

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

한국해양공학회지

제33권 제4호 (통권 제149호)

2019년 8월

Journal of Ocean Engineering
and Technology



Vol. 33, No. 4 (Serial Number 149)
August 2019

사단법인 한국해양공학회
The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장

정준모 인하대학교

편집이사

김윤해 한국해양대학교

신성원 한양대학교

안석환 중원대학교

최형식 한국해양대학교

편집위원

강희진 한국해양과학기술원

고대은 동의대학교

구원철 인하대학교

권순철 부산대학교

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

김현식 동명대학교

남보우 한국해양과학기술원

류용욱 부경대학교

박종천 부산대학교

백광준 인하대학교

송창용 목포대학교

윤현규 창원대학교

이강수 한국해양과학기술원

이우동 경상대학교

이중현 제주대학교

이탁기 경상대학교

임영섭 서울대학교

정동호 한국해양과학기술원

정세민 조선대학교

하태민 강원대학교

허정원 전남대학교

홍성남 경상대학교

국제논문 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

Do Kyun Kim, PETRONAS University of Technology(UTP)

Taeseong Kim, Loughborough University

연구윤리위원회

위원장

서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원

구원철 인하대학교

윤현규 창원대학교

Editorial Boards

Editor-in-Chief

Joonmo Choung, Inha University, Korea

Manuscript Editors

Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean 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

Weoncheol Koo, Inha 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

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

Kangsu Lee, KRISO, 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

Se-Min Jeong, Chosun University, Korea

Taemin Ha, Kangwon National University, Korea

Jungwon Huh, Chonnam National University, Korea

Sungnam Hong, Gyeongsang 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

Do Kyun Kim, PETRONAS University of Technology(UTP), Malaysia

Taeseong Kim, Loughborough University, UK

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, DOAJ(Directory of Open Access Journals), 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.

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.

© 2019 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 August 31, 2019 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

목 차

제33권 제4호 (통권 제149호)

2019년 8월

<연구논문>

OpenFOAM을 이용한 주형체 활주선의 저항 및 항주자세 추정 쉬상위 · 장양 · 염덕준	313
중앙 단면 형상에 따른 횡동요 감쇠 추정 실험 연구 박병원 · 정동우 · 정재상 · 박인보 · 조석규 · 성홍근	322
해양플랜트 복사열 차폐막의 차폐성능에 관한 연구 김봉주	330
A60급 구획 적용 격벽 관통용 관의 열전달 특성 II: 관 재질 및 단열재 종류에 따른 방화시험 박우창 · 송창용	340
조류 중 원형실린더 형상 구조물의 거동감소를 위한 실험적 연구 임재환 · 조효제 · 황재혁 · 김재희 · 이태경 · 최윤우 · 이민준 · 김영규	350
잔향수조 내 수중음원의 음원레벨 추정기법에 관한 실험연구 김국현	358
3차원 수치파동수조에서 수중발파에 의한 수면파의 전파해석 이우동 · 정연명 · 최규남 · 허동수	364

CONTENTS

Volume 33, Number 4

August, 2019

<Original Research Articles>

- Prediction of Resistance and Planing Attitude for Prismatic Planing Hull using OpenFOAM
XiangYu Shi, Yang Zhang and Deuk-joon Yum 313
- Experimental Study on Estimation of Roll Damping for Various Midship Sections
Byeongwon Park, Dong Woo Jung, Jaesag-Jung, Inbo Park, Seok-Kyu Cho and Hong Gun Sung 322
- Study on Performance of Radiant Heat Shields for Offshore Installations
Bong Ju Kim 330
- Heat Transfer Characteristics of Bulkhead Penetration Piece for A60 Class Compartment II:
Fire Resistance Test for Piece Material and Insulation Types
Woo-Chang Park and Chang Yong Song 340
- Experimental Study on Reducing Motion of Circular Cylinder in Currents
Jae Hwan Lim, Hyo Jae Jo, Jae Hyuk Hwang, Jae Heui Kim, Tae Kyung Lee,
Yoon Woo Choi, Min Jun Lee and Young Kyu Kim 350
- Experimental Study on Source Level Estimation Techniques of Underwater Sound Source in
Reverberant Water Tank
Kookhyun Kim 358
- Water Wave Propagation Caused by Underwater Blasting in a 3D Numerical Wave Tank
Woo-Dong Lee, Yeon-Myeong Jeong, Kyu-Nam Choi and Dong-Soo Hur 364

Prediction of Resistance and Planing Attitude for Prismatic Planing Hull using OpenFOAM

XiangYu Shi¹*, Yang Zhang^{1,2}**, and Deuk-joon Yum¹*

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Korea

²Ulsan Ship and Ocean College, LuDong University, Yantai, China

OpenFOAM을 이용한 주형체 활주선의 저항 및 항주자세 추정

쉬상위¹* · 장양^{1,2}** · 엄덕준¹*

*국립군산대학교 조선해양공학과

**로동대학교 울산조선해양대학

KEY WORDS: Planing hull 활주선, Fridsma hull 프리즈마 선형, RANS equation RANS 방정식, OpenFOAM 오픈폼, Overset mesh method 중첩격자 방법, Uncertainty analysis 불확실성 해석

ABSTRACT: The prediction of the hydrodynamic performance of a planing hull vessel is an important and challenging topic for computational fluid dynamic (CFD) applications to naval hydrodynamics. In this paper, the resistance and planing attitude analysis for a Fridsma hull, which is a prismatic planing hull, in still water are numerically studied using OpenFOAM. OpenFOAM is an open source code package based on C++ libraries and the finite volume method (FVM) for the discretization of the RANS equation. The volume of fluid method (VOF) is used to capture the water-air interface and the SST $k-\omega$ model is used for the turbulence simulation. The overset mesh method is used to capture the large motion of the hull at higher speeds. Before the extensive analysis, uncertainty analyses using various time steps and grid sizes were performed for one ship speed case of $Fn = 1.19$.

The results of the present study are compared with those of a model test, other CFD research, and Savitsky's empirical formula. The results of the present study, following the trend of other CFD results, slightly over predict the resistance and under predict the sinkage and, more significantly, the trim.

1. 서 론

고성능 컴퓨터의 지속적인 성능 향상과 더불어 선박의 유체 역학 성능을 추정하는데 있어서 CFD(Computational fluid dynamics)에 기반한 다양한 프로그램을 이용하는 것이 필수적인 사항이 되었다. 근래에는 소스 코드가 공개된 OpenFOAM을 이용하는 연구가 새로운 선택으로 제공되고 있다. OpenFOAM 프로그램은 ANSYS: Fluent, Star-CCM+ 등 대규모 상업용 프로그램과 마찬가지로 유한체적법(Finite volume method, FVM)에 기반한 편미분방정식 수치해석 프로그램이지만 사용자가 특정한 해석기를 추가로 정의할 수 있도록 하여 선박의 유체역학 성능 추정의 적용이 확대되고 있는 추세이다.

선박의 유체역학적 성능 추정에 전산유체역학을 적용한 근래의 연구로, Mousavirrad et al.(2015)은 CFDSHIP-IOWA 프로그램

을 통하여 Fridsma 선형에 대한 저항성능과 운동성능을 추정하였다. Islam and Soares(2017)는 Ropax 선형에 대한 파랑 중 저항 성능을 추정하였고 Go et al.(2016)은 수중 예인체에 대하여 6 자유도 운동을 추정하였다. 그리고 Bustos and Alvarado(2017)은 쌍동선에 대하여 저항성능 추정 연구를 하였지만 항주자세에 대한 연구는 수행하지 않았다. 소형 고속선의 운동성능과 관련하여 Hassan et al.(2015)은 단이 있는 활주선(Stepped planing hull)에 대하여 이론 및 CFD 해석을 통하여 트림 및 저항성능을 추정하였다. Cucinotta and Sfravara(2018)는 CFD 해석과 모형시험을 통하여 고속선박에 대한 저항성능을 연구하였으며 격자계의 동적 변형에 대하여는 중첩격자방법(Overset mesh method)을 사용하였다.

최근에는 선박의 유체역학적 성능 해석에 고가의 대규모 상업용 CFD 프로그램을 사용하는 것 보다는 소스가 공개되어 있

Received 26 July 2019, revised 4 August 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Deuk-joon Yum: +82-63-469-1852, djyum@kunsan.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2250-6937

© 2019, 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.

어 경제적이며 사용자가 목적에 맞게 특정한 해석기들을 추가로 정의할 수 있는 OpenFOAM을 이용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 오픈소스 CFD 프로그램인 OpenFOAM(OpenCFD Ltd., 2017)을 이용하여 주형체 활주선인 Fridsma 선형(Fridsma, 1969)에 대하여 정수 중에 저항성능과 트림 및 부상량 등 항주자세를 추정하였다. 특히, 활주선이 고속으로 활주할 때 발생하는 항주자세의 큰 변화와 연관된 유체역학적 현상의 정도 높은 추정을 위하여 동적중첩격자 해석기인 ‘overInterDyMFoam’을 사용하였다. 또한, 본격적인 CFD 해석에 앞서 활주상태의 선속인 $F_n=1.19$ 에 대하여 격자 크기와 계산 시간 간격 변화에 따른 불확실성 해석을 수행하였다.

마지막으로 OpenFOAM을 이용한 본 연구결과를 Fridsma의 실험 결과, 타 CFD 해석 결과 및 Savitsky 경험식(Savitsky, 1964)과의 비교를 통하여 분석하고 적용 가능성을 검증하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 OpenFOAM의 구성

OpenFOAM은 유한체적법을 기반으로 하는 오픈소스 편미분 방정식 수치해석 프로그램이다. OpenFOAM의 구성은 화학, 난류유통, 열에너지 및 구조역학 등 광범위한 공학분야에 적용되는 다양한 해석기(Solver)들과 전후처리 툴(Pre-processing & Post-processing tool)을 포함하고 있으며 해석목적에 따라서 다수의 해석기들을 결합함에 의하여 원하는 수치해석 프로그램을 구성할 수 있다.

통상적으로 CFD 프로그램은 전처리, CFD 해석 및 후처리의 3가지 절차가 순차적으로 진행되나 OpenFOAM은 User’s interface가 없으므로 모든 단계에서 Fig. 1에 보는 바와 같이 경계조건이 정의된 ‘0’ 파일, 격자와 난류모델 등이 정의된 ‘constant’ 파일 및 시간제어, 이산화처리방법 등이 정의된 ‘system’ 파일로 구성된다. 그리고 OpenFOAM에서 제공되는 격자변환 툴을 이용하여 Fluent, Star-CCM+ 및 GAMBIT 등에서 생성된 격자계를 읽어 들일 수 있다.

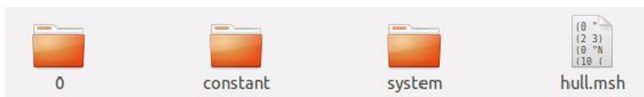


Fig. 1 Document composition of OpenFOAM

2.2 CFD 해석기

OpenFOAM을 이용한 유동해석에서의 지배방정식은 아래의 연속방정식과 RANS(Reynolds averaged navier stokes)방정식으로 구성된다.

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (UU) - \nabla \cdot (\nu \nabla U) = -\nabla \frac{p}{\rho} + S \tag{2}$$

여기서 U 는 속도이며 ρ 와 S 는 각각 밀도 및 소스항으로 정의된다.

자유수면 변형 해석에는 식 (3)의 VOF(Volume of fraction)법을 사용하였다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \tag{3}$$

여기서 α (air : $\alpha=0$, water : $\alpha=1$)는 VOF이다.

유동장의 압력과 속도 연성해석에는 PISO(Pressure-implicit with splitting of operators)방법이 사용된다. 식 (2)에 대한 이산화 과정을 통하여 다음의 식이 유도된다.

$$A_p U = H(U) - \nabla p_d + S \tag{4}$$

여기서 A_p 는 대수방정식 매트릭스의 대각(Diagonal) 요소이고 $H(U)$, p_d 및 S 는 각각 비대각(Off-diagonal) 요소, 동압력 및 소스항이다. 대수방정식 해석기를 통하여 산출한 속도 예측값 U^* 를 다시 식 (4)에 대입하고 식 (5)와 식 (6)의 과정을 거쳐 압력 포아송 방정식인 식 (7)을 얻는다.

$$U^* = \frac{H(U^*)}{A_p} - \frac{\nabla p_d}{A_p} + \frac{S}{A_p} \tag{5}$$

$$\nabla \cdot U^* = \nabla \cdot \tilde{U} - \nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p_d \right) \tag{6}$$

$$\tilde{U} = \frac{H(U^*)}{A_p} + \frac{S}{A_p}$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p_d \right) = \nabla \cdot \tilde{U} \tag{7}$$

식 (7)에서 산출된 새로운 p_d^* 를 식 (4)에 대입하여 수정된 속도 U^{**} 를 얻을 수 있다. 같은 방법으로 수정된 $H(U^{**})$, p_d^{**} 및 \tilde{U}^* 를 수렴할 때까지 반복하여 계산한다.

2.3 동적격자계(Dynamic mesh)

OpenFOAM에서 사용되는 동적격자방법은 크게 격자변형방법(Mesh deformation method)과 중첩격자방법 등 2가지 방법이 있다.

격자변형방법은 Fig. 2처럼 격자의 변형 과정 중에 전체 격자수가 유지되며, 압력-속도 결합법을 통하여 격자의 노드(Node)를 이동시키는 방법이다. 하지만 고속 활주선의 경우처럼 선속

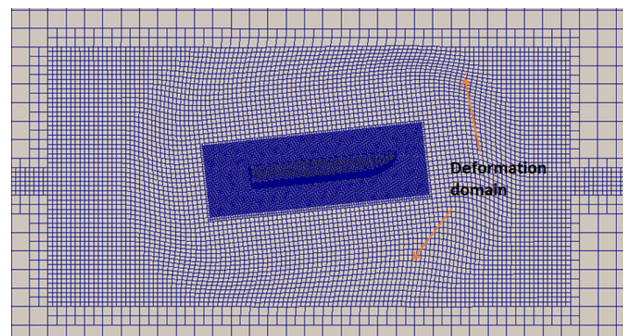


Fig. 2 Mesh deformation method

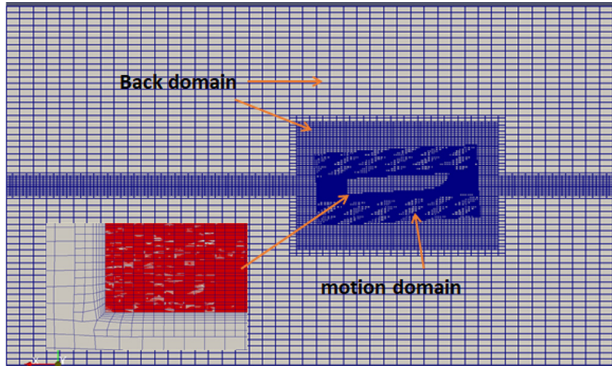


Fig. 3 Overset mesh method

에 따라서 흘수의 변화가 큰 선박은 정수 중 저항 및 항주자세 수치해석 시 노드의 이동거리가 커짐에 따라 수치해석 오차가 커지게 되며, 심지어 부피가 음수가 되는 격자가 발생하여 수치해석 결과가 발산하게 된다.

중첩격자방법은 Fig. 3처럼 배경격자 영역과 운동격자 영역이 따로 있어서 수치해석 시에 중첩되는 경계영역만 고려하면 되고 격자의 변형이 발생하지 않으므로 격자변형으로 인하여 야기되는 오차의 발생을 줄일 수 있다. 그리고 중첩격자는 배경격자 영역과 운동격자 영역에 별도의 격자계를 구성한 후에 운동영역 격자계를 배경영역 격자계에 삽입하고 DCI(Domain connectivity information)방법을 통하여 각각의 격자계에 포함된 유동장 정보가 내삽법에 의하여 전달이 되도록 한다. 유동장 정보가 전달되는 과정은 다음과 같다.

삽입되는 운동영역 격자계에서 ‘cellType’ 표식을 통하여 아래와 같이 0에서 2까지 격자의 유형을 지정한다.

- 0 - calculated cell
- 1 - interpolated cell
- 2 - hole/inactive cell

유형 ‘2’로 지정된 격자에 대하여는 Cutting hole 처리를 하여 제거하며 남은 격자, 즉 유형 ‘1’로 지정된 격자에 대하여는 내삽법을 통하여 유동장 정보를 유형 ‘0’ 격자와 상호 교환한다.

유동장 정보의 내삽을 위하여 OpenFOAM에서 사용하는 방법에는 InverseDistance, TrackingInverseDistance, CellVolumeWeight 및 LeastSquares 등 4가지 방법이 있으며 본 연구에서는 Inverse Distance 방법을 사용하였다.

2.4 난류 모델

OpenFOAM에는 다양한 난류 모델을 제공되며, 본 연구에서는 SST $k-\omega$ 모델을 사용하였다. SST $k-\omega$ 난류 모델은 Wilcox $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델을 결합한 하이브리드 모델로 수송방정식의 형태는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (Uk) &= \tilde{G} - \beta^* k\omega + \nabla \cdot [(\nu + \alpha_k \nu_t) \nabla k] \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (U\omega) &= \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(\nu + \alpha_\omega \nu_t) \nabla \omega] \\ &\quad + (1 - F_1) CD_{k\omega} \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 k 는 난류 에너지, ω 는 난류 에너지 소산 비율, \tilde{G} 는 혼합 함수, S 는 변형율의 불변도(Invariant measure of the strain rate)이다. F_1 은 다음의 식 (9)와 식 (10)으로 정의되는 혼합 함수로 벽 근처 영역에서는 $k-\omega$ 모델($F_1 = 1$)을, 자유 유동 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델($F_1 = 0$)을 활성화하여 전체유동장에서 사용할 수 있다.

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}, \frac{4\alpha_\omega k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right]^4 \right\} \tag{9}$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \tag{10}$$

여기서 ϕ_1 와 ϕ_2 는 각각 $k-\omega$ 방정식과 $k-\epsilon$ 방정식의 계수이다. 선체표면 경계층에는 벽 함수를 사용하였으며 y^+ 의 크기를 30~100으로 유지하였다.

2.5 항주 자세

항주 시에 흘수에 큰 변화가 없는 배수량형선과는 달리 고속 항주선은 선형의 특성 상 속도가 증가함에 따라 수직 방향의 양력이 발생하여 Fig. 4에 보이는 바와 같이 트림(Trim)과 부상량(Sinkage)이 발생하여 속도에 따라 항주 자세가 크게 변화한다.

OpenFOAM에서는 ‘6DOFSolver’ 해석기를 이용하여 트림 및 부상량 등 선체 항주자세를 추정하는데 기본방정식은 식 (11)과 식 (12)의 강체운동방정식(뉴턴 제2법칙)이다.

$$\sum F = ma \tag{11}$$

$$\sum M = I\alpha \tag{12}$$

여기서 a 는 선형가속도이고 α 는 각가속도이다. 매 시간 식 (13)과 식 (14)에 의하여 계산된 가속도 a 와 각가속도 α 를 이용 Newmark 방법(Newmark, 1959)을 사용하여 시간 적분하여 새로운 속도 v_{new} 와 각속도 ω_{new} 를 계산하며 속도결과를 격자노드에 적용하여 격자변형을 실현하며, 선체의 트림과 부상량을 추정한다.

$$v_{new} = \int_{t_{old}}^t a dt = v_{old} + a \Delta t \tag{13}$$

$$\omega_{new} = \int_{t_{old}}^t \alpha dt = \omega_{old} + \alpha \Delta t \tag{14}$$

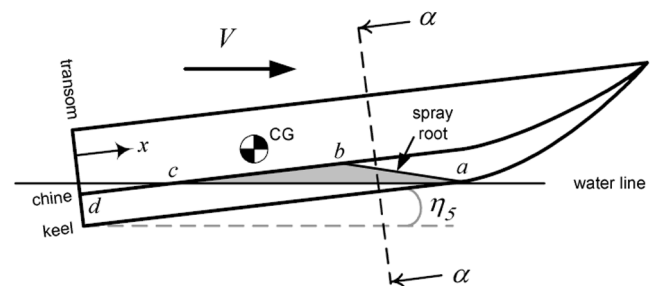


Fig. 4 Planing attitude of planing hull

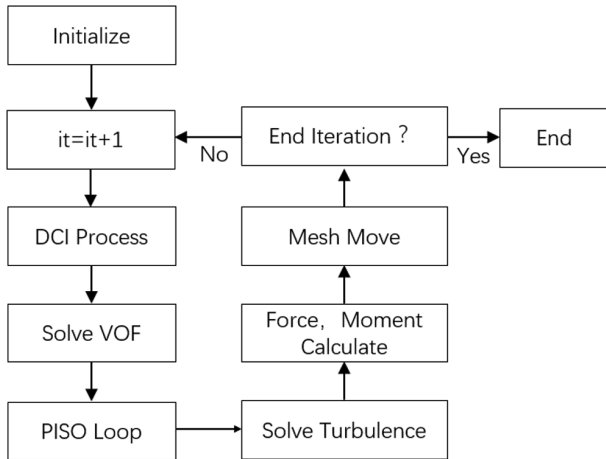


Fig. 5 6 DOF solver process for overset mesh method

OpenFOAM에서 중첩격자방법을 이용한 유동장 및 항주자세(선체운동) 해석 과정을 Fig. 5에 간단히 도시하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 Fridsma 활주선 및 전처리

본 연구에 사용된 활주선은 Fridsma(1969)에 의해 체계적인 모형시험이 수행된 주형체 활주선으로 Fig. 6에 L/B 가 4인 선형의 선도(Lines)를 보여주고 있다. 주요목은 Table 1과 같다.

전체 수치해석 영역은 길이 방향으로 8L로, 입구에서 선수까지 1L, 선미부터 출구까지 6L로 구성되어 있다. 유동장의 폭은 2L로 지정하였다. 높이 방향으로는 자유수면 하부와 상부에 각각 L을 배치하였다. 운동격자 영역의 크기는 x 축 방향으로 1.5L, y 축 방향으로 0.4L 및 z 축 방향으로 0.7L로 하였다(Fig. 7).

격자계는 SnappyHexMesh 툴을 사용하여 중첩격자 영역의 경계면 근처에는 배경격자 영역의 격자 크기와 운동격자 영역의 격자 크기를 동일하게 생성하여 유동장 정보 교환 시 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다. 그리고 유속과 압력의 변화가 클

Table 1 Principal particulars of Fridsma model ($L/B = 4$)

Items	Value
L [m]	1.143
B [m]	0.286
T [m]	0.069
LCG from AP [m]	0.457
VCG from keel [m]	0.084
Deadrise angle	20°
Δ [kg]	14.219
$I_{zz} = I_{yy}$ [kgm ²]	0.5805

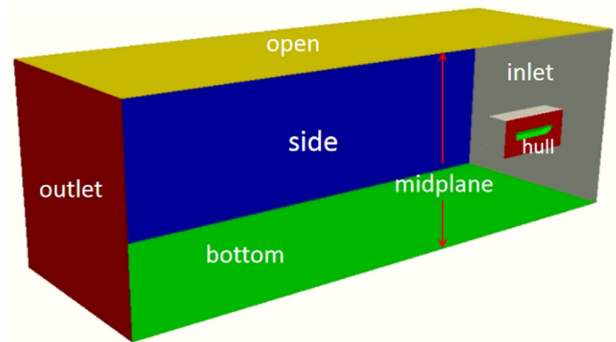


Fig. 7 Flow domain for Fridsma hull

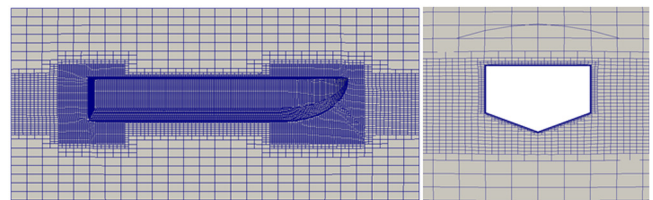


Fig. 8 Meshing for Fridsma hull using SnappyHexMesh

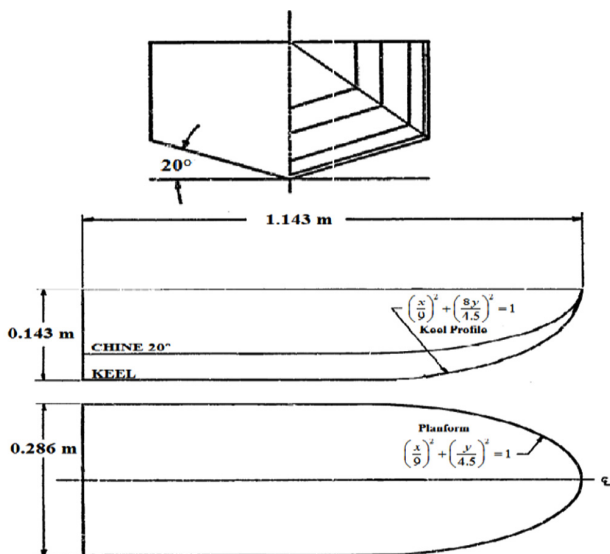


Fig. 6 Lines of Fridsma model ($L/B = 4$)

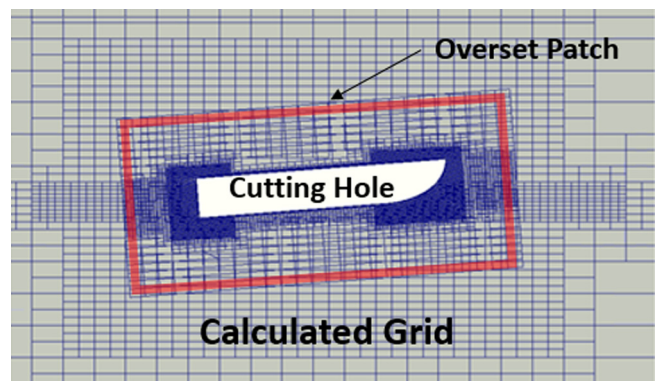


Fig. 9 Multi-mesh pre-processing using overset

것으로 예상되는 선수와 선미 부분에는 Fig. 8과 같이 국부 세분화(Local refinement) 기능을 이용하여 정밀한 격자를 생성하였다. Fig. 9는 중첩격자의 구성을 보여주고 있다.

수치해석에 사용된 각 변수들에 대한 경계조건은 Table 2와 같다. 여기서 'phaseMeanVelocity'는 유동장 출구에서 유량보존으로 평균속도를 제어하는 조건이고 'variableHeightFlowRate'는

Table 2 Boundary conditions

Boundary	Type
< U file >	
Inlet	fixedValue
Outlet	phaseMeanVelocity
Midplane	
Side	symmetry
Bottom	
Open	pressureInletOutletVelocity
Hull	wall
< p_rgh file >	
Inlet	fixedFluxPressure
Outlet	zeroGradient
Open	totalPressure
Hull	fixedFluxPressure
OversetPatch	overset
< alpha.water file >	
Inlet	fixedValue
Outlet	variableHeightFlowRate
Open	inletOutlet
Hull	zeroGradient
< pointDisplacement file >	
Inlet	
Outlet	fixedValue
Open	
Hull	calculated
< zoneID file >	
Inlet	
Outlet	zeroGradient
Open	
Hull	
< k file >	
Hull	kqRWallFunction
< omega file >	
Hull	omegaWallFunction

상한(Upper bound)과 하한 (Lower bound)을 통하여 VOF값을 보정하는 조건이다. 일반적으로 상한은 ‘1’로 하한은 ‘0’으로 지정된다(OpenCFD Ltd., 2017).

수치해석에 사용된 난류모델은 SST $k-\omega$ 이며 시간이산에 대하여는 1차 정확도의 Implicit Euler법, 공간이산의 확산항에 대하여는 중앙 차분 기법으로 처리하며, 대류항에 대하여는 압력 이산, 속도이산, 및 난류이산 등은 2차 정확도인 Linear Upwind 법을 사용하고 VOF이산은 안정된 자유수면 유동 결과를 얻을 수 있는 Van Leer법을 사용하였다(Chevrier and Galley 1993).

3.2 불확실성 해석(Uncertainty analysis)

CFD를 이용한 RANS 방정식에 대한 수치해석 과정에는 입력 변수 오차, 반복 오차, 공간이산 오차, 시간이산 오차 등 다양한

오차가 발생하여 해의 불확실성이 존재한다. 본 연구에서는 Wilson et al.,(2001)과 Stern et al.,(2001)에 제시된 방법을 이용하여 시간이산 오차와 공간이산 오차의 영향에 대한 불확실성 해석을 수행하였다.

첫째로, 시간이산 오차 즉, 계산시간 간격에 의한 불확실성 해석을 위하여 식 (15)와 같이 정의된 CFL 수(Courant number)를 ‘Small(1)’, ‘Medium(2)’ 및 ‘Large(4)’ 등 크기 변화의 비율을 2로 하여 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. 각각의 해석에는 총 격자수 93만개의 동일한 격자계가 사용되었다. 선속은 활주 속도인 $Fn = 1.19$ 를 사용하였다.

$$CFL = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{15}$$

여기서 u 은 최대 유속이며, Δx 와 Δt 는 각각 최소격자 간격과 계산시간 간격이다.

Table 3에는 CFL 수 변화에 따른 계산 시간 간격과 수치해석 결과인 총 저항값을 보여주고 있다. CFL 수가 작아질수록 계산 시간 간격이 작아지고 총 저항값은 Frisma 실험 결과에 접근하는 결과를 얻을 수 있다. 결론적으로 수치해석의 시간이산 오차를 최소화하기 위해서는 CFL 수가 ‘1’보다 작게 되도록 계산 시간 간격을 설정할 필요가 있다.

둘째로, 공간이산 오차 즉, 격자 크기에 의한 불확실성 해석의 수행을 위하여 Table 4처럼 배경격자 영역과 운동격자 영역을 포함한 전체 영역에 ‘Coarse Mesh’(총 격자수 45만개), ‘Medium Mesh’(총 격자수 93만개) 및 ‘Fine Mesh’(총 격자수 256만개) 등 격자 분할비(Refinement ratio)를 $\sqrt{2}$ 로 하여 3가지 정렬격자계를 생성하고 수치해석을 수행하여 총 저항, 트림 및 부상량을 추정하였다.

수치해석은 활주 속도인 $Fn = 1.19$ 에서 수행하였고 시간간격 제어기능(Time step control)을 이용하여 최대 CFL 수를 1이하로 유지하였다.

‘Coarse Mesh’, ‘Medium Mesh’ 및 ‘Fine Mesh’ 를 사용하여 구한 수치해석 결과를 각각 S_{coarse} , S_{medium} 및 S_{fine} 으로 표기하고 결과를 Table 5에 정리하였다.

Table 3 Comparison of total resistance varying CFL number

	CFL	Δt	Resistance [N]	Diff.
Large	4	0.001	24.4	14.6 %
Medium	2	0.0005	23.5	10.4 %
Small	1	0.00025	22.9	7.6 %
Exp.			21.28	

Table 4 Mesh configuration for mesh size test

	Background cells			Motion domain cells			Total mesh
	x	y	z	x	y	z	
Coarse	42	14	14	26	7	11	0.45M
Medium	60	20	20	36	10	16	0.93M
Fine	85	28	28	50	14	22	2.56M

Table 5 Comparison of the results varying mesh size

	Coarse	Medium	Fine	Exp.
Resistance [N]	21.76	22.9	23.49	21.28
Difference		5.24 %	2.58 %	
ε_{32}	-1.14			
ε_{21}		-0.59		
R		0.517		
Trim [deg]	5.305	5.65	5.71	6.9
Difference		6.5 %	1.06 %	
ε_{32}	-0.345			
ε_{21}		-0.06		
R		0.174		
Sinkage [m]	0.03	0.0263	0.025	0.0342
Difference		12.33 %	4.94 %	
ε_{32}	0.0037			
ε_{21}		0.0013		
R		0.351		

각각의 격자계에 대한 결과로부터 식 (16)-(18)을 이용하여 ε_{21} 와 ε_{32} 및 수렴비(Convergence ratio), R 을 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{21} = S_{medium} - S_{fine} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{32} = S_{coarse} - S_{medium} \quad (17)$$

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (18)$$

수렴비의 크기에 따라 아래와 같은 수렴 특성을 가진다.

- (1) 단순 수렴(Monotonic convergence) : $0 < R < 1$
- (2) 진동 수렴(Oscillatory convergence) : $R < 0$
- (3) 발산(Divergence) : $R > 1$

Table 5에 의하면 격자의 크기가 작아질수록 총 저항, 트림 및 부상량의 수렴비 R 의 값이 각각 0.517, 0.174 및 0.351로 최종 수렴치를 향해 단순 수렴(Monotonic convergence)하는 것을 알 수 있으며 불확실성 해석에 Richardson 외삽법을 사용할 수 있다.

‘Coarse Mesh’와 ‘Medium Mesh’의 총 저항값은 차이가 5.24%, 트림의 차이는 6.5%, 부상량의 차이는 12.33%로 비교적 큰 차이가 추정되었다. 그러나 ‘Medium Mesh’와 ‘Fine Mesh’의 경우에 부상량 차이가 4.94%로 다소 큰 편이나 총 저항과 트림의 차이는 각각 2.58%와 1.06%로 큰 차이 없이 수렴치에 접근하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 분석 결과와 수치 해석 수행의 용이성을 고려하여 다음 절에서 수행할 Fridsma 활주선에 대한 저항 및 활주 성능 해석에는 ‘Medium Mesh’를 기본 격자계로 선정하였다.

수치해석 결과와 Fridsma 실험 결과의 비교는 격자 크기가 작아질수록 트림은 실험치에 접근하는 경향을 보이고 있으나 총 저항값과 부상량은 공히 실험치와의 차이가 커짐을 알 수 있다. 즉, 저항과 부상량의 상호 상관관계가 트림보다는 매우 큼을 알 수 있다. 수치해석 결과가 실험 결과에 수렴하지 않는 경향은 활주선 저항 및 활주 성능 관련 타 CFD해석 연구 결과(Fu et al., 2012; Marcello, 2015; Mousavirrad et al., 2015) 등에도 공통적으로 나타나는 결과로 이러한 현상을 규명하기 위해서는 수치해석 과정에 존재하는 다른 오차 요소들에 대한 추가적인 분석은 물론 활주선 모형시험 과정에서 발생할 수 있는 실험 오차 요소들 특히, 무게분포, 예인 방법 및 예인점에 대한 검증이 필요할 것으로 본다.

Wilson et al.(2001)과 Stern et al.(2001)의 절차에 따라 Richardson 외삽법을 이용하여 격자크기의 변화에 따른 불확실성 해석을 수행하였다. 식 (19)-(23)에 걸쳐서 수렴차수, P_G , 보정계수, C_G , 불확실성, U_G , 수정된 오차 δ_G^* , 및 수정된 해, S_c 를 각각 구할 수 있다. 여기서 한계 수렴차수, $P_{G_{\infty}}$ 의 값은 2를 사용하였으며 격자 분할비, r 은 $\sqrt{2}$ 를 사용하였다.

$$P_G = \frac{\ln(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21})}{\ln(r)} \quad (19)$$

$$C_G = \frac{r^{P_G} - 1}{r^{P_{G_{\infty}}} - 1} \quad (20)$$

$$U_G = |C_G(\frac{\varepsilon_{21}}{r^{P_G} - 1})| + |(1 - C_G)(\frac{\varepsilon_{21}}{r^{P_{G_{\infty}}} - 1})| \quad (21)$$

$$\delta_G^* = C_G(\frac{\varepsilon_{21}}{r^{P_G} - 1}) \quad (22)$$

$$S_c = S_{fine} - \delta_G^* \quad (23)$$

공간이산 오차 즉 격자크기의 변화에 따른 불확실성 해석 결과를 Table 6에 정리하였다.

‘Fine mesh’에 대한 총 저항의 불확실성은 2.7%, 트림과 부상량의 불확실성은 각각 1.9%와 8%로 추정되었다. 그리고 격자의 크기가 0으로 수렴될 경우에 총 저항, 트림 및 부상량은 각각 24.08N, 5.77° 및 0.0249m로 수렴할 것으로 추정된다.

Table 6 Results of uncertainty analysis varying mesh size

Study	R_G	P_G	C_G	U_G	δ_G^*	S_c
Resistance	0.517	1.9	0.932	0.633	-0.59	24.08
% S_{fine}				2.7 %	2.5 %	
Trim	0.174	5.05	4.75	0.107	-0.06	5.77
% S_{fine}				1.9 %	-1 %	
Sinkage	0.351	3.02	1.85	0.002	0.0013	0.0249
% S_{fine}				8%	5.2%	

3.3 활주성능 해석

수치해석 대상 활주선인 Fridsma 선형의 주요목은 Table 1와 같고, 선속은 프루드 수가 0.59, 0.89, 1.19, 1.48 및 1.78의 5가지 선속을 선택하여 배수량형 저속상태부터 활주선형 고속상태를 포함하도록 하였다.

격자구성은 불확실성 해석에서 분석한 결과를 바탕으로 총 격자는 93만개의 ‘Medium mesh’를 사용하였으며 최대 CFL 수는 1로 지정하였다.

Fig. 10은 최대 CFL수가 1로 유지될 때 속도에 따른 계산 시간 간격(Delta t)을 보여주고 있다. 속도가 빨라질수록 계산 시간 간격이 0.0006초부터 0.0002초까지 점점 작아짐을 알 수 있다. 또한, 계산 시간 간격의 빠른 수렴은 유동장 전체의 속도와 압력값들이 빠르게 수렴함을 의미한다.

Fig. 11은 프루드 수 1.19일 때 자유수면의 파고 분포를 보여주고 있다. 전반적으로 명확한 켈빈 파형을 볼 수 있으며 선미부 후류에 발생하는 루스터(Rooster) 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 저속부터 고속까지 선속의 변화에 따른 선저면의 압력 분포를 보여주고 있다. 선속이 증가하면서 부상과 트림이 발생함에 따라서 전반적으로 침수면적이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 그러나, 프루드 수가 1.19에서 1.48로 증가할 때는 침수면적이 증가함을 볼 수 있는데 그 이유는 프루드 수가 1.19보다 커지면 부상량의 증가율은 둔화되고 트림은 지속적으로 감소하면서 생기는 현상으로 추정할 수 있다. 침수면적의 변화는 총 저항치에 직접적인 영향을 주는 요소이다.

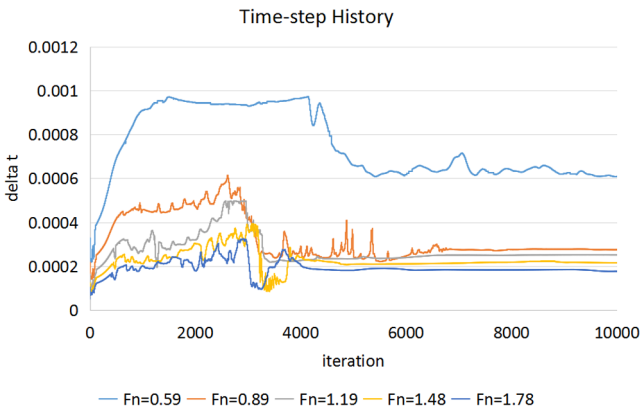


Fig. 10 Time step history limited by $MaxCb = 1$

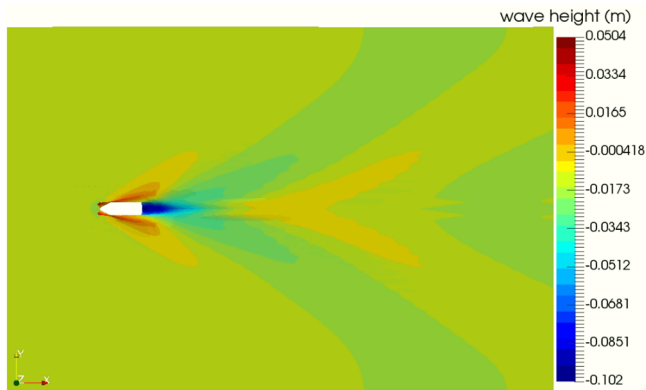


Fig. 11 Free surface wave contour ($Fn = 1.19$)

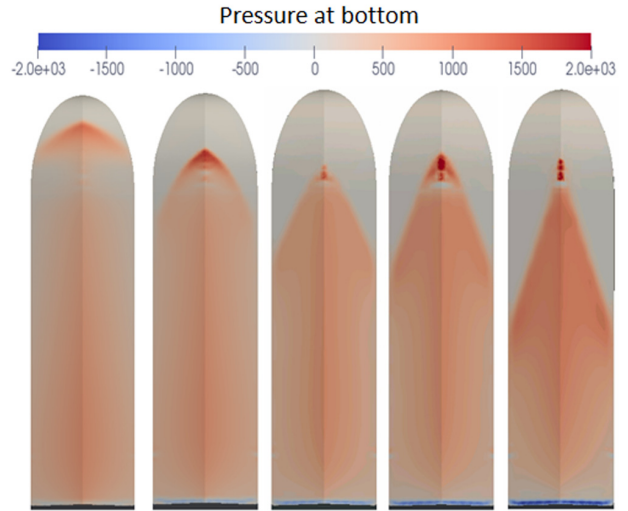


Fig. 12 Pressures on hull bottom at Fn 0.59, 0.89, 1.19, 1.48, 1.78 (from left to right)

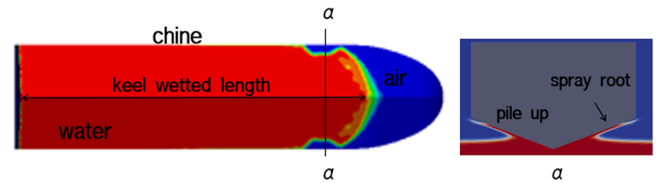


Fig. 13 Wetted surface profile on bottom and spray characteristics at $\alpha-\alpha$ surface ($Fn=1.19$)

Fig. 13은 프루드 수가 1.19인 경우에 VOF의 변화를 통하여 선저점수면의 형상을 보여주고 있다. 붉은색 부분은 VOF가 1인 부분으로 격자가 물로만 채워져 있는 부분이고 푸른색 부분은 VOF가 0으로 격자 내에 공기만 있는 부분이다. 또한, 선저면 기선 부분부터 Chine-dry 영역과 Chine-wet 영역을 볼 수 있으며 Chine-dry 영역인 $\alpha-\alpha$ 단면에 발생하는 스프레이 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 14-16은 각각 속도의 변화에 따른 총 저항, 부상량 및 트림의 변화를 보여주고 있다. 삼각형(OpenFOAM)은 본 연구의 결과이며 실험 결과, Mousaviraad et al.(2015)의 결과 및 Savitsky 경험식과의 비교를 통하여 수치해석 결과를 검증하였다.

