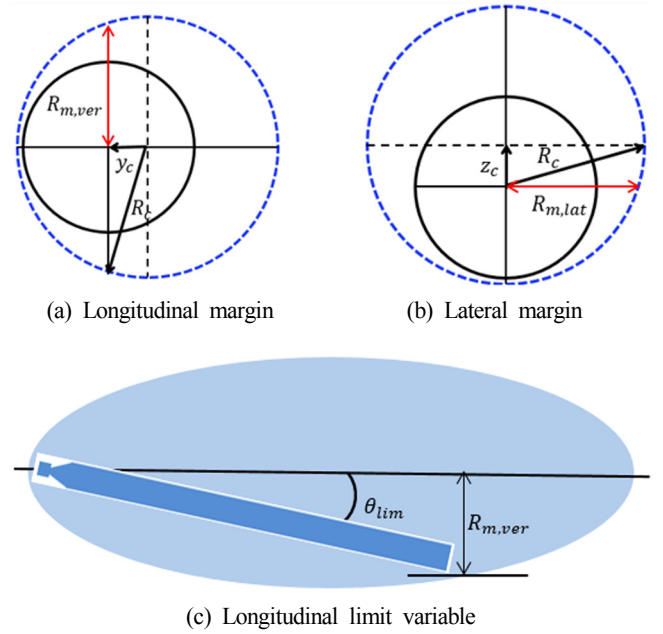


Fig. 2 Planing margin according to the relative position between cavity and vehicle

미에서 발생하며 이 때 공동의 중심과 운동체의 중심은 일치하지 않는다. 본 연구에서는 공동 중심과 운동체의 상대위치 및 공동의 크기를 계산하여 종/횡축방향 플레이닝 여유(R_m)를 계산하고 이를 식 (1)-(2)를 통해 종/횡축 한계변수로 나타내었다.

$$\theta_{lim} = \sin^{-1}\left(\frac{R_{m,ver}}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_t}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) \quad (1)$$

$$\psi_{lim} = \sin^{-1}\left(\frac{R_{m,lat}}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_t}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) \quad (2)$$

여기서, L_t 는 무게중심에서 운동체 후미까지의 거리이고 R_v 는 운동체 반지름이다. 공동의 크기가 작을수록, 운동체와 공동의 상대 위치가 멀수록 플레이닝의 여유는 감소하게 된다.

2.2 플레이닝 보호

플레이닝 한계변수가 결정되면 플레이닝 보호를 통해 운동체의 자세가 한계변수를 넘지 않도록 해야 한다. 본 연구에서는 항공기에 적용된 포텐셜 함수기반 비행영역보호(Flight envelope protection) 알고리즘을 초공동 수중운동체에 적용하였다(Sun et al., 2017). 포텐셜 함수 기반 명령 제한 기법은 식 (3)과 같은 포텐셜 함수를 정의하여 운동체의 자세명령을 제어한다.

$$U(\theta(t)) = U_{at}(\theta(t)) + U_{rep}(\theta(t)) \quad (3)$$

여기서, U_{at} 는 입력성분으로 한계변수가 기존의 제어명령을 추종하는 명령을 생성한다. U_{rep} 는 척력성분으로 운동체 자세가 한계변수를 넘지 않도록 하는 명령을 생성한다. 운동체가 종방향 운동만 한다고 가정하면 운동체의 페루프 시스템은 식 (4)-(6)

과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta}(t) = q(t), \theta(0) = \theta_0 \quad (4)$$

$$\dot{q}(t) = f_q(x) + g_q(x)u(t), q(0) = q_0 \quad (5)$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (6)$$

식 (5)에 의해 결정된 PI제어기의 종동요각속도 명령이 운동체 종동요각 정상상태 오차를 0으로 만드는 제어기라고 가정한다. 제어기는 PI제어기가 아닌 다른 제어기를 사용하여도 무방하다. 종동요 각속도 명령(q_{cmd})은 기존 Tracking controller 명령(q_r)과 플레잉 보호 시스템 명령(q_{FEP})으로 나눌 수 있다.

$$q_{cmd}(t) = q_r(t) + q_{FEP}(t) \quad (7)$$

플레잉 보호 시스템은 운동체의 종동요각이 한계보호 유발점(θ_t)을 넘는 순간, $\theta(t) \geq \theta_t$,에만 작동한다. 이를 이용하여 식 (3)의 포텐셜 함수를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$U_{at}(\theta(t)) = \zeta(\theta_{lim} - \theta(t)) \quad (8)$$

$$U_{rep}(\theta(t)) = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ \frac{1}{2}(\theta(t) - \theta_t)^2 & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases}$$

포텐셜 함수를 통해 결정된 종동요각속도 명령은 정상상태에서 포텐셜 함수의 값을 최소화시키는 값으로 수렴하게 된다. 이 수렴값을 계산하기 위해 Gradient descent method를 적용하면 식 (9)-(10)과 같다.

$$\nabla U(\theta(t)) = \nabla U_{at}(\theta(t)) + \nabla U_{rep}(\theta(t)) \quad (9)$$

$$= \begin{cases} -\zeta & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ -\zeta + (\theta(t) - \theta_t) & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases}$$

$$\dot{\theta}(t) = \beta(t) \nabla U(\theta(t)) \quad (10)$$

Gradient descent method에 의해 발생된 식 (10)의 명령은 종동요각속도와 같은 차원이다. 따라서 $q_{cmd} = \beta(t) \nabla U(\theta(t))$ 라 하면 식 (7)은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{cmd}(t) = q_r(t) + q_{FEP}(t) \quad (11)$$

$$= \begin{cases} -\beta(t)\zeta & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ -\beta(t)\zeta + \beta(t)(\theta(t) - \theta_t) & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases}$$

여기서 종동요각이 유발점보다 작은 경우의 종동요각속도 명령은 Tracking controller 명령과 같다($-\beta(t)\zeta = q_r(t)$). 정상상태에서는 포텐셜함수는 최소값으로 수렴하고 운동체의 종동요각속도 및 종동요각속도 명령은 0이 되고,

$$q_r(t) + \beta(t)(\theta(t) - \theta_t) = 0 \quad (12)$$

이 때 운동체가 정상상태에서 수렴하는 종동요각을 목표 종동요각 (θ_d)로 정의하면 식 (13)과 같은 결과를 얻는다.

$$\beta(t) = -\frac{q_r(t)}{\theta_d - \theta_t} \quad (13)$$

이를 식 (11)에 대입하면 운동체의 종동요각 명령을 결정할 수 있다. 최종 포텐셜 함수는 식 (14)와 같이 표현되며 이를 Fig. 3에 나타내었다.

$$U(\theta(t)) = \begin{cases} (\theta_d - \theta_t)(\theta_{lim} - \theta(t)) & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ (\theta_d - \theta_t)(\theta_{lim} - \theta(t)) + \frac{1}{2}(\theta(t) - \theta_t)^2 & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases} \quad (14)$$

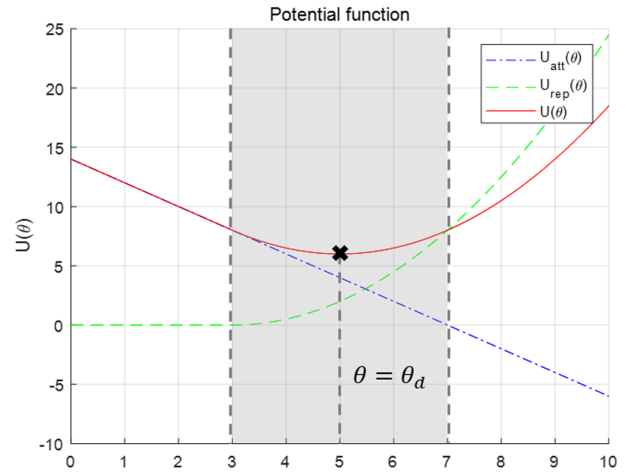


Fig. 3 Potential function for planing avoidance control

3. 수치 시뮬레이션

제안된 초공동 수중운동체의 플레잉 회피 제어 알고리즘을 검증하기 위해서 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 Tracking controller의 종동요각속도 명령(q_r)을 5초를 기준으로 $q_r = \pm 0.1 \text{ rad/s}$ 로 주었을 때 각각 종동요각(θ)과 종동요각속도 명령(q_{cmd})을 보여준다.