총 저항의 경우에 부력의 영향이 지배적인 저속에서는 4가지 방법에 큰 차이 없으나 속도가 증가하고 수동역학적인 힘인 양

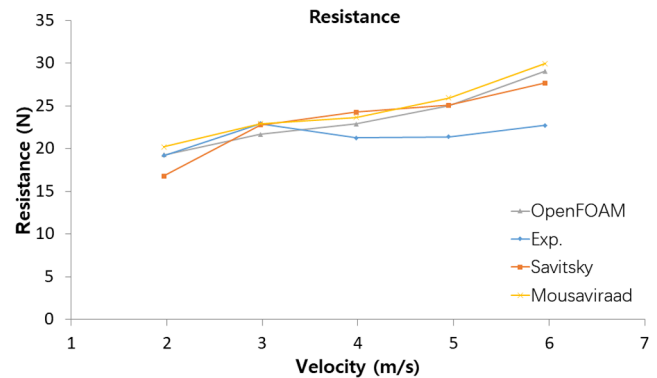


Fig. 14 Comparison of resistance

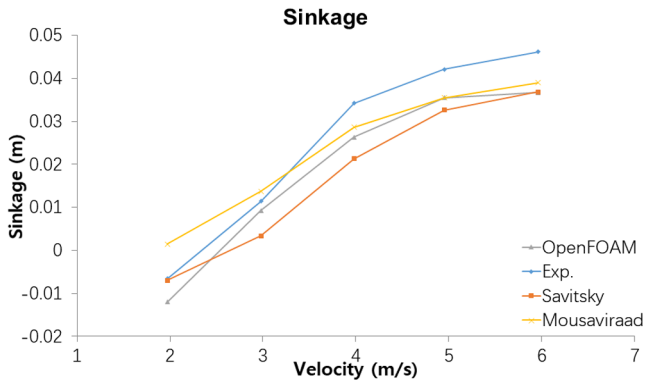


Fig. 15 Comparison of sinkage

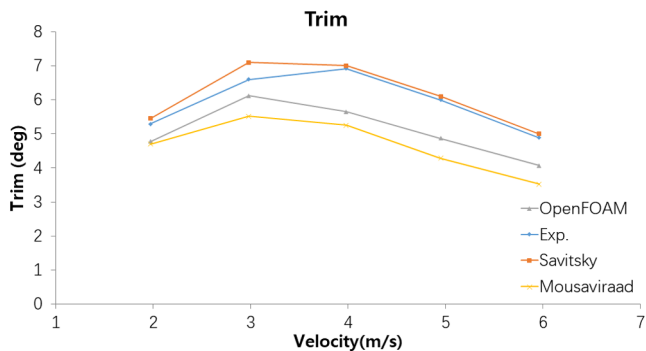


Fig. 16 Comparison of trim

력의 영향이 증가하면서 본 연구 결과와 Mousaviraad의 결과 및 Savitsky 경험식 결과는 비교적 잘 일치하면서 증가하지만 실험값은 전반적인 변화의 경향은 일치하나 크기가 작고 속도가 증가함에 따라 차이가 커짐을 알 수 있다.

부상량의 경우에도 정성적인 변화의 경향은 일치하나 저속을 제외한 대부분의 속도 구간에 걸쳐서 실험값이 가장 크고 Savitsky 경험식은 가장 작은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 본 연구의 결과와 Mousaviraad의 결과가 중간값을 가지고 있으나 본 연구의 결과가 실험값의 변화 경향을 대체로 따라가고 있음을 알 수 있다. 실험 결과와 CFD 결과가 총 저항과 부상량의 크기에서 역전되는 경향을 보여주고 있는 것으로 볼 때 총 저항에 미치는 부상량의 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

트림의 경우는 실험값과 Savitsky 경험식 결과가 전반적으로 잘 일치하고 있으며 본 연구의 결과는 실험값과 큰 차이를 보여주고 있으나 Mousaviraad의 결과보다는 실험값에 근접한 결과를 보여주고 있다.

앞 절 ‘불확실성 해석’에서도 기술한 바와 같이 활주형선에 대한 본 연구의 결과를 포함한 대부분의 CFD 결과가 Fridsma의 실험 결과와 크게 차이가 남을 볼 수 있는데 그 원인을 규명하기 위하여는 CFD 수치해석에서 발생할 수 있는 다양한 오차 요소들은 물론 모형실험의 준비 및 수행과정에서 발생하는 불확실성에 대한 보다 근본적인 연구가 필요할 것으로 본다.

4. 결 론

첫째, 본 연구를 통해서 OpenFOAM 프로그램을 이용하여 주

형체 고속 활주선에 대한 저항성능 및 항주자세를 수치해석하는 방법을 정립하였다.

둘째, 주형체 활주선의 저항 및 항주자세 수치해석에 대하여 계산시간 간격과 격자크기의 변화에 대한 불확실성 해석을 수행한 결과 각각의 물리량에 대한 불확실성의 크기와 Richardson 외삽법을 사용하여 격자의 크기가 0으로 수렴될 경우에 수렴값(참값)을 추정하였다.

셋째, 활주선 고속항주 시 자유수면의 파고 분포와 Chine-dry 영역에서의 스프레이 현상을 수치해석으로 확인하였고 선속 변화에 따른 선저 접수면의 형상 변화를 통하여 저속상태부터 고속상태까지의 활주현상을 확인할 수 있었다.

넷째, Fridsma의 주형체 활주선에 대하여 고속 항주시 저항성능과 항주자세를 추정하였다. 총 저항 값과 부상량의 경우에 타 CFD 결과 및 경험식 결과와 대체로 일치하는 경향을 보여주고 있지만 고속 활주 영역으로 갈수록 실험값과의 차이가 커지는 결과를 얻었다. 트림 결과는 전 속도 영역에서 변화의 경향은 대체로 일치하나 실험값과 비교적 큰 차이를 보여주고 있다.

다섯째, 활주형선에 대한 본 연구의 결과를 포함한 대부분의 CFD 결과가 Fridsma의 실험 결과와 정성적인 변화의 경향은 일치하나 크게 차이가 남을 볼 수 있는데 그 원인을 규명하기 위해 CFD 수치해석과 모형실험에 존재하는 다양한 불확실성에 대한 연구가 필요할 것으로 본다.

본 연구 결과를 바탕으로 향후에는 비주형체 활주선에 대한 정수 중 저항성능 및 항주자세 추정 연구, 활주선의 파랑 중 운동성능 추정에 대한 연구 및 CFD 수치해석과 모형실험의 불확실성에 대한 연구를 수행할 예정이다.

References

- Bustos, D.S.H., Alvarado, R.J.P., 2017. Numerical Hull Resistance Calculation of a Catamarán Using OpenFOAM. *Ship Science and Technology*, 11(21), 29-39. <https://doi.org/10.25043/19098642.150>
- Chevrier, P., Galley, H., 1993. A Van Leer Finite Volume Scheme for The Euler Equations on Unstructured Mesh. *Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 27(2), 183-201.
- Cucinotta, F., Sfravara, F., 2018. Experimental and Numerical Hydrodynamic Analysis of a Planing Hull Pleasure Boat. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(1), 30-39.
- Fridsma, G., 1969. A Systematic Study of the Rough-water Performance of Planing Boats. Davidson Laboratory Report, 1275.
- Fu, T.C., O'Shea, T.T., Judge, C.Q., Dommermuth, D., Brucker, K., Wyatt, D.C., 2012. A Detailed Assessment of Numerical Flow Analysis (NFA) to Predict the Hydrodynamics of a Deep-V Planing Hull. 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26-31.
- Go, G.S., Lee, E.T., Ahn, H.T., Kim, S.I., Chun, S.Y., Kim, J.S., Lee, B.H., 2016. 6DOF Simulation and Determination of Hydrodynamic Derivatives of Underwater Tow-Fish Using

- CFD. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), 315-328. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.4.315>
- Hassan, G., Kamarlouei, M., Veysi, S.T.G., 2015. A Hydrodynamic Methodology and CFD Analysis for Performance Prediction of Stepped Planing Hulls. *Polish Maritime Research*, 22(2), 23-31. <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0014>
- Islam, H., Soares, C.G., 2017. Prediction of Ship Resistance in Head Waves Using OpenFOAM. *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*, Taylor & Francis Group.
- Marcello, I., 2015 Hydrodynamics of Planing Hull by CFD. Thesis Master's Degree in Naval Engineering of Naples University.
- Mousaviraad, S.M., Wang, Z.Y., Stern, F., 2015. URANS Studies of Hydrodynamic Performance and Slamming Loads on High-speed Planing Hulls in Calm Water and Waves for Deep and Shallow Conditions. *Applied Ocean Research*, 51, 222-240. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.04.007>
- Newmark, N.M., 1959. A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85(3), 67-94.
- OpenCFD Ltd., 2017. OpenFOAM User Guide.
- Savitsky, D., 1964. Hydrodynamic Design of Planing Hulls. *Marine Technology and SNAME News*, 1(4), 71-95.
- Stern, F., Wilson, R., Coleman, H.W., Paterson, E., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations —Part 1: Methodology and Procedures. *Journal of Fluids Engineering*, 123(4), 793-802. <https://doi.org/10.1115/1.1412235>
- Wilson, R., Stern, F., Coleman, H.W., Paterson, E., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations —Part 2: Application for Rans Simulation of a Cargo/Container Ship. *Journal of Fluids Engineering*, 123(4), 803-810. <https://doi.org/10.1115/1.1412236>

Experimental Study on Estimation of Roll Damping for Various Midship Sections

Byeongwon Park^{ID*}, Dong Woo Jung^{ID*}, Jaesag-Jung^{ID*},
Inbo Park^{ID*}, Seok-Kyu Cho^{ID*} and Hong Gun Sung^{ID*}

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

중양 단면 형상에 따른 횡동요 감쇠 추정 실험 연구

박병원^{ID*} · 정동우^{ID*} · 정재상^{ID*} · 박인보^{ID*} · 조석규^{ID*} · 성홍근^{ID*}

*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Roll damping, 횡동요 감쇠, Free decay test, 자유감쇠, Harmonic excited roll motion, 가진 횡동요, Midship section, 중양 단면, 모형 시험, Model test

ABSTRACT: The magnitude of the roll motion of a floating structure depends on the roll damping acting on the body. In other words, the roll damping of a floating structure must be accurately obtained in order to precisely evaluate the roll motion. Various methods are used to evaluate the roll damping of a floating structure, such as the linear potential theory, computational fluid dynamics (CFD), and model tests. However, it is difficult to evaluate the roll motion of a floating structure with appendages such as a bilge keel and riser slot due to the limitation of ignoring the viscous effects in the linear potential theory. Among these methods, a model test based on a free decay test and harmonic excited roll motion (HERM) is known to be the most reliable method to estimate the roll damping of the floating structures. In this study, model tests using free decay and HERM techniques were performed in the Ocean Engineering Basin (OEB) of KRISO with various types of midship sections. The roll damping results were estimated based on post-processing methods using both techniques, and the roll damping results were compared.

1. 서 론

해상 유전 개발의 경제성 확보를 위해 오일 메이저 및 국영 석유회사는 저유가 시대에 맞는 저비용 해양플랜트 개발의 필요성을 제기하고 있다. 특히, 깊은 수심 및 인프라가 부족한 해역에 주로 투입되는 선박형 부유식 해양구조물인 FPSO(Floating production storage offloading)의 효율적인 설계 및 개발이 대표적이다.

부유식 해양구조물 설계의 가장 기본이 되는 정보는 대상 부유체의 파랑 중 동적 거동, 상대 파고 및 가속도 정보이다. 특히, 부유체의 6자유도 운동 중 횡동요(Roll)는 폭 방향 및 수직 방향으로의 가속도를 유발하는 중요한 인자로 부유체 선체 및 상부의 트러스 구조에 하중을 발생시킨다. 또한 해양구조물의 상부 공정 설비는 동적 거동 중에 구조 안정성을 확보하여야

할 뿐만 아니라 요구되는 공정 처리 기능을 원활히 수행해야하므로 부유체의 동적 거동 및 가속도 정보는 공정 설비 설계 시 중요하게 다뤄져야 한다. 따라서 해양구조물의 구조적 안정성을 확보하고 선체 및 상부 처리시설의 최적 설계를 위해서는 투입 환경 조건에서 해양구조물의 동적 거동을 정확하게 추정하고 평가해야 한다. 특히, 점성에 의한 감쇠 영향을 많이 받는 횡동요를 정확하게 평가해야 폭 방향 및 수직 방향 가속도를 엄밀하게 추정할 수 있다.

횡동요 감쇠에 대한 연구는 경험식을 바탕으로 상선의 감쇠 계수 추정을 비롯하여 모형 시험 및 CFD(Computational fluid dynamics) 해석 기법 등에 대한 연구가 지속적으로 진행되었다. 경험식을 통한 횡동요 감쇠 계수 추정법은 일반적인 상선의 선형에 대해 횡동요 감쇠를 선체 양력 성분, 마찰 성분, 밀지킬 성분 등으로 세분화하여 각기 성분의 감쇠 영향을 추정한 후 이

Received 9 January 2019, revised 12 June 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Seok-Kyu Cho: +82-042-866-3933, skcho33@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7821-4848

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of fall conference of the Korean Society of Ocean Engineers 2018 in incheon.

© 2019, 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.

를 합하여 전체 횡동요 감쇠를 추정하는 방법이다(Ikeda et al., 1976; Ikeda et al., 1978).

모형 시험을 통한 횡동요 감쇠 계수 추정 기법으로는 자유 감쇠, 가진 운동을 통한 감쇠, 가진 횡모멘트를 통한 감쇠 추정법이 있다. 이중 자유 감쇠 추정법은 대상 부유체를 일정한 횡각도를 준 후 구속을 풀어 자유 감쇠하는 시계열을 계측하고 이를 분석하는 추정 기법으로 시험 절차가 간단하여 널리 활용되고 있다. 가진 운동이나 가진 횡모멘트를 활용한 감쇠 추정 기법은 가진을 위한 별도의 장치가 필요로 하다는 단점이 있으나 특정 횡동요 각도, 다양한 횡동요 주기, 파랑 및 선속 조건에서의 감쇠 계수를 추정할 수 있다는 장점이 있다. Handschel et al.(2015)은 횡동요 자유 감쇠 실험뿐만 아니라 Blume(1979)이 제안한 회전 무게추에 의한 횡동요 가진 개념을 도입하여 Post panamax containership의 횡동요 감쇠 계수를 추정 연구를 수행하였다. Oliva-Remola et al.(2018)은 내부에서 이동하는 무게추를 이용한 가진운동을 통해 횡동요 감소 계수 실험을 수행하였으며 자유 감쇠 실험 결과와 비교하였다. 또한 가진 운동을 포함한 횡동요 거동을 수학적 모델로 구성하여 해석하여 모형 시험 결과와 비교하였다.

Park et al.(2017)은 감쇠 계수 추정 모형 시험을 위해 폭방향으로 정현파의 신호로 이동하는 무게추를 활용한 횡동요 가진 장치를 설계하였으며 가진 장치를 이용한 모형 시험 결과로부터 횡동요 감쇠 계수 추정하는 후처리 기법을 검토하였다. 제작된 가진 장치를 30k LNG-BS(LNG-bunkering shuttle)에 적용하여 모형 시험을 수행하였고 추정한 횡동요 감쇠 계수를 자유감쇠 실험 결과와 비교하였다(Park et al., 2018).

모형 시험 및 CFD를 이용한 횡동요 감쇠 추정 기법과 시계열의 해석에 대해서는 29차 ITTC stability in waves committee의 ‘Terms of reference’ 항목으로 심도 있게 다루어지고 있으며 횡동요 감쇠 추정에 대한 가이드라인 개선을 위해 지속적인 연구가 필요하다고 언급하였다.

2. 횡동요 감쇠 추정 기법

횡동요 감쇠 계수는 모형 시험의 결과인 시간에 따른 횡동요 및 횡모멘트의 시계열을 분석하여 추정할 수 있으며 식 (1)은 횡동요 운동방정식을 나타낸다.

$$(I + I_a)\ddot{\phi} + C_1\dot{\phi} + C_2\phi + K\phi = M(t) \tag{1}$$

여기서 I 는 관성 모멘트, I_a 는 부가 관성 모멘트, C_1 은 선형 횡동요 감쇠계수, C_2 는 비선형 횡동요 감쇠계수, K 는 횡 복원력, $M(t)$ 는 외력항으로 가진 횡 모멘트를 각각 나타낸다. 또한, $\ddot{\phi}$, $\dot{\phi}$, ϕ 는 각각 횡동요 각가속도, 횡동요 각속도, 횡동요 각도를 나타낸다.

자유 감쇠의 경우에는 식 (1)의 외력항인 $M(t)$ 이 0 값을 가지며 가진 장치에 의한 외력이 주어진 경우에는 시간에 따른 외력 $M(t)$ 를 식 (2)로 나타낸다.

$$M(t) = M_a \sin(\omega t) = M_a \times L_d \times g \times \sin(\omega t) \tag{2}$$

여기서 M_a 는 무게추 무게, L_d 는 중심축으로부터 무게추 최대 이동 거리, g 는 중력가속도, ω 는 무게추의 왕복 주파수를 나타낸다.

2.1 자유 감쇠 추정 기법

자유 감쇠 모형 시험은 Fig. 1과 같이 대상 부유체를 일정한 각도로 횡동요를 발생시킨 후 구속을 풀어 시간에 따른 횡동요 시계열을 계측한다. 계측된 시계열의 형태는 첫 횡동요를 시작으로 점차 줄어 최종적으로 0도로 수렴하게 되며 이때 시계열에 나타나는 각 주기의 최고, 최저점들을 이용하여 감쇠를 추정한다.

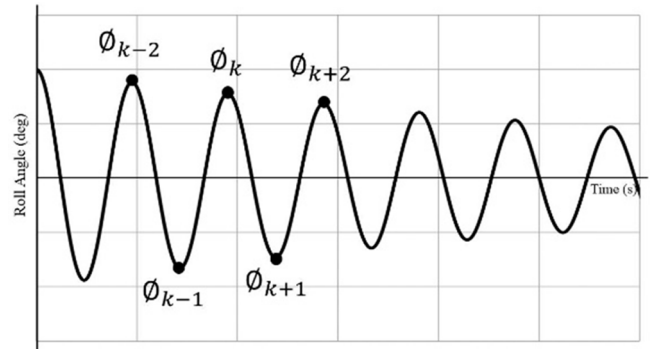


Fig. 1 Example of roll motion time series for decay test

대수감쇠율 기법(Logarithmic decrement)은 횡동요의 연속된 각 주기의 최고 또는 최저점들의 대수감쇠 비를 통해 횡동요 감쇠 계수를 추정한다. 대수감쇠율 기법은 비선형 감쇠의 영향을 등가의 선형 감쇠로 간주하여 횡동요 감쇠를 선형 감쇠로 추정하는 방법과 비선형 감쇠 영향을 반영하여 선형, 비선형 감쇠를 구하는 방법으로 나눌 수 있다. 상대감쇠율 기법(Relative decrement)은 횡동요의 선형 및 비선형 감쇠를 최고점 또는 최저점의 상대 감소량을 통해 이용하여 추정한다. 한 주기 동안 횡동요 변화값 및 평균값의 관계를 Extinction coefficient 또는 Decay coefficient로 나타내며 Himeno(1981)는 에너지 보존 법칙에 통해 Decay coefficient로부터 선형, 비선형 횡동요 감쇠 계수를 추정하였다.

본 연구에서는 자유감쇠 모형 시험에 대해 대수감쇠율 기법을 이용하여 선형 횡동요 감쇠 결과를 도출하였다. 횡동요 대수감쇠율(δ)은 자유 감쇠의 시계열 중 인접한 최고점(ϕ_k)과 최저점(ϕ_{k+1})을 이용하여 식 (3)으로 표현되며 대수감쇠율이 작다는 가정 하에 횡동요 상대 감쇠 ζ 는 식 (4)로 구해진다.

$$\delta = \ln|\phi_k| - \ln|\phi_{k+1}| \tag{3}$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(\pi)^2 + \delta^2}} \approx \frac{\delta}{\pi} \tag{4}$$

2.2 가진 운동 감쇠 추정 기법

가진 운동을 통한 횡동요 감쇠 추정법은 한 주기 동안 주어진 횡동요 에너지가 횡동요 감쇠로 인한 에너지 소실과 같다는 관계를 이용하며 비선형 감쇠의 영향이 포함된 등가의 선형 감쇠 결과로 나타낸다.

가진된 횡동요는 감쇠 조건에 따라 가해진 횡동요 모멘트와 위상차를 가진다. Motion and moment phase shift 방법은 가진 장치에 의한 횡동요 모멘트, 가진된 횡동요 크기, 위상차를 이용하여 횡동요 감쇠를 추정한다. Lissajous curve를 이용한 추정법은 횡동요 모멘트와 발생한 횡동요의 관계를 이용한다. 주기 운동의 경우 닫힌 영역을 가지며 내부 영역의 면적이 한 주기 동안 소실된 에너지를 의미하므로 이를 이용하여 감쇠를 추정한다. 가진 장치에 의해 가해진 횡동요 모멘트는 설정된 주기 및 크기로 발생하며 Fourier polynomial approximation을 통해 표현될 수 있다. 특히, 횡동요 공진 주기에 해당하는 횡동요 모멘트가 가해진 경우에는 횡동요와 90도의 위상차를 나타낸다. 한 주기 동안 소실되는 에너지는 Fourier polynomial 계수의 함수로 간단히 표현되고 이를 통해 횡동요 감쇠를 추정한다.

본 연구에서는 가진 운동 모형 시험에 대해 Lissajous curve 기법을 이용하여 등가의 선형 감쇠 결과를 도출하였다. 식 (5)는 횡동요 한 주기 동안 감쇠에 의해 소실된 에너지를 나타내며 식 (6)은 Lissajous curve의 닫힌 영역의 면적에 해당하는 에너지를 나타낸다. 식 (5)와 식 (6)이 같으므로 횡동요 크기 ϕ_a 에서의 등가 선형 횡동요 감쇠는 식 (7)로 구할 수 있다.

$$E_d = 4 \int_0^{\phi_a} C_e \dot{\phi} d\phi = \pi C_e (\phi_a) \omega \phi_a^2 \quad (5)$$

$$E_l = \int_{-\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} M \phi \quad (6)$$

$$C_e (\phi_a) = \frac{E_l}{\pi \omega \Phi_a^2} \quad (7)$$

여기서 ϕ_a 는 가진된 횡동요 크기, ω 는 횡동요 주파수, $C_e(\phi_a)$ 는 횡동요 크기 ϕ_a 에서의 등가 선형 횡동요 감쇠, M 은 가진 횡 모멘트를 나타낸다.

3. 횡동요 감쇠 모형 시험

3.1 모형 시험 모델

본 연구에서는 선박형 부유체의 다양한 중앙 단면 형상의 횡동요 감쇠 계수를 검토하기 위해 Fig. 2와 같이 3종류의 중앙단면과 빌지킬이 부착된 모델을 대상으로 모형 시험을 수행하였다.

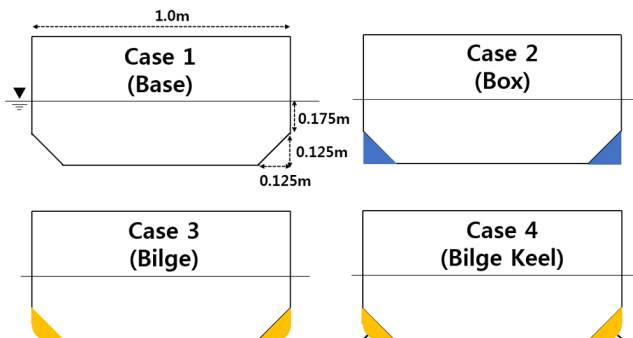


Fig. 2 Models with various midship section for roll damping model test

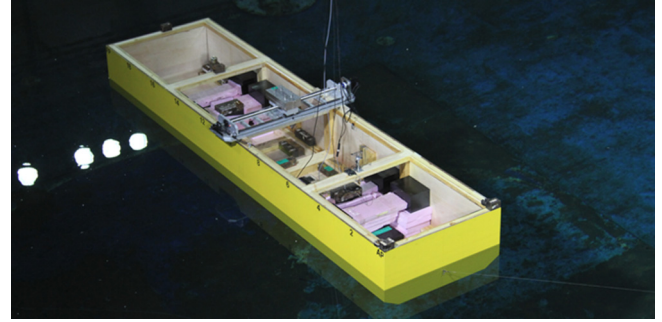


Fig. 3 Case 1 test model in OEB of KRISO

Table 1 Particulars of test models

	Unit	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		Base	Box	Bilge	Bilge keel
Loa	m	4.0	4.0	4.0	4.0
Beam	m	1.0	1.0	1.0	1.0
Draft	m	0.30	0.30	0.30	0.30
Displacement	ton	1.1375	1.2000	1.1900	1.1900
V.C.G	m	0.263	0.225	0.233	0.233
GM	m	0.170	0.203	0.195	0.195
kxx	m	0.35	0.35	0.35	0.35
Roll period	s	1.80	1.80	1.80	1.87
Bilge radius	m	-	-	0.0625	0.0625
Bilge keel	m	-	-	-	0.0250

Case 1을 기본 중앙단면으로 하였으며 선체 양 하단부에 길이 방향으로 추가적인 형상 구조물을 설치하여 중앙 단면에 변화를 주었다.

모형 시험에 사용된 모형선(Case 1)을 Fig. 3에 나타내었으며 각 Case의 모델 제원을 Table 1에 나타내었다. Case 4는 Case 3 선형에 빌지킬을 추가로 부착하였다. Case 1, 2 및 3의 횡동요 공진 주기는 설계값을 이용하여 포텐셜 기반의 In-house 프로그램인 AdFLOW(Advanced analysis system for floating body in waves using higher-order element method)를 통해 계산하였으며 Case 4의 횡동요 공진주기는 자유 감쇠 모형 시험 결과로부터

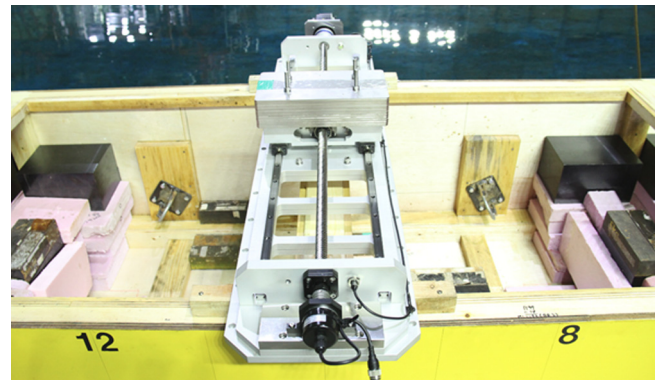


Fig. 4 Roll motion excitation device attached in mid ship of test model

Table 2 Specification of roll motion excitation device

Item	Specification	Unit
Motor/Driver	Mitsubishi 800 W Servo	
Controller	Cruiser-Mini Motion Controller	
Weight (Maximum)	~ 30.0	kg
Stoke	+400 from center	mm
Weight of equipment	35.0	kg
Size	1320 × 300 × 220	mm

얻었다. 설계 횡동요 공진주기와 모형 시험에서 구현된 횡동요 공진 주기는 4.1장의 Table 5에 비교하였다.

가진 운동 장치는 Park et al.(2017)이 제시한 설계 기법을 활용하여 대상 모델의 횡동요를 원하는 크기로 가진시킬 수 있는 사양으로 제작되었다. 제작된 가진 장치는 Fig. 4와 같이 모형선의 중앙부, 데크 상단에 장착하였고 횡동요 모멘트는 무게추, 이동 거리 및 이동 주기의 조합으로 구현된다. 실험에 사용된 가진 장치의 제원은 Table 2에 정리하였다. 본 실험에서는 무게 추 26.5kg을 사용하였으며 주기 및 이동 거리는 각 실험 케이스 별로 요구되는 횡동요가 발생하도록 구성하였다.

3.2 모형 시험 조건

횡동요 감쇠 계수 추정을 위해 자유 감쇠 및 가진 운동 감쇠 모형 시험은 선박해양플랜트연구소 해양공학수조에서 수행되었다. 모형의 무게 분포를 조정하여 Table 1의 제원을 만족하는 GM(Metacentric height) 및 횡동요 공진 주기를 갖도록 설정하였다. 자유 감쇠 및 가진 운동 감쇠 모형 시험이 동일한 무게 조건에서 수행될 수 있도록 가진 장치 및 무게추를 모형선 데크 상부에 미리 장착하여 무게 분포를 조정하였으며 자유 감쇠 시험 시에는 무게추를 선체 중앙에 고정하여 모형 시험을 수행하였다.

Table 3 Model test matrix of free decay tests for Case 1

Test ID	Initial roll angle (deg) for free decay test
C1-FD-001	~ 3.0
C1-FD-002	~ 6.0
C1-FD-003	~ 9.0
C1-FD-004	~ 12.0
C1-FD-005	~ 15.0

Table 4 Model test matrix of harmonic excited roll motion tests for Case 1

Test ID	Moving distance [m]	Period [s]	Target roll angle (deg)
C1-HR-001	0.008	1.81	~ 3.0
C1-HR-002	0.020	1.81	~ 6.0
C1-HR-003	0.030	1.81	~ 9.0
C1-HR-004	0.040	1.81	~ 12.0
C1-HR-005	0.042	1.81	~ 15.0

모형 시험은 각 Case별로 각기 다른 5개의 횡동요 각도에 대해 자유 감쇠 실험을 수행하였다. 자유 감쇠 모형시험에서는 초기 각도를 달리하여 시험 케이스를 구성하였고 가진 운동 감쇠 모형 시험은 횡동요 공진주기에서 무게추의 이동 거리를 조정하면서 적정 횡동요가 발생하도록 구성하였다. 모형 시험 구성에 대한 예시로 Case 1에 대한 모형 시험 조건을 Table 3 및 Table 4에 나타내었다. 다만, Case 4의 경우에는 횡동요 공진 주기가 1.87초이므로 무게추의 왕복 주기를 횡동요 공진 주기에 해당하는 1.87초로 설정하였다.

4. 모형 시험 결과 및 횡동요 감쇠 추정

4.1 자유 감쇠 모형 시험

자유 감쇠 모형 시험은 Table 3과 같이 각 Case별로 총 5개의 초기 각도 조건에 대해서 실험을 수행하였으며 각 실험 Case의 자유 감쇠 시험 시계열을 Figs. 5-8에 도시하였다. 또한 Fig. 9는 Case 1~3의 경우 초기 횡동요 각도 조건이 약 8.8도, Case 4의 경우에는 초기 횡동요 각도 조건이 약 8.0도인 실험의 시간에 따른 횡동요 시계열을 나타낸 것으로 각 Case의 횡동요의 감소 형태를 파악할 수 있다. 실험 모델은 Table 1에 정리되어 있는 횡동요 공진 주기를 갖도록 구성되었으며 목표 횡동요 공진 주기와 자유 감쇠 모형 시험 계측 결과를 통해 얻은 횡동요 공진 주기 결과를 Table 5에 비교하였다.

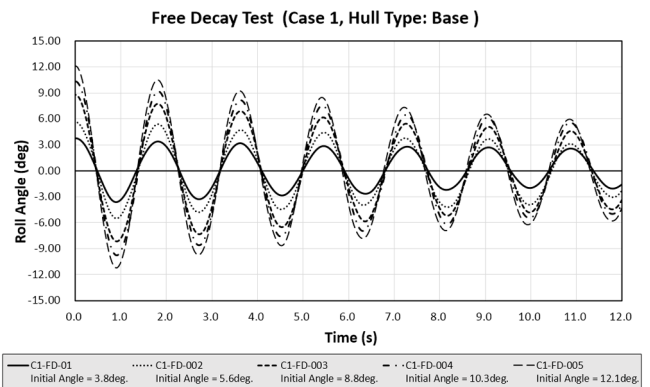


Fig. 5 Free decay time series with 5 different initial roll angle for Case 1, hull type: base

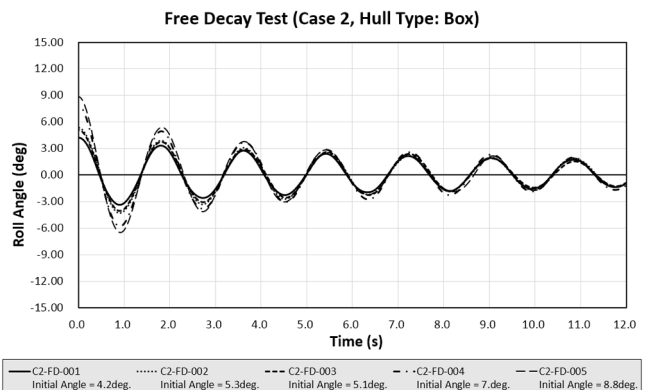


Fig. 6 Free decay time series with 5 different initial roll angle for Case 2, hull type: box

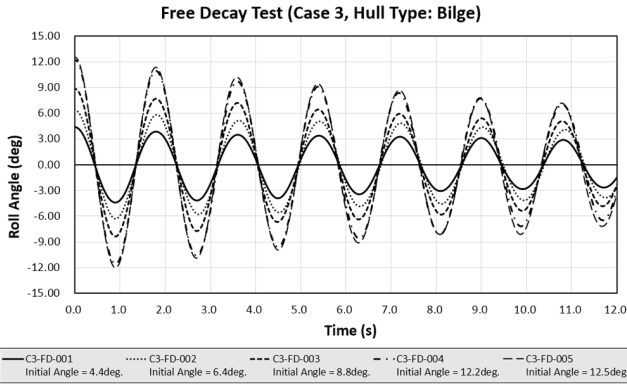


Fig. 7 Free decay time series with 5 different initial roll angle for Case 3, hull type: bilge

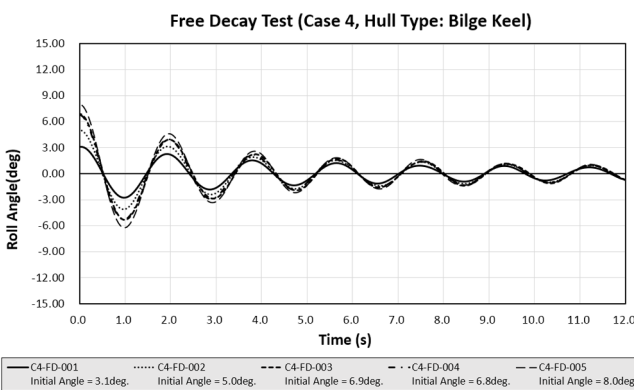


Fig. 8 Free decay time series with 5 different initial roll angle for Case 4, hull type: bilge keel

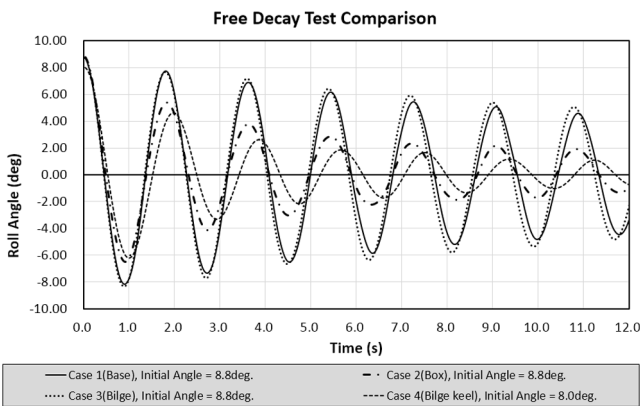


Fig. 9 Comparison of free decay time series with approximately 8.8degree initial angle for Case 1, 2, 3 and 8.0 degree initial roll angle for Case 4

Case 4의 경우에는 횡동요 공진 주기가 약 1.87초로 약 4% 증가하는 것으로 나타났으며 이는 Case 4는 빌지킬을 부착한 것이 이외에는 Case 3과 동일한 무게 분포를 가지고 있으므로 공진 주기 증가는 빌지킬에 의한 영향으로 판단된다.

자유 감쇠 추정 기법은 횡동요의 크기가 연속적 변화하는 과정에서의 추정 결과를 도출한다. 그러나 횡동요 감쇠 결과는 특정 횡동요 값에서의 결과로 나타나므로 추정된 감쇠 결과가 어느 횡동요 값에 대응하는지 검토가 필요하다. 예를 들어 추정된

Table 5 Comparison of roll period between target value and measured value of free decay test

Case No.	Hull type	Roll period [s]		
		Target	Measured	Error [%]
Case 1	Base	1.80	1.81	0.6%
Case 2	Box	1.80	1.81	0.6%
Case 3	Bilge	1.80	1.80	0.0%
Case 4	Bilge keel	-	1.87	-

횡동요 감쇠 결과가 자유 감쇠의 초기 횡동요 값에 대응하는지, 선택된 피크 횡동요 값의 평균에 대응하는지에 따라 횡동요 감쇠 추정 결과는 다르게 나타난다. 대응되는 횡동요 값의 적합성을 검토하기 위해 자유 감쇠 시계열 내 선택된 구간의 전체 피크를 적용한 횡동요 감쇠 추정 결과와 특정 횡동요 값이라 근사할 수 있는 인접한 두 개의 피크만을 이용한 횡동요 감쇠 추정 결과 비교하였다.

특정 횡동요에서 감쇠값을 검토를 위해 Case 4(C4-FD-005)를 대상으로 인접한 두 개의 횡동요 크기만은 이용하여 순차적으로 횡동요 감쇠를 추정한 결과와 선택 구간 전체를 대상으로 횡동요 감쇠를 추정한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 또한 Fig. 11에는 Case 4 실험에 대해 연속된 최고, 최저점을 이용하여 순차적으로 횡동요 감쇠를 추정한 결과와 선형 추세선을 표시 및 점선으로 각각 표시하였다. 또한 Case 4 자유 감쇠 실험의 횡동요 감쇠 추정 결과를 횡동요 평균값에 대해 Fig. 11에 함께 나타내었다. Fig. 11에 의하면 선형 추세선과 횡동요 평균에 대한 횡동요 감쇠 결과가 유사한 경향을 보여주고 있다. 이를 통해 선택 구간에서의 횡동요 감쇠 추정 결과를 횡동요 평균값에 대응하여 나타낸 결과가 특정 횡동요 크기에서의 감쇠 결과와 유사한 값을 보여 준다고 판단할 수 있다.