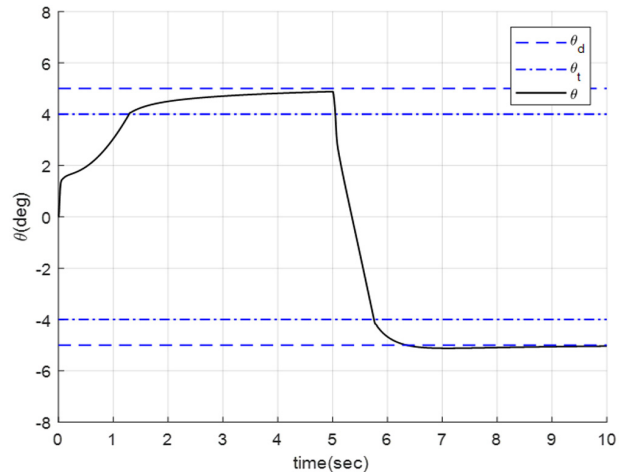


Fig. 4 Pitch angle response with planing avoidance control

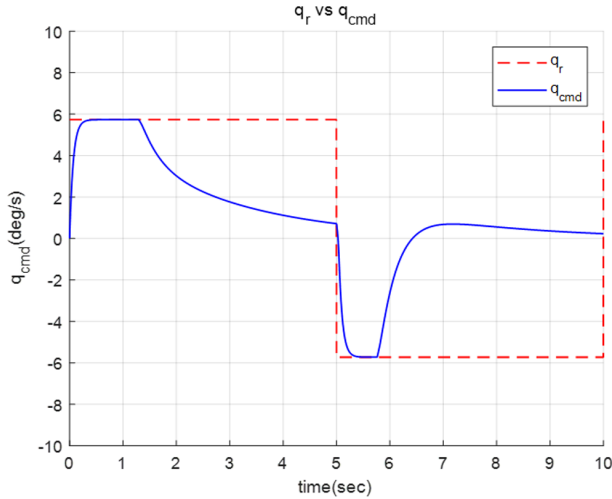


Fig. 5 Comparison of q_r and q_{cmd}

유발점과 목표 종동요각은 각각 4° 와 5° 이다. 종동요각이 유발점에 도달하기 전에는 종동요각 명령을 추종하여 증가하지만 유발점을 지나는 순간부터 포텐셜함수의 척력성분이 작용하여

종동요각 명령(q_{cmd})이 줄어들면서 종동요각을 목표종동요각(θ_d)으로 수렴시키는 것을 확인할 수 있다.

초공동 수중운동체가 수중주행할 때에는 공동 벽면과 운동체 후미와의 거리에 따라 수시로 변하기 때문에 종동요각 한계변수 역시 상수가 아닌 변하는 값을 가지게 된다. 따라서 유발점과 목표 종동요각도 종동요각 한계변수에 따라서 실시간으로 변하는 값을 가지게 된다. Figs. 6-8은 심도 변경 주행을 하는 초공동 수중운동체의 플레잉 회피 시뮬레이션 결과를 보여준다.

Fig. 6은 운동체 종동요각 제한과 목표 종동요각, 유발점 및 운동체 종동요각을 보여준다. 이 때 목표 종동요각과 유발점은 한계종동요각과 각각 0.5° , 2° 차이가 나게 설정하였다. 심도 명령은 20m에서 시작해 5초, 10초, 15에서 각각 5m씩 변화를 주었다. 심도를 변경하기 위해서는 운동체의 종동요각을 변화시켜야 한다. 이 때 운동체의 종동요각이 플레잉 예측에서 계산된 종동요각 한계변수값(θ_{lim})을 넘지 않도록 플레잉 보호 시스템이 작동된다. Fig. 7은 위에서부터 차례대로 x축방향 이동거리, 심도, 종동요각을 Fig. 8은 전진속도, 상하동요속도, 종동요각속도를 보여준다.

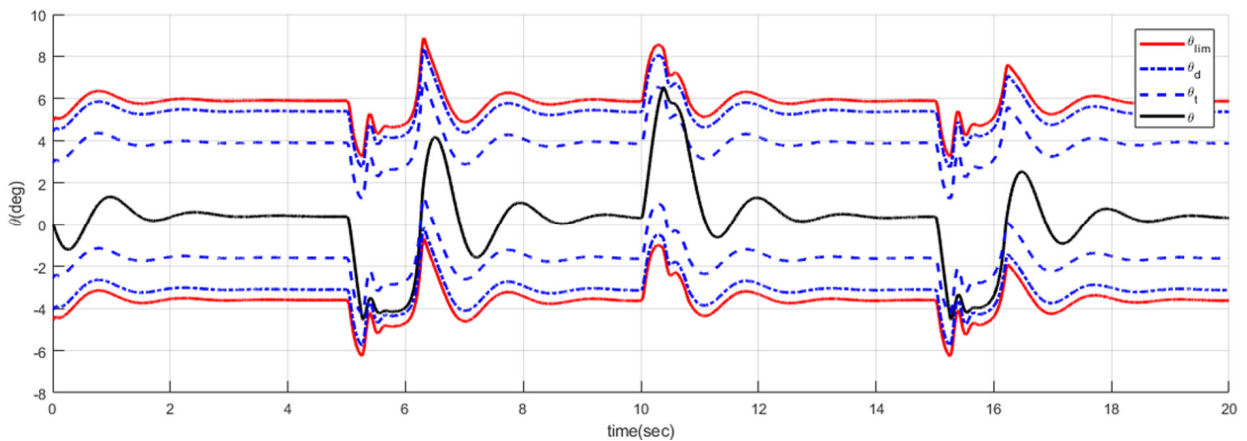


Fig. 6 Pitch limit, desired pitch angle, trigger point and vehicle pitch angle with planing avoidance control

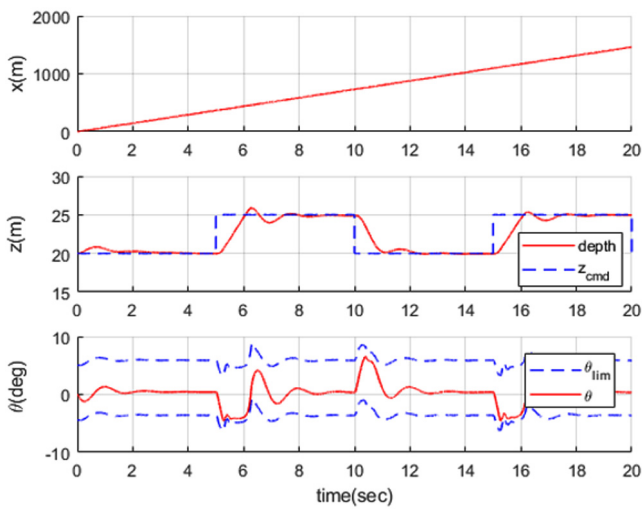


Fig. 7 Distance, depth, pitch angle response of depth tracking supercavitating underwater vehicle

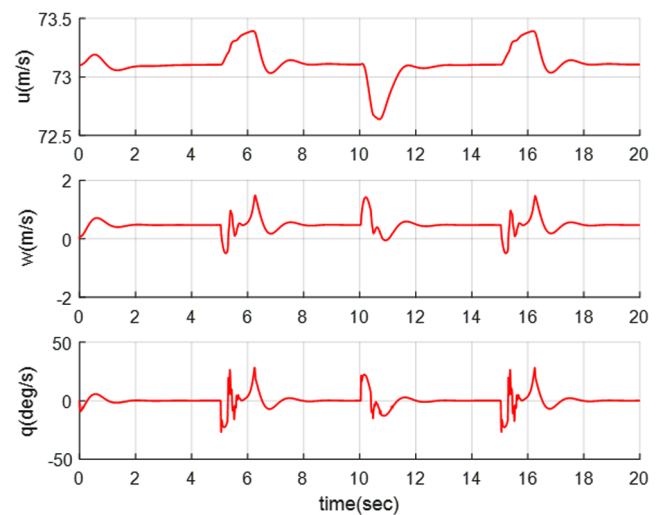


Fig. 8 Forward/heave velocity, pitch rate response of depth tracking supercavitating underwater vehicle

4. 결 론

본 논문에서는 초공동 수중운동체의 플레이닝 회피 제어에 관한 연구를 수행하기 위하여 포텐셜함수 기반 플레이닝 회피 알고리즘을 제안하였다. 플레이닝 회피 알고리즘은 운동체의 자세를 제어하기 위한 유도법칙으로 초공동 수중운동체가 플레이닝을 발생시키지 않고 주행할 수 있도록 유도명령을 생성한다. 본 연구에서 사용된 포텐셜함수 기반 플레이닝 회피기법은 운동체의 동역학에 대한 정확한 정보 없이도 유도법칙을 생성할 수 있다. 또한, 유도법칙이 제어기와 분리되어 독립적으로 작동하기 때문에 기존에 설계된 제어기의 변경 없이 제안된 기법을 추가함으로써 플레이닝 회피 성능을 확보할 수 있다.