Fig. 12는 자유 감쇠 실험 시계열의 선택된 구간 내 횡동요 크기를 이용하여 대수감쇠율 기법으로 선형 감쇠 결과를 도출한 결과로 횡동요 평균값에 대해 임계 횡동요 감쇠값과 횡동요 감쇠 계수의 비율인 상대 감쇠로 표현하였다. 상대 감쇠 크기는 횡동요 각도가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보이며 선체 하부

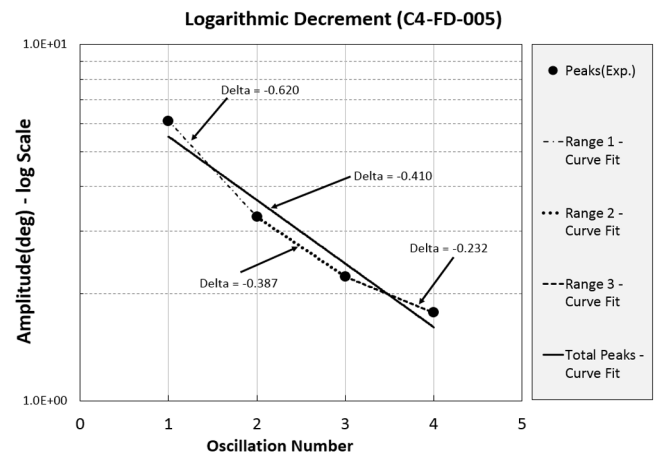


Fig. 10 Comparison of logarithmic slopes between adjacent two peaks and total peaks for Case 4 (C4-FD-005)

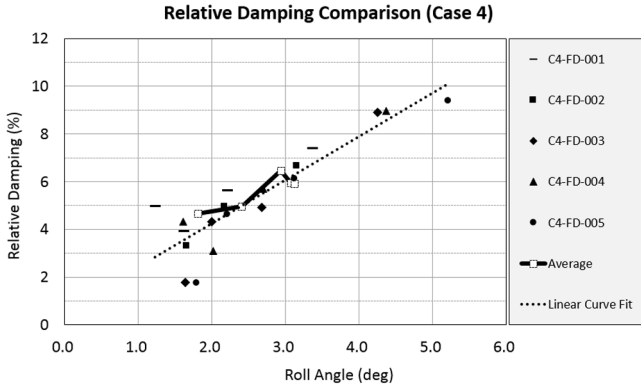


Fig. 11 Comparison of relative damping of using adjacent two peaks, linear curve and total peaks for Case 4

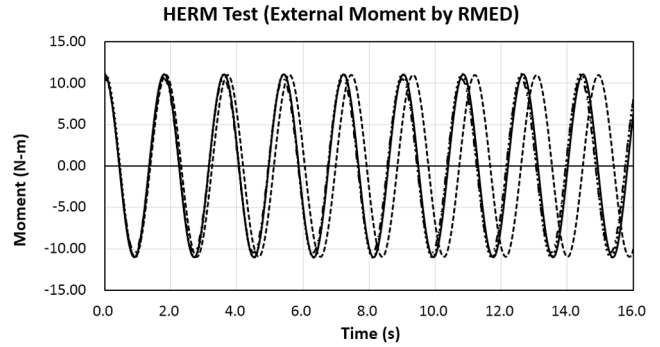


Fig. 13 Time series of roll moment induced by roll motion excitation device (RMED) for HERM test

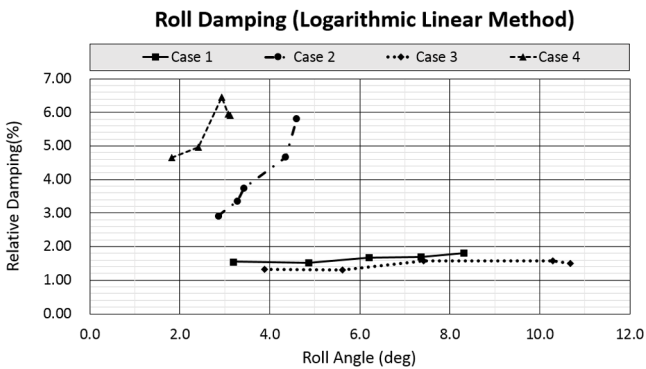


Fig. 12 Roll damping estimation from free decay test using logarithmic decrement linear method

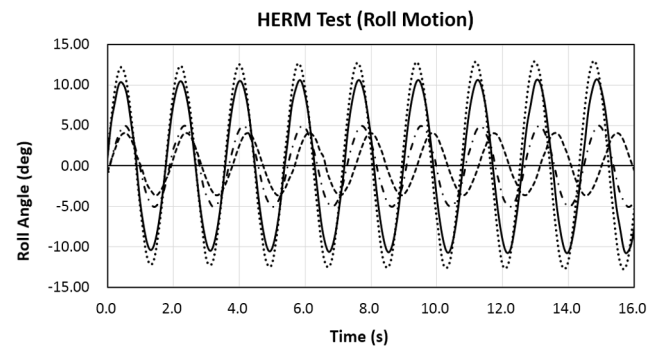


Fig. 14 Time series of roll motion excited by external roll moment for HERM test

의 형태 및 빌지킬의 유무에 따른 횡동요 감쇠가 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

Case 1과 Case 3은 약 1%에서 2% 사이의 상대 감쇠값을 가지며 횡동요 각도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Case 2는 선체 하부의 엣지 효과로 횡동요 상대 감쇠값이 횡동요 각도에 따라 약 3%에서 6%로 나타났다. Case 4는 Case 3 조건에 빌지킬을 부착한 것으로 횡동요 상대 감쇠값이 횡동요 각도 조건에 따라 약 4.5%에서 6.5%까지 추정되었다.

4.2 가진 운동 모형 시험

가진 운동을 통한 감쇠 추정 모형 시험은 Table 4 조건을 기반으로 하되 가진 장치의 무게추 이동 거리 조건에 따라 실험이 조건이 추가되었다. Fig. 13은 동일한 크기의 횡동요 가진 모멘트가 적용된 실험 조건이며 자유 감쇠 실험을 통해 얻은 공진주기가 적용되었다. Fig. 14는 Fig. 13의 횡동요 가진 모멘트가 가해졌을 때 각 Case의 횡동요 시계열을 나타낸 것이다. 가해진 횡동요 모멘트의 주기가 횡동요 공진 주기와 같으므로 모멘트와 횡동요의 위상차는 약 90도를 보이고 있으며 각각의 Case별로 중앙 단면 특성 및 빌지킬 유무에 따라 각기 다른 횡동요 결과를 보여준다.

완만한 빌지 반경을 가지는 Case 3은 약 12.7도의 횡동요로 가장 큰 값을 보여주며 Case 1이 약 10.8도의 횡동요로 거동하였다. Case 2는 선체 하부의 엣지 효과로 횡동요가 약 5도 발생하였으며 빌지킬이 부착된 Case 4는 약 3.6도의 횡동요 결과를 나타내었다.

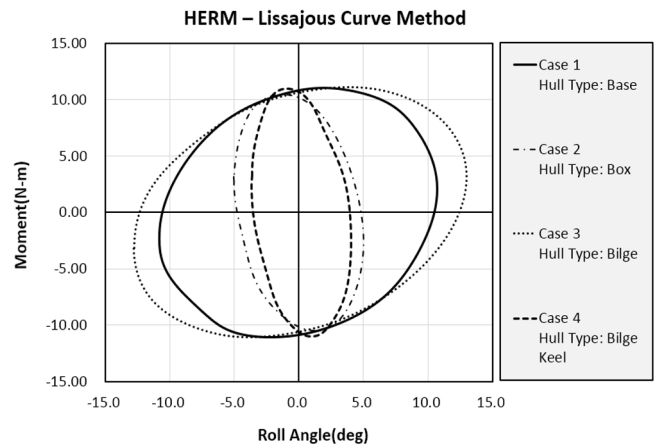


Fig. 15 Lissajous curve plot of HERM test

Fig. 15는 Fig. 13과 Fig. 14의 시험 결과에 대한 Lissajous Curve를 나타낸다. Lissajous curve 내부 영역의 면적이 한 주기 동안 소실된 에너지를 의미하므로 이를 이용하여 식 (7)과 같이 횡동요 감쇠값을 추정할 수 있다.

Fig. 16은 각 Case 및 가진 조건별로 감쇠 계수를 추정한 결과이다. Case 1은 약 1%에서 2% 사이의 상대 감쇠값을 가지며 Case 3은 약 1%의 상대 감쇠값으로 두 Case 모두 횡동요 각도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Case 2는 선체 하

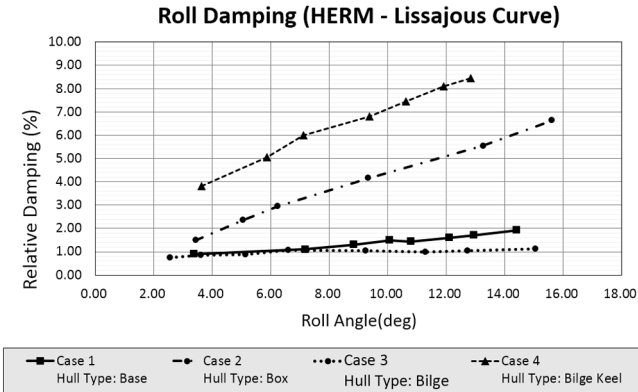


Fig. 16 Relative roll damping estimation results using lissajous curve method for HERM test

부의 엣지 효과로 횡동요 상대 감쇠값이 횡동요 각도에 따라 약 1.5%에서 6.8%로 증가한다. Case 4는 Case3 조건에 빌지킬을 부착한 것으로 횡동요 상대 감쇠값이 횡동요 각도 조건에 따라 약 4.0%에서 8.5%까지 나타났다.

4.3 횡동요 감쇠 추정 결과 비교

본 연구에서는 자유 감쇠 모형 시험과 가진 운동 모형 시험을 통해 각각 추정기법을 적용하여 대상 Case 별 횡동요 감쇠 계수를 추정하여 비교하였다. Fig. 17에 자유 감쇠 모형시험과 가진 운동 모형 시험의 횡동요 감쇠 추정 결과를 함께 표시하였다. Case 1과 Case 3의 경우에는 선형 특성 상 횡동요 상대 감쇠값이 2% 내외로 작으며 자유 감쇠 추정 기법과 가진 운동 감쇠 추정 기법 간 차이가 크지 않다.

Case 2와 Case 4의 경우 두 모형 시험 기법에 의한 결과가 차이를 보이고 있으며 전반적으로 자유 감쇠 모형 시험을 통한 횡동요 감쇠값이 크다. 이는 모형 시험 기법의 특성 및 감쇠 추정 기법의 차이로 부터 기인한 것으로 추정한다.

자유 감쇠 시험은 부유체가 특정 횡동요 각도를 유지한 정적 상태를 초기 조건으로 두고 시험을 수행하므로 시험 기간 동안 선체 주위의 유체가 충분히 교란되지 않은 상태에서의 횡동요 감쇠값을 추정한다. 반면, 가진 운동 모형 시험을 이용한 추정

기법은 가진 장치에 의해 가해진 모멘트에 의해 횡동요가 일정 각도로 수렴한 이후의 시계열을 이용하므로 선체 주위 유체는 충분히 교란된 상태라 볼 수 있다. 이는 Case 3과 Case 4의 결과 비교에서 확인할 수 있다. Case 3은 빌지킬이 없는 선형이므로 횡동요에 의해 발생하는 유체 교란이 상대적으로 미비하며 횡동요 감쇠에 작용하는 영향이 작다. 결과적으로 Case 3의 횡동요 감쇠 결과는 두 모형 시험 기법의 차이가 크지 않다. 반면 빌지킬이 부착되어 선체 주위의 유체 교란이 중요한 Case 4의 경우에는 횡동요 감쇠 결과가 모형 시험 기법에 따라 큰 차이를 보인다.

자유 감쇠 모형 시험을 이용한 횡동요 추정 기법은 초기 횡동요 크기를 시작으로 점차 감소하는 형태의 연속적인 횡동요 거동 중의 횡동요 감쇠를 추정한다. 따라서 4.1장에서 살펴본 바와 같이 자유 감쇠 모형 시험의 경우 선택 구간에서의 횡동요 크기를 이용한 감쇠 추정 결과는 횡동요 평균값에 대응하여 나타나는 것이 유효하다. 반면, 가진 장치를 이용한 횡동요 감쇠 추정 기법은 가진 장치에 의한 모멘트로 인해 발생하는 횡동요 값을 통해 감쇠 결과 추정하므로 특정 횡동요 값의 횡동요 감쇠를 직접적으로 확인할 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 3종류의 중앙 단면과 빌지 곡률을 가지는 중앙단면에 빌지킬이 부착된 모델을 대상으로 자유 감쇠 및 가진 운동 감쇠 모형 시험을 수행하였다. 자유 감쇠 모형 시험 결과는 대수감쇠율 기법을 통해 횡동요 상대 감쇠 계수 값을 추정하였으며 가진 운동 모형시험 결과는 Lissajous curve 기법을 이용하여 등가의 선형 감쇠를 구한 후 상대 감쇠 계수 값으로 나타내었다.

기본 선형인 Case 1과 빌지 반경을 가지는 Case 3은 횡동요 각도 조건에서 전반적으로 1%~2%내외의 상대 감쇠 결과를 보여주었으며 모형 시험 기법 간 큰 차이를 보이지 않았다. 반면, 선체 하부가 엣지 형태인 Case 2와 빌지킬이 부착된 Case 4는 횡동요 각도가 증가함에 따라 횡동요 감쇠값이 크게 증가하였다. Case 4는 Case 3과 동일 선형 조건에 빌지킬만 추가로 부착된 경우로 빌지킬이 횡동요 저감에 상당히 효율적인 수단임을 확인할 수 있다.

자유 감쇠와 가진 운동 감쇠의 횡동요 감쇠 추정 결과를 비교하면 각진 형태 선체 및 빌지킬이 부착되어 선체 주위 유체 교란 및 횡동요 감쇠가 크게 나타나는 경우에는 전반적으로 자유 감쇠 모형 시험에 의한 횡동요 감쇠 추정 결과 가진 운동을 통한 감쇠 추정 결과 대비 크게 나타났다. 이는 두 모형 시험 기법의 특성 및 감쇠 추정 기법 간 차이에 의한 것으로 보이며 향후 CFD 및 파랑 중 동적 거동 수치 해석 등을 통해 두 모형 시험 및 추정 기법의 특성을 엄밀하게 검토할 예정이다.

후 기

본 논문은 해양수산부 국가개발사업인 ‘심해공학수조 운영을 위한 연구 인프라 구축 및 심해플랜트 Pre-FEED 원천핵심기술

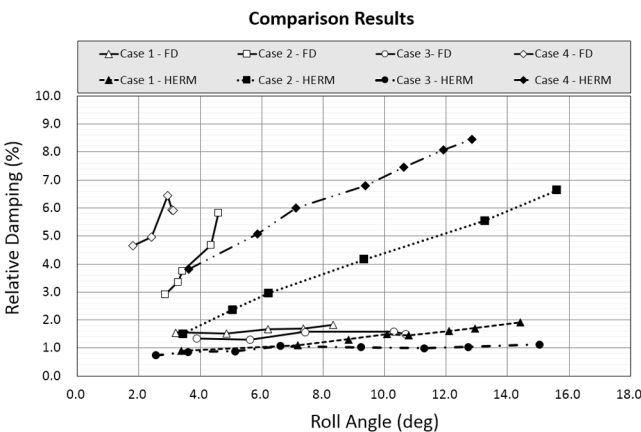


Fig. 17 Comparison results of relative roll damping between free decay and HERM test

개발' 및 선박해양플랜트연구소 주요사업 '심해공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발'로 수행된 연구결과입니다(PMS3850, PES3200).

References

- Blume, P., 1979. Experimentelle Bestimmung von Koeffizienten der Wirksamen Rolldämpfung und Ihrer Anwendung zur Abschätzung Extremer Rollwinkel. Ship Technology Research, Schiffstechnik, 26, 3-23.
- Himeno, Y., 1981. Prediction of Ship Roll Damping - State of the Art. University of Michigan, 239.
- Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N., 1976. On Roll Damping Force of Ship: Effects of Friction of Hull and Normal Force of Bilge Keels. Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, 161, 41-49.
- Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N., 1978. A Prediction Method for Ship Roll Damping. Report of Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, 00405.
- Oliva-Remola, A., Bulian, G., Perez-Rojas, L., 2018. Estimation of Damping through Internally Excited Roll Tests. Ocean Engineering, 160, 490-506.
- Park, B., Jung, J., Park I., Jung, D., Cho, S., Sung, H., 2017. Study on Estimation Methods of Roll Damping Coefficients for 30k LNG-BS Using Designed Excitation Device for Harmonic Roll Motion. Proceedings of Fall Conference of the Korean Society of Ocean Engineers, 86-90. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.052>
- Park, B., Jung, J., Jung, D., Park I., Cho, S., Sung, H., 2018. Study on the Estimation Methods of Roll Damping Coefficients Using Designed Excitation Device for Harmonic Roll Motion. Proceedings of ISOPE 2018, Sapporo, Japan.
- Handschele, S., Feder D., Abdel-Maksoud, M., 2015. Estimation of Ship Roll Damping - a Comparison of the Decay and the Harmonic Excited Roll Motion Technique for a Post Panamax Container Ship. Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, UK, 475-488.

Study on Performance of Radiant Heat Shields for Offshore Installations

Bong Ju Kim^{ID*}

**The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University, Busan, Korea*

해양플랜트 복사열 차폐막의 차폐성능에 관한 연구

김봉주^{ID*}

*부산대학교 선박해양플랜트기술연구원

KEY WORDS: Radiant heat shield 복사열 차폐막, Offshore installations 해양플랜트 설비, Performance test성능시험, Thermal radiation 열복사, Radiant heat flux 복사열유속

ABSTRACT: Radiant heat shields are normally installed on offshore oil and gas platforms to protect personnel, equipment, and structures from the thermal radiation emitted by a flare system. A heat shield should be individually designed to reduce the thermal radiation to the target level, and then manufactured and installed after the performance verification. However, in general, a heat shield is designed and manufactured by trial and error based on the performance test. For this reason, it is difficult to develop and design radiant heat shields in the Korean shipbuilding and marine equipment industry because of the lack of performance test data and limited experience.

In the present study, the results of experiments conducted to verify the performances of radiant heat shields were analyzed, and the thermal radiation characteristics and performance characteristics of the radiant heat shields were investigated. The insights and conclusions developed in the present study will be useful in terms of the design and development of radiant heat shield, as well as in their performance verification tests.

1. 서 론

해양플랜트 설비의 플레어 시스템(Flare system)은 운전 중 고온의 열 에너지를 주변으로 방출한다. 방출된 열 에너지는 전도, 대류 그리고 복사 현상을 통해 주변으로 전달되는데 특히 복사 현상으로 전달되는 열 에너지는 플레어 시스템 주변은 물론 해양플랜트 설비 전반으로 넓게 전달되어 작업자와 설비에 위협이 될 수 있다. 영국 보건안전관리국(Health and Safety Executive, UK)의 연구에 의하면 Table 1에 요약된 바와 같이 열복사 수준(Thermal radiation level)이 2kW/m²인 경우 1분간의 노출만으로 작업자는 통증(Pain)을 느끼며, 5kW/m²인 경우는 15~20초 정도의 노출시간으로도 작업자는 통증을 느끼며 노출시간이 30초가 지나면 상해(Injury)를 입을 수 있음을 경고하고 있으며(HSE, 2010a), 작업자의 안전을 위해 Table 2의 생존가능성 기준(Survivability criteria)을 적용하여 위험도 평가를 수행할 것을 제안하고 있다(HSE, 2010b). 미국석유협회(American Petroleum Institute, USA)의 설계 기준에서도 Table 3에 요약된 바와 같이 열복사로부터 피부 노출을 최소화할 수 있는 작업복을 착용한

작업자가 지속적인 작업을 할 수 있는 열복사 수준을 1.58kW/m² 이하로 권고하고 있으며, 6.31kW/m²이상의 열복사 노출 환경에서는 특수한 보호장구를 착용할 것을 권고하고 있다(API, 2014). 이러한 이유로 해양플랜트 설비의 경우, 설계 및 엔지니어링 단계부터 주요 작업공간 및 설비 위치에서의 열복사 수준을 검토하고, 작업자와 설비를 보호하기 위해 열복사 수준이 허용 수준 이하가 되도록 Fig. 1과 같은 복사열 차폐막(Radiant heat shields)의 설치가 요구되고 있다. 열복사 수준은 열복사를 통해 단위 면적당 전달되는 열에너지, 복사열유속(Radiant heat flux)으로 정의하며 단위는 kW/m²이다.

복사열 차폐막을 설치하여 유입되는 열복사 수준을 허용 수준 이하로 낮추기 위해서는 유입되는 복사열유속에 대한 복사열 차폐막의 차폐성능을 알아야한다. 그러나 차폐막의 차폐성능은 유입되는 복사열유속의 크기, 차폐막의 형상, 차폐막 후면에서의 거리 등 다양한 변수에 따라 그 특성이 다르다. Lee et al.(2002)은 FPSO(Floating production storage offloading)플레어 시스템의 화염에 의한 복사열유속을 수치해석적인 방법으로 예측할 수 있는 유한요소모델을 정립하였으며, 수치해석결과의 신뢰성 확보

Received 30 April 2019, revised 4 June 2019, accepted 13 June 2019

Corresponding author Bong Ju Kim: +82-051-510-2338, bonjour@pusan.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8234-1030

© 2019, 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.

Table 1 Thermal radiation exposure effects (HSE, 2010a)

Thermal radiation [kW/m ²]	Conditions
1.2	Received from the sun at noon in summer.
2	Minimum to cause pain after 1 minute.
Less than 5	Will cause pain in 15-20 seconds and injury after 30 seconds exposure.
Greater than 6	Pain within approximately 10 seconds rapid escape only is possible.
12.5	Significant chance of fatality for medium duration exposure. Thin steel with insulation on the side away from the fire may reach thermal stress level high enough to cause structural failure.
25	Likely fatality for extended exposure and significant chance of fatality for instantaneous exposure. Spontaneous ignition of wood after long exposure. Unprotected steel will reach thermal stress temperatures that can cause failure.
35	Cellulosic material will pilot ignite within one minute's exposure. Significant chance of fatality for people exposed instantaneously.

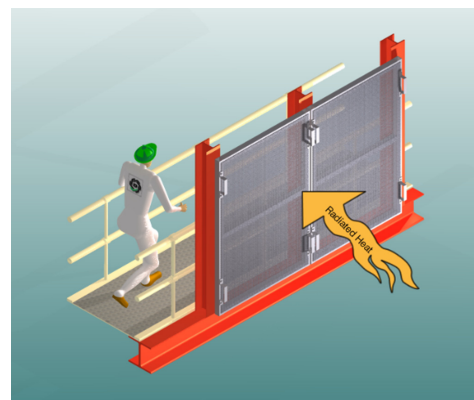
Table 2 Suggested indicative human survivability criteria for thermal radiation (HSE, 2010b)

Hazardous agent	Short term exposure	Long term exposure
Thermal radiation [kW/m ²]	4.0 (< 3 minutes) 6.0 (Maximum; 1.5 minutes)	1.6 (10 minutes; without heavy clothing)

Table 3 Recommended design thermal radiation for personnel (API, 2014)

Permissible design level [kW/m ²]	Conditions
9.46	Maximum radiant heat intensity at any location where urgent emergency action by personnel is required. When personnel enter or work in an area with the potential for radiant heat intensity greater than 6.31 kW/m ² , radiation shielding and/or special protective apparel (e.g. a fire approach suit) should be considered. <u>Safety Precaution—It is important to recognize that personnel with appropriate clothing^a cannot tolerate thermal radiation at 9.46 kW/m² for more than a few seconds.</u>
6.31	Maximum radiant heat intensity in areas where emergency actions lasting up to 30 s can be required by personnel without shielding but with appropriate clothing ^a .
4.73	Maximum radiant heat intensity in areas where emergency actions lasting 2 min to 3 min can be required by personnel without shielding but with appropriate clothing ^a .
1.58	Maximum radiant heat intensity at any location where personnel with appropriate clothing a can be continuously exposed.

Note: ^a Appropriate clothing consists of hard hat, long-sleeved shirts with cuffs buttoned, work gloves, long-legged pants, and work shoes. Appropriate clothing minimizes direct skin exposure to thermal radiation.

**Fig. 1** Applications of radiant heat shield products (Source: www.heatshielding.com; www.esterline.com)

를 위해서는 다양한 해석결과 검증이 필요함을 언급하였다. Heo(2011)는 복사열 차폐막의 차폐성능을 전산유체역학기법으

로 검증하기 위해 FPSO에서 가장 많이 적용되는 4종류의 복사열 차폐막에 대해 4.7kW/m² 및 10kW/m² 수준의 복사열유속에

대한 차폐성능을 실험을 통해 검증하였으며, Yi and Chin(2012), Bae and Chin(2013)은 메쉬(Mesh) 타입의 복사열 차폐막에 대해 태양열 복사열에 대한 차폐성능을 실험을 통해 확인한 바가 있다. Kim et al.(2014), 역시 3종류의 복사열 차폐막에 대해 4.7kW/m^2 및 10kW/m^2 수준의 복사열유속에 대한 차폐성능을 실험으로 검증한 바가 있고, Kim(2018)은 2종류의 복사열 차폐막에 대해 25kW/m^2 수준의 복사열유속에 대한 차폐성능을 전산유체역학기법으로 예측하고 실험결과와 비교하여 검증한 바가 있다. 그러나 수치해석적 기법으로 복사열 차폐막의 차폐성능을 실용적으로 예측하기 위해서는 아직 더 많은 추가 연구가 필요한 실정이며, 현재 산업체에서는 복수개의 복사열 차폐막을 제작하여 차폐성능을 실험을 통해 검증하고 그 결과를 바탕으로 차폐막을 제작하는 시행착오법을 적용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위해 복사열 차폐성능 실험결과(Heo, 2011; Kim et al., 2014; Kim, 2018)를 분석하

여 4.7, 10 그리고 25kW/m^2 수준의 열복사 전과 특성 및 평판과 다공판(Perforated plate) 타입의 복사열 차폐막에 대한 차폐성능 특성을 고찰하였다.

2. 복사열 차폐성능 실험

2.1 복사열 차폐성능 실험방법

Fig. 2는 선행 연구에서 보고된 복사열 차폐막의 차폐성능 실험을 위한 실험장치의 배치도를 보여주고 있다(Heo, 2011; Kim et al., 2014; Kim, 2018). 바퀴가 달린 2개의 프레임 중 한쪽에는 복사열 차폐막($1\text{m}\times 1\text{m}$)을 설치할 수 있는 지그와 할로겐 히터(직경 10mm, 18개)가 설치되어 있으며, 차폐막의 면에 일정한 복사열유속($4.7, 10$ 및 25kW/m^2)이 유지될 수 있도록 히터에 공급되는 전력량을 일정하게 조절할 수 있는 전원조절장치가 설치되어 있다. 반대편 프레임에는 Fig. 2와 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 차폐막면의 정중

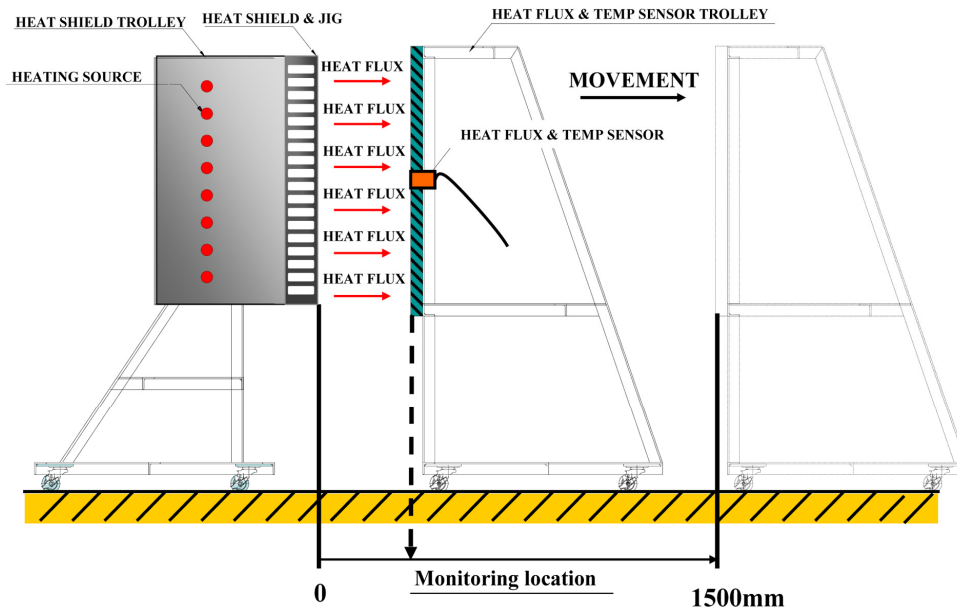


Fig. 2 Schematic diagram of the test setup

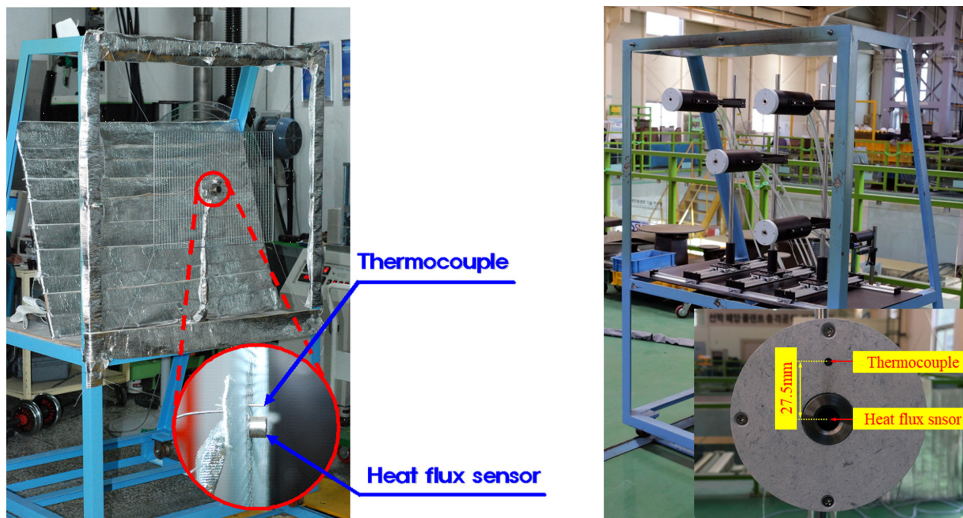


Fig. 3 The heat flux and temperature sensors (Left: Heo, 2011; Kim et al., 2014, Right: Kim, 2018)

양에서 복사열유속을 측정할 수 있도록 열유속 센서와 상하 일정 거리에 온도 센서가 설치되어 있으며, 프레임 하부에 설치된 레일 위를 따라 프레임을 앞뒤로 이동시켜 차폐막의 후면에서의 측정위치까지 이동이 가능하도록 제작되어 있다.

복사열 차폐막의 차폐성능은 동일한 측정위치에서 차폐막으로 인해 감소되는 복사열유속의 감소비율(Reduction ratio, R)로 나타내었으며 식 (1)과 같이 정의하고 있다.

$$R = 1 - (q_{w,s} / q) \quad (1)$$

여기서, q 는 차폐막이 없을 때의 복사열유속, $q_{w,s}$ 는 차폐막이 있을 때의 복사열유속으로 열유속 센서로 측정된 값이다.

실험 절차를 살펴보면 총 3단계로 나누어지는데, 첫번째 단계는 q 와 $q_{w,s}$ 를 측정하기 위해 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속을 설정하기 위해 전원조절장치의 전류량을 셋팅하는 작업을 수행하였다. 복사열 차폐막의 두께를 고려하여 차폐막 후면의 위치에 열유속 센서를 위치시키고 열유속 측정값이 실험조건(4.7, 10 및 25kW/m²)이 되도록 전원조절장치의 전류량을 조절하여 셋팅하는 것이다. 이때 복사열 차폐막은 설치되지 않으며 히터 및 주변의 지그 등이 열평형상태에 도달하여 복사열

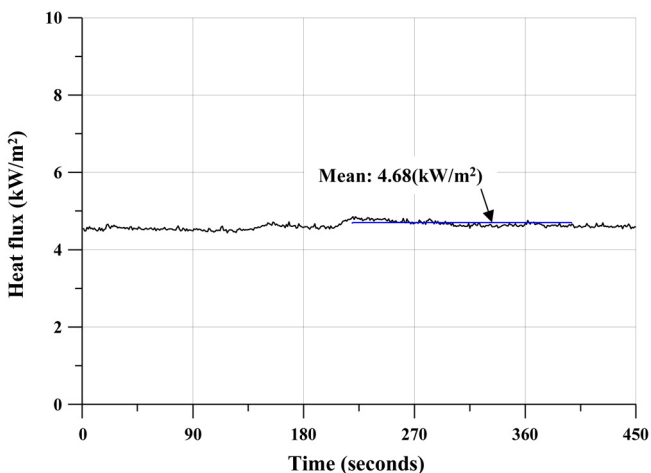


Fig. 4 Average radiant heat flux (Heo, 2011)

유속이 충분히 안정될 때까지 충분한 시간을 준 후, 열유속 센서의 측정 신호가 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 크게 요동치지 않고 안정화 되면 2-3분간 측정 데이터의 평균값을 사용하여 복사열 수준과 일치하는 실험 조건을 설정한다.

두번째 단계는 복사열 차폐막이 없을 때의 복사열유속 q 의 측정이다. 첫번째 단계를 통해 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속이 실험조건과 같아지면 열유속 센서를 각 측정위치(5, 10, 100, 250, 500, 750, 1000, 1500mm)로 이동시켜 Fig. 4와 같이 측정 데이터의 평균값으로 복사열유속을 측정한다.

세번째 단계는 복사열 차폐막이 있을 때의 복사열유속 $q_{w,s}$ 의 측정이다. 지그에 복사열 차폐막을 설치하고 첫번째 단계와 동일한 전원조절장치의 전류량 셋팅하고 복사열유속이 충분히 안정될 때까지 시간을 준 후 각 측정위치에 복사열유속을 측정한다.

2.2 복사열 차폐성능 실험결과

본 연구에서는 열복사 특성 및 복사열 차폐막의 차폐성능의 특성을 고찰하기 위해 선행 연구(Heo, 2011; Kim et al., 2014; Kim, 2018)에 의해서 수행된 복사열 차폐막에 대한 차폐성능 실험결과 중에서 유사한 기하학적 형상을 갖는 평판 및 다공판 타입의 복사열 차폐성능 실험결과를 분석하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 1m×1m 크기의 복사열 차폐막의 가장자리에는 시험장치의 지그에 차폐막을 설치하기 위한 사각 프레임이 제작되어 있으며, 차폐막은 SUS316L 판재를 사용하여 제작되었다. 실제 해양플랜트 설비의 경우, 부식에 강하고 유지관리에 유리한 스테인레스강을 사용하여 복사열 차폐막을 제작한다. 본 연구에서 사용된 SUS316L 재료의 주요특성은 Table 4와 같다.

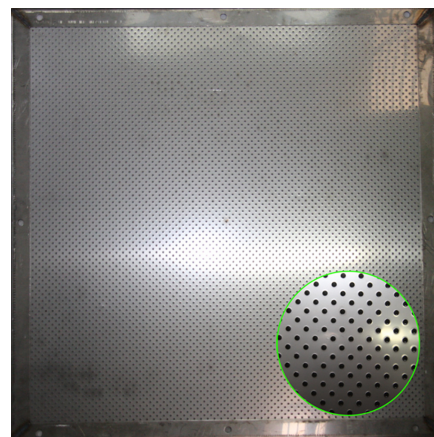
Table 5와 Table 6은 실험조건이 복사열 차폐막에 유입되는

Table 4 Physical properties of SUS316L

Property	Value
Density [kg/m ³]	7900
Specific heat [J/kg·K]	500
Thermal conductivity [W/m·K]	15
Elastic modulus [GPa]	197



(a) A flat plate-type radiant heat shield



(b) A perforated plate-type radiant heat shield

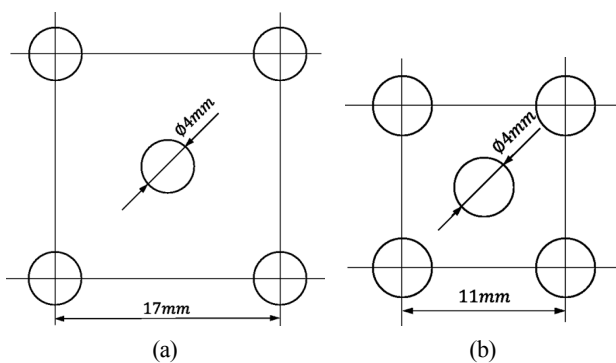
Fig. 5 Test specimens

Table 5 Heat flux measurements (4.7 kW/m^2) by Heo (2011)

Measurement location [mm]	Heat flux [kW/m^2]			Reduction ratio	
	q	q_{fp}	q_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	4.69	0.51	0.61	0.891	0.870
5	4.63	0.33	0.61	0.929	0.868
10	4.55	0.29	0.63	0.936	0.862
50	4.24	0.18	0.55	0.958	0.870
100	3.84	0.10	0.51	0.974	0.867
250	2.80	0.04	0.36	0.986	0.871
500	1.70	0.00	0.22	1.000	0.871
750	1.00	0.00	0.13	1.000	0.870
1000	0.60	0.00	0.08	1.000	0.867
1500	0.32	0.00	0.03	1.000	0.906

Table 6 Heat flux measurements (10 kW/m^2) by Heo (2011)

Measurement location [mm]	Heat flux [kW/m^2]			Reduction ratio	
	q	q_{fp}	q_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	10.18	1.07	0.80	0.895	0.921
5	10.06	1.08	0.76	0.893	0.924
10	10.03	1.03	0.76	0.897	0.924
50	9.30	0.85	0.70	0.909	0.925
100	8.36	0.75	0.65	0.910	0.922
250	6.14	0.53	0.48	0.914	0.922
500	3.77	0.32	0.27	0.915	0.928
750	2.33	0.20	0.17	0.914	0.927
1000	1.50	0.13	0.10	0.913	0.933
1500	0.83	0.07	0.03	0.916	0.964

**Fig. 6** A pattern of holes of perforated plate-type radiant heat shield

복사열유속이 각각 4.7 kW/m^2 , 10 kW/m^2 일 때의 실험결과를 보여주고 있다(Heo, 2011). 각 측정위치에서 복사열 차폐막이 없을 때 복사열유속(q)와 두께가 2 mm 인 평판 타입의 복사열 차폐막이 설치되었을 때의 복사열유속(q_{fp}), 두께가 1.2 mm 이고 Fig. 6(a)와 같이 17 mm 간격으로 직경 4 mm 의 원형구멍이 있는 다공판

타입의 복사열 차폐막이 설치되었을 때의 복사열유속(q_{pp}) 및 각 차폐막으로 인해 감소되는 복사열유속의 감소비(R_{fp} , R_{pp})를 보여주고 있다.

Table 7과 Table 8은 Kim et al.(2014)의 실험결과를 보여주고 있다. 실험조건은 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속이 각각 4.7 kW/m^2 , 10 kW/m^2 일 때이고, 매번 실험에서 복사열 차폐막이 없을 때 복사열유속을 측정하고 복사열 차폐막이 설치되었을 때의 복사열유속을 측정하여 제시하고 있다. 두께가 1 mm 인 평판 타입의 복사열 차폐막과 두께가 1 mm 이고 Fig. 6(b)와 같이 11 mm 간격으로 직경 4 mm 의 원형구멍이 있는 다공판 타입의 복사열 차폐막이 사용되었다.

Table 9는 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속이 25 kW/m^2 일 때의 실험결과를 보여주고 있다. 두께가 1 mm 인 평판 타입의 복사열 차폐막에 대한 실험결과(Kim, 2018)와 두께가 1 mm 이고 Fig. 6(b)와 같이 11 mm 간격으로 직경 4 mm 의 원형구멍이 있는 다공판 타입의 복사열 차폐막에 대한 추가 실험결과가 정리되었다.

각 측정위치에서 측정된 온도(T , T_{fp} , T_{pp}) 및 온도의 감소비(R_{fp} , R_{pp})도 같은 방법으로 Table 10에서 Table 14에 정리하였다.