제안된 기법을 초공동 수중운동체 동역학 모델링과 결합하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 플레이닝 회피 및 심도명령 추종성능을 동시에 만족할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원 민군기술협력센터(위탁과제명 : 발음각 변화 및 분사에 따른 공동 유지 및 제어 연구, 과제번호 14-BR-EN-32)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, B.K., Lee, T.K., Kim, H.T., Lee, C.S., 2012. Experimental Investigation of Supercavitating Flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(2), 123-131.
- Kim, H.T., Lee, H.B., 2014. Numerical Analysis of Gravity and Free Surface Effects on a Two-Dimensional supercavitating Flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), 435-449.
- Kim, S., Kim, N., 2015a. Integrated Dynamics Modeling for Supercavitating Vehicle Systems. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(2), 346-363.
- Kim, S., Kim, N., 2015b. Neural Network-based Adaptive Control for a Supercavitating Vehicle in Transition Phase. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), 454-466.
- Sanabria, D.E., Balas, G.J., Arndt, R.E., 2014. Planing Avoidance Control for Supercavitating Vehicles. In *2014 American Control Conference*, IEEE, 4979-4984.
- Sun, D., Li, X., Jafarnejadsani, H., Hovakimyan, N., 2017. A Flight Envelope Protection Method Based on Potential Functions. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Grapevine, TX, USA, 1024.
- Vanek, B., 2008. Control Methods for High-Speed Supercavitating Vehicles. Ph.D. Dissertation, University of Minnesota.

Potential Explosion Risk Comparison between SMR and DMR Liquefaction Processes at Conceptual Design Stage of FLNG

Wonwo You^{*}, Minho Chae^{**}, Jaek Park^{***} and Youngsub Lim^{****}

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

^{**}Hyundai Motor Company Co., Ltd., Hwaseong, South Korea

^{***}Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Seongnam, South Korea

^{****}Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, South Korea

FLNG개념설계 단계에서 SMR 및 DMR 액화공정의 잠재적 폭발위험도 비교

유원우^{*} · 채민호^{**} · 박재욱^{***} · 임영섭^{****}

^{*}서울대학교 조선해양공학과

^{**}현대자동차

^{***}삼성중공업

^{****}서울대학교 해양시스템공학연구소

Corrigendum to: Journal of Ocean Engineering and Technology 32(2), 95-105 April, 2018

<https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.4.32.2.095>

논문 정정: 한국해양공학회지 제32권 제 2호, pp 95-105, 2018년 4월

<https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.4.32.2.095>

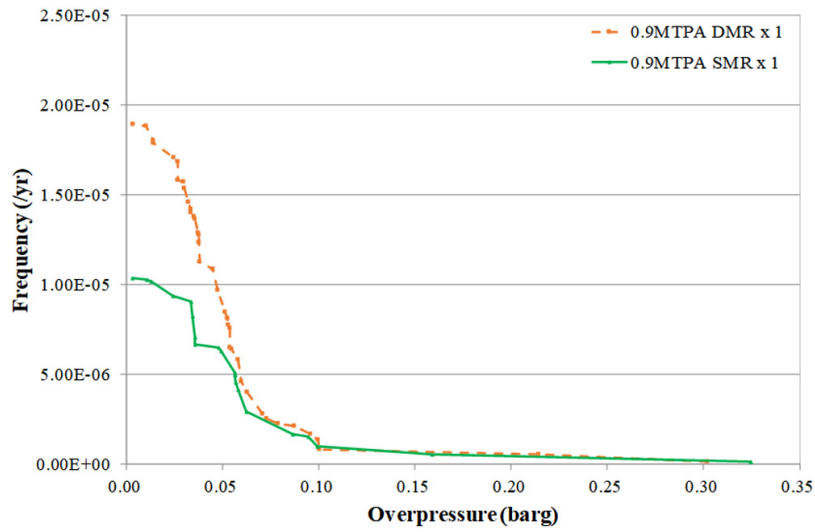
위의 논문 99쪽의 '4. 결과 및 검토'에서 언급된 그림(Fig. 5)이 누락되었으며, 다음의 Fig. 5를 추가하여 정정합니다.