Table 7 Heat flux measurements (4.7 kW/m^2) by Kim et al.(2014)

Measurement location [mm]	Heat flux [kW/m^2]				Reduction ratio	
	q	q_{fp}	q	q_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	4.726	0.270	4.701	1.206	0.943	0.743
5	4.617	0.221	4.638	1.184	0.952	0.745
10	4.502	0.186	4.567	1.185	0.959	0.741
50	4.156	0.126	4.271	1.148	0.970	0.731
100	3.670	0.100	3.860	1.017	0.973	0.736
250	2.460	0.061	2.797	0.780	0.975	0.721
500	1.245	0.018	1.734	0.469	0.986	0.730
750	0.646	0.000	1.047	0.331	1.000	0.684
1000	0.362	0.000	0.675	0.213	1.000	0.685
1500	0.053	0.000	0.355	0.115	1.000	0.656

Table 8 Heat flux measurements (10 kW/m^2) by Kim et al.(2014)

Measurement location [mm]	Heat flux [kW/m^2]				Reduction ratio	
	q	q_{fp}	q	q_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	10.175	1.076	10.097	2.631	0.894	0.739
5	10.070	0.866	10.063	2.704	0.914	0.731
10	9.992	0.720	9.946	2.636	0.928	0.735
50	9.520	0.470	9.395	2.588	0.951	0.725
100	8.625	0.411	8.595	2.275	0.952	0.735
250	6.227	0.279	6.300	1.781	0.955	0.717
500	3.883	0.153	3.873	1.131	0.961	0.708
750	2.398	0.080	2.425	0.753	0.967	0.690
1000	1.585	0.038	1.584	0.487	0.976	0.692
1500	0.772	0.004	0.779	0.247	0.995	0.682

Table 9 Heat flux measurements (25 kW/m²) by Kim (2018)

Measurement location [mm]	Heat flux [kW/m ²]			Reduction ratio	
	q	q_{fp}	q_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	25.100	-	-	-	-
10	23.950	2.909	9.048	0.879	0.622
50	22.675	2.477	6.698	0.891	0.705
100	21.045	2.358	6.125	0.888	0.709
250	16.196	1.766	5.268	0.891	0.675
500	10.496	1.131	3.495	0.892	0.667
750	6.855	0.750	2.329	0.891	0.660
1000	4.715	0.549	1.606	0.884	0.659
1500	2.579	0.357	0.918	0.861	0.644

Table 10 Temperature measurements (4.7 kW/m²) by Heo (2011)

Measurement location [mm]	Temperature [°C]			Reduction ratio	
	T	T_{fp}	T_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	63.55	36.52	29.75	0.425	0.532
5	62.20	33.80	29.23	0.457	0.530
10	61.47	34.54	29.27	0.438	0.524
50	60.08	33.39	29.21	0.444	0.514
100	56.16	27.25	29.03	0.515	0.483
250	45.90	26.00	27.44	0.434	0.402
500	36.27	25.18	25.89	0.306	0.286
750	31.06	24.21	25.52	0.221	0.178
1000	28.70	23.85	25.29	0.169	0.119
1500	27.53	23.84	25.18	0.134	0.085

Table 11 Temperature measurements (10 kW/m²) by Heo (2011)

Measurement location [mm]	Temperature [°C]			Reduction ratio	
	T	T_{fp}	T_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	95.05	33.59	26.51	0.647	0.721
5	95.47	34.11	26.33	0.643	0.724
10	94.97	33.82	26.37	0.644	0.722
50	90.92	32.90	25.93	0.638	0.715
100	83.96	31.43	25.33	0.626	0.698
250	67.06	30.07	23.74	0.552	0.646
500	49.21	27.76	23.39	0.436	0.525
750	30.08	27.05	24.79	0.101	0.176
1000	26.95	26.62	24.24	0.012	0.101
1500	26.28	26.04	24.04	0.009	0.086

Table 12 Temperature measurements (4.7 kW/m²) by Kim et al. (2014)

Measurement location [mm]	Temperature [°C]				Reduction ratio	
	T	T_{fp}	T	T_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	60.907	26.467	59.028	33.496	0.565	0.433
5	62.322	26.375	59.249	35.283	0.577	0.404
10	59.405	25.662	58.188	35.640	0.568	0.388
50	60.772	24.247	57.888	34.564	0.601	0.403
100	56.745	23.500	56.560	33.439	0.586	0.409
250	48.646	22.689	46.072	30.835	0.534	0.331
500	37.079	21.301	37.152	28.442	0.426	0.234
750	32.097	20.839	31.929	26.677	0.351	0.164
1000	29.692	20.280	28.663	25.895	0.317	0.097
1500	26.977	19.849	26.690	25.607	0.264	0.041

Table 13 Temperature measurements (10 kW/m²) by Kim et al. (2014)

Measurement location [mm]	Temperature [°C]				Reduction ratio	
	T	T_{fp}	T	T_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	95.136	46.987	93.085	47.250	0.506	0.492
5	94.064	42.242	93.335	47.905	0.551	0.487
10	92.473	36.282	90.336	48.606	0.608	0.462
50	86.354	29.375	84.555	47.051	0.660	0.444
100	78.127	26.753	83.148	45.086	0.658	0.458
250	60.217	24.788	64.329	40.388	0.588	0.372
500	46.065	24.153	48.466	35.024	0.476	0.277
750	37.351	23.717	39.481	30.927	0.365	0.217
1000	32.571	22.839	34.889	28.797	0.299	0.175
1500	28.044	22.135	30.329	27.429	0.211	0.096

Table 14 Temperature measurements (25 kW/m²) by Kim (2018)

Measurement location [mm]	Temperature [°C]			Reduction ratio	
	T	T_{fp}	T_{pp}	R_{fp}	R_{pp}
0	206.190	-	-	-	-
10	198.948	59.716	128.932	0.700	0.352
50	188.897	53.748	85.300	0.715	0.548
100	175.752	50.348	79.284	0.714	0.549
250	140.423	41.603	68.581	0.704	0.512
500	100.135	33.890	51.800	0.662	0.483
750	74.858	29.706	42.026	0.603	0.439
1000	59.229	27.600	36.435	0.534	0.385
1500	44.432	25.997	30.074	0.415	0.323

3. 열복사의 전파 특성 및 복사열 차폐막의 차폐성능 특성

본 장에서는 2장에서 기술한 실험결과를 고찰하여 해양플랜트 설비에서 널리 사용되는 평판 타입과 다공판 타입의 복사열 차폐막의 차폐성능 특성을 살펴보고자 한다. 먼저 복사열 차폐막이 없을 때 각 측정위치에서 측정된 복사열유속 측정자료를 도식화하여 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속의 전파 특성(열복사의 전파 특성)을 살펴보았으며, 평판 타입과 다공판 타입의 복사열 차폐막 설치로 인해 각 측정위치에서 감소되는 복사열유속의 감소비를 도식화하여 복사열 차폐막의 차폐성능 특성을 살펴보았다.

3.1 열복사의 전파 특성

열원에서 복사 현상을 통해 전파되는 열복사의 특성을 고찰하기 위해 복사열 차폐막이 없을 때 각 측정위치에서 측정된 복사열유속(q)을 Fig. 7과 같이 도식화하였다. 복사열유속은 차폐막이 없어도 측정위치에 따라 감소함을 알 수 있다. 측정된 복사열유속을 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속(q_0)로 무차원하여 살펴보면 q_0 의 크기에 따라 같은 측정위치에서 측정된 복사열유속이 다를 수 있다. 즉, q_0 가 높을수록 복사열유속이 더 멀리 전파됨을 확인할 수 있다. 복사열유속의 감소형태는 측정위치에 대해 지수함수 형태와 유사함을 알 수 있는데, Heo (2011)는 q_0 가 4.7kW/m^2 와 10kW/m^2 일 때의 열복사의 전파 특성을 식 (2)와 같이 실험결과를 바탕으로 제안한 바가 있다.

$$q = q_0 \times \exp(-0.002x) \tag{2}$$

여기서, x 는 측정위치를 나타내며, 열복사의 전파 거리이다. 즉, 제안된 식은 전파 거리에 따른 복사열유속의 비(q/q_0)가 $\exp(-0.002x)$ 로 열복사는 전파 거리에 따라 일정하게 지수 감소함을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 제안된 식은 q_0 가 25kW/m^2 인 경우, 열복사로 전파되는 복사열유속을 과소평가하고 있다. 각 q_0 에 대해 측정된 복사열유속을 각각 식 (3)과 같은 지수함수로 커브피팅해보면 계수 a 는 q_0 가 4.7kW/m^2 일 때는 -0.00220 , 10kW/m^2 일 때는 -0.00190 , 25kW/m^2 일 때는 -0.00171 로 q_0 가 증가할수록 a 도 같이 증가함을 알 수 있었다.

$$q = q_0 \times \exp(a \times x) \tag{3}$$

즉, q_0 가 증가하면 a 도 증가하여 전파 거리에 따른 열복사유속의 감소가 완만하게 되고, 더 멀리 열복사가 전파됨을 알 수 있다. 이는 Table 10에서 Table 14에 정리된 실험결과를 살펴보면, q_0 가 4.7kW/m^2 또는 10kW/m^2 일 때는 측정위치가 $1,500\text{mm}$ 에서는 상온과 큰 차이가 없는 온도가 측정되었으나, q_0 가 25kW/m^2 일 때는 같은 위치에서 온도가 상온과 차이가 큰 44.5°C 가 측정되었음을 보더라도 합당한 추정이라 사료된다.

따라서 열원에서 복사 현상을 통해 전파되는 열복사의 특성

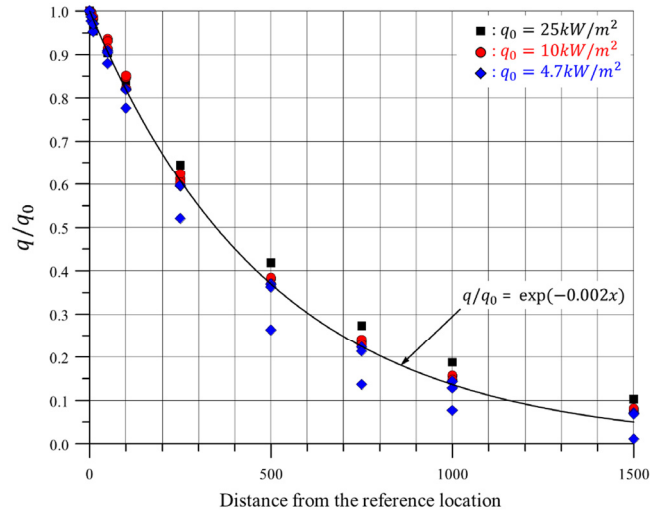


Fig. 7 Heat flux measurements without radiant heat shields

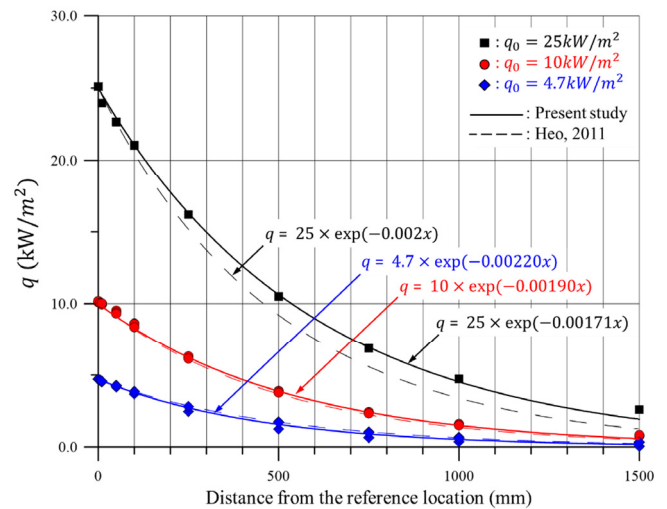


Fig. 8 Transmission characteristics of thermal radiation

은 전파 거리에 따라 지수함수 형태로 감소하며 복사열유속의 크기에 따라 감소 형태가 다를 수 있다.

3.2 복사열 차폐막의 차폐성능 특성

본 절에서는 복사열 차폐막의 차폐성능 특성을 고찰하고 있다. 식 (1)에서 정의되는 바와 같이, 동일한 측정위치에서 복사열 차폐막으로 인해 감소되는 복사열유속의 감소비율로 정의되는 차폐성능은 Table 5에서 Table 9에 평판 타입의 복사열 차폐막에 대해서는 R_{fp} , 다공판 타입의 복사열 차폐막에 대해서는 R_{fp} 로 정리가 되어 있으며, 각각 동일 측정위치에서 측정된 q 와 q_{fp} 또는 q_{pp} 로 계산되었다.

Fig. 9는 다공판 타입의 복사열 차폐막으로 인해 감소되는 복사열유속의 감소비율(R_{pp})을 도식화하여 보여주고 있다. 측정위치, q_0 그리고 식 (4)에 의해 정의되는 기공율(Porosity, A_p)에 따라 R_{pp} 가 다르게 나타남을 알 수 있다.

$$A_p = A_h/A \tag{4}$$

여기서, A_h 는 원형구멍의 면적, A 는 원형구멍이 없는 차폐막의 면적이다. Heo(2011)가 사용한 Fig. 6(a)와 같이 17mm 간격으로 직경 4mm의 원형구멍이 있는 다공판 타입의 복사열 차폐막의 경우, A_p 는 약 8.7%이고, 나머지 실험결과는 Fig. 6(b)와 같이 11mm 간격으로 직경 4mm의 원형구멍이 있는 다공판 타입으로 A_p 는 약 20.8%이다.

먼저, 측정위치에 따른 R_{pp} 의 변화를 자세히 살펴보면 차폐막 후면에서 멀어질수록 완만하게 변화하고 그 형태가 측정거리에 대해 선형적인 모습을 알 수 있다. 이를 선형함수 형태로 커브피팅해보면 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 차폐성능의 특성을 알 수 있는 선형식을 얻을 수 있다. 예를 들어, A_p 는 약 20.8%인 다공형 타입의 복사열 차폐막이 q_0 가 4.7kW/m²의 복사열유속을 차단하기위해 설치된 경우, 이 차폐막의 차폐성능 특성식은 $R_{pp} = -5.63E-05x + 0.740$ 이므로, 차폐막 후면($x=0$)에서의 차폐성능은 74%이고 차폐막 후면으로부터 1000mm 떨어진 곳에서는 차폐성능이 5.63%가 감소하여 68.4%가 됨을 알 수 있

다. 이 경우가 측정위치에 따른 차폐성능의 변화가 가장 큰 경우로 실험결과에서는 측정위치에 대한 차폐성능의 변화가 1,000mm 당 5.63%이하로 크지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 다공판 타입의 복사열 차폐막의 차폐성능 실험결과와 3.1절에서 도출한 열복사의 전파 특성식과 본 절에서 도출한 차폐성능 특성을 이용하여 비교하고 있다. 즉, 차폐성능 실험결과 q_{pp} 는 차폐막으로 인해 감소되고 남은 복사열유속이므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{pp} = q_0 \times \exp(a \times x) \times (1 - R_{pp}) \quad (5)$$

여기서, a 는 3.1절에서 도출한 q_0 가 4.7kW/m²일 때 -0.00220, 10kW/m²일 때 -0.00190, 25kW/m²일 때 -0.00171을 사용하였고, R_{pp} 는 차폐막의 차폐성능 특성식의 y 절편값만을 사용하였다. 즉, 차폐막 후면 한점($x=0$)에서의 차폐성능을 대표값으로 사용하였다. 다공판 타입의 차폐막의 차폐성능은 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 측정위치가 후면에서 멀어질수록 A_p 가 8.3%인 경우는 증가하고 A_p 가 20.8%인 경우는 반대로 감소하지만, 식 (5)는 실험결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이는 다공판 타입의 복사열 차폐막의 차폐성능을 차폐성능 특성식의 y 절편값으로 대표하여 나타낼 수 있음을 보여주는 것이다.

다공판 타입의 복사열 차폐막의 A_p 가 8.3%인 경우와 20.8%인 경우를 비교해보면, A_p 가 약 2.5배 증가하는 경우, q_0 가 4.7kW/m²일 때는 차폐성능이 86%에서 74%로 약 12% 감소하고, 10kW/m²일 때는 차폐성능이 92%에서 73%로 19% 감소하고 있다. 그리고 q_0 에 대해서 A_p 가 8.3%인 경우, q_0 가 4.7kW/m²에서 10kW/m²로 2.1배 증가하면 차폐성능은 86%에서 92%로 6% 증가하고, A_p 가 20.8%인 경우, q_0 가 4.7kW/m²에서 10kW/m²로 2.1배 증가하면 차폐성능은 74%에서 73%로 1% 감소하며, 4.7kW/m²에서 25kW/m²로 5.3배 증가하면 차폐성능은 74%에서 68%로 6% 감소하고 있다. 이는 다공판 타입의 복사열 차폐막의 차폐성능은 측정위치, A_p 와 q_0 중 A_p 에 가장 민감함을 알 수 있다. 그리고 q_0 가 증가할수록 차폐성능은 일반적으로 감소하는 경향을 보이는데 A_p 가 8.3%인 다공판 타입의 복사열 차폐막의 경우는, q_0 가 4.7kW/m²에서 10kW/m²로 2배 증가하였음에도 차폐성능은 6% 증가하였다. 이는 보다 다양한 A_p 에 대한 추가적인 실험과 연구 검토가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 11은 평판 타입의 복사열 차폐막으로 인해 감소되는 복사열유속의 감소비율(R_{fp})을 도식화하여 보여주고 있다. 측정위치, q_0 그리고 차폐막 두께(t_s) 따라 R_{fp} 가 다르게 나타남을 알 수 있다. q_0 가 증가할수록 R_{fp} 는 감소하지만 25kW/m²일 때에도 85%정도의 복사열유속을 차단하고 있어 다공판 타입의 복사열 차폐막보다 차폐성능이 우수함을 알 수 있다. 먼저, 측정위치에 따른 R_{fp} 의 변화를 살펴보면 차폐막 후면에 가까운 측정위치에서는 변화가 크게 발생하지만 100mm 이후부터는 다공판 타입의 복사열 차폐막과 유사하게 차폐막 후면에서 멀어질수록 완만하게 변화하고 그 형태가 측정거리에 대해 선형적인 모습을 알 수 있다. 측정위치가 10mm부터 1500mm에서의 R_{fp} 를 선형함수 형태로 커브피팅해보면 Fig. 11에서 보여주는 바와 같이

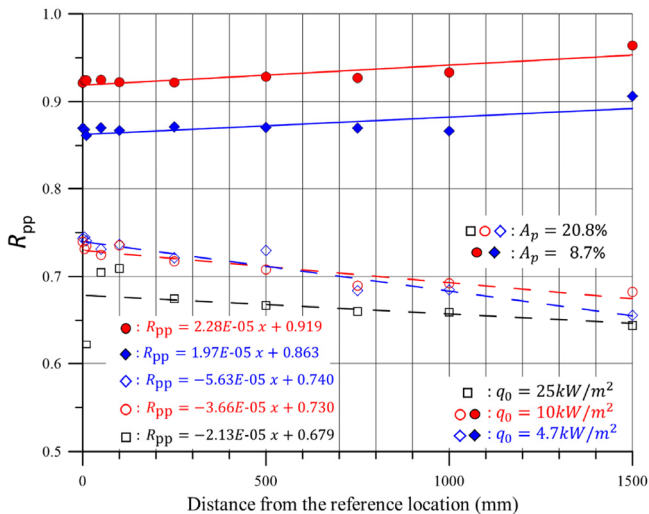


Fig. 9 The performance of perforated plate-type radiant heat shields

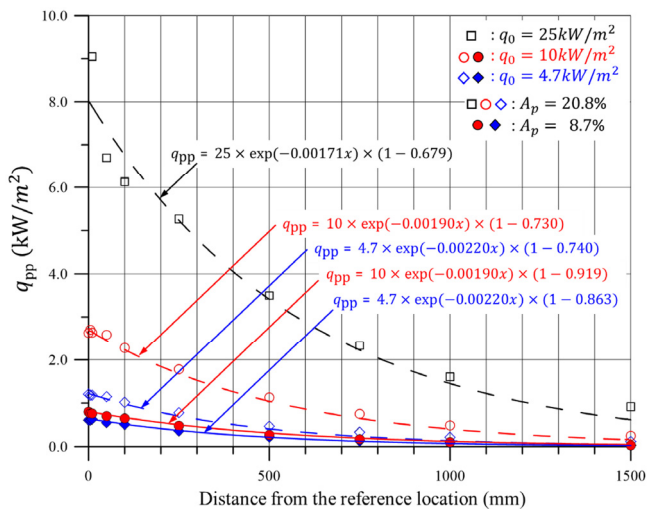


Fig. 10 Reduced radiant heat flux by perforated plate-type radiant heat shields

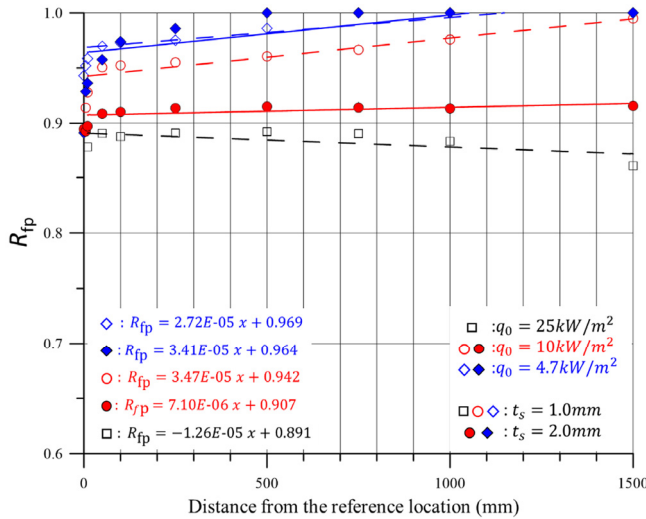


Fig. 11 The performance of flat plate-type radiant heat shields

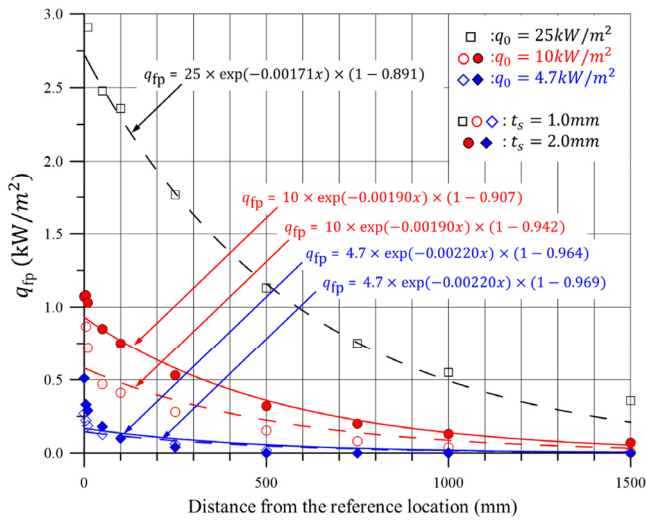


Fig. 12 Reduced radiant heat flux by flat plate-type radiant heat shields

차폐능의 특성을 알 수 있는 선형식을 얻을 수 있다.

Fig. 12는 평판 타입의 복사열 차폐막의 차폐능 실험결과와 상기에서 도출한 차폐능 특성을 식 (6)과 같이 적용하여 비교하여 보여 주고 있다.

$$q_{fp} = q_0 \times \exp(a \times x) \times (1 - R_{fp}) \tag{6}$$

여기서, a 는 3.1절에서 도출한 q_0 가 4.7kW/m²일 때 -0.00220, 10kW/m²일 때 -0.00190, 25kW/m²일 때 -0.00171을 사용하고, R_{fp} 는 차폐막의 차폐능 특성식의 y 절편값만을 사용하였다. 즉, 차폐막 후면 한점($x = 0$)에서의 차폐능을 사용하였다. 식 (6)은 측정위치가 50mm 이하인 경우에는 실험결과보다 복사열유속을 낮게 평가하고 있으며, 측정위치가 50mm 이상인 경우에는 복사열유속을 다소 크게 평가하고 있으나, 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 11에서 알 수 있듯이 측정위치가 50mm 이하인 구간에서는 R_{fp} 가 측정위치에 따라 급

격하게 변하고 있으며, 선형함수 형태로 도출된 차폐능 특성식은 이 구간에서 차폐능을 실험결과보다 높게 평가하고 있기 때문이다. 이 구간에서 복사열유속이 급격하게 변하는 특성은 평판 타입이 복사열 차폐막의 특징 중 하나로 추정되며 전산유체역학기법 및 추가 실험을 통해 연구 검토가 필요하다고 사료된다. 그렇지만 해양플랜트 산업에서 복사열 차폐막의 차폐능 검증은 일반적으로 차폐막 후면에서 200~300mm 떨어진 위치에서 차폐능을 검증하고 있으므로, 본 연구에서 제안하는 선형함수 형태로 도출된 차폐능 특성식의 y 절편값으로 평판 타입의 복사열 차폐막의 차폐능을 대표하는 방법은 산업현장에서 충분히 실용적으로 사용이 가능할 것으로 사료된다.

평판 타입의 복사열 차폐막의 두께가 1mm인 경우와 2mm인 경우를 비교해보면, q_0 가 4.7kW/m²일 때 차폐능이 97%에서 96%로 약 1% 감소하고 10kW/m²일 때 차폐능이 94%에서 91%로 약 3% 감소하고 있다. 그리고 q_0 에 대해서는 두께가 2mm인 경우, q_0 가 4.7kW/m²에서 10kW/m²로 2.1배 증가하면 차폐능은 96%에서 91%로 5% 감소하고, 두께가 1mm인 경우, q_0 가 4.7kW/m²에서 10kW/m²로 2.1배 증가하면 차폐능은 97%에서 94%로 3% 감소하며, 4.7kW/m²에서 25kW/m²로 5.3배 증가하면 차폐능은 97%에서 89%로 8% 감소하고 있다. 이는 평판 타입의 복사열 차폐막의 차폐능은 측정위치, 차폐막의 두께와 q_0 중 q_0 에 조금 더 민감함을 알 수 있다. 그리고 차폐막의 두께가 2mm인 경우가 1mm인 경우 보다 차폐능이 낮은 것과 측정위치가 50mm이하의 구간에서의 급격한 변화에 대해서는 추가적인 연구와 검토가 필요한 것으로 사료된다. 특히 평판 타입의 복사열 차폐막의 경우는 다공판 타입의 복사열 차폐막과 달리 복사열 에너지가 차폐막을 투과하여 전달되는 것보다 차폐막에 흡수되었다가 다시 복사되는 현상을 통해 전파되며, 열용량이 큰 두께가 2mm인 차폐막 후면의 복사열유속의 변화가 두께가 1mm인 경우보다 완만하고 차폐능이 낮게 측정되는 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해양플랜트 설비에서 작업자와 설비의 보호를 위해 설치되는 복사열 차폐막의 차폐능 특성을 실험결과 분석을 통해 고찰하였다. 먼저 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속이 각각 4.7, 10 그리고 25kW/m²일 때 열복사의 전파 특성을 분석하였고, 다공판 타입과 평판 타입의 복사열 차폐막의 차폐능 특성을 분석하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열원에서 복사 현상을 통해 전파되는 열복사의 특성은 전파 거리에 따라 지수함수 형태로 감소하고, 복사열유속이 클수록 더 멀리 전파됨을 알 수 있었다.
- (2) 열복사의 전파 특성은 식 (3)과 같이 추정할 수 있었고 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속(q_0)이 각각 4.7kW/m², 10kW/m², 25kW/m²일 때 a 는 각각 -0.00220, -0.00190, -0.00171임을 확인하였다.
- (3) 평판 타입과 다공판 타입의 복사열 차폐막의 차폐능은 측정위치, q_0 , 기하학적 형상(두께 또는 기공율)에 따라 다름을

확인하였으며, 측정위치에 대한 차폐성능의 변화를 선형함수로 커브피팅하여 y 절편값으로 대표적인 차폐성능으로 사용하여도 실용적으로 충분히 정도 있는 평가가 가능함을 확인하였다.

(4) 기하학적 형상에 따른 복사열 차폐막의 차폐성능은 평판 타입의 복사열 차폐막의 경우에는 두께가 증가하여도 차폐성능의 변화는 크지 않았으나, 다공판 타입의 복사열 차폐막의 경우에는 기공율 A_p 가 8.3%에서 20.8%로 약 2.5배 증가하면 q_0 가 4.7kW/m²일 때 차폐성능이 약 12%가 감소하고, q_0 가 10kW/m²일 때 차폐성능이 약 19% 감소하여 A_p 가 증가함에 따라 차폐 성능 저하가 현저하게 나타남을 확인 할 수 있었다.

(5) 복사열 차폐막에 유입되는 복사열유속(q_0)에 따른 복사열 차폐막의 차폐성능은 평판 타입의 복사열 차폐막의 경우는 q_0 가 4.7kW/m²에서 25kW/m²로 5.3배 증가하면 약 8%가 감소하고, 다공판 타입의 복사열 차폐막의 경우는 q_0 가 4.7kW/m²에서 25kW/m²로 5.3배 증가하면 약 6%가 감소하여 q_0 에 따른 복사열 차폐막의 차폐성능 저하는 두 타입 모두 비슷한 수준임을 확인 할 수 있었다.

복사열 차폐막의 설계 및 성능검증을 위해서는 여전히 많은 연구가 필요하다고 사료된다. 보다 다양한 차폐막에 유입되는 복사열유속(q_0)와 복사열 차폐막의 기하학적 특성을 고려한 연구가 필요하며, 수치해석적 기법을 활용하여 복사열 차폐막을 설계 및 검증하기 위해서는 실험적 연구를 통해 실험결과 확보가 절실하다. 이러한 관점에서 본 연구를 통해 얻은 열복사의 전파 특성 분석 및 다공판 타입과 평판 타입의 복사열 차폐막의 차폐성능 특성 분석 결과는 향후 추가적인 복사열 차폐막의 차폐성능 실험 및 관련 수치해석적 기법의 연구에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 교수국외장기파견지원비에 의하여 연구되었음

References

- American Petroleum Institute (API), 2014. API Standard 521: Pressure-relieving and Depressuring Systems. 6th Edition, API, Washington DC.
- Bae, C.I., Chin, D.H., 2013. A Study on the Thermal and Flow Characteristics of Sun Shield According to for Offshore Plant. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 15(2), 223-231.
- Health and Safety Executive (HSE), 2010a. Methods of Approximation and Determination of Human Vulnerability for Offshore Major Accident Hazard Assessment, Supporting Document to SPC/Tech/OSD/30 Version 3. [Online] Available at: <http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/spctecosd30.pdf> [Accessed May 2019].
- Health and Safety Executive (HSE), 2010b. Indicative Human Vulnerability to the Hazardous Agents Present Offshore for Application in Risk Assessment of Major Accidents, SPC/Tech/OSD/30 Version 3. [Online] Available at: <http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/> [Accessed May 2019].
- Heo, T.U., 2011. A Study on the Performance of Radiant Heat Shield for Offshore Plant (FPSO). Master Thesis, Pusan National University, Busan.
- Kim, D.Y., 2018. Numerical Study on Performance of Radiant Heat Shield for Offshore Production Facility. Master Thesis, Pusan National University, Busan.
- Kim, S.J., Park, S.I., Lee J.C., Seo, J.K., Kim, B.J., Ha, Y.C., Paik, J.K., Heo, T.U., 2014. Experimental Study of the Reduction of High Temperatures and Radiation using Heat Shields Associated with Flare Towers of Offshore Oil and Gas Platforms. *Ships and Offshore Structures*, 9(5), 540-549.
- Lee, J.H., Shin, J.G., Nho, I.S., 2002. Analysis of Radiative Heat Transfer and Thermal Stress in Flaring System of FPSO. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(1), 61-72. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2002.39.1.061>
- Yi, C.S., Chin, D.H., 2012. A Study on the Thermal and Flow Characteristics of Wind and Radiant Heat Shield for Offshore by using Mesh Screen. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 11(3), 166-173.

American Petroleum Institute (API), 2014. API Standard 521:

Heat Transfer Characteristics of Bulkhead Penetration Piece for A60 Class Compartment II: Fire Resistance Test for Piece Material and Insulation Types

Woo-Chang Park^{ID*} and Chang Yong Song^{ID*}

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Korea*

A60급 구획 적용 격벽 관통용 관의 열전달 특성 II: 관 재질 및 단열재 종류에 따른 방화시험

박우창^{ID*} · 송창용^{ID*}

*목포대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Ship and offshore plant fire accident 선박 및 해양플랜트 화재 사고, A60 class compartment A60급 구획, Bulkhead penetration piece 격벽 관통 관, Fire resistance test 방화 시험, Piece and insulation materials 관 및 단열재 재질

ABSTRACT: In the case of a fire accident on a ship or an offshore plant, the design of the bulkhead penetration piece must be verified via a fire test procedure (FTP), as specified by the Maritime Safety Committee (MSC). The purpose of this study is to verify both the numerical analysis results and the design specifications for penetration pieces that could be applied to the A60 class bulkhead division. In this study, the FTP was carried out in accordance with the test procedure prescribed in the MSC regulation. In order to review the fire resistance performance according to the material type, bulkhead penetration pieces for the FTP were made from brass, carbon steel for machine structures (S45C), and austenite stainless steel (SUS316). In addition, spray-type insulation and mechanical fastener-type insulation were applied to investigate the fire resistance performance according to the type of insulation. To verify the heat transfer numerical analysis results for the A60 class bulkhead penetrating piece from this test study, the design specifications of the penetrating piece material and the insulation type applicable to a ship and an offshore plant were identified.

1. 서 론

선박 및 해양플랜트 운용 시에 다양한 형태의 제어, 모니터링 및 통신용 케이블 등이 필요하게 되며, 이러한 케이블은 선내·외에 걸쳐 전 영역에 포설된다. 선박 및 해양플랜트 구조 특성상 여러 격벽(Bulkhead)이 배치되게 되는데, 이러한 케이블이 안전하게 설치 및 유지보수 되기 위해서 격벽 관통 관(Bulkhead penetration piece, BPP)의 설치가 요구된다. 특히 선박 및 해양플랜트에 화재가 발생하는 경우에 대비하여 해사안전위원회(Maritime Safety Committee, MSC)에서 규정한 화재시험절차(Fire test procedure, FTP)에 따라 적합한 BPP 설계의 방화성능을 실증해야 한다(MSC, 2010). BPP의 방화시험에서 MSC에 규정된 전용 시편(Structure steel core, SSC)의 설계 및 제작, 시험대상 BPP과 SSC와의 조립, 단열재(Insulation)의 선정, SSC의 화

염로(Furnace) 장착, 화염시험 및 분석 등의 일련의 과정들이 수행되며 높은 수준의 시험 노하우(Know-how)와 많은 시간과 비용 등이 요구된다.

선박 및 해양플랜트 분야에서 방화시험과 관련된 연구들이 수행되어 오고 있다. Yu et al.(2000)은 내화용 오일붐의 재질 자체에 대한 내화성을 평가하기 위한 전기로 시험과 실제 유층이 점화된 상황을 모사하는 수조시험 방법을 제시하였다. Grigonis et al.(2011)은 팽창성 화재 방지 코팅의 두께와 열에 노출된 시간 사이의 관계를 조사하기 위해 14가지 이상의 상이한 화재 방지 코팅 샘플에 대한 방화시험을 수행하였다. Choi et al.(2013)은 방화 덤퍼의 H-120급 방열성능 확보를 위하여 방화 덤퍼 블레이드의 방열 유무와 코팅 부위에 적용된 방열재의 두께를 변화시켜 120분 탄화수소 화재 조건의 내화 실험을 실시하였다. Choi et al.(2014)은 FRP 선박을 건조하는 19곳의 조선소를

Received 12 March 2019, revised 4 August 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Chang Yong Song: +82-61-450-2732, cysong@mokpo.ac.kr, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1098-4205>

© 2019, 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.

대상으로 선박 기관실의 난연성 향상을 위해 적용되는 재료의 종류를 조사하였고, 이들 재료를 이용하여 적층 또는 도포 형태의 14종의 시험체를 제작하여 국제해사기구에서 규정한 화염전파성시험 및 소방방재청에서 고시한 방염성능시험을 실시하고 그 결과를 비교하였다. Jang et al.(2014)은 해양플랜트용 H-120급 방화덤퍼의 열용력해석을 수행한 후 덤퍼 블레이드 및 코밍 방열에 대한 최적 조건을 도출하기 위해 코밍 노출면 방열 두께와 비노출면 방열 길이를 변수로 하여 내화실험을 통한 비노출면 방열재와 코밍 표면 온도를 측정하였다.

본 논문은 저자들이 수행한 기존 연구논문(Park et al., 2018)의 후속 연구로서 앞서 저자들이 수행하였던 A60급 구획에 적용될 수 있는 BPP의 설계와 과도 열전달 수치해석의 결과를 검증하기 위해 MSC에서 규정하고 있는 A60급 방화성능 검증에 대한 화재시험절차와 동일하게 시편의 제작, 온도조건 및 가열 시간 설정, 온도측정 및 분석방법을 준수하여 방화시험 연구를 수행하였다. 방화시험에 적용된 BPP는 앞서 저자들의 수치해석 연구에서 가장 경제성이 우수한 것으로 검토된 200mm 길이의 BPP를 대상으로 하였다. 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 BPP는 수치해석 연구와 동일하게 황동(Brass), 기계구조용 탄소강(S45C), 오스테나이트계 스테인레스 강(SUS316)의 재질로 각각 제작하여 방화시험을 수행하였다. 또한 단열재의 종류

에 따른 방화성능을 검토하기 위해 분무식 단열재(Spray type insulation)와 부착식 단열재(Mechanical fastener type insulation)를 각각 적용하여 방화시험을 수행하였다. 본 시험연구를 통해 A60급 BPP의 열전달 수치해석의 검증과 더불어 실질적으로 선박 및 해양플랜트에 적용 가능한 BPP와 단열재의 설계 사양을 검토하였다.

2. A60급 구획의 화재시험절차(FTP) 규정 (MSC, 2010)

MSC에서는 선박 및 해양플랜트 기자재의 방화성능을 일정한 규정에 따라 검증될 수 있도록 Resolution MSC.307(88) 상에 시편제작부터 시험방법에 이르기까지 상세한 내용을 명문화하고 있다. 선박 및 해양플랜트에 설치되는 구조나 의장품이 A60급 구획에 대한 방화성능을 만족하기 위해서는 60분 동안 규정된 화염온도 가열 상태에서 화염이 가해지는 면의 반대쪽에서 측정된 온도가 180°C 이하가 되어야 한다. 또한 시험과정 동안 화염이 가해지는 면의 반대쪽 시편과 단열재에서 발화가 발생하지 않아야 하고, 시편의 과도한 구조적 손상이 발생되지 않아야 한다. 격벽을 관통하는 관의 방화성능 검증시험용 시편은 실제 선박 및 해양플랜트의 설치 조건과 동일하게 평가될 수 있도록

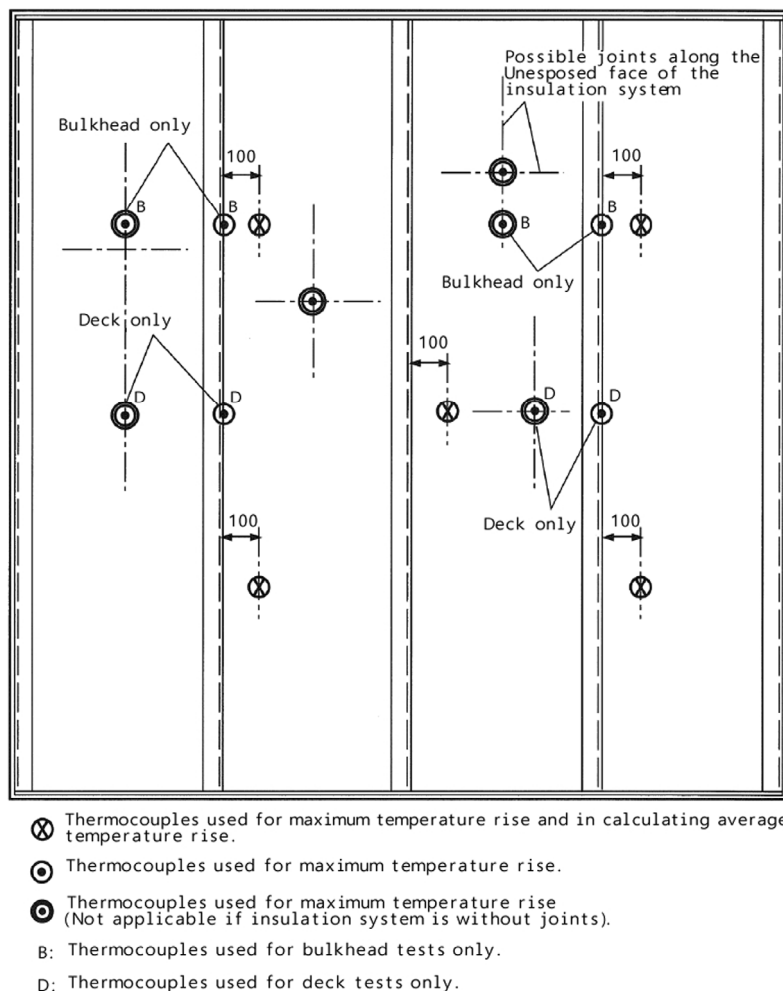


Fig. 1 Position of unexposed-face thermocouples for “A” class division (MSC, 2010)

단열재는 화염이 가해지는 면의 반대쪽 면에 도포되고 화염로에 수직으로 장착되어야 한다. A60급 격벽 구역에 대한 화재시험용 시편인 SSC는 강제로 된 용접 구조물로 제작되어야 하며 가로 2,440mm, 세로 2,500mm, 두께 4.5±0.5mm의 평판에 600mm 간격으로 (65±5)×(65±5)×(6±1)mm의 보강재가 배치되도록 설계되어야 한다. SSC는 열팽창에 대한 저항성이 보장될 수 있도록 1,600~2,400kg/mm³의 밀도를 갖는 두께 50mm 이상의 콘크리트 혹은 석조(Masonry) 형태의 화염로에 볼트로 체결되어야 한다. 온도측정센서(Thermocouple)는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 단열재가 화염이 가해지는 면의 반대쪽 면에 도포되는 격벽용 SSC의(B 측정위치) 경우 평균 및 최고 온도의 측정 목적과 단열재의 도포 방법에 따라 규정대로 부착되어야 하며, 시험시간 동안 1분 간격으로 온도가 측정되어야 한다. 본 연구에서는 동일한 사양의 온도측정센서를 MSC FTP code에서 규정하는 온도 측정 위치에 부착하여 SSC의 방화시험 조건을 구성하였다.

시험을 위한 대기온도는 10~35°C이며 화염로의 내부 평균 온도(T)는 다음의 조건식에 따라 제어되어야 한다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \tag{1}$$

여기서 t 는 분 단위의 시험 시간을 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 화염 시간에 대한 온도 곡선을 도출할 수 있다. 또한 안정적인 화염온도 조건을 유지하기 위해 격벽 SSC의 경우, 바닥 높이보

다 500mm 높은 곳에서 압력 값이 0이 되도록 화염로를 제어해야 한다.

3. A60급 BPP의 방화시험

3.1 방화시험 방법

본 연구에서는 수치해석 연구와 동일하게 A60급 BPP의 재질을 Brass, S45C, SUS316로 각각 적용하고, 단열재의 종류에 따른 방화성능을 검토하기 위해 분무식 및 부착식 단열재로 각각 적용한 SSC를 설계 및 제작하였다. 제작이 완료된 SSC를 KOLAS 공인시험기관에서 화염로에 수직으로 설치 및 A60급 BPP의 방화성능 시험을 수행하고 MSC FTP code의 온도 규정 만족여부를 검토하였으며, 기존 저자들이 수행한 연구논문(Park et al., 2018)의 과도열전달수치해석 온도분포 결과와 비교 검토하였다. 본 논문에서 수행된 일련의 A60급 BPP의 방화성능 시험 과정은 Fig. 2에 정리하여 도시하였다.

A60급 BPP의 방화성능 평가용 설비인 수직화염로는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 선박 및 해양플랜트용 A급 수직 방화 구획 구성재 등을 시험하는 장비로써 3,000mm×3,000mm 이상의 유효 가열면적이 적용되며, 측면에 배치된 버너를 통해 식 (1)의 시험 온도 곡선으로 화염로 내부 온도를 제어하여 방화 성능을 시험하게 된다(ISO, 1999).

본 연구에서 수행한 A60 BPP의 방화성능시험 시 수직화염로

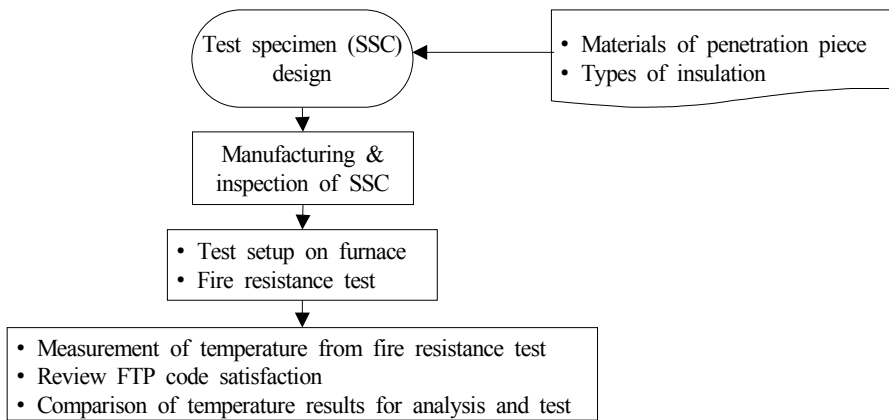


Fig. 2 Fire test flow of bulkhead penetration piece for A60 class compartment

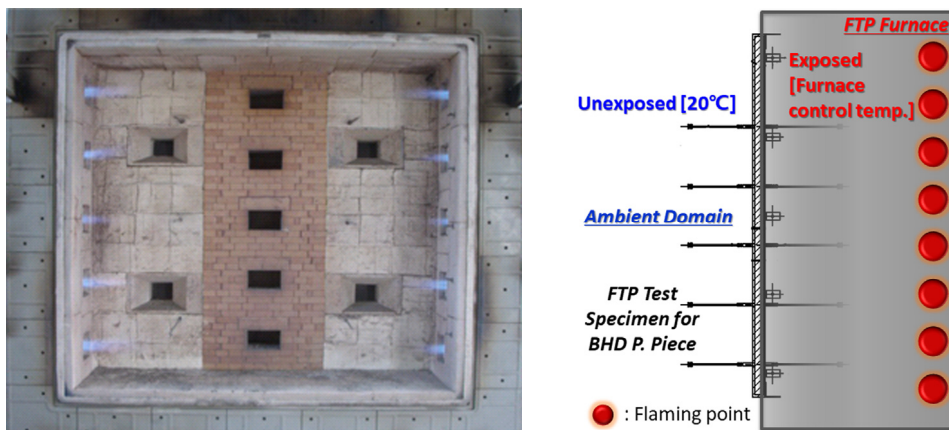


Fig. 3 Vertical furnace(left) and fire test condition(right) (Park et al., 2018)

Time/Temperature curve of the furnace

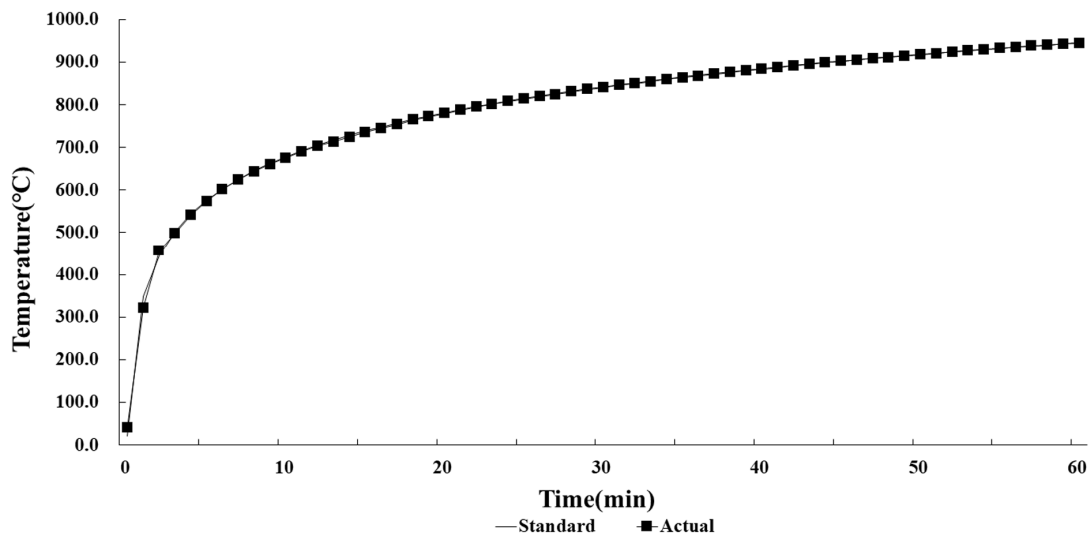


Fig. 4 Verification of time-temperature curve for furnace

내부의 실제 온도 측정결과(actual)와 ISO에서 규정하는 식 (1)의 시험 온도 곡선(standard)과의 비교 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 수직화염로 내부의 실제 온도와 ISO 규정 시험 온도 곡선 간의 차이는 거의 발생하지 않았으며, 방화시험 시 MSC. 307(88)에서 규정하는 화염로 내부 시험 온도 규정을 만족하였음을 확인 할 수 있다.

3.2 BPP의 재질에 대한 방화시험 결과

BPP의 재질별 시편은 과도 열전달 수치해석의 결과(Park et al., 2018)를 방화시험을 통해 검증하기 위해 동일한 설계사양으로 제작 하였다. 열전달 수치해석 연구와 동일하게 가장 경제성이 우수한 것으로 검토된 길이 200mm의 BPP를 대상으로 하여 직경 $\phi 8$ 의 튜브 및 직경 $\phi 18$ 의 소켓, 직경 $\phi 12$ 튜브 및 직경 $\phi 25$ 의 소켓의 조립체로 구성된 BPP를 사용 용도에 따라 튜브가 소켓 내부에서 단절된 절단형(Cutting type)과 튜브가 소켓 내부를 연속적으로 통과하는 관통형(Passing type)의 설계사양을 고

려하고, Brass, S45C, SUS316의 3가지 재질을 반영하여 총 10개의 BPP를 제작하였다. 강재로 구성된 SSC에 제작된 BPP를 조립한 후 분무식 단열재를 적용하여 방화시험용 SCC 조립체를 제작하였다. 분무식 단열재로 구성된 방화시험용 SCC 조립체와 BPP의 설계사양 조합은 Fig. 5와 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타나 있는 BPP의 직경 및 재질에 대한 사양 조합은 실제 조선소에서 적용 가능한 설계 사양의 조사를 통해 고려되었다. 1~5번의 BPP는 $\phi 8$ 튜브와 $\phi 18$ 소켓의 조립체로 구성하였고, 6~10번의 BPP는 $\phi 12$ 튜브와 $\phi 25$ 소켓의 조립체로 구성하였다.

튜브 재질이 황동인 경우 용접성 등의 이유로 소켓 재질을 S45C로 설정하였으며, 이외의 BPP는 튜브와 소켓의 재질을 동일하게 설정하였다. 또한 1~3번, 6~8번 BPP는 절단형으로 고려하였으며 4~5번 및 9~10번 BPP는 관통형으로 고려하였다.

Fig. 5와 Table 1에 나타나 있는 사양으로 실제 제작된 분무식 단열재 적용 방화시험용 SCC 조립체의 형상과 A60 방화시험 수행을 위해 수직화염로에 장착된 상태는 Fig. 6에 도시하였다.

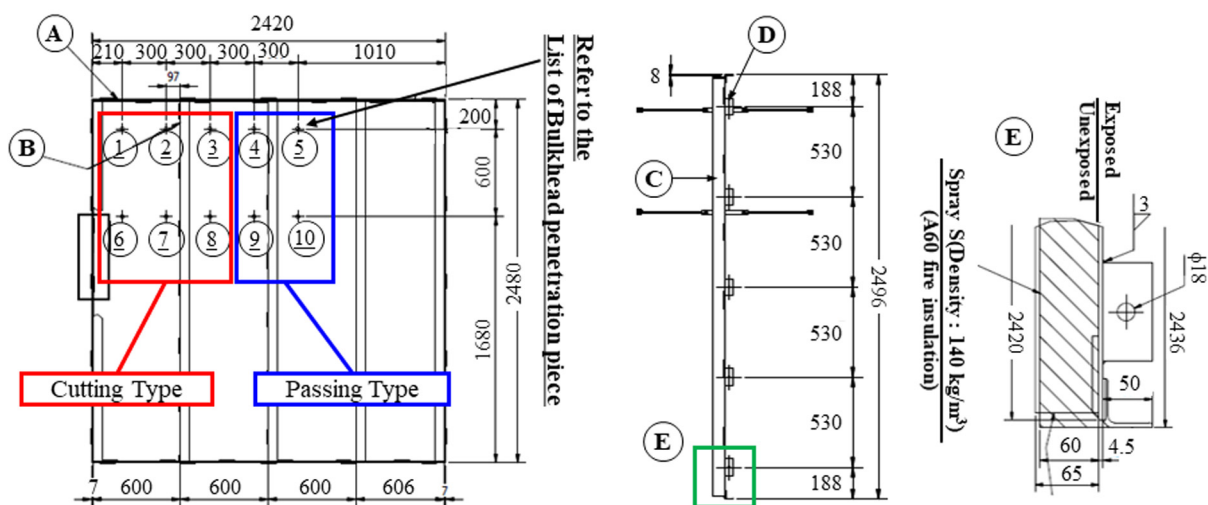


Fig. 5 Fire test specimen design for A60 class bulkhead penetration piece with spray type insulation (Park et al., 2018)

Table 1 Material type and main dimension of fire test specimen with spray type insulation

No.	Part Name	Main Dimension	Material Type	Piece type
1	Bulkhead penetration piece	φ18 Socket / (φ8 Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
2	Bulkhead penetration piece	φ18 Socket / (φ8 Tube)	S45C / Brass	Cutting type
3	Bulkhead penetration piece	φ18 Socket / (φ8 Tube)	S45C / S45C	Cutting type
4	Bulkhead penetration piece	φ18 Socket / (φ8 Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
5	Bulkhead penetration piece	φ18 Socket / (φ8 Tube)	S45C / S45C	Passing type
6	Bulkhead penetration piece	φ25 Socket / (φ12 Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
7	Bulkhead penetration piece	φ25 Socket / (φ12 Tube)	S45C / Brass	Cutting type
8	Bulkhead penetration piece	φ25 Socket / (φ12 Tube)	S45C / S45C	Cutting type
9	Bulkhead penetration piece	φ25 Socket / (φ12 Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
10	Bulkhead penetration piece	φ25 Socket / (φ12 Tube)	S45C / S45C	Passing type
A	Bulkhead plate	2420 × 2480 × 4.5 t	Mild Steel	-
B	Bulkhead stiffener	65 × 65 × 6 t	Mild Steel	-
C	Sealing	100 × 4.5 × 2420 L	Mild Steel	-
D	Mounting plate	80 × 80 × 4.5 t	Mild Steel	-
E	A60 fire insulation	60 t	Spray S	-



Fig. 6 Actual fire test specimen with spray type insulation(left) and installation on vertical furnace(right)

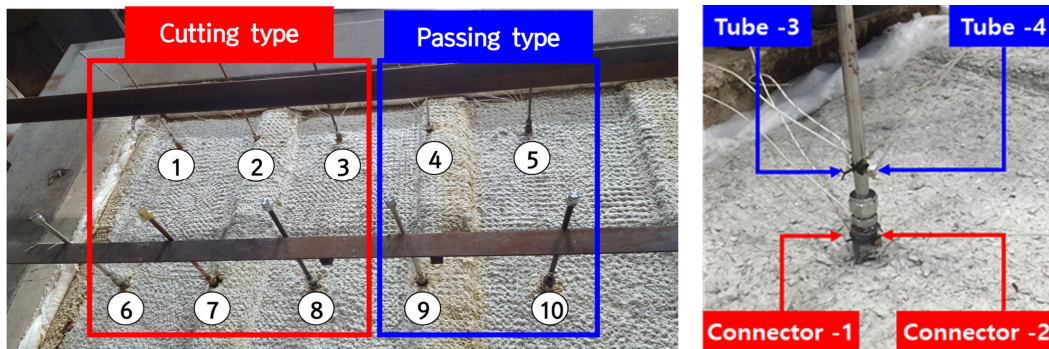


Fig. 7 Overall thermocouple locations(left) and detailed location(right)

BPP의 온도 측정 위치는 A60급 BPP의 열전달 수치해석 연구 (Park et al., 2018)와 동일하게 설정하였다. 온도 측정을 위한 온도센서 부착 설정사항은 Fig. 7에 자세히 나타내었다.

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 SSC의 보강재 위치에 분무된 단열

재의 높이로 인해 튜브에만 온도센서를 부착할 수 있는 경우인 2번, 4번, 7번, 9번 BPP는 2개의 온도센서를 튜브에 부착하였고, 이 외에 단열재 높이에 영향을 받지 않아 온도센서 부착에 제한이 없는 경우인 1번, 3번, 5번, 6번, 8번, 10번 BPP는 소켓에 2

개, 튜브에 2개씩 총 4개의 온도센서를 부착하였다. MSC.307 (88)에 규정된 시험절차에 따라 60분간 방화시험을 수행하면서 화염 비노출면에서 BPP의 온도를 측정하였고, 앞서 저자들이 수행하였던(Park et al., 2018) 과도 열전달 수치해석 결과를 검

증하기 위해 BPP 상의 온도센서 부착 위치 별 온도결과를 비교하여 Table 2에 나타내었다. 저자들이 수행하였던 기존 연구논문(Park et al., 2018)에서 과도열전달해석에 따른 화염 비노출면에서의 온도분포 결과는 Fig. 8에 도시하였다.

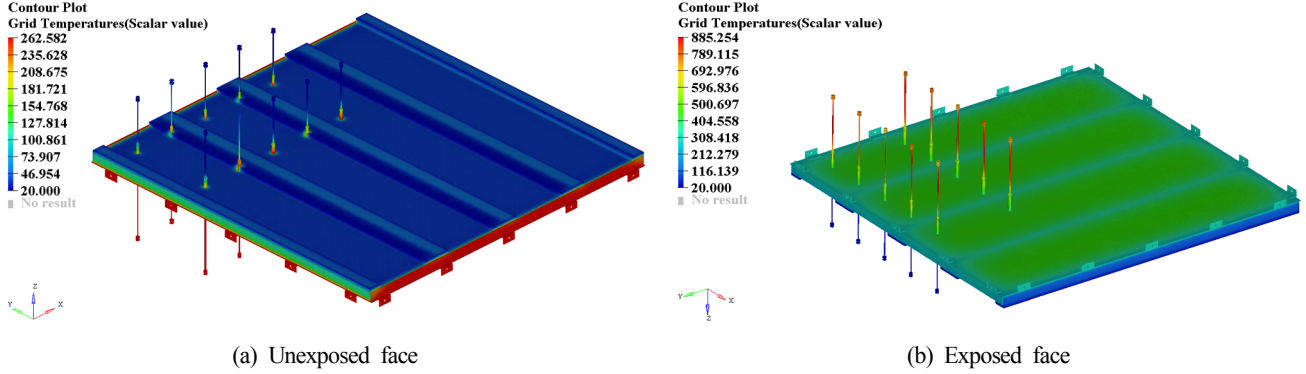


Fig. 8 Temperature distribution contour results(Park et al., 2018)

Table 2 Comparison of temperature results for analysis and test (Park et al., 2018)

BPP #	Measuring point #	Material type	Unexposed face		Error [%]	Remark	
			Temperature [°C]			Analysis	Test
			Analysis	Test			
1	1-1 (socket)	SUS316L	144.5	153.0	5.9	OK	OK
	1-2 (socket)	SUS316L	144.4	132.5	8.3	OK	OK
	1-3 (tube)	SUS316L	31.9	29.2	8.6	OK	OK
	1-4 (tube)	SUS316L	32.0	27.9	12.8	OK	OK
2	2-3 (tube)	Brass	169.7	196.7	15.9	OK	Fail
	2-4 (tube)	Brass	169.7	193.8	14.2	OK	Fail
3	3-1 (socket)	S45C	210.2	220.5	4.9	Fail	Fail
	3-2 (socket)	S45C	210.2	202.6	3.6	Fail	Fail
	3-3 (tube)	S45C	84.5	82.7	2.1	OK	OK
	3-4 (tube)	S45C	84.5	79.4	6.1	OK	OK
4	4-3 (tube)	SUS316L	102.3	115.3	12.7	OK	OK
	4-4 (tube)	SUS316L	102.3	109.9	7.4	OK	OK
5	5-1 (socket)	S45C	213.9	221.3	3.5	Fail	Fail
	5-2 (socket)	S45C	213.8	210.7	1.5	Fail	Fail
	5-3 (tube)	S45C	81.2	77.5	4.6	OK	OK
	5-4 (tube)	S45C	81.2	76.8	5.5	OK	OK
6	6-1 (socket)	SUS316L	165.8	191.6	15.6	OK	Fail
	6-2 (socket)	SUS316L	165.8	159.0	4.1	OK	OK
	6-3 (tube)	SUS316L	35.2	34.4	2.4	OK	OK
	6-4 (tube)	SUS316L	35.1	31.2	11.0	OK	OK
7	7-3 (tube)	Brass	186.4	218.4	17.2	Fail	Fail
	7-4 (tube)	Brass	186.4	213.4	14.5	Fail	Fail
8	8-1 (socket)	S45C	230.9	233.5	1.1	Fail	Fail
	8-2 (socket)	S45C	231.0	219.4	5.0	Fail	Fail
	8-3 (tube)	S45C	93.0	86.7	6.8	OK	OK
	8-4 (tube)	S45C	92.8	85.3	8.1	OK	OK
9	9-3 (tube)	SUS316L	108.7	97.0	10.7	OK	OK
	9-4 (tube)	SUS316L	108.7	96.3	11.4	OK	OK
10	10-1 (socket)	S45C	232.5	240.2	3.3	Fail	Fail
	10-2 (socket)	S45C	232.5	223.5	3.9	Fail	Fail
	10-3 (tube)	S45C	87.7	95.4	8.8	OK	OK
	10-4 (tube)	S45C	87.6	92.1	5.1	OK	OK

Table 2에 나타나 있는 바와 같이 방화시험 결과를 기준으로 과도열전달 수치해석의 온도결과 오차는 전체 측정위치에서 17.2% 미만으로 나타났으며, Brass 재질인 경우에 상대적으로 오차가 높은 것으로 나타났다. Brass 재질인 경우 과도열전달 수치해석 결과에서 절단형으로 설계된 2번 BPP는 규정 온도인 180°C 이하를 만족하고 관통형으로 설계된 7번 BPP는 규정 온도를 만족하지 못할 것으로 예측 하였으나, 방화시험에서 모든 형태의 BPP에서 규정 온도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. Brass 재질의 BPP에서 이와 같은 해석과 시험의 오차가 발생한 원인은 Fig. 9에 나타난 것처럼 방화시험 후 화염노출면에서 Brass 재질의 BPP가 용해되는 현상이 발생하였기 때문으로 사료된다. S45C 재질 BPP의 경우 과도 열전달 수치해석 결과와 동일하게 모두 경우에서 규정 온도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. SUS316L 재질 BPP의 경우 방화시험 결과에서 1번, 4번, 6번, 9번 BPP 중 6-1(Socket) 측정위치에서의 규정 온도인 180°C를 초과하는 것으로 나타났으며, 이러한 오차는 수치해석 상에서의 BPP와 단열재의 연결 형태와 방화시험에서의 실제 연결 형태의 차이에 기인 한 것으로 파악되어진다. 과도 열전달 수치해석에서 BPP와 단열재의 유한요소 모델은 절점(Node)을 공유하여 단열재와 BPP 간에 이격이 없는 이상적인 상태로 고려되나, 실제 제작된 방화시험용 SCC 조립체의 경우 일부 BPP와 단열재의 밀착이 잘 이루어지지 않아 오차가 발생한 것으로

판단된다. 그러나 전체적인 방화시험 온도 측정결과를 해석결과와 비교해보면 오차율이 크지 않았고, 방화시험에 소요되는 비용과 시간을 고려하면 사전에 과도 열전달 수치해석에 기반하여 설계 사양을 결정하는 것은 합리적인 접근 방법이라 할 수 있다. 방화시험 전·후의 재질에 따른 BPP의 상태를 각각 관찰하기 위해 화염 노출면에서의 BPP 형상을 Fig. 9에 비교하여 나타내었다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 Brass 재질인 2번, 7번 BPP에서 용해가 일어남으로 인해 Brass 재질의 온도 특성(MatWeb, 2019) 상 BPP의 소재로 적합하지 않은 것으로 나타났으며, S45C 재질인 3번, 5번, 8번, 10번 BPP에서 방화시험 후에 변형이 발생한 것을 알 수 있다. 한편 과도 열전달 수치해석 연구에서 가장 합리적인 A60 BPP의 설계 사양으로 판단했던 SUS316L 재질인 1번, 4번, 6번, 9번 BPP는 방화시험 전후의 형상이 거의 동일하게 유지되는 것으로 나타났다.

3.3 단열재의 특성에 대한 방화시험 결과

A60급 BPP용 단열재의 종류에 따른 방화성능을 검토하기 위해 부착식 단열재를 추가로 적용하여 방화시험 시편을 설계 및 제작하였다. 부착식 단열재는 선박 및 해양플랜트의 방화용 단열재로 주로 적용되고 있는 W-212-II Hi Wool을 고려하였다. 부착식 단열재 적용 BPP의 방화시험에서는 앞서의 분무식 단열재

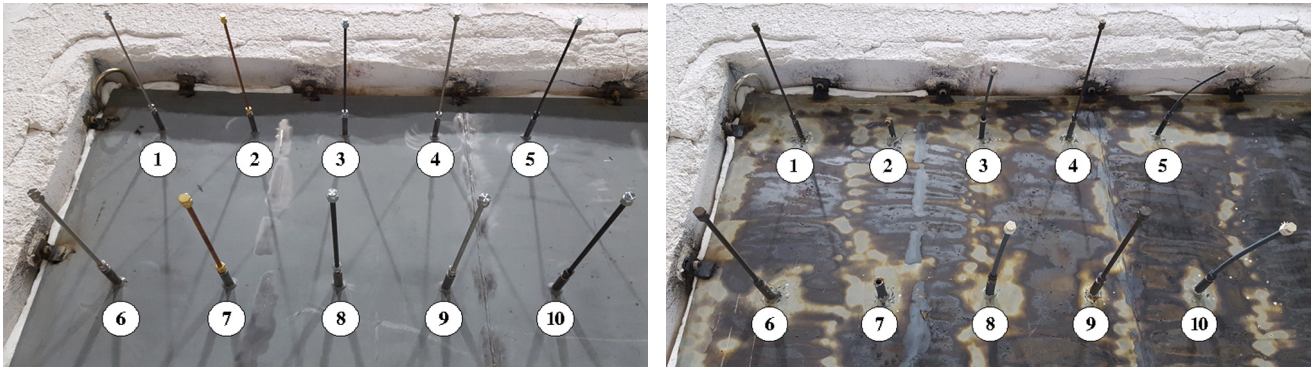


Fig. 9 Bulkhead penetration piece status before fire test(left) and after(right)

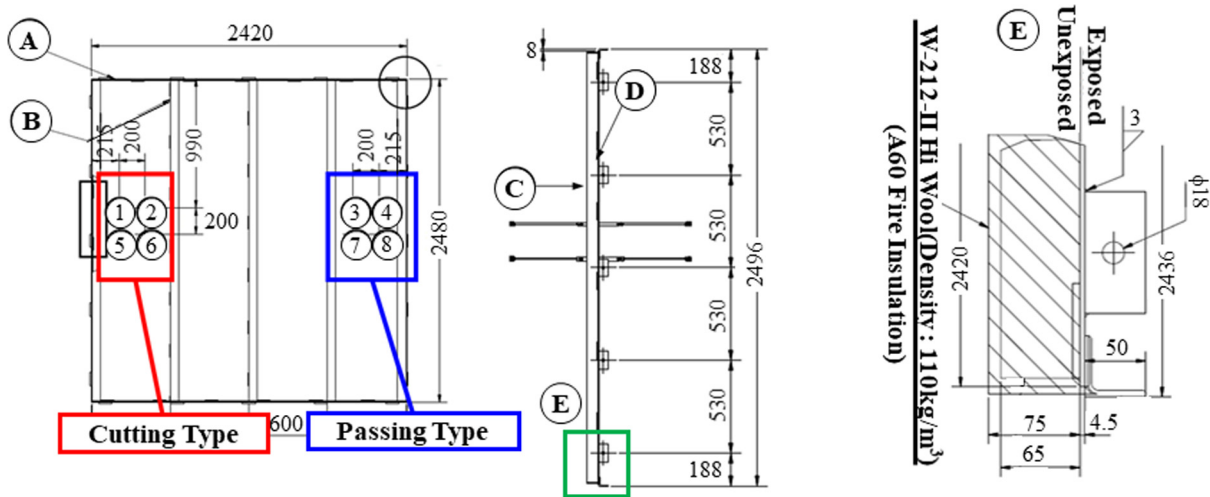
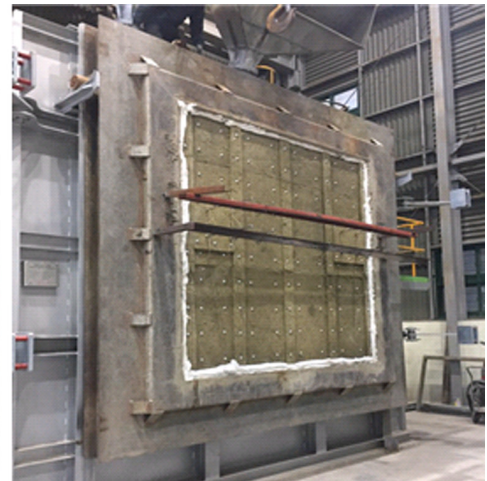
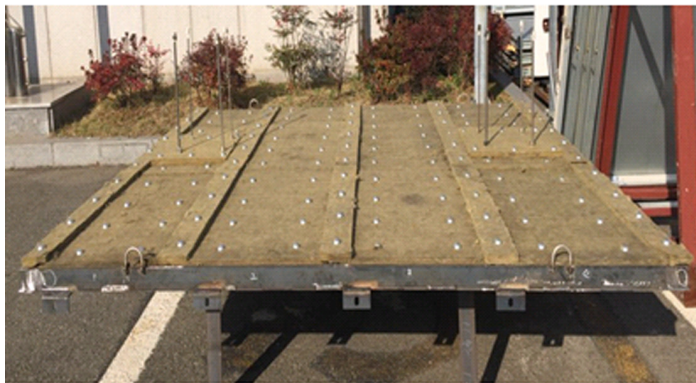


Fig. 10 Fire test specimen design for A60 class bulkhead penetration piece with mechanical fastener type insulation (Park et al., 2018)

Table 3 Material type and main dimension of fire test specimen with mechanical fastener type insulation

No.	Part name	Main dimension	Material type	Piece type
1	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / S45C	Cutting type
2	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
3	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / S45C	Passing type
4	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
5	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / S45C	Cutting type
6	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
7	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / S45C	Passing type
8	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
A	Bulkhead plate	2420 × 2480 × 4.5 t	Mild Steel	-
B	Bulkhead stiffener	65 × 65 × 6 t	Mild Steel	-
C	Sealing	65 × 6 × 2420 L	Mild Steel	-
D	Mounting plate	50 × 50 × 100 L × 5 t	Mild Steel	-
E	A60 fire insulation	75 t	W-212-II Hi Wool	-

**Fig. 11** Actual fire test specimen with mechanical fastener type insulation(left) and installation on vertical furnace(right)

적용 BPP의 방화시험에서 Brass 재질 BPP가 용해 되었기 때문에 Brass 재질 BPP를 제외하고 시편을 설계 및 제작하였다. 부착식 단열재가 적용된 방화시험용 SCC 조립체의 설계사양은 Fig. 10과 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타나 있는 것처럼 Brass 재질 BPP를 제외하고 S45C와 SUS316L 재질은 분무식 단열재 적용 BPP의 방화시험용 시편과 동일하게 설계 및 제작하였다. 1~4번의 BPP는 $\phi 8$ 튜브와 $\phi 18$ 소켓의 조립체로 구성하였고, 5~8번의 BPP는 $\phi 12$ 튜브와 $\phi 25$ 소켓의 조립체로 구성하였으며, BPP는 튜브와 소켓의 재질을 동일하게 설정하였다. 또한 1~2번, 5~6번 BPP는 절단형으로 고려하였으며 3~4번 및 7~8번 BPP는 관통형으로 고려하였다.

Fig. 10과 Table 3에 나타나 있는 사양으로 실제 제작된 부착식 단열재 적용 방화시험용 SCC 조립체의 형상과 A60 방화시험 수행을 위해 수직화염로에 장착된 상태는 Fig. 11에 나타내었다.

부착식 단열재를 적용한 경우의 방화시험을 수행하기 전에 분무식 단열재와의 시공 상 특성을 비교하기 위해 Fig. 12와 같이 BPP 조립위치에서 상세 형상을 관측하였다.

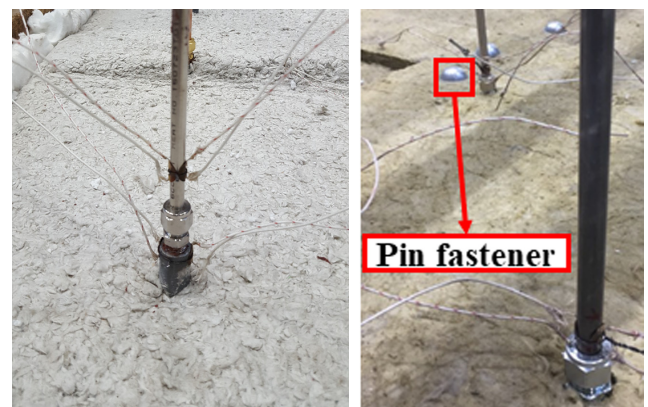
**Fig. 12** Insulation assembly characteristics in spray type(left) and mechanical fastener type(right)

Fig. 12 좌측에 나타난 바와 같이 분무식 단열재는 울(Wool)의 형태로 이루어진 단열재를 접착성분과 함께 분무하여 시공하는 단열재로써 BPP의 조립 형상에 영향을 받지 않아 울 형태

Table 4 Comparison of temperature results for insulation type

Spray type insulation					Mechanical fastener type insulation				
BPP #	Measuring point #	Material	Temperature [°C]	Remark	BPP #	Measuring point #	Material	Temperature [°C]	Remark
1	1-3 (tube)	SUS316L	29.2	OK	2	2-3 (tube)	SUS316L	199.7	Fail
	1-4 (tube)	SUS316L	27.9	OK		2-4 (tube)	SUS316L	181.7	Fail
3	3-3 (tube)	S45C	82.7	OK	1	1-3 (tube)	S45C	231.2	Fail
	3-4 (tube)	S45C	79.4	OK		1-4 (tube)	S45C	217.4	Fail
4	4-3 (tube)	SUS316L	115.3	OK	4	4-3 (tube)	SUS316L	225.4	Fail
	4-4 (tube)	SUS316L	109.9	OK		4-4 (tube)	SUS316L	209.7	Fail
5	5-3 (tube)	S45C	77.5	OK	3	3-3 (tube)	S45C	229.1	Fail
	5-4 (tube)	S45C	76.8	OK		3-4 (tube)	S45C	198.4	Fail
6	6-3 (tube)	SUS316L	34.4	OK	6	6-3 (tube)	SUS316L	155.1	OK
	6-4 (tube)	SUS316L	31.2	OK		6-4 (tube)	SUS316L	155.1	OK
8	8-3 (tube)	S45C	86.7	OK	5	5-3 (tube)	S45C	245.0	Fail
	8-4 (tube)	S45C	85.3	OK		5-4 (tube)	S45C	244.4	Fail
9	9-3 (tube)	SUS316L	97.0	OK	8	8-3 (tube)	SUS316L	216.9	Fail
	9-4 (tube)	SUS316L	96.3	OK		8-4 (tube)	SUS316L	203.5	Fail
10	10-3 (tube)	S45C	95.4	OK	7	7-3 (tube)	S45C	245.4	Fail
	10-4 (tube)	S45C	92.1	OK		7-4 (tube)	S45C	230.0	Fail

의 단열재에 비해 밀착되어 시공되어 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 12 우측에 나타난 부착식 단열재는 미네랄 울 (Mineral wool)을 판(Plate)형태로 제작하여 필요한 길이만큼 절단하고 이를 핀으로 고정시키는 형태로써 단열재 고정용 핀을 격벽에 미리 용접해야 하는 준비과정이 필요하고, BPP의 조립부에서 완전한 밀착을 보장하기 어려운 것으로 나타났다. Table 4에는 MSC.307(88)에 규정된 시험절차에 따라 60분간 방화시험을 수행하면서 부착식 단열재가 적용된 A60급 BPP의 화염 비노출면에서 온도를 측정하였고, 분무식 단열재의 결과와 비교하였다.

Table 4에 나타난 것처럼 부착식 단열재가 적용된 A60급 BPP의 규정 온도 만족 여부를 살펴보면 SUS316L 재질의 튜브 사이즈 $\phi 12$ 이며 절단형인 6번 BPP만 규정 온도를 만족하는 것으로 나타났다. 전체적으로 60분 후 최종 측정 온도를 비교해 보면 부착식 단열재가 적용된 BPP에서 최소 약 2배에서 최대 약 7배의 온도 편차가 관측되었다. 이러한 원인은 Fig. 12에서 살펴본 바와 같이 부착식 단열재가 적용된 경우 BPP의 조립부에서 단열이 완전히 이루어지지 못하여 발생한 것으로 파악된다. 부착식 단열재를 적용할 경우 BPP의 조립부에서 완전한 밀착을 보장할 수 있는 기술개발이 필요함을 알 수 있다. A60급 BPP와 같은 형상에 분무식 단열재를 적용할 경우 부착식 단열재에 비해 BPP의 형상에 따른 제약조건이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 분무식 단열재의 시공성이 평균적으로 우수하고, BPP의 방화시험에서 최종 온도분포를 비교하였을 때 분무식 단열재를 시공한 BPP의 전체적인 온도가 현저히 낮게 나타나는 것으로 보아 실질적으로 선박 및 해양플랜트의 A60급 BPP에는 분무식 단열재를 적용 하는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 앞서 저자들이 수행하였던 A60급 구획에 적용될 수 있는 BPP의 설계와 과도 열전달 수치해석의 결과를 검증하기 위해 MSC에서 규정하고 있는 A60급 방화성능 검증에 대한 화재시험절차와 동일하게 시편제작, 온도조건 및 가열시간 설정, 온도측정 및 분석방법을 준수하여 방화시험을 수행하였다. 방화시험에 적용된 BPP의 설계사양은 앞서의 수치해석 연구에서 가장 경제성이 우수한 것으로 검토된 길이 200mm를 기준으로 설정 하였다. BPP 재질에 따른 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 수치해석 연구와 동일하게 Brass, S45C, SUS316L의 재질로 각각 BPP를 제작하여 방화시험을 수행하였다. 방화시험 결과로부터 Brass 재질인 경우 화염노출부에서 용해가 발생하여 BPP의 사양으로 적합하지 않음을 검증하였고, S45C 재질인 경우 과도한 열변형이 발생하였으며 과도 열전달 수치해석에서 예측한 바와 같이 모두 규정 온도를 만족하지 못한 것으로 나타났다. 과도 열전달 수치해석에서 가장 합리적인 A60 BPP 설계 사양으로 판단되었던 SUS316L 재질인 경우 외관상 변형이 거의 발생하지 않았으며, BPP 6번의 1개의 측정부를 제외하고 모두 규정온도를 만족하는 것으로 나타났다. 재질별 BPP에 대한 전체적인 방화시험 온도 측정결과를 과도 열전달 해석결과와 비교해보면 오차율이 크지 않았고, 방화시험에 소요되는 비용과 시간을 고려하면 사전에 과도 열전달 수치해석을 통해 A60급 BPP의 설계 사양을 결정하는 것은 합리적인 접근 방법이라 할 수 있다. 단열재의 종류에 따른 방화시험 결과로부터 부착식 단열재가 적용된 경우 SUS316L 재질의 튜브 사이즈 $\phi 12$ 이며 절단형인 6번 BPP만 규정 온도를 만족하였고,

이외의 설계사양은 모두 규정을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. A60급 BPP와 같은 형상에 분무식 단열재를 적용할 경우 부착식 단열재에 비해 BPP의 형상에 따른 제약조건이 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 분무식 단열재의 시공성이 평균적으로 우수하고, BPP의 방화시험에서 최종 온도분포를 비교하였을 때 분무식 단열재를 시공한 BPP의 전체적인 온도가 현저히 낮게 나타나는 것으로 보아 실질적으로 선박 및 해양플랜트의 A60급 BPP에는 분무식 단열재를 적용 하는 것이 타당하다고 판단되었다. 저자들은 추후 부착식 단열재의 형상 제약사항을 개선할 수 있는 설계방안의 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 위기지역 Scale-up R&D 사업, 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 ‘해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발’ 과제, 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 친환경스마트선박 R&D 전문인력양성사업의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

References

- Choi, J.M., Um, H.C., Jin, Y.H., 2014. Comparison on the Fire Performance of Additional Insulation Materials for Improving the Fire Retardancy in Engine-room of FRP Vessel. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 38(9), 1150-1155. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.9.1150>
- Choi, T.J., Kim, J.S., Choi, K.K., Lim, Y.S., Kim, Y.T., 2013. An Experimental Study on the Fireproof of Fire Damper in Accordance with Insulation Conditions on the Coaming and Blade. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 37(4), 431-437. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.4.431>
- Grigonis, M., Maciulaitis, R., Lipinskas, D., 2011. Fire Resistance Tests of Various Fire Protective Coatings. *Materials Science*, 17(1), 93-98.
- International Organization for Standardization (ISO), 1999. Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction. ISO 834-1, Switzerland.
- Jang, C.J., Hur, N.S., Kim, I.W., 2014. Performance Experiment of H-120 Class Fire Damper for Offshore. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 13(2), 131-136. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.2.131>
- MatWeb, 2019. Overview of materials for Brass. [Online] Available at : <<http://www.matweb.com/>> [Accessed 14 January. 2019].
- MSC, 2010. Adoption of the International Code for Application of Fire Test Procedures. MSC.307(88), UK.
- Park, W.C., Song, C.Y., Na, O.G., 2018. Heat Transfer Characteristics of Bulkhead Penetration Piece for A60 Class Compartment I: Transient Thermal Analysis for Piece Design. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(5), 310-323. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.6.32.5.310>
- Yu, J.S., Sung, H.G., Oh, J.H., 2000. An Experimental Study on Fire-Resistant Boom. *Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*, 3(2), 25-32.