Received 14 May 2018, revised 7 June 2018, accepted 7 June 2018

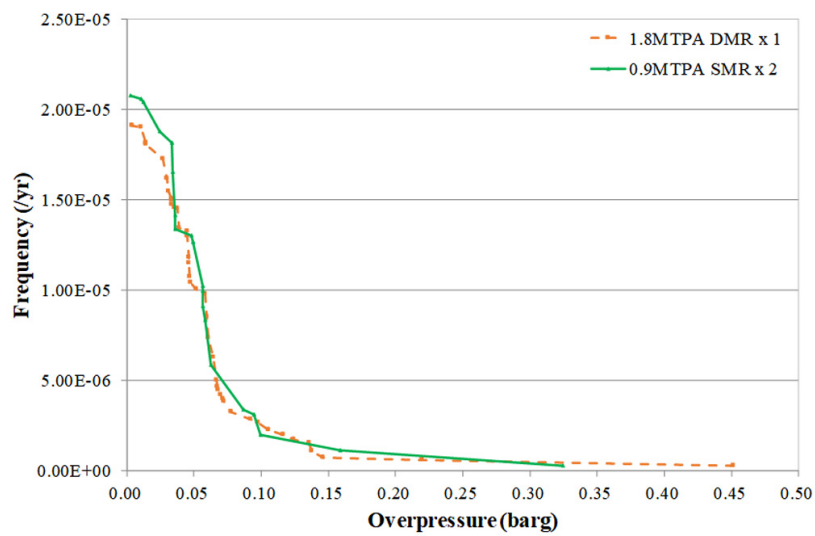
Corresponding author Youngsub Lim: +82-10-8850-4586, s98thesb@snu.ac.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-0756>

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

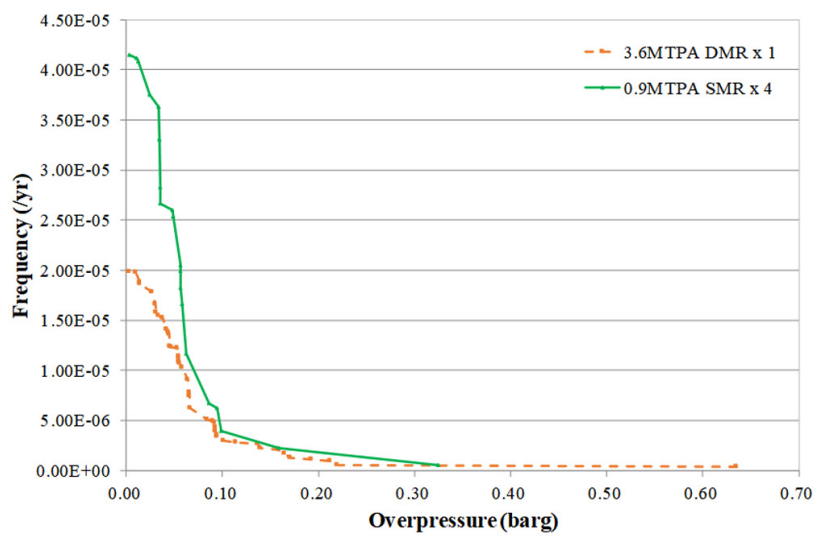
This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Exceedance diagram for (a) case 1 (0.9 MTPA), (b) case 2 (1.8 MTPA), and (c) case 3 (3.6 MTPA)

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 실험역 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)

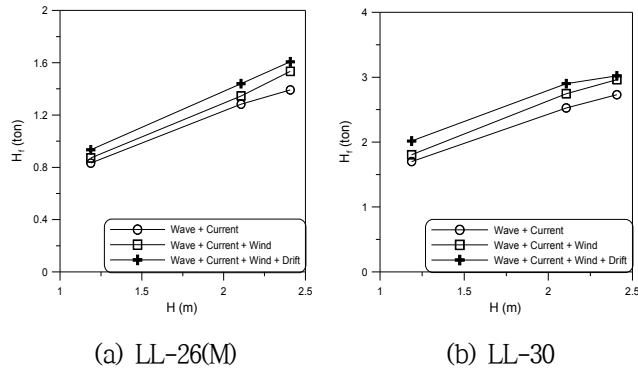


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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.

(사)한국해양공학회 특별회원

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

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



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

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

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

한국해양공학회지

제32권 제3호(통권 제142호)

인 쇄 : 2018년 6월 26일

발 행 : 2018년 6월 30일

발행인 : 윤종성

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