Experimental Study on Reducing Motion of Circular Cylinder in Currents

Jae Hwan Lim^{ID*}, Hyo Jae Jo^{ID**}, Jae Hyuk Hwang^{ID**}, Jae Heui Kim^{ID**},
Tae Kyung Lee^{ID**}, Yoon Woo Choi^{ID**}, Min Jun Lee^{ID**} and Young Kyu Kim^{ID**}

^{*}Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

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

조류 중 원형실린더 형상 구조물의 거동감소를 위한 실험적 연구

임재환^{ID*} · 조효제^{ID**} · 황재혁^{ID**} · 김재희^{ID**} · 이태경^{ID**} · 최윤우^{ID**} · 이민준^{ID**} · 김영규^{ID**}

^{*}한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

^{**}한국해양대학교 조선해양시스템공학전공

KEY WORDS: Circular cylinder 원형실린더, VIM(Vortex induced motion)와 유기 운동, String 줄, In-line response 흐름 방향 응답, Cross flow response 흐름 직각 방향 응답, Model test 모형실험

ABSTRACT: The development of marine technology is expected to increase the demand for marine plants because of increasing oil prices. Therefore, there is also expected to be an increase in the demand for cylindrical structures such as URF (umbilical, riser, flowline) structures and spars, which are used operating in various seas. However, a cylindrical structure experiences vortex induced motion (VIM) in a current. In particular, for risers and umbilicals, it is important to identify the characteristics of the VIM because interference between structures can occur. In addition, various studies have been conducted to reduce VIM because it is the cause of fatigue damage to structures. The helical strake, which was developed for VIM reduction, has an excellent VIM reduction performance, but is difficult to install on structures and has a negative effect on heave motion. Therefore, the purpose of this study was to supplement the shortcomings of the helical strake and develop a high-performance reduction device. In the reduction device developed in this study, a string is placed around the structure inside the flow, causing vibration. The vibration of this string causes a small turbulence in the flow field, reducing the VIM effect on the structure. Finally, in this study, the 2-DOF motion characteristics of models without a suppression device, models with a helical strake, and models with a string were investigated, and their reduction performances were compared through model tests.

1. 서 론

최근 지속적인 유가상승으로 인하여 해양플랜트 산업의 회복에 대한 기대감이 높아지고 있고, 이에 따른 다양한 해양구조물들의 수요 또한 증가할 것이라 예상된다. 실제로 해양구조물들은 제작비용이 고가일 뿐만 아니라 유지·보수에도 상당한 비용이 필요하다. 하지만 무엇보다 중요한 것은 2010년 GOM(Gulf of Mexico)에서 발생한 Deepwater horizon의 폭발사고와 같은 해양사고가 반복되지 않도록 해양구조물의 신뢰성 있는 설계가 필요하다. 그리고 최근 심해 해양자원 개발의 확대에 인하여 설치해역이 심해로 이동하고 있는 추세이다. 심해에서의 생산과 시추는 더 많은 부하와 스트레스를 유발하기 때문에 추가적인

엔지니어링 기술이 더욱 중요해지고 있다.

일반적으로 부유식 구조물을 대표하는 Spar, 시추를 위한 Riser, 수송을 위해 사용되는 Pipeline 등의 해양구조물은 기본적으로 원형실린더 형상을 지니고 있다. 이러한 원형실린더 형상의 구조물들은 일정한 속도 이상의 조류가 흐르는 경우, 후류에서 급격한 구배 변화로 인한 규칙적인 패턴의 와 흘림 현상(Vortex shedding)이 발생하게 된다. 발생한 와 흘림 현상은 원형실린더 형상 구조물에 주기적인 하중을 발생시키며, 구조물의 움직임과 상호작용에 의해 와 유기 운동(Vortex induced motion, VIM)을 유발하는 원인이 된다. VIM으로 인해 원형실린더 형상 구조물은 흐름에 평행한 방향 응답(In-line response)과 흐름에 직각인 방향 응답(Cross-flow response)이 발생하게 된다. 이러한 VIM 응답은 비선

Received 14 March 2019, revised 16 June 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Hyo-Jae Jo: +82-51-410-4302, hjjo@kmou.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7847-0462

© 2019, 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.

형적인 운동특성을 가지며, Vortex는 원형실린더 형상 구조물에 반복적인 하중을 유발하여 구조적 피로손상을 발생시킨다. 뿐만 아니라 원형실린더 형상 구조물의 와 흘림 진동수(Vortex shedding frequency, f_s)와 고유진동수(Natural frequency, f_n)의 비가 1에 가까워지면 VIM 응답이 점점 커지게 되고, 두 진동수의 비가 1이 되면 공진현상의 일종인 Lock-in현상이 발생한다. 이러한 이유로 VIM 응답은 원형실린더 형상 구조물의 설계 시 고려해야 할 중요한 인자이다.

따라서 구조물에 발생하는 VIM에 의한 영향을 줄이기 위하여 Helical strake와 같은 VIM 저감장치가 사용되고 있다. 그러나 Helical strake는 본체와 따로 제작하여 조립이 어렵고 고가의 시공비가 발생한다(Son, 2010). 뿐만 아니라 구조물의 무게를 증가시키며 Heave motion을 크게 만드는 단점이 존재한다(Oh, 2003). 그래서 기존의 Helical strake의 단점을 보완하고 우수한 저감성을 가진 저감장치를 개발하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 먼저 Son(2010)은 원형실린더 형상 구조물에 필름을 부착함으로써 유동장에 위치한 필름이 유선형 형상을 만듦으로써 구조물에 작용하는 수평력을 저감하는 실험적 연구를 진행하였다. 그리고 Jung and Yoon(2015)은 나선형 표면 처리를 한 트위스트 실린더의 VIM 저감성에 대해서 CFD(Computational fluid dynamics) 해석을 수행하였다.

앞서 진행한 선행연구처럼 VIM 응답과 관련된 연구는 크게 CFD와 실험적 연구 두 가지 방법으로 이루어지고 있다. 먼저 CFD의 경우는 원형실린더 형상 구조물의 경우 길이-직경비(이하 L/D)가 크기 때문에 계산량이 방대해지는 경향이 존재하며, 설치해역의 수심이 깊어짐에 따라 해석의 어려움은 더욱 커지게 된다. 따라서 최근에는 Full scale의 Riser 대신, Riser의 특정 Section을 잘라서 사용하는 방법을 사용한다(Gustafsson, 2012). 하지만 VIM 응답은 점성이 지배적인 동적 응답이기 때문에 주로 실험을 통한 연구가 많이 이루어져 왔다. 그리고 기존의 VIM 응답과 관련한 연구들은 Cross-flow 응답만을 고려한 1-DOF system에 관한 연구가 대다수 이루어졌으나, 최근 연구에서는 In-line 응답과 Cross-flow 응답을 동시에 고려하는 2-DOF system에 대한 실험들이 수행되어지고 있다(Blevins, 2001; Bearman, 2011; Srinil et al., 2013; Kim et al. 2016; Park, 2017).

본 연구에서는 String이 조류환경 속에서 만들어내는 떨림이 유동장의 변화를 주는 메커니즘을 활용하여 VIM 저감을 위한 연구를 수행하였다. 이와 유사한 사전연구로 Silva-Ortega and Assi

(2017)는 원형실린더 주변에 직경이 작은 8개의 회전 가능한 실린더를 배치하여 유동장에 변화를 주는 연구가 진행되었으며, 원형실린더에 작용하는 항력과 양력을 측정하였다. 그리고 Silva-Ortega and Assi(2018)에서는 작은 실린더의 개수, 실린더의 직경비, 설치위치를 파라미터로 설정하여 항력과 양력에 관한 연구를 진행하였다. 마찬가지로 선행연구로 진행되었던, Baek et al. (2018)은 String을 저감장치로 사용하여 String의 떨림을 이용한 항력과 수평력의 저감성능에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 앞서 연구경향과 방법들을 종합하여 본 연구는 2-DOF 환경에서 실험을 통해서 진행하였으며, 원형실린더가 조류 중 움직임으로 인한 비선형적인 특성을 파악하기 위해 VIM 응답의 변위에 초점을 두었다. 그리고 실험에 사용된 모델은 크게 네 종류로 저감장치를 부착하지 않은 Bare hull 모델, Helical strake를 부착한 모델, Two string을 부착한 모델과 방사형으로 String이 설치된 모델로 정하였다. 최종적으로 각 모델별 VIM 응답 특성을 파악하면서 VIM의 저감성능을 비교 및 분석하였다.

2. 모형 실험

2.1 실험환경

Fig. 1은 연구에서 사용된 실험장비들을 나타내고 있다. 먼저 실험은 한국해양대학교에 있는 회류수조(Circulating water channel, CWC)에서 실시하였다. 그리고 회류수조의 크기는 $4.0 \times 1.8 \times 1.2\text{m}$ ($L_{cwc} \times B_{cwc} \times D_{cwc}$)이며, 측정수심은 0.915m로 설정하였다. VIM 응답의 측정은 비접촉식 3차원 운동계측기를 사용하였으며, 이는 실험모델이 반사하는 빛을 마커로 인식하는 광학용 계측기이다. 따라서 실험모델에 빛을 반사할 수 있는 마커를 실험모델의 무게 중심점에 부착하여 VIM 응답의 변위를 측정하였다.

Fig. 2의 왼쪽 그림은 실험의 전체적인 모식도를 나타내고 있다. 먼저 원형실린더 구조물의 x, y 변위를 측정하기 위해 프레임의 상단부에 유니버설 조인트를 설치하였다. 유니버설 조인트와 모델을 이어주는 봉은 알루미늄으로 2.6m의 길이로 제작되었으며, 이는 원형 실린더의 회전운동을 최소화하기 위함이다. 여기서 x 방향은 회류수조의 길이방향으로 유속은 왼쪽에서 오른쪽으로 진행방향을 가지고 있으며, y 방향은 회류수조의 벽면방향이다. 여기에 x, y 방향으로 일정한 복원력을 제공하기 위해서 스프링을 설치하였다. 그리고 Fig. 2의 오른쪽 그림은 실험에 사용된 실험모델의 모식도를 나타내었고 Table 1에는 모델별 제원을



Fig. 1 Circulating water channel (left) & 3-D motion measuring instrument (right)

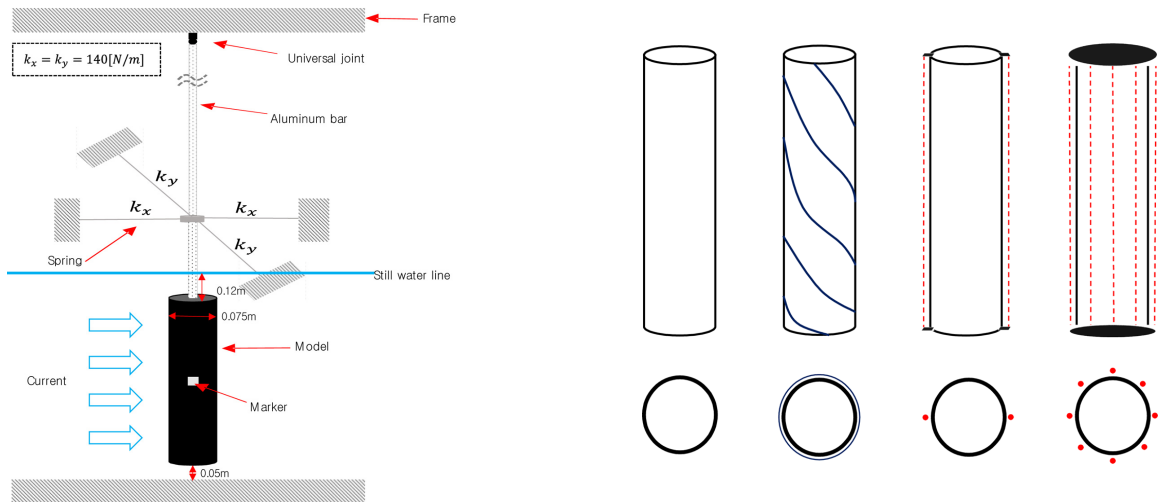


Fig. 2 Concept of experiment (left) & Experimental model figures (right)

Table 1 Experimental model

Case	Material	Description
Bare	Body: Acrylic	Diameter (D) : 0.075 [m] Length (L) : 0.75 [m]
Strake	Body: Acrylic Strake: Acrylic	Height of strake : 0.1 D Pitch of strake : 11.5 D Number of strake : 3
Two strings	Body: Acrylic String: Nickel	String's natural frequency : 50 [Hz]
Radiational string	Body: Acrylic String: Nickel	Each string's natural frequency : 50 [Hz] Number of string : 8

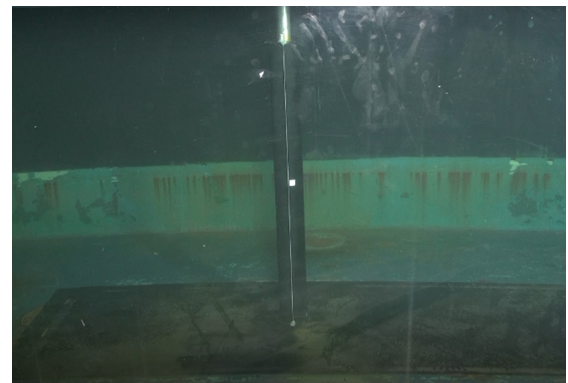
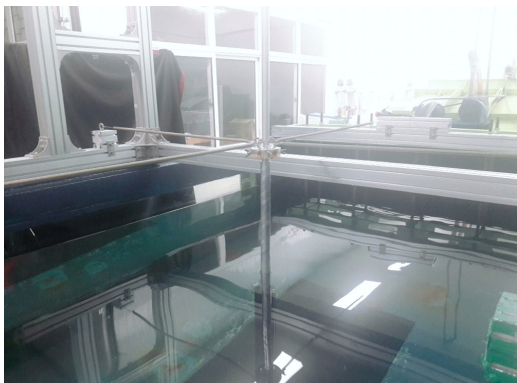


Fig. 3 Installation condition (left) & Experiment for two string case (right)

나타내었다. 첫 번째로 가장 왼쪽에 있는 실험모델은 저감장치를 부착하지 않은 Bare case(이하 Bare)이며, VIM 저감성능을 비교하기 위한 기준이 되는 구조물이다. Bare는 원형실린더 형상의 구조물이며, 길이는 0.75m로 제작되었고 직경은 벽면효과를 최소화하기 위해 0.075m이며, $L/D=10$ 으로 설정하였다. Bare의 바로 오른쪽에 위치한 모식도는 선행기술을 대표할 수 있는 Strake case(이하 Strake)이다. Strake의 경우 Bare에 Helical strake를 부착하였으며, Strake의 제원은 선행자료를 참고하여 제작하였다 (Blevins, 2001). 그리고 Strake의 오른쪽에 위치한 모델은 선행연구에서 고안된 Two strings case(이하 String)이며, 흐름의 방향에 수직하게 180° 간격으로 String을 설치하였다. 끝으로 가장 오른쪽

에 위치한 모델은 이번 연구에서 새롭게 고안한 Radiational string case(이하 Radiation)이며, 원 둘레를 따라서 45° 간격으로 총 8개의 String을 설치하였다. Fig. 3은 본 연구의 실제 실험사진을 나타내었으며, 전체적인 설치사진과 Two string 모델에 대한 실험 광경을 나타내고 있다.

2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서 실험유속은 0.3m/s부터 1.2m/s까지 0.1m/s간격으로 설정하였다. 또한 모형실험의 결과를 일반화하기 위하여 무차원 파라미터를 사용하였다. 첫 번째 사용된 파라미터로 구조물의 고유 진동수(f_n), 유속, 직경으로 표현되된다. 최종적으로

구조물의 고유 진동속도와 유속의 비로 표현되는 무차원 속도인 Reduced velocity(V_r)를 사용하였으며, 실험유속에 따라 V_r 은 4.45~18.0에 형성되었다. V_r 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_r = \frac{U}{f_n D} \quad (1)$$

이때 구조물의 고유 진동수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 본 실험에서 고유 진동수는 자유 감쇠 실험을 통하여 구하였으며, 부가질량의 영향을 최소화하기 위해서 공기 중에서 실시하였다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_a}} \quad (air) \quad [Hz] \quad (2)$$

m_a : Added mass [kg]
 k : Stiffness of system [kg/s^2]

두 번째 파라미터로 VIM 응답은 점성이 지배적인 현상이므로 관성력과 점성력의 관계를 나타내주는 무차원수인 Reynolds number(Re)를 사용하였고, 식 (3)으로 나타내었다. 본 실험에서는 와류가 활발히 일어나는 아임계 영역인 22,500~90,000 범위에서 형성되었다.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (3)$$

U : Flow velocity [m/s]
 D : Diameter [m]
 ν : kinematic viscosity [kg/s^2]

세 번째는 진동하는 구조물의 응답의 메커니즘을 일반화하기 위하여 Strouhal number(St)를 사용하였으며, Bare에 대해서 전체적으로 약 0.2의 값을 가지고 있었다. St 는 와 흘림 진동수(f_s)와 구조물의 직경, 유속의 조합으로 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 St 에 사용되는 와 흘림 진동수(f_s)는 실험을 통해서 얻어진 값을 사용하였다.

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (4)$$

U : Flow velocity [m/s]
 D : Diameter [m]
 f_s : Vortex shedding frequency [Hz]

끝으로 VIM 응답에 영향을 주는 요인인 Mass ratio(\bar{m})의 경우 모든 Case에 대해서 $\bar{m}=1.1$ 로 동일한 조건에서 실험을 진행함으로써 관성력의 영향을 동일하게 하였으며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{m} = \frac{4m}{\rho\pi D^2 L} \quad (5)$$

직립인 상태에서 원형실린더 형상 구조물의 VIM 운동응답특성을 파악하기 위하여 In-line 응답 방향의 용수철의 강성과 Cross-flow 응답 방향의 스프링의 강성은 140[N/m]로 동일하게 설정해주었다. 끝으로 실험 계속 시간은 실험모델의 운동을 안정한 상태에서 계속하기 위하여 각 유속별로 300초로 하였고, 균일류를 얻기 위한 충분한 대기시간을 가졌다. 뿐만 아니라 동일 유속에서 계속의 불확실성을 감소하기 위하여 Case별로 3회 반복 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 In-line amplitude

Fig. 4의 그래프는 V_r 변화에 따른 In-line amplitude의 평균값을 실린더의 직경으로 무차원화하여 비교한 그래프이다. Bare는 검은색 원형 표식으로 나타내었고, Strake는 붉은색 사각형 표식, String은 푸른색 삼각형 표식, Radiation은 녹색 다각형 표식으로 나타내었다. Fig. 4(a)에 의하면, 대부분의 유속에 있어서 Strake는 In-line amplitude를 감소시키는 것을 알 수 있다. 그러나 $V_r=12$ 인 유속에서는 Strake의 경우가 Bare보다 미세하게 크게 나타나는 경향을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4(b)에 의하면, String의 In-line amplitude는 Strake와 Radiation에 비해 다소 크게 나타나지

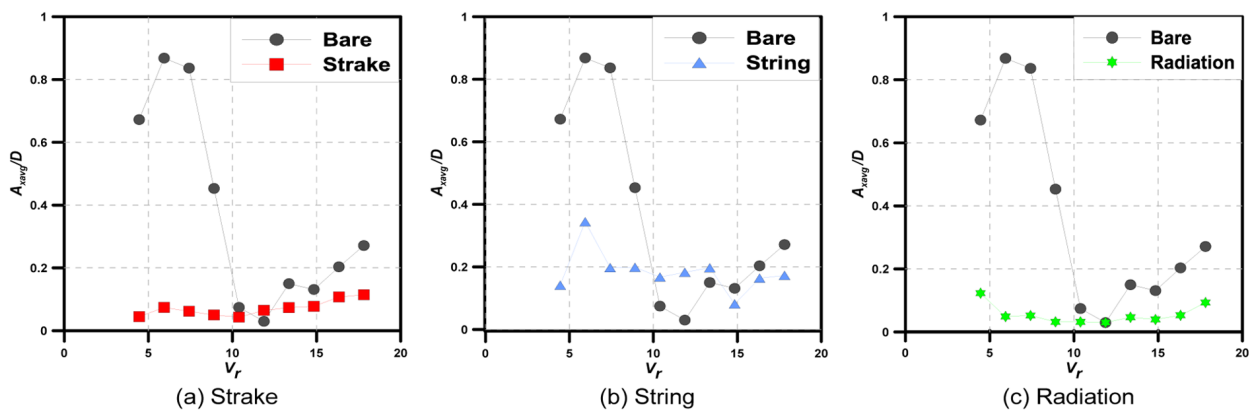


Fig. 4 Comparisons of in-line amplitude

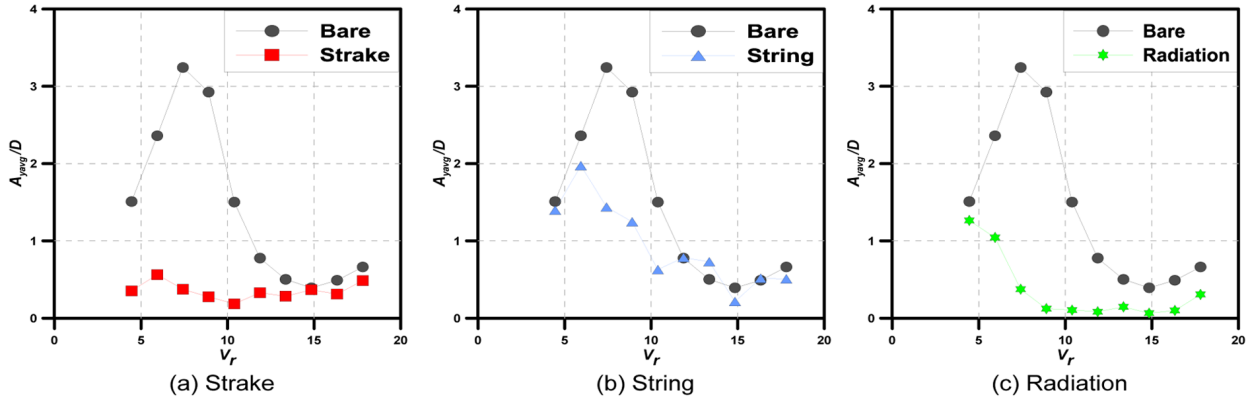


Fig. 5 Comparisons of cross-flow amplitude

만, $10.5 \leq V_r \leq 13.5$ 인 구간을 제외하면 Bare보다 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 끝으로 Fig. 4(c)에서는, Radiation은 Bare에 비해 전 유속에서 In-line amplitude의 크기가 감소되었음을 확인할 수 있다.

3.2 Cross-flow amplitude

Fig. 5의 그래프는 V_r 변화에 따른 Cross-flow amplitude의 평균 값을 실린더의 직경으로 무차원화하여 비교한 그래프이다. Fig. 5(a)에 의하면, Strake는 전체 유속에서 Cross-flow amplitude가 Bare보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)를 보면, In-line amplitude의 경향과 마찬가지로 String은 Strake와 Radiation에 비해 Cross-flow amplitude는 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Bare와 비교해보면, V_r 이 13.5에서는 미소하게 큰 진폭이 발생하는 구간을 제외한 전반적인 유속에 걸쳐 진폭이 감소되었음을 알 수 있다. Fig. 5(c)에서 Radiation은 V_r 이 4.45에서 진폭의 차이는 미소하였으나, 모든 유속에서 진폭이 확실히 저감되었음을 확인할 수 있다.

3.3 In-line & Cross-flow motion response

Fig. 6에는 V_r 별로 In-line과 Cross-flow의 응답을 종합하여 나

타내었으며, 응답의 형상은 발생하는 진폭의 최대치에 의해 형성된다. 먼저 Bare의 응답은 $4.45 \leq V_r \leq 7.5$ 인 구간에서 기울어진 8자 모양의 운동을 하고 있으며, $7.5 \leq V_r \leq 12.0$ 까지는 직립 8자 운동을 하고 있다. 그리고 $V_r \geq 13.35$ 인 구간부터 8자 운동의 경향이 사라지고, 점 운동을 하는 것을 관찰할 수 있다. 첫 번째로 Strake의 응답을 보면, Bare의 8자 운동의 경향은 나타나지 않으며 전체 유속에서 In-line 응답이 줄어들음을 관찰할 수 있다. 그리고 Cross-flow 응답의 경우, $V_r \leq 12$ 의 범위에서는 유속별로 응답의 크기가 작음을 확인할 수 있으나, $V_r \geq 12$ 인 구간에서 응답의 크기는 Bare와 유사한 점을 보아 저감성능을 관찰하기 어려웠다. 그리고 String의 응답은 Strake와 마찬가지로 Bare의 8자 운동 경향은 눈에 띄지 않는다. 그러나 String의 In-line 응답은 Bare와 큰 차이를 보이지 않으며, Cross-flow 응답은 V_r 이 7.42, 8.9에서만 작음을 알 수 있다. 끝으로 Radiation은 V_r 이 4.45, 5.93에서는 약하게 8자 모양의 운동을 가지는 것으로 확인되었고, Bare에 비해 전체 유속에 걸쳐 In-line 응답과 Cross-flow 응답 크기 또한 확연하게 줄어든 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 의하면, String은 Strake와 Radiation에 비해 저감성능이 미미하다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 7에는 V_r 에

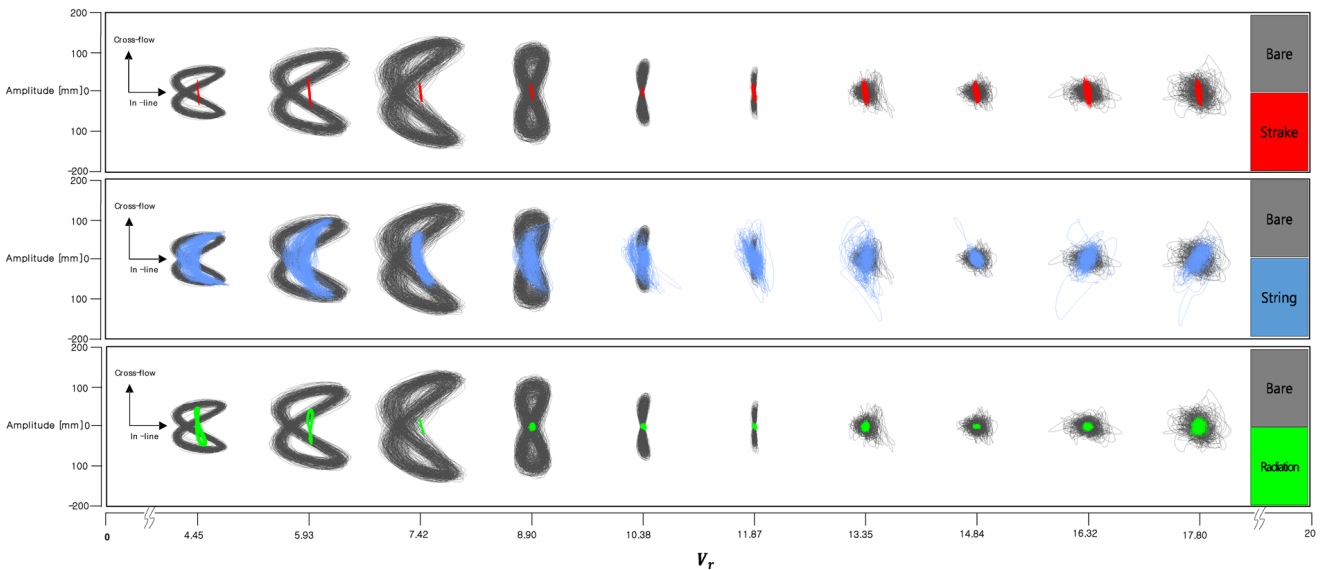


Fig. 6 Comparisons of motion response

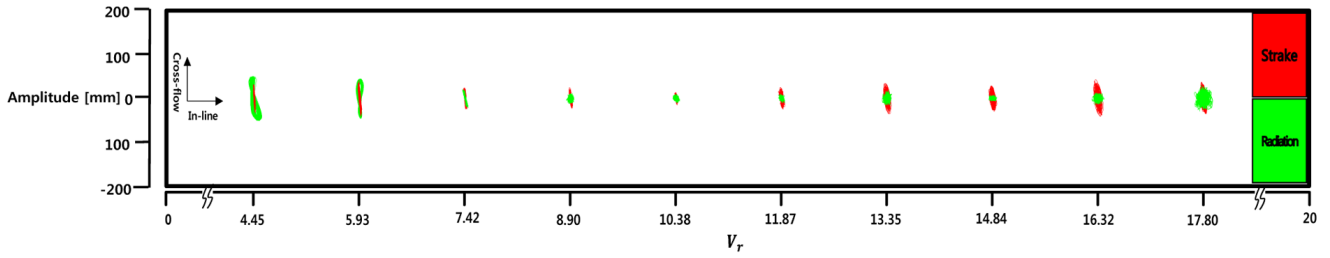


Fig. 7 Comparisons of motion response (Strake vs Radiation)

따른 Strake와 Radiation의 응답을 비교하였다. Radiation과 Strake의 응답은 V_r 이 4.45, $4.5 \leq V_r \leq 12.0$, $12.0 \leq V_r \leq 17.8$ 세 구간으로 나누어서 비교를 하였다. 첫 번째 구간인 V_r 이 4.45인 유속에서는 Strake가 Radiation보다 In-line 응답과 Cross-flow 응답이 작음을 확인할 수 있다. 그리고 두 번째 구간인 $4.5 \leq V_r \leq 12.0$ 에서 In-line 응답은 큰 차이를 보이지 않지만, Cross-flow 응답은 Radiation이 작은 것으로 관찰되었다. 그리고 세 번째 구간인 $12.0 \leq V_r \leq 17.8$ 에서는 In-line 응답의 크기가 유사하였고, Cross-flow 응답의 경우, Radiation이 Strake보다 크기가 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서 전체 유속에서 걸쳐서 In-line 응답 측면에서는 Radiation과 Strake가 유사한 응답의 크기를 보이고 있으나, Cross-flow 응답의 측면에서 바라보았을 때에는 Radiation이 Strake보다 작은 응답의 크기를 보여주고 있다. 이는 유속이 증가

할수록 Radiation이 Strake에 비해 뚜렷한 VIM 저감성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

3.4 Distribution table of in-line amplitude

VIM 응답은 항상 일정한 크기의 진폭을 가진 운동이 아니기 때문에 다양한 크기의 진폭이 발생한다. 위의 3.1, 3.2, 3.3에 나타난 결과들은 VIM 응답의 불규칙한 진폭을 표현하기에는 한계가 존재한다. 따라서 Fig. 7에는 V_r 이 8.9인 유속에서 횡축을 In-line amplitude, 종축을 빈도로 한 도수분포표를 이용하여 저감성능을 비교하였다. Bare의 경우, 진폭의 크기가 20~50mm 범위에 형성되어 있었고, Fig. 8(a)를 살펴보면 Strake의 진폭은 0~10mm사이에서 발생하고 있다. Fig. 8(b)에서는 String의 진폭이 0~30mm 범위에서 관찰되었으며, 일정부분 Bare와 겹치는 부

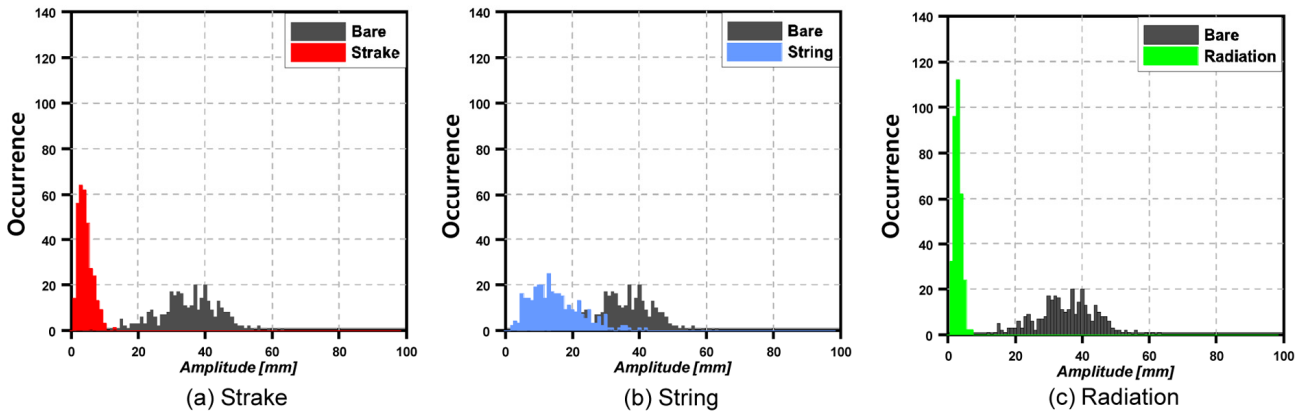


Fig. 8 Comparisons about distribution table of in-line amplitude at $V_r=8.9$

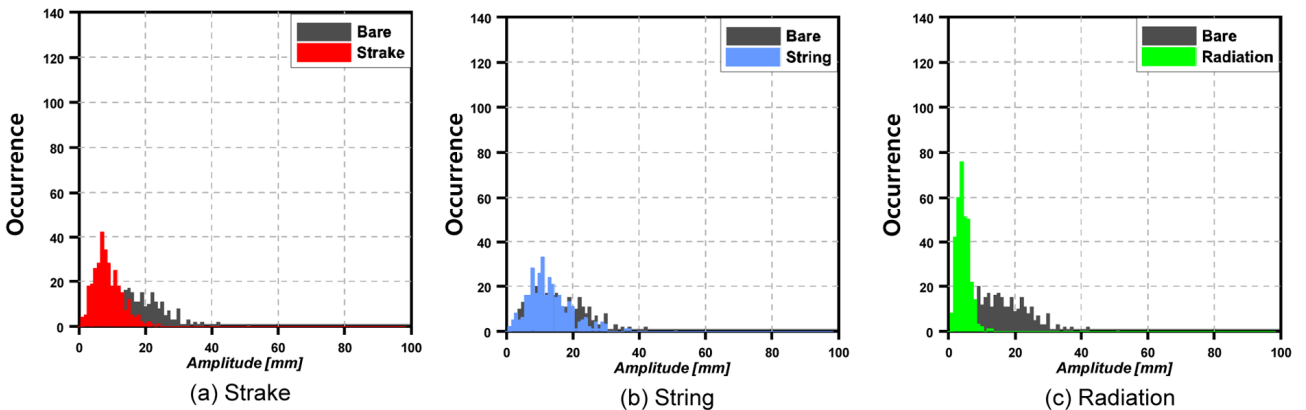


Fig. 9 Comparisons about distribution table of in-line amplitude at $V_r=16.92$

분이 발생한 것 또한 확인할 수 있다. 마지막으로 Fig. 8(c)의 Radiation은 Strake와 마찬가지로 0~10mm에서 진폭이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, Strake, String과는 달리 특정 진폭에서 빈도가 집중되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 9에는 Fig. 8과 마찬가지로 V_r 이 16.32인 유속에서 도수 분포표를 이용하여 저감성능을 비교하였다. Fig. 9(a)에 의하면, Bare의 진폭은 0~30mm 범위에서 형성되었으며, Strake는 0~20mm사이의 진폭들이 발생하고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 Bare와 Strake의 진폭의 범위가 일정 부분 겹치는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9(b)에서는 String이 Bare와 진폭의 범위와 발생빈도가 상당 부분 일치하고 있어, 저감의 정도가 미미하다는 것을 알 수 있다. 끝으로 Fig. 9(c)에서의 Radiation은 0~10mm에서 진폭이 발생하고 있는 점으로 보아 전반적으로 Strake와 Radiation은 진폭의 범위와 빈도수를 바탕으로 저감성능을 파악할 수 있었다. 그리고 0~20mm사이의 범위를 가졌던 Strake에 비해 0~10mm 범위를 가지는 Radiation이 우수한 저감성능을 보여주고 있다고 판단된다. 뿐만 아니라 Radiation의 경우, V_r 이 8.9에서 보여주었던 경향과 유사하게 특정 빈도수가 집중되어 있음을 확인할 수 있다.

3.5 Distribution table of Cross-flow amplitude

Fig. 10에는 V_r 이 8.9인 유속에서 횡축을 Cross-flow amplitude, 종축을 빈도로 한 도수분포표를 이용하여 저감성능을 비교하였

다. Bare는 약 170~270mm 사이의 진폭이 발생하였고, 이는 가장 큰 진폭과 가장 작은 진폭의 크기 차이가 100mm정도 발생하였음을 의미한다. Fig. 10(a)의 Strake는 0~50mm 범위에서 진폭이 발생함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10(b)에서 String은 0~170mm의 범위에서 고르게 빈도를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 10(c)를 살펴보면 Radiation의 경우 0~25mm사이의 진폭이 발생함을 관찰할 수 있으며 In-line 응답의 경향과 마찬가지로 특정 진폭이 집중되어 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 V_r 이 8.9에서 Strake, String, Radiation은 Cross-flow 응답 감소에 긍정적인 영향을 끼쳤으며, String보다 Strake와 Radiation이 저감성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에는 V_r 이 16.32인 유속에서 도수분포표를 바탕으로 저감성능을 비교하였다. Bare는 약 0~70mm 범위에서 진폭이 형성되었다. Fig. 11(a)에 의하면, Strake 경우 진폭의 발생 범위는 0~70mm으로 Bare와 동일하였으나, 보다 낮은 진폭에서 높은 집중도를 가지고 있는 점으로 보아 미미하게 저감성능을 확인할 수 있었다 하지만 Fig. 11(b)의 String은 Bare의 진폭범위와 거의 동일한 범위가 관찰되어 저감성능을 관찰할 수가 없었다. 하지만 Fig. 11(c)의 Radiation을 살펴보면 0~25mm범위의 진폭이 발생하였으며, 마찬가지로 특정 진폭에서 높은 집중도를 보여주고 있다. 따라서 V_r 이 8.9에서의와 마찬가지로 V_r 이 16.32에서 또한 Strake와 String보다 Radiation이 저감성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

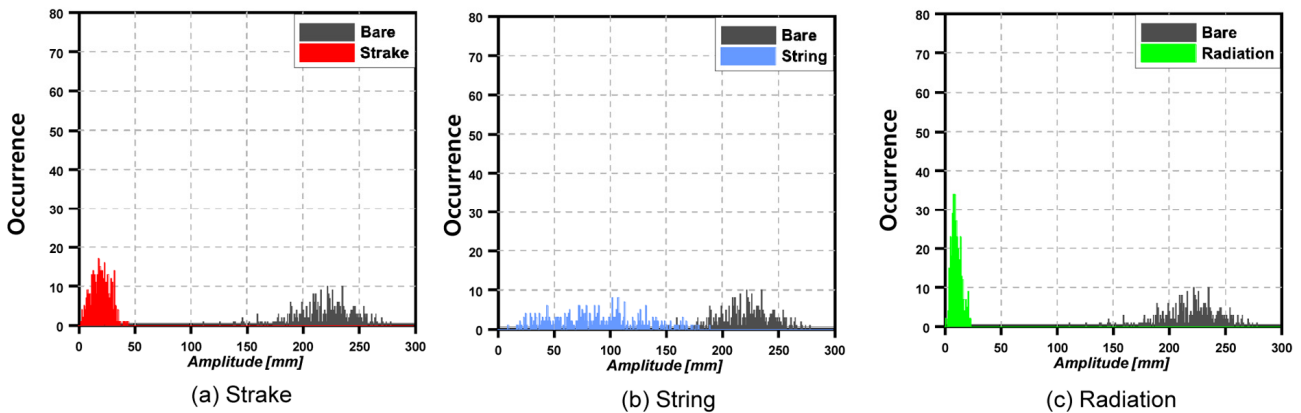


Fig. 10 Comparisons about distribution table of cross-flow amplitude at $V_r=8.9$

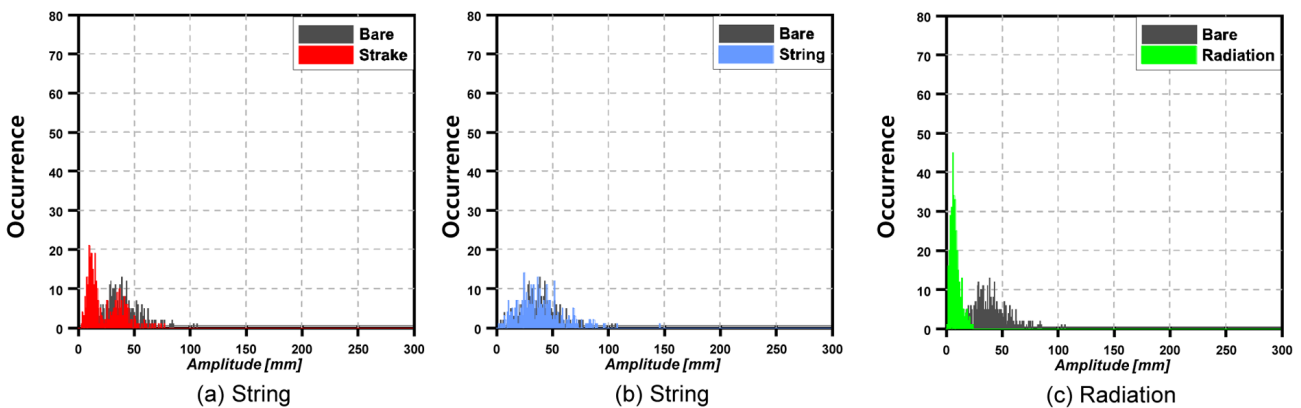


Fig. 11 Comparisons about distribution table of cross-flow amplitude at $V_r=16.92$

4. 결 론

본 논문에서는 모형 실험을 통한 원형실린더 형상 구조물에 작용하는 VIM 응답의 저감에 관한 연구를 진행하였다. 모형 실험 모델은 Bare, Strake, String, Radiation로 선정하였고, 동일한 실험 조건에서 VIM 응답의 Average amplitude, Response, Distribution table을 활용하여 실험결과를 나타내었고 최종적으로 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 저감장치를 부착한 모델에서도 특정 유속에서 8차 운동이 관찰되었으나 Bare보다 운동 응답의 크기가 작음을 확인할 수 있다.

(2) 진폭의 도수분포표를 바탕으로 Radiation의 VIM 응답은 특정 진폭에서 높은 집중도를 보이고 있다. 이는 원형실린더 형상 구조물을 설계 시, 원형실린더 형상 구조물의 간섭에 관련하여 중요한 요인으로 고려될 수 있을 것이라 판단된다.

(3) Strake 모델은 V_r 가 4.45과 5.93인 구간에서는 응답의 크기가 작음을 볼 수 있었다. 그러나 V_r 이 7.42 이상인 유속 범위부터 17.8까지 유속이 증가할수록 저감효과를 관찰할 수 있었다. 반해 Radiation의 경우 V_r 이 4.45와 5.93에서는 Strake에 비해 상대적으로 응답의 크기가 큰 것을 알 수 있었지만 V_r 이 증가할수록 뚜렷한 저감효과를 관찰할 수 있다.

(4) Strake는 곡가공 공정과 부착 시 용접 기술이 필요하지만, Radiation의 경우 String을 상하단부에 고정하기 위한 Winch 혹은 고정장치만 필요하다는 점에서 Strake 단점을 보완함과 동시에 우수한 VIM 저감성능을 가진 기술이라 판단된다.

후 기

본 연구는 한국해양대학교 LINC+사업단의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Baek, D.-I., Jo, H.-J., Lee, M.-J., Lim, J.-H., Lee, T.-K., Kim, J.-H., Oh, T.-W., 2018. Experimental Study on Reducing Lateral Force on Circular Cylinder Using Strings. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(4), 237-243. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.6.32.4.237>
- Bearman, P.W., 2011. Circular Cylinder Wakes and Vortex-induced Vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 27(5-6), 648-658. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.03.021>
- Blevins, R.D., 2001. *Flow-Induced Vibration*. 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- Gustafsson, A., 2012. *Analysis of Vortex-Induced Vibrations of Risers*. M.Sc Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Jung, J.H., Yoon, H.S., 2015. Reynolds Number Effects on Flow over Twisted Offshore Structure with Drag Reduction and Vortex Suppression. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 9-15. <https://doi.org/10.5574/KSOE.2015.29.1.009>
- Kim, S.W., Lee, S.J., Park, C.Y., Kang, D.H., 2016. An Experimental Study of Circular Cylinder's Two-degree-of-freedom Motion Induced by Vortex. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(4), 330-343. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.05.001>
- Oh, T.W., 2003. *An Experimental Study for the Dynamic Behaviour of Spar*. M.Sc thesis, Korea Maritime and Ocean University, Korea.
- Park, C.Y., 2017. *Experimental Investigation of Vortex- and Wake-Induced Vibration of Tandem Cylinders*, M.Sc Thesis, Korea Maritime and Ocean University, Korea.
- Silva-Ortega, M., Assi, G.R.S., 2017. Flow-induced Vibration of a Circular Cylinder Surrounded by Two, Four and Eight Wake-control Cylinders. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 85, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.03.020>
- Silva-Ortega, M., Assi, G.R.S., 2018. Hydrodynamic Loads on a Circular Cylinder Surrounded by Two, Four and Eight Wake-control Cylinders. *Ocean Engineering*, 153, 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.116>
- Son, M.S., 2010. *Experiment Study about Decrease Law of Lift Force Acting on Cylinder*. M.Sc Thesis, Korea Maritime and Ocean University, Korea.
- Srinil, N., Zanganeh, H., Day, A., 2013. Two-degree-of-freedom VIV of Circular Cylinder with Variable Natural Frequency Ratio: Experimental and Numerical Investigations. *Ocean Engineering*, 73, 179-194. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.07.024>

Experimental Study on Source Level Estimation Techniques of Underwater Sound Source in Reverberant Water Tank

Kookhyun Kim^{ID*}

^{*}School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea

잔향수조 내 수중음원의 음원레벨 추정기법에 관한 실험연구

김국현^{ID*}

^{*}동명대학교 조선해양공학부

KEY WORDS: Reverberant water tank 잔향수조, Acoustic power measurement 음향파위측정, Source Level 음원레벨, Reverberation time 잔향시간, Reverberant tank plot 잔향수조도

ABSTRACT: The acoustic power is used as a primary index characterizing underwater sound sources and could be defined by its source level. The source level has been assessed using various experimental techniques such as the reverberation time method and reverberant tank plot method. While the reverberation time method requires reverberation time data extracted in a preliminary experiment in a reverberant water tank, the reverberant tank plot method only needs acoustic pressure data directly obtained at the reverberation water tank. In this research, these experimental techniques were studied in comparative experiments to estimate the source levels of underwater sources in a reverberant water tank. This paper summarizes the basic theories and procedures of these experimental techniques and presents the experimental results for an underwater source in a long cuboid water tank using each technique, along with a discussion.

1. 서 론

음향 파워(Acoustic power)는 잠수정과 같은 수중 음원(Underwater sound source)의 특성을 나타내는 주요 지표이다(Robinson et al., 2014). 수중음원의 음향파위는 수면이나 바닥면, 벽면 등의 경계면이 없는 자유음장조건(Free acoustic field condition) 하에서 측정하는 것이 가장 이상적이지만, 비용이나 기술적 측면에서 구현이 어려운 경우가 많다. 대안으로써, 무향수조(Anechoic water tank) 또는 잔향수조(Reverberant water tank)를 활용한 음향파위 측정기법들이 적용되고 있다. 무향수조에서는 음향파위 뿐만 아니라 지향성(Directivity) 측정이 용이하다는 장점뿐 아니라 설치·운영에 비용이 발생하는 단점도 있다. 이에 무향수조에 비해 설치 및 운영이 간편한 잔향수조가 실용적으로 많이 활용되고 있다.

잔향수조와 같은 잔향공간(Reverberant space)에서의 음향파위 측정기법으로는 직접방법(Direct method)과 비교방법(Comparison method)이 있다(ISO, 2010). 직접방법의 경우, 측정된 수중음원의 음압으로부터 음향파위를 직접 산정하는 방법이며, 비교방

법은 기준음원(Reference sound source)을 작동시킬 때 잔향수조에 형성되는 음압과 미지의 수중음원을 작동시킬 때 잔향수조에 형성되는 음압의 비로부터 미지의 수중음원의 음향파위를 산정하는 방법이다.

잔향수조에서의 수중 음원 음원레벨 추정에 적용 가능한 직접방법으로는 잔향시간법(Reverberation time method)과 잔향수조도법(Reverberant tank plot method)이 있다. 잔향시간법은 잔향수조의 잔향시간을 이용해 음원레벨을 산정하는 가장 보편화되어 있는 기법이다(Cochard et al., 2000; Li et al., 2014; Takahashi et al., 1986) 이 때, 해당 잔향수조는 확산음장(Diffused acoustic field) 특성을 보여야 하며, 잔향시간 산정을 위한 예비시험이 요구된다. 참고로, 잔향시간 측정은 선형주사신호(Linear sweep signal), 로그주사신호(Logarithmic sweep signal), 백색신호(White signal)등 다양한 음원을 이용한다(Kang and Jung, 2018). 한편, 잔향수조도법은 잔향시간 데이터 없이 확산음장 형성 여부에 상관없이 수조 내 수중음원의 음원레벨을 산정할 수 있는 실험 기법이며(Hazelwood and Robinson, 2007; Kim et al., 2017), 부수적으로 그 결과를 활용해 해당 공간의 흡음률, 잔향시간 등의

Received 3 May 2019, revised 6 August 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Kookhyun Kim: +82-51-629-1658, kimk@tu.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4214-4673

© 2019, 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.

음향특성을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 잔향시간법 및 잔향수조도법 기반 수중음원에 대한 음원레벨 추정기법에 대한 비교실험연구를 수행하였다. 본 논문에서는 이들 추정기법에 대한 배경이론을 요약하고 기하학적으로 잔향음장(Reverberant sound field) 형성이 용이하지 않은 긴 직육면체 수조 내 수중 음원에 대한 음향실험을 통해 각각의 음원레벨 추정기법의 특성을 고찰한다.

2. 배경 이론

2.1 음원 레벨

수중음원의 음향 파워는 음원레벨(Source level)로 표현되며, 자유음장에서의 음원레벨은 식 (1)과 같이 정의된다(Kinsler et al., 1982).

$$SL = 20 \log_{10} \frac{S}{p_0 r_0} = 20 \log_{10} \frac{p r}{p_0 r_0} \quad (1)$$

여기서, SL 는 수중음원의 음원레벨(dB re. $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}$)이며, S 는 음원 출력($p \cdot r$, $\text{Pa}\cdot\text{m}$), p 는 직접음장에서의 음압(Pa), r 은 음원의 음향중심(Acoustic center)로부터 수신기까지의 거리(m), r_0 과 p_0 는 각각 기준거리(1m)와 기준음압($1 \mu\text{Pa}$)이다.

2.2 잔향시간법

잔향수조에서는 수중 음원으로부터의 직접음과 반사와 확산에 의한 잔향음이 합쳐서 형성되는 확산음장(Diffused acoustic field)이 형성된다. 이 경우, 활용될 잔향수조에 대해 기준에 확보된 잔향시간을 활용하면 식 (2)를 이용해 미지의 수중음원의 음원레벨을 추정할 수 있다(Cochard et al., 2000).

$$SL = 20 \log_{10} \frac{p_r}{p_0} + 10 \log_{10} \frac{V}{T_{60} c} + 0.4 \quad (2)$$

여기서, p_r 은 확산음장에서 측정 음압(Pa)이며, V 는 잔향수조의 체적(m^3), T_{60} 은 잔향시간(s), c 는 음속(m/s), p_0 는 기준음압($1 \mu\text{Pa}$)이다.

잔향시간 산정 시 사용되는 음원신호로는 선형주사신호, 로그주사신호, 백색신호 등이 있으며, 신호의 종류에 따라 추정되는 잔향시간에 다소 차이를 보인다. 본 연구에서는 각각의 신호를 사용한 잔향시간을 이용해 수중음원의 음원레벨을 추정하고 그 결과를 잔향수조도법에 의한 것과 비교·고찰한다.

2.3 잔향수조도법

잔향수조도법은 잔향시간법과 달리 잔향시간 데이터 없이 미지의 수중음원의 음원레벨을 해당공간의 확산음장의 형성여부와 상관없이 적용 가능한 기법이다(Hazelwood and Robinson, 2007). 잔향수조와 같은 잔향음장 내 수중음원이 존재하는 경우, 임의의 위치에서의 전체 음장 p_t 의 제곱은 식 (3)과 같이 직접음장 p_d 와 잔향음장 p_r 의 음압제곱의 합으로 가정할 수 있다(Kinsler et al., 1982).

$$p_t^2 = p_d^2 + p_r^2 = S^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{16\pi}{AQ} \right) \quad (3)$$

여기서, A 는 등가 흡음면적(Equivalent absorption area, m^2), Q 는 지향계수(Directivity factor)이다.

식 (3)으로부터 전체 음압제곱은 거리제곱의 역수 $1/r^2$ 에 비례함을 알 수 있으며, 식 (3)을 식 (4)와 같이 $1/r^2$ 와 p_t^2 에 각각 해당하는 독립변수 x 와 종속변수 y 에 대한 선형방정식으로 치환할 수 있다. 식 (4)를 회귀모델로 하고 음원과 수음점 간의 거리를 변경하면서 측정한 음압 데이터를 이용해 회귀분석을 수행하면 회귀계수 θ_0 와 θ_1 을 산정할 수 있다.

$$y = \theta_0 + \theta_1 x \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 비교할 때, 산정된 회귀계수 θ_1 은 기울기 S^2 에 해당하며, θ_0 는 절편 $p_r^2 (=16\pi S^2/AQ)$ 에 해당한다. S 를 식 (1)에 대입하면 해당 음원의 음원레벨을 산정할 수 있으며, 무지향성 음원($D=1$)을 가정하면 식 (5)와 식 (6), 식 (7)로부터 잔향공간의 등가 흡음면적 $A(\text{m}^2)$ 와 이에 대응하는 흡음률 α , 잔향시간 T_{60} 을 산정할 수 있다(Hazelwood and Robinson, 2007).

$$A = \frac{16\pi S^2}{p_r^2 Q} \quad (5)$$

$$\alpha = A/A_s \quad (6)$$

$$T_{60} = 55.26 \frac{V}{cA} \quad (7)$$

여기서, A_s 와 V 는 잔향수조의 자유수면을 제외한 표면적(m^2)과 체적(m^3)을 각각 의미한다.

Fig. 1은 가로축을 거리제곱의 역수 $1/r^2$ 과 세로축을 전체 음압제곱 p_t^2 으로 하고 측정데이터와 선형회귀분석 결과를 함께 도시한 잔향수조의 예시이다. 참고로, 잔향수조도를 음원레벨 산정에 활용하므로 잔향수조도법이라 한다.

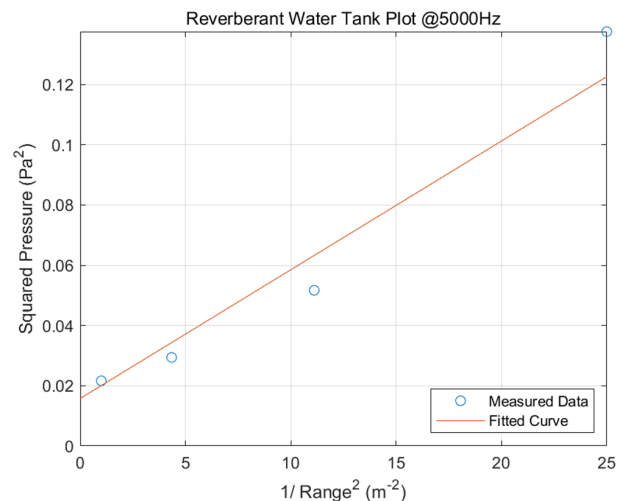


Fig. 1 Sample of reverberant tank plot

3. 음향실험

앞서 언급한 음원레벨 추정기법들의 특성을 관찰하기 위해 긴 직육면체 형상의 수조에서 음향실험을 수행하고 그 결과를 고찰하였다.

3.1 음향실험 장치 구성 및 주파수 범위

음향실험 장치는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 음파 송신(Transmit) 및 수신(Receive)을 위한 수중청음기 2개(B&K 8104), 수중청음기용 파워앰프(Crown D-150A-2)와 컨디션 앰프(Nexus amp), 신호 생성 및 분석을 위한 주파수 분석기(B&K Pulse 3560C), 수조 등으로 Kim et al.(2017)의 실험과 동일하게 구성하였다. 주파수 분석은 1/3 옥타브 밴드 중심주파수 기준으로 2.5kHz에서 20kHz 주파수 구간에 대해 수행하였다.

3.2 잔향수조 및 잔향시간

음향실험은 길이, 폭, 수심이 약 12.5m, 1.8m, 0.7m인 긴 직육면체 형상 수조에서 수행되었다. 사전실험을 통해 구한 음속은 1,515m/s이며, 잔향시간은 Table 1에 정리한 바와 같다. 이 때,

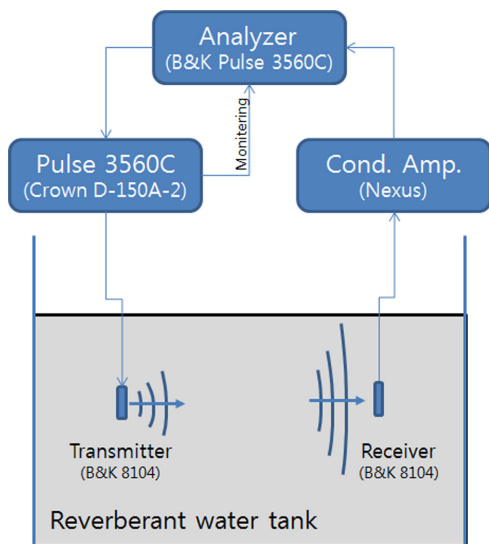


Fig. 2 Configuration of acoustic power measurement system (Kim et al., 2017)

Table 1 Reverberation time of a long cuboid water tank

1/3 octave center freq. [Hz]	Reverberation time, T_{60} [s]		
	Linear chirp	Log. chirp	White
2500	11.15	0.25	-
3150	0.59	0.15	-
4000	0.17	0.15	-
5000	0.17	0.16	-
6300	0.21	0.20	-
8000	0.19	0.19	0.25
10000	0.20	0.20	0.24
12500	0.26	0.26	0.27
16000	0.21	0.21	0.23
20000	0.24	0.24	0.19

대상수조의 잔향시간측정은 음원신호로 선형주사신호, 로그주사신호, 백색신호 등을 사용하여 실시하였으며, 음원과 수음점의 이격거리는 1m이다. 참고로, 6,300Hz 이하 주파수 영역에서 백색신호에 대한 잔향시간 산정에 실패하였으며, 이는 Fig. 2의 음향시험장치 구성으로는 해당 주파수영역에서의 잔향장 형성할 수 없었기 때문인 것으로 사료된다.

4. 음원레벨 산정

4.1 잔향시간법 기반의 음원레벨 산정

잔향시간법 기반의 음원레벨 산정을 위한 음향실험을 실시하였다. 이 때, 송신기(Transmitter)에 백색신호를 발생시킨 상태에서 수신기(Receiver)에서의 음압을 측정하고 그 결과와 Table 1의 잔향시간 데이터를 식 (2)에 대입하여 음원레벨을 산정하였다. Fig. 3은 Table 1의 음원신호 형태별 음원레벨 산정결과를 실제 송신 음원레벨과 함께 도시한 것이다. 선형주사신호와 로그주사신호에 대한 잔향시간을 적용할 때, 추정된 음원레벨의 주파수 특성은 송신 음원레벨과 유사한 경향성을 보이고 있다. 음원레벨 6.3kHz를 기준으로 고주파수대역에서는 실제 송신 음원레벨 대비 비교적 정확한 음원레벨 산정 결과를 보이고 있으나 공히 저주파수 대역에서는 큰 오차를 보이고 있다. 백색신호에 대한 잔향시간을 적용할 때, 8kHz 이상에서는 타 결과와 부합성이 매우 높게 나타나지만 6.3kHz 이하에서는 잔향시간 데이터가 존재하지 않아 음원레벨을 산정할 수 없었다.

4.2 잔향수조도법 기반의 음원레벨 산정

잔향수조도법 기반의 음원레벨 산정을 위한 음향실험을 실시하였다. 이 때, 음향실험장치의 구성은 Fig. 2와 동일하며 송신용 수중청음기의 위치를 고정한 상태에서 Table 2에 나타낸 총 12개 지점에 수신용 수중청음기를 순차적으로 이격시키면서 음향실험을 실시하였다. 각각의 수음기에 대한 음압측정결과를 활용해 1/3 옥타브 주파수 밴드별 잔향수조도를 작성하였으며, 이 중 2.5kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz에 대한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 또한 잔향수조도를 이용해 음향레벨을 산정하였으며,

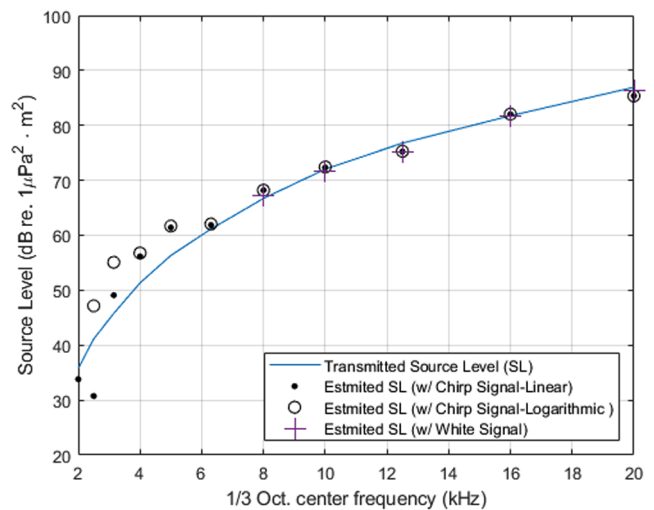


Fig. 3 Source level estimated by the reverberation time method

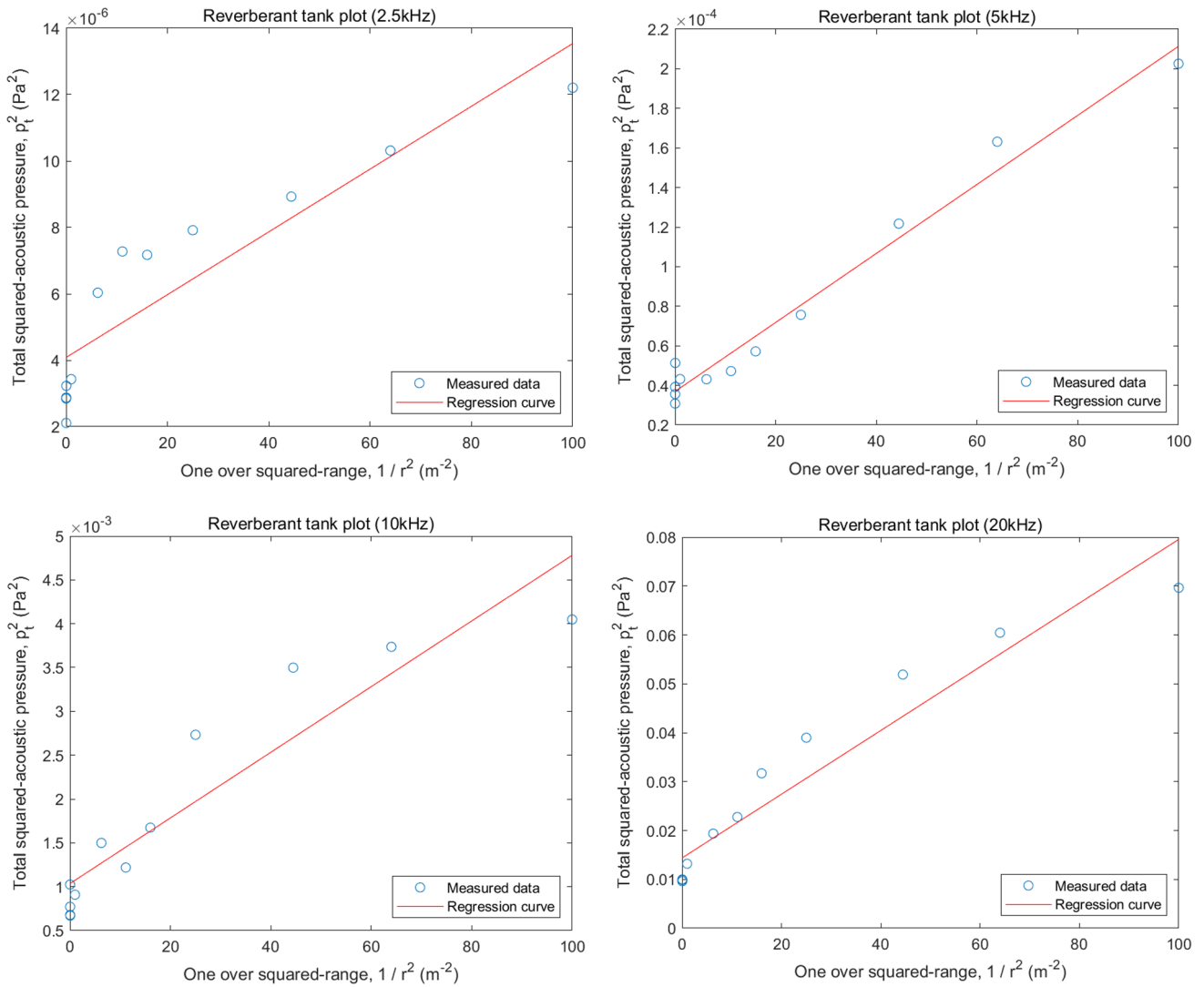


Fig. 4 Reverberant tank plots at 1/3 Oct. band center frequencies of 2.5 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz

Table 2 Transmitter to receiver distance

Receiver No.	Distance [m]	Receiver No.	Distance [m]
1	0.10	7	0.40
2	0.13	8	1.00
3	0.15	9	5.00
4	0.20	10	6.00
5	0.25	11	7.00
6	0.30	12	8.00

그 결과를 Fig. 5에 실제 송신기 음원레벨과 함께 도시하였다. 저주파수 영역에서 잔향시간법 대비 작은 오차를 보이고 있으며, 이는 잔향수조도법이 비확산음장에서 우수한 성능을 보일 수 있음을 시사한다. 주파수에 따른 음원레벨은 실제와 유사한 경향성을 보이지만 주파수가 증가함에 따라 오차가 점차 증가하여 2kHz에서 최대 5.8dB의 큰 오차를 보이고 있다. 이는 송신용 수중청음기와 수신용 수중청음기 사이의 거리를 수중청음기 고정용 지그를 기준으로 산정하였기 때문인 것으로 판단되며,

상호상관함수(Cross correlation function) 기반 음속 측정기법 (Kraftmakher, 2014)등 보다 정밀한 거리 측정 도구 적용으로 개선 가능할 것으로 사료된다.

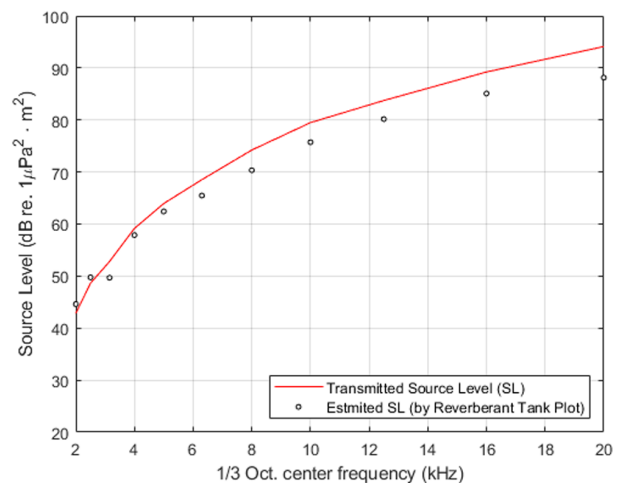


Fig. 5 Source level estimated by the reverberant tank plot method

Table 3 Absorption area, absorption coefficient, and reverberation time of the water tank estimated by the reverberant tank plot method

1/3 octave center freq. [Hz]	Absorption area [m ²]	Absorption coefficient (-)	Reverberation time [s]
2500	1.16	0.028	0.43
3150	0.58	0.014	0.86
4000	1.03	0.025	0.49
5000	2.37	0.057	0.21
6300	1.82	0.044	0.27
8000	1.40	0.034	0.36
10000	1.82	0.044	0.28
12500	2.25	0.054	0.22
16000	2.90	0.070	0.17
20000	2.28	0.055	0.22

한편, 식 (5)에서 식 (7)에 의거 대상수조의 등가흡음면적과 흡음률, 잔향시간 등을 추정하였으며, 그 결과는 Table 3에 정리한 바와 같다.

4.3 결과 비교

잔향시간법과 잔향수조도법 기반의 음원레벨 산정결과를 비교하였다. 음향실험 시 사용한 송신기 출력이 달라 두가지 방법을 기반으로 추정된 음원레벨의 직접 비교는 무의미하였다. 따라서 실제 송신기 음원레벨 대비 음원레벨 추정결과와의 정확도를 식 (8)의 전주파수 대역에 대한 평균제곱오차(Mean square error, MSE)로 평가하였다.

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (SL_i - \overline{SL_i})^2 \tag{8}$$

여기서, SL_i 과 $\overline{SL_i}$ 는 i 번째 1/3 옥타브 밴드에서의 실제 송신 음원레벨과 추정 음원레벨을 각각 의미하며, m 은 1/3 옥타브 밴드 필터 개수이다.

Table 4는 음원레벨 추정기법 별 평균제곱오차를 정리한 것이다. 백색신호를 이용한 잔향시간법이 0.7로 가장 낮은 오차수준을 보이지만 이는 6.3kHz 이하의 주파수 대역에서 잔향시간 데이터 미도출로 음원레벨 추정이 불가능하므로 직접적인 비교가 어렵다. 따라서 이를 제외하면 실제적으로 잔향수조도법이 잔향시간법 대비 가장 낮은 오차수준을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, 잔향수조도법의 회귀분석결과로부터 구한 등가 흡음면적을 식 (7)에 대입하여 산정한 대상 수조의 잔향시간을 Fig. 6에 Table 1의 잔향시간 데이터와 함께 도시하였다. 잔향시간 측정결과와 경향성 측면에서 부합성이 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 4 Mean square errors against the real source level

Reverberation time method			Reverberant tank plot method
Linear chirp	Log. chirp	White	
17.6	18.9	(0.7)	9.6

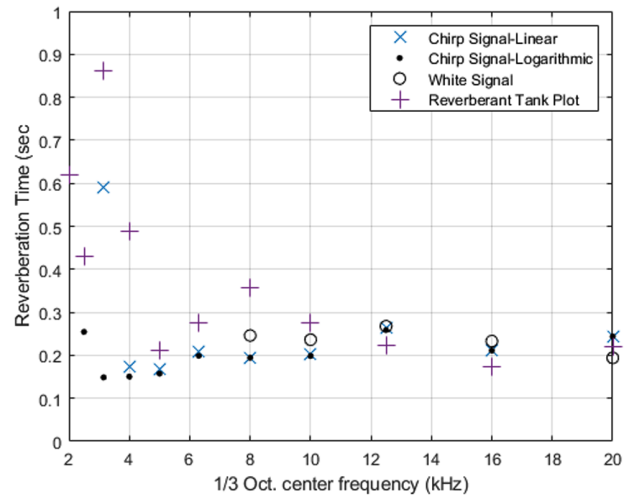


Fig. 6 Reverberation time estimated by the reverberant tank plot and those by the reverberation time measurement

4. 결 론

본 연구에서는 잔향 수조 내에 있는 수중 음원의 음원레벨 추정기법에 대한 비교연구를 수행하였다. 이를 위해 본 논문에서는 잔향시간법, 잔향수조도법 등의 이론을 소개하였으며, 잔향음장 형성이 어려운 긴 직육면체 형상의 수조 내 수중 음원 대한 음향실험을 수행하고 그 결과를 활용해 각각의 음원레벨 추정기법의 특성을 살펴보았다.

잔향시간법의 경우, 선형주파수신호와 로그주파수신호에 대한 잔향시간을 적용할 때 음원레벨은 유사한 경향성을 보였다. 고주파수 대역에서는 비교적 정확한 음원레벨 산정 결과를 보였으나 저주파수 대역에서는 오차가 커짐을 확인하였다. 한편, 백색신호에 대한 잔향시간을 적용할 때, 고주파수 대역에서 타 결과와 부합성이 매우 높게 나타났으나 저주파수 대역에서는 잔향시간을 도출할 수 없었으며, 음원레벨 산정 또한 불가능하였다. 잔향수조도법의 경우, 수음점 위치별 측정 음압 데이터를 활용하여 잔향시간 데이터 없이 음원레벨을 산정하였다. 저주파수 대역에서는 잔향시간법 대비 우수한 성능을 보인 반면, 주파수가 증가할수록 오차가 증가하였다. 그럼에도 불구하고 각각의 추정기법에 대한 음원레벨 추정 성능을 전체 주파수 대역에 대해 평균제곱오차로 비교할 때, 잔향수조도법이 가장 우수한 성능을 보였다.

후 기

이 논문은 2019학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2019F013). 본 연구에 활용된 음향실험장치의 구성과 음향데이터 획득에 도움을 준 부산대학교 선체소음진동 실험실에 감사합니다.

References

Cochard, N., Lacoume, J.L., Arzelies, P., Gabillet, Y., 2000. Underwater Acoustic Noise Measurement in Test Tanks. IEEE

- Journal of Oceanic Engineering, 25(4), 516-522. <https://doi.org/10.1109/48.895359>
- Hazelwood, R.A., Robinson, S.P., 2007. Underwater Acoustic Power Measurements in Reverberant Fields. IEEE Ocean 2007-Europe, Aberdeen, UK, 1-6. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2007.4302295>
- ISO, 2010. Acoustics-Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources Using Sound Pressure: Precision Methods for Reverberation Test Rooms. ISO 3741:2010(E)
- Kang S.H., Jung, H.K., 2018. The Accuracy of Analyzing Reverberation Time. The Journal of the Acoustical Society of Korea, 37(5), 349-355. <https://doi.org/10.7776/ASK.2018.37.5.349>
- Kim, K., Lee J.H., Cho, D.S., Lee, J.J., 2017. Acoustic Power Measurement of Underwater Noise Source in Reverberant Water Tank. Proceedings of KSOE 2017 Fall Conference, Gojae, 411-413.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., 1982. Fundamentals of Acoustics. 3rd Edition, John Wiley & Sons.
- Kraftmakher, Y., 2014. Experiments and demonstrations in physics: Bar-ilan physics laboratory: 2nd Edition, World Scientific. <https://doi.org/10.1142/8618>
- Li, Q., Shang, D., Tang, R., 2014. Sound Source Performance Measurement Take in Reverberant Tank with Reverberation Method. ICSV 21, Beijing China, 1-8.
- Robinson, S.P., Lepper, P.A., Hazelwood, R.A., 2014. Good Practice Guide No.133 - Underwater Noise Measurement. National Physical Laboratory. [Online] Available at : <https://www.oceanbestpractices.net/bitstream/handle/11329/435/GPG133_UnderwaterNoise_final3.pdf?sequence1&isAllowedby> [Accessed May 2019].
- Takahashi, S., Kikuchi, T., Ogura, A., 1986. Measurements of Underwater Sound Absorption Coefficient by the Reverberation Method. Japanese Journal of Applied Physics, 25, Supplement 25-1, 112-114. <https://doi.org/10.7567/JJAPS.25S1.112>

Water Wave Propagation Caused by Underwater Blasting in a 3D Numerical Wave Tank

Woo-Dong Lee^{ID*}, Yeon-Myeong Jeong^{ID**}, Kyu-Nam Choi^{ID***} and Dong-Soo Hur^{ID*}

^{*}Department of Ocean Civil Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

^{**}Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

^{***}Daewoo Engineering & Construction Co., Ltd., Seoul, Korea

3차원 수치파동수조에서 수중발파에 의한 수면파의 전파해석

이우동^{ID*} · 정연명^{ID**} · 최규남^{ID***} · 허동수^{ID*}

^{*}국립경상대학교 해양산업연구소 해양토목공학과

^{**}국립경상대학교 해양산업연구소

^{***}(주)대우건설

KEY WORDS: Underwater blasting 수중발파, Shock wave 충격파, Water wave 수면파, Wave propagation 파랑전파, 3-D numerical wave tank 3차원 수치파동수조

ABSTRACT: When underwater blasting is conducted, both shock waves and water waves have an effect on adjacent coastal areas. In this study, an empirical formula for estimating the details of water waves caused by underwater blasting was applied to a non-reflected wave generation system, and a 3D numerical wave tank (NWT) was improved to reproduce the generation and propagation of such water waves. The maximum elevations of the propagated water waves were comparatively analyzed to determine the validity and effectiveness of the NWT. Good agreement was demonstrated between the empirical and simulation results. The generation and propagation of water waves were also simulated under each underwater blasting scenario for the removal of the Todo islet at the Busan Newport International Terminal (PNIT). It was determined that the water waves generated by the underwater blasting scenario examined in this study did not have a significant impact on the PNIT. In addition, multiple-charge blasting caused higher wave heights than single-charge blasting. As the amount of firing charge increased, the wave height also increased. Finally, larger water waves were generated during the later blasting conducted at a deeper depth as compared with an earlier blasting conducted at a relatively shallow depth.

1. 서 론

수중발파는 일반적으로 부피가 큰 수중의 구조물/장애물을 철거하는 과정에 필요한 공정이다. 해양개발이 지속적으로 진행됨에 따라 수중발파 또한 증가하는 추세이다. 그리고 해안 및 항만 공사에서는 대규모의 수중발파가 수반되는 경우가 많다. 대표적 예로서 부산신항만에서는 선박의 입·출항에 걸림돌이 되어온 토도를 제거하기 위해 수중발파를 동반한 공사가 진행되고 있다. 해양수산부는 2018년부터 2020년까지 국비 3,437억 원을 투입하여 부산신항만의 선반 운항의 안전과 항만 운용의

효율성을 높이기 위해 토도 제거를 추진하며, 수심 -17m를 확보할 예정이다.

Fig. 1처럼 수중폭파는 공기 중 폭발과 같이 순간적으로 발생하며, 고압의 충격파가 수중에서 빠른 속도로 전파된다. 수중에서는 공기보다 압력전파속도가 빠르고, 발생한 가스 또는 에너지가 소실 전에 물에 의해 기포 형태로 갇히게 된다(Choi et al. 2017). 충격파는 기포 크기가 최소일 때 발생하고, 이 기포는 외부 압력과 중력의 영향으로 팽창과 수축을 반복하며, 수면으로 상승하게 된다(Hunter and Geers, 2002; Klaseboer et al., 2005; Hamashima et al., 2010). 이러한 일련의 과정이 수중폭파지점을

Received 9 January 2019, revised 23 July 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Dong-Soo Hur: +82-55-772-9122, dshur@gnu.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4627-7593>

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Fall Conference of KSOE 2018 in Incheon.

© 2019, 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.

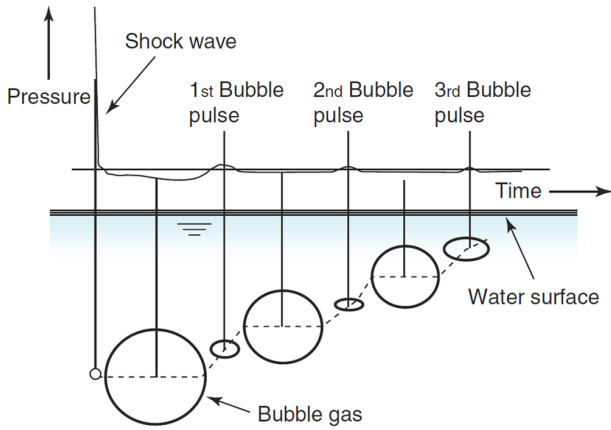


Fig. 1 Schematic illustration of underwater explosion phenomenon (Hamashima et al., 2010)

기점으로 한 수면파동을 발생시키고, 주변 해역까지 영향을 미치게 된다. 그러므로 가동 중인 부산신항만에서 수행하는 토도 제거를 위한 수중발파의 수면파동이 컨테이너 터미널에 미치는 영향을 면밀하게 검토할 필요가 있다.

수중폭파에 관한 연구들은 대부분 충격파의 물리적 특성을 분석(Cole, 1948; Costanzo, 2011)에 중점을 두고, 충격파가 주변 구조물(Zhang et al., 2017; Saadatfar and Zahmatkesh, 2018), 선박(Warren, 1996; Ming et al., 2016), 생태계(Keevin and Hemen, 1997; Govoni et al., 2008)에 미치는 영향을 분석 또는 모니터링(Carlson et al., 2011)을 수행하였다. 이에 반해 수면파의 발생 및 전파에 관한 연구들은 아직까지 미진한 실정이다. 국내에서는 수중발파 사례분석에 관한 연구(Jeung et al., 2004; An et al., 2007; Kim and Kim, 2018)가 주로 수행되었다. 그리고 수중발파 현장에서 측정한 자료로부터 진동추정식을 제안하였다(Park et al., 2006). 수중발파에 대한 어류 및 구조물의 영향평가(Lee et al., 2001; Choi et al., 2015)에 관한 연구도 수행되었다.

최근에서는 CFD(Computational fluid dynamics) 기반의 수치해석에서 수중폭파에 의한 수면파동이 계산되기도 한다. Miller et al.(2013)은 유한 체적법의 이상류 해석으로부터 수중폭파 시에 압력강하에 의한 동공현상, 기포 상승, 수면파 생성에 관한 수치해석을 수행하기도 하였으나, 수면파 전파과정에 관한 검토는 수행되지 않았다. Wang et al.(2014)의 다상류 해석에서는 충격파와 공동현상에 의한 수면파동이 발생하나, 이것에 대한 논의가 이루어지지 않았다. 현실적으로 수중폭파부터 수면파동의 발생과 전파까지 직접 모의하기에는 많은 어려움이 따른다. 한편 Le Méhauté and Wang(1996)은 수중발파 시에 TNT (Trinitrotoluene) 장약량에 따른 최대수위, 수면파의 주기 등에 관한 경험식을 제안하였다. 이 경험식을 이용하여 수중폭발에 따른 수면파의 발생과 전파를 해석한다면, 전술한 이상류 또는 다상류 수치모델이 아닌 단상류 수치모델에서도 시뮬레이션이 가능할 것이다.

본 연구에서는 Navier-Stokes(N-S) 방정식에 기반의 단상류 수치모델 LES-WASS-3D Ver. 2.0(Lee and Hur, 2014a)을 이용한다. 그리고 Le Méhauté and Wang(1996)의 추정식을 무반사 조파시스템에 적용하는 방법을 제안한다. 나아가 부산신항만의 토도

제거를 위한 수중발파 시나리오별 수면파의 발생과 전파에 관한 3차원 시뮬레이션을 수행하여 주변 컨테이너 및 다목적 터미널에 미치는 영향을 분석한다.

2. 수치모델

본 연구에서는 수중발파에 의한 수면파의 3차원적 전파특성을 분석하기 위하여 LES-WASS-3D ver. 2.0(Lee and Hur, 2014a)을 이용한다. 이 3차원 수치파동수조는 PBM(Porous body model)과 VOF(Volume of fluid)를 토대로 개량된 3-D N-S Solver의 강비선형 모델이다. 그리고 무반사 조파시스템에 의해 파와 흐름을 자유자재로 생성할 수 있다. 아격자 규모의 난류해석을 위해 Smagorinsky(1963)에 기초한 Germano et al.(1991)과 Lilly(1992)의 동적 와동점성모델, 자유수면의 표면장력을 고려하기 위해 Brackbill et al.(1992)의 CSF(Continuum surface force)모델을 수치파동수조에 각각 도입하였다.

2.1 지배방정식

지배방정식은 비압축성·점성유체에서 무반사 조파 또는 흐름을 생성할 수 있게 조파원천이 포함된 연속방정식 (1)과 PBM을 토대로 질량 및 에너지 보존, 투수매체에 의한 에너지 소산을 정량적으로 계산할 수 있게 수정된 N-S 운동량 방정식 (2)로 구성된다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_i g_i - E_i \quad (2)$$

여기서 v_i 는 x, y, z 방향의 유속성분, q^* 는 소스의 유량밀도, γ_v 는 체적공극률, γ_i 는 x, y, z 방향의 면적투과율, t 는 시간, ρ 는 수온과 염분을 고려한 물의 밀도, p 는 압력, ν_T 는 수온과 염분에 따른 물의 동점성계수(ν)와 동적 난류모델에서 구한 와동점성계수(ν_i)의 합, D_{ij} 는 변형률속도텐서, S_i 는 CSF모델에 의한 표면장력항, Q_i 는 조파원천항, R_i 는 투수매체의 유체저항항, g_i 는 중력가속도항, E_i 는 에너지 감쇠항을 각각 나타낸다.

F 는 각 계산 격자에서 유체의 체적비를 나타내고, 비압축성 유체에 대한 가점과 PBM을 적용하여 VOF 함수를 유체의 보존형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i v_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = Fq^* \quad (3)$$

세부적인 수치해석방법에 대해서는 Hur et al.(2012)과 Lee and Hur(2014a), Lee and Hur(2014b)를 참조하기 바란다.

2.2 조파방법

2.2.1 수면파형

수중폭파에 발생하는 수면파형은 크노이드파 형태를 가진다

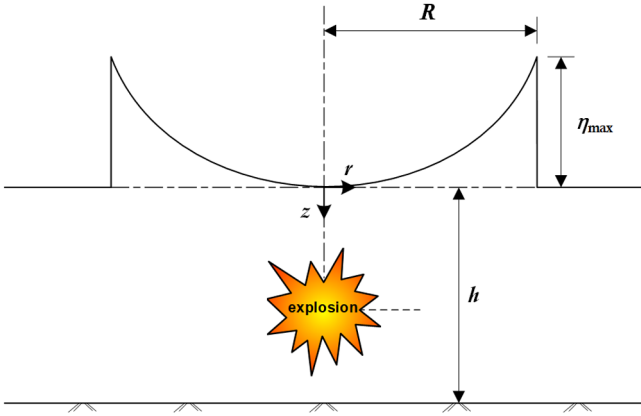


Fig. 2 Schematic illustration of initial water waveform due to underwater explosion

(Le Méhauté and Wang, 1996), 본 연구에서는 수중폭파에 의한 수면파는 단파임을 감안하여 크노이드파를 대신한 비주기성의 고립파를 적용한다. 이에 Le Méhauté and Wang(1996)는 실험을 통해 천해역에서 TNT 장약량에 따른 최대수위, 수면파의 주기 등에 관한 경험식을 이용하며, Fig. 2처럼 수중폭파 시에 생성되는 고립파형의 수면파 제원을 식 (4)-(6)들로부터 얻을 수 있다.

$$\frac{\eta_{max} r^\alpha}{W^\beta} = C_W \tag{4}$$

$$R = \begin{cases} 9.54 W^{0.3} & : 0 < \frac{z}{W^{0.3}} < 0.25 \\ 10.77 W^{0.3} & : 0.25 < \frac{z}{W^{0.3}} < 7.5 \end{cases} \tag{5}$$

$$T = \begin{cases} 1.669 W^{0.15} & : 0 < \frac{z}{W^{0.3}} < 0.25 \\ 1.773 W^{0.15} & : 0.25 < \frac{z}{W^{0.3}} < 7.5 \end{cases} \tag{6}$$

여기서 η_{max} 는 최대수위, r 은 발파지점으로부터의 수평거리, W 는 TNT 기준 장약량, α 와 β 는 식 (7)-(8)과 같은 경험계수, C_W 는 식 (9)과 같은 경험계수, R 은 초기 수면형의 반경, T 는 주기, h 는 수심, z 는 발파 수심을 각각 나타낸다. 여기서 단위는 ft와 lb이다.

$$\alpha = 0.83 \left(\frac{h}{W^{1/3}} \right)^{0.07} \tag{7}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{3} + 0.25 \tag{8}$$

$$C_W = 1.44 \left(\frac{h}{W^{1/3}} \right)^{0.93} \tag{9}$$

본 연구에서는 이 경험식에서 산정되는 수면파의 제원을 무반사 조파시스템에 적용하여 수면파의 생성과 전파를 모의한다.

2.2.2 조파방법

양방향으로 파랑이 생성되는 방식(Brosen and Larsen, 1987)을 개량하여 수치파동수조의 4방향(x 의 \pm 방향, y 의 \pm 방향)으로 수면파를 전파될 수 있게 조파원천을 개량하였으며, 식 (10)과 같이 4배의 조파강도(q)를 가진다. 그리고 수치파동수조 내의 장애물 또는 경계로부터 발생하는 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 Ohyama and Nadaoka(1991)가 제안한 강도조절계수(ζ)를 적용하여 안정적으로 수면파를 생성한다.

$$q = 4\zeta V_0 \tag{10}$$

여기서 V_0 는 수면파의 수평 유속성분, ζ 는 강도조절계수($(\eta_0 + h)/(\eta_s + h)$, η_0 는 이론적 수면 변위, η_s 는 실제 수면 변위)이다.

엇갈림 격자체계를 채택한 수치모델에서는 격자 크기에 따른 q 의 영향을 배제할 필요가 있다. 본 연구에서는 식 (11)처럼 격자 크기의 영향이 없는 유량밀도(q^*)를 지배방정식에 대입한다. 그리고 단일발파의 조파영역은 하나의 격자가 되지만, 다중발파의 조파영역은 장약량과 발파공의 수에 따라 결정된다.

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t)/\Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \tag{11}$$

본 연구에서는 수중폭파에 의한 수면파형에 고립파 근사이론을 적용하며, Lee et al.(2016)이 다양한 고립파형을 조파할 수 있는 제안한 방법을 이용한다. 고립파의 수면파형은 Dean and Dalrymple(1991)의 근사이론을 이용하며, 시간파형과 수립자의 수평유속은 식 (12)-(13)과 같다.

$$\eta_0 = \eta_{max} \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3}{4}} \frac{\eta_{max}}{h^3} (x_s - Ct) \right] \tag{12}$$

$$V_0 = \left[\lambda \left(\epsilon + 3\epsilon^2 \left(\frac{1}{6} - \frac{z_h^2}{2} \right) \right) - \lambda^2 \epsilon^2 \left(\frac{7}{4} - \frac{9z_h^2}{4} \right) \right] \tag{13}$$

여기서 η_{max} 는 최대수면높이, C 는 식 (14)과 같은 파속, λ 는 수면변위와 최대수면변위와의 비(η/η_{max}), ϵ 는 최대수면변위와 수심과의 비(η_{max}/h), z_h 는 바닥과 수립자의 연직거리와 수심과의 비이다.

$$C = \sqrt{gh} \left(1 + \frac{\eta_{max}}{2h} \right) \tag{14}$$

2.3 수중발파에 의한 수면파를 위한 경계조건

대부분의 수치파동수조는 진행파의 양방향에 부가감쇠영역을 설치하고, 측면경계에 있어서 Non-slip 또는 Slip 조건을 사용한다. 이처럼 적용할 경우, 수중발파에 의한 수면파는 4방향으로 전파되기 때문에 측면경계에서 반사파가 발생하여 파동장 교란이 발생하게 된다. 이것을 보완하기 위해 Hur and Lee(2011)는 수치파동수조에서 경사입사파의 조파를 위한 수조경계의 반사

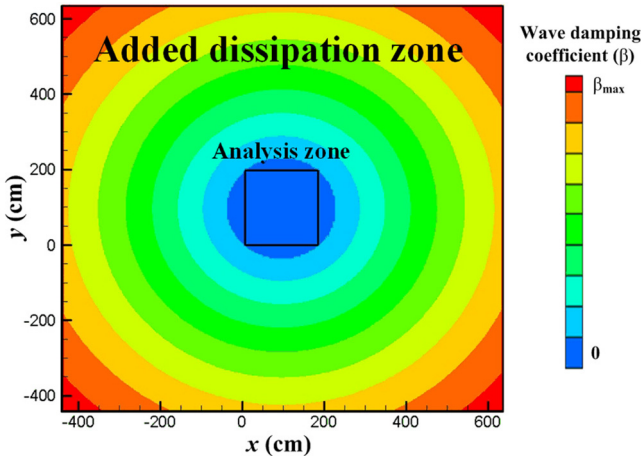


Fig. 3 Schematic illustration of added dissipation zone with wave damping coefficients in NWT

파 제어를 Fig. 3이 같은 부가감쇠영역(Added dissipation zone)과 방사형 파랑감쇠계수(β ; Wave damping coefficient)를 설정하였다. 여기서 β 는 다음 식 (15)에 대입되어 연직유속(w)만을 서서히 감소시킨다.

$$E_i = \begin{cases} 0 & : i = x \text{ or } y \\ \beta w & : i = z \end{cases} \quad (15)$$

개경계 조건은 수치파동수조에서 생성된 에너지를 수조 밖으로 완벽하게 배출하기 위한 것으로 식 (16)처럼 Hinatsu(1992)의 개경계 처리법을 이용한다. 식 (16)에서 ϕ 는 유속과 같은 물리량을 말한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \pm C \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

3. 수치모델의 검증

3.1 검증을 위한 수치파동수조의 구성 및 조건

LES-WASS-3D ver. 2.0을 적용한 연구들에서는 파랑의 진행 방향 양쪽에 무반사 조파시스템을 적용하였다(Lee et al., 2017; Lee et al., 2018). 그러나 수중발파에 의한 수면파는 사방으로 전파된다. 따라서 수중발파에 의한 수면파 전파모의에 앞서 이용하는 수치파동수조의 검증이 요구된다.

Fig. 4와 같이 구성된 수치파동수조의 정중앙에서 발파에 의한 수면파를 생성하여 그 전파과정을 경험적 값과 비교·분석한다. 1km×1km×15m 해석영역을 설정하여 수평 격자($\Delta x, \Delta y$)는 5m, 수직 격자(Δz)는 0.5m의 수치파동수조를 구성하며, 그 외곽에는 Fig. 3과 같이 부가감쇠영역 및 개경계 조건을 고려한다.

이용하는 계산조건은 Table 1과 같으며, 토도 제거를 위한 수중발파 시나리오를 그대로 적용하여 수치파동수조를 검증한다. 수중발파 시나리오의 단계는 수심 -1m, -6m, -11m, -15m 순으로

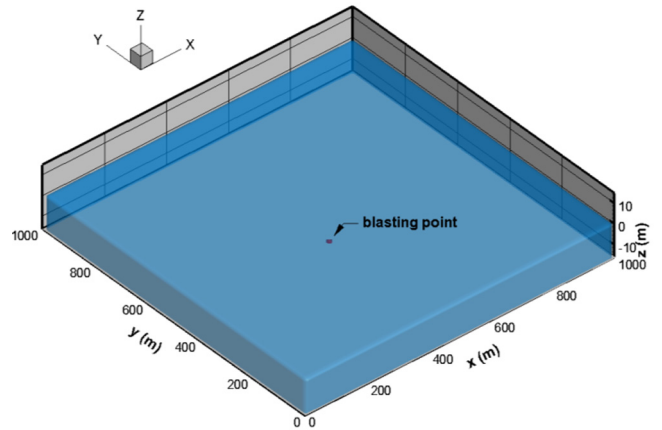


Fig. 4 Definition sketch of a 3-D numerical water tank for validation

Table 1 Underwater blasting conditions used in numerical model validation

Scenario	z [m]	Charge weight per hole [kg/hole]	Number of holes	Total charge weight [kg]
S1	1	124	1	124
S2	6	90		90
S3	11	58		58
S4	15	25		25
M1	1	52	10	520
M2	6	42	11	462
M3	11	27	15	405
M4	15	12	30	360

진행한다. 그리고 단일발파(Scenario S1-S4)와 다중발파(Scenario M1-M4)로 구분하여 수중발파에 따른 수면파의 생성 및 전파를 모의한다. 다중발파에서 발파공의 간격은 5m이다. 그리고 모든 수치모의의 초기계산간격(Δt)을 1/100초로 설정하고, CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)조건을 만족하게 조절한다.

3.2 수면파의 비교·검증

Fig. 5는 단일발파, Fig. 6은 다중발파에 의해 발생한 수면파가 초기 수면형의 반경(R)에서 500m까지 전파하는 과정에서의 최대수위를 비교한 것이다. 여기서 검정 실선은 식 (4)에 의한 값, 붉은 동그라미는 수면파의 최대수위를 각각 나타낸다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 각각의 R 지점에서 경험식 (4)에 의한 값과 수치모의결과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 발파지점(조파원천)에서 발생하는 수면파의 생성과정이 타당하기 때문이다. 또한 R 지점에서 500m 지점까지 수면파가 전파되는 과정에서 최대수위가 높은 정확도로 일치한다. 이것은 본 연구에서 수치파동수조가 발파에 의한 수면파 전파모의에 적합함을 보여준다.

이로써 본 연구에서 제안한 수중폭파에 의한 수면파의 생성 방법, 수치파동수조에서의 수면파 전파모의에 대한 타당성 및 유효성이 입증되었다.

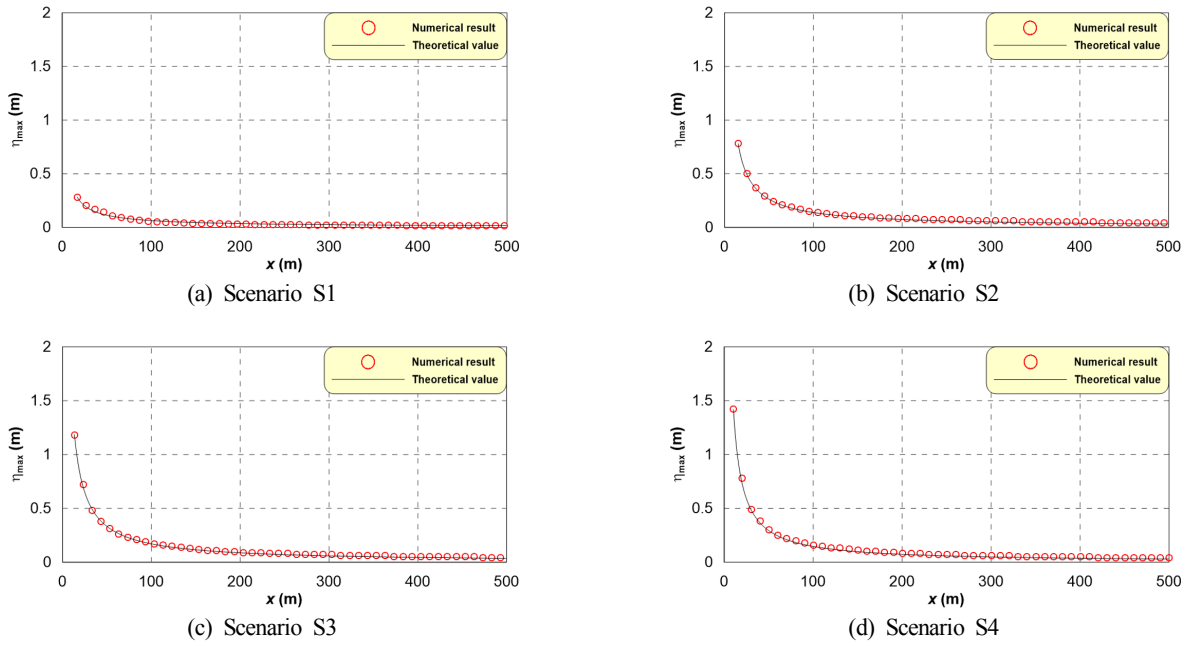


Fig. 5 Comparisons between theoretical(red circle) and numerical(black line) results showing the maximum elevation of water wave by a single-charge blasting

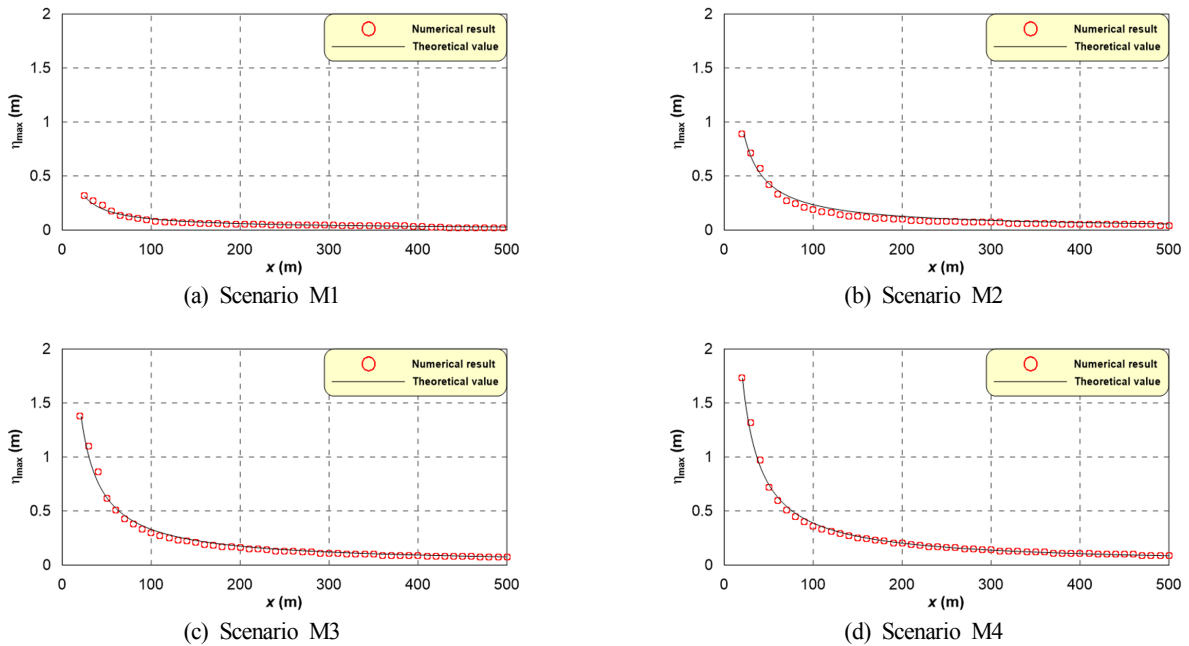


Fig. 6 Comparisons between theoretical value and numerical result showing the maximum elevation of water wave by a multiple-charge blasting

4. 수치모의

4.1 수치파동수조의 구성 및 조건

본 연구에서는 토도 제거를 위한 수중발파 시나리오별 수면파의 생성 및 전파를 모의하기 위하여 Fig. 7에 나타낸 부산신항만의 전 해역을 수치파동수조의 계산영역으로 설정한다. Table 2에 나타낸 것과 같이 5.91km×2.71km×23m의 계산영역을 수평 방향으로 5m 등간격 분할하고, 수직 방향으로 0.1-0.5m 부등간격 분할한다. 이 과정에서 부산신항만 내의 경사지형은 Hur et al.(2008)의 경사면

처리방법을 적용한다. 나머지 상세한 수치모의조건은 Table 2과 같다.

단계별 수중발파 시나리오는 Table 1과 같으며, 육상제거가 완료된 수심 -1m를 시작하여 수심 -6m, 수심 -11m 그리고 마지막 수심 -15m까지 Table 3과 같이 총 4단계로 나누어 수치 모의를 수행한다. 수중발파 시나리오별 장약량은 Table 1에서 기술한 바와 같다. 발파지점에 따른 수면파의 영향 검토는 수치 파동수조 검증에서 가장 큰 수면변동이 발생한 다중발파의 시나리오 4단계 조건(Scenario M4; 수심 -15m)에서 동서남북 가장 자리를 발파지점으로 한다(Table 4 참조). 그리고 부산신항만 컨

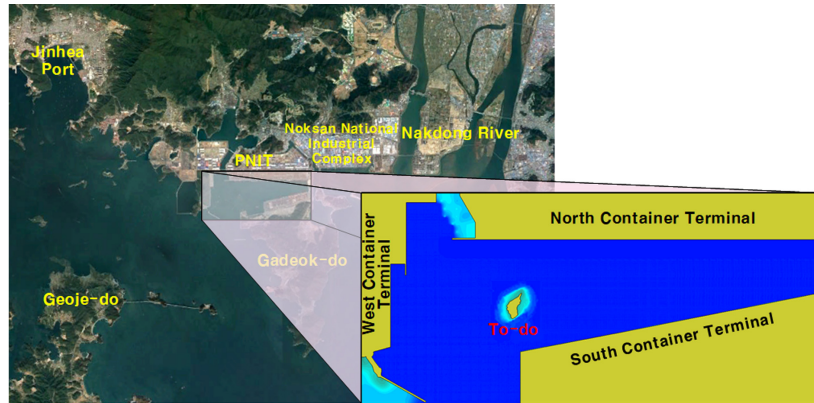


Fig. 7 Overview of target area (Pusan Newport International Terminal, Busan, Korea)

Table 2 Operating conditions for numerical simulation

Domain size	5.91 km × 2.71 km × 23 m
Grid size	Δx or $\Delta y = 5$ m, $\Delta z = 0.1-0.5$ m
Grid number	46,126,368 (1182×542×72)
Time step	1/100 s
Computing time	10 min
Offshore boundary	Added dissipation zone with open boundary
Bottom boundary	Non-slip condition
Water level	Mean sea level (MSL)

테이너 터미널에서 미치는 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 동서남북 직선거리가 가장 가까운 터미널의 4지점에서 시간과 형을 측정한다(Table 5 참조).

4.2 수면파의 전파

Fig. 8과 Fig. 9는 다중발파에 의해 생성된 수면파가 전파하는 과정을 30초 간격으로 나타낸 공간과형이다. Fig. 8은 Scenario M1으로서 발파수심 1m에 총 장약량이 520kg, Fig. 9는 Scenario M4로서 발파수심 -15m, 총장약량이 360kg의 경우를 각각 나타낸다.

Table 3 Scenarios of underwater blasting for numerical simulation

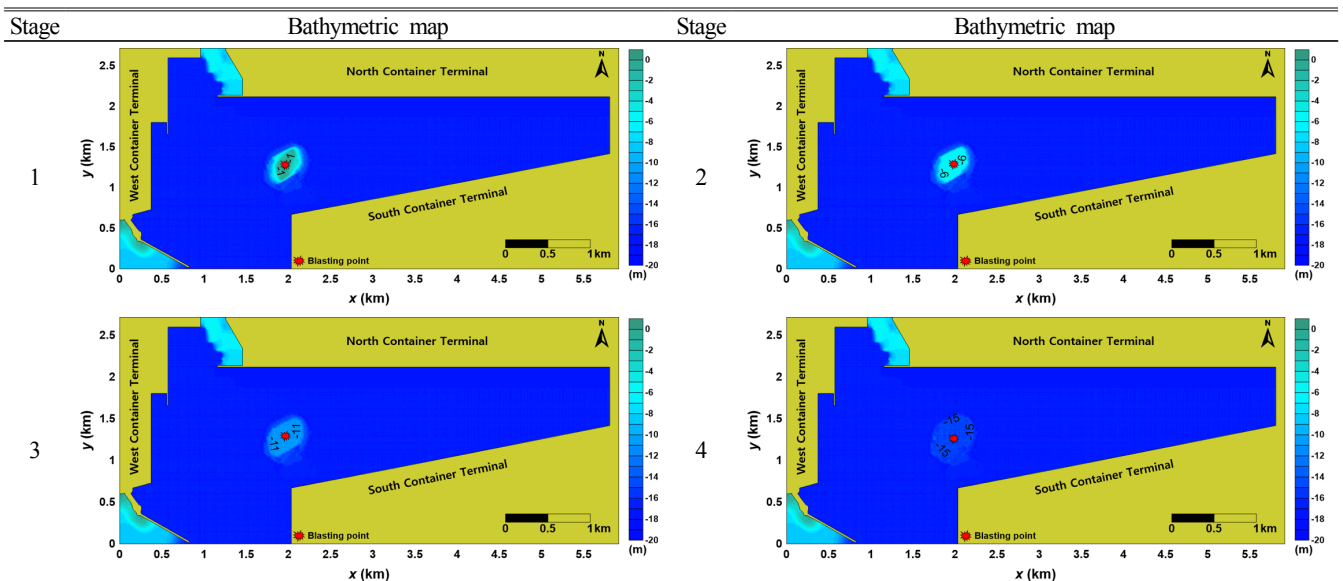


Table 4 Underwater blasting points under condition of stage 4

Location	x [km]	y [km]	Map
North	2.065	1.57	
South	1.99	0.945	
West	1.715	1.23	
East	2.255	1.32	

Table 5 Measuring points of water wave by underwater blasting

Point	x [km]	y [km]	Map
PN	2.05	2.115	
PS	2.05	0.67	
PW	0.385	1.27	
PE	5.81	1.775	

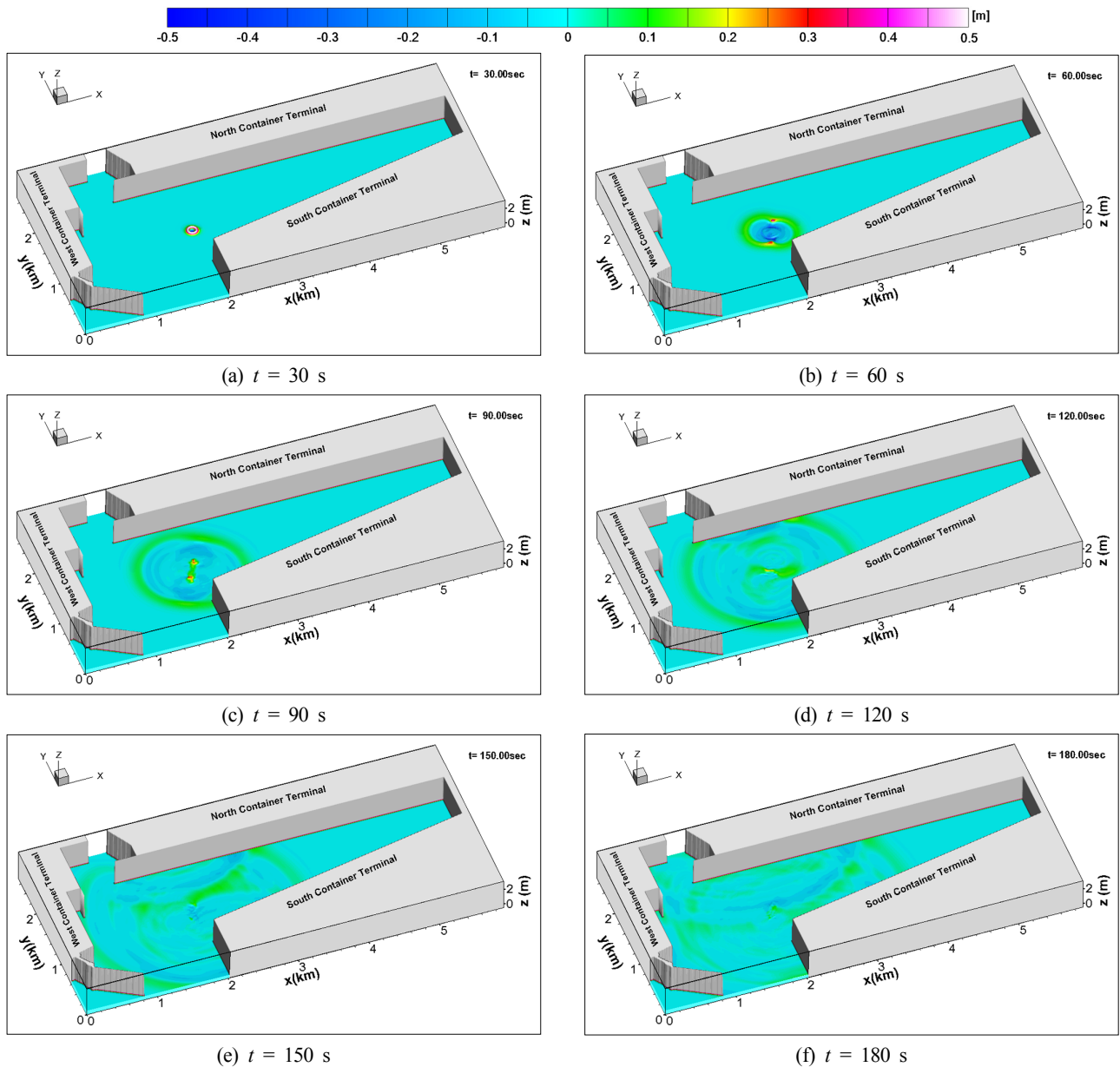


Fig. 8 Temporal and spatial distributions of water surface elevations by underwater blasting in case of Scenario M1

Fig. 8에서는 장약량이 가장 많음에도 불구하고, 발파수심이 -1m로 낮으므로 폭발에너지가 얇은 수층으로 전달됨으로 발생하는 수면파의 진폭이 작다. 그 뿐 아니라 수심 -1m의 토도 지

형이 남북으로 긴 타원형인 관계로 방사형으로 전파되던 수면 파가 남북방향의 양쪽에서 굴절되어 수면파의 중첩이 발생한다. 반면에 Fig. 9에서는 발파수심이 -15m로 가장 깊으므로 장약량

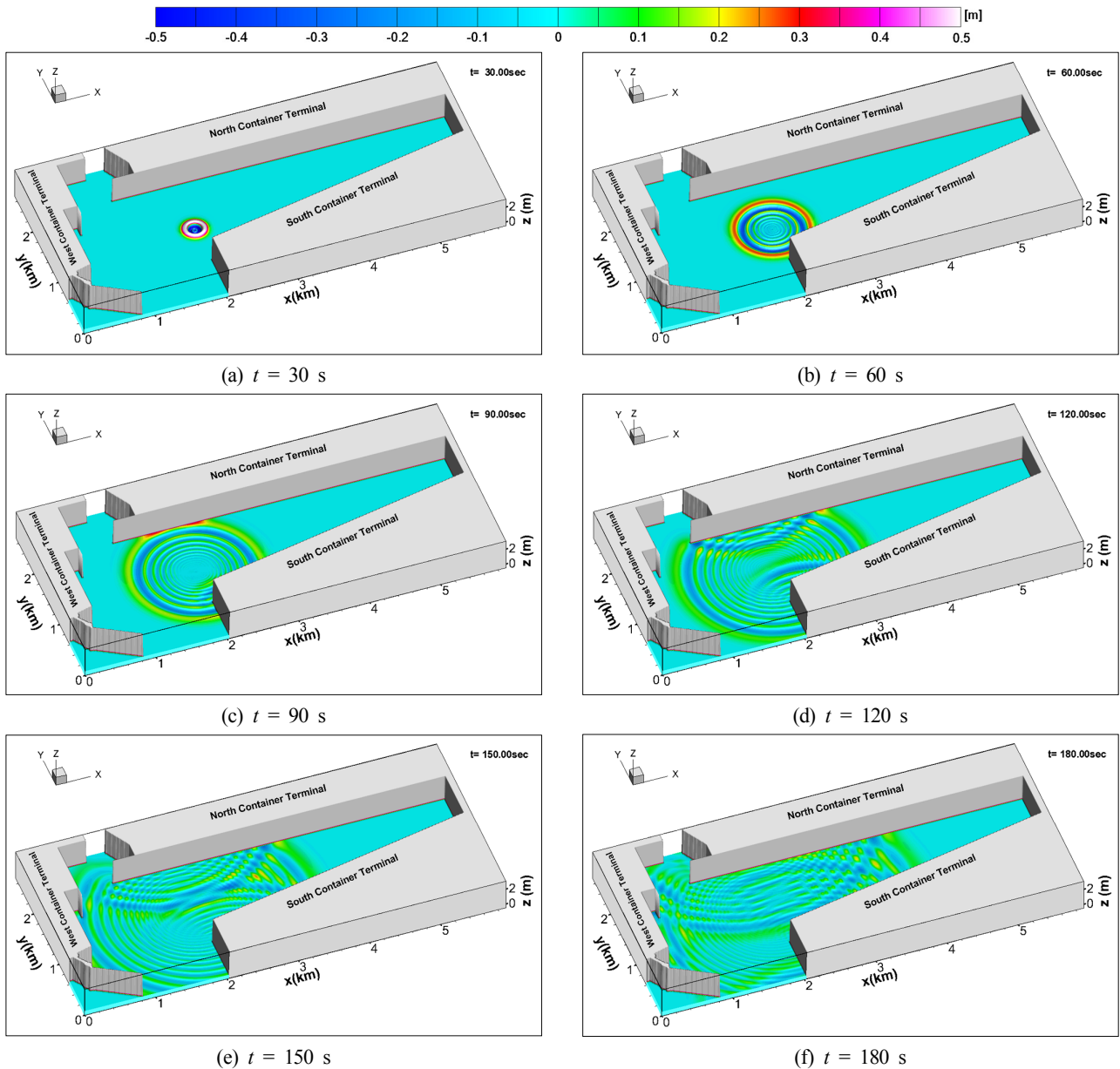


Fig. 9 Temporal and spatial distributions of water surface elevations by underwater blasting in case of Scenario M4

이 적음에도 폭발에너지가 전 수층으로 전달됨으로 수면파의 진폭이 크다. 또한 수면파의 전파에 있어서 토도의 지반높이 (-15m)와 항로의 수심(-17m)과 차이가 작은 관계로 방사형으로 그대로 퍼져나간다. 이 과정에서 수면파는 가까운 남쪽과 북쪽의 컨테이너 터미널 그리고 서쪽 컨테이너 터미널 순으로 도달한다. 그리고 컨테이너 터미널 안벽에 의한 반사파 간의 중첩이 연속적으로 발생함을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Table 5에 나타난 PN, PS, PW, PE에서의 시간과형이며, 수중발파지점에서 직선거리가 가장 가까운 다목적 터미널, 남, 서, 북 컨테이너 터미널의 한 지점이다. 여기서 Fig. 10은 Scenario M1, Fig. 11은 Scenario M4의 경우이다.

Fig. 10과 Fig. 11로부터 수중발파지점으로부터 직선거리가 가까운 PS, PN, PW, PE 순으로 수면변위가 나타난다. Fig. 10은 전술한 Fig. 8에서 논의한 것과 같이 전체적으로 수면변위가 크

지 않다. Fig. 11은 상대적으로 수면변위가 크고, PS, PN, PW, PE 순으로 수면파의 파고가 큰 것을 알 수 있다.

Table 6 Travel time of water wave by underwater blasting in each of measuring points

Scenario	Measuring point [s]			
	PN	PS	PW	PE
S1	100.5	86	156.5	339
S2	92	75	150.5	330
S3	88.5	70	145.5	326
S4	86	68	147.5	320
M1	101.5	84	157.5	337
M2	92.5	74.5	151	329
M3	89	69.5	146	326
M4	86.5	67.5	148	319.5

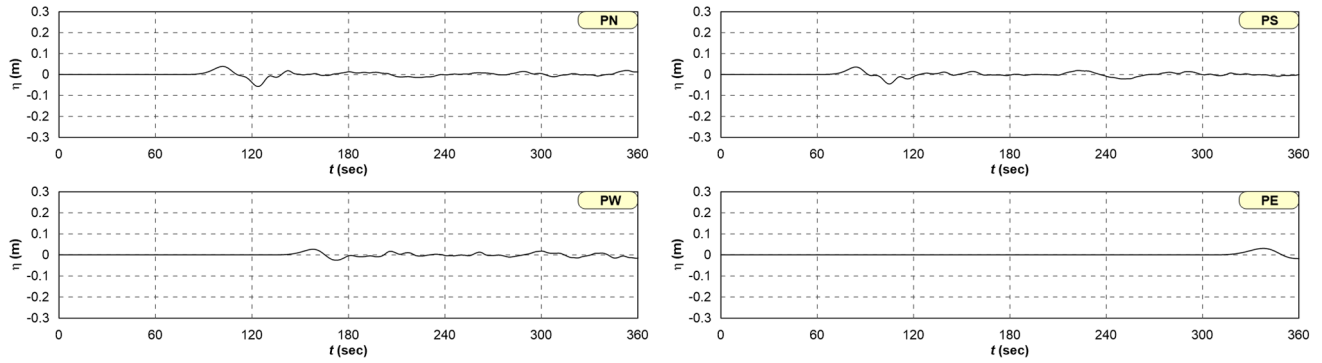


Fig. 10 Time-domain waveform under multiple-charge blasting for Scenario M1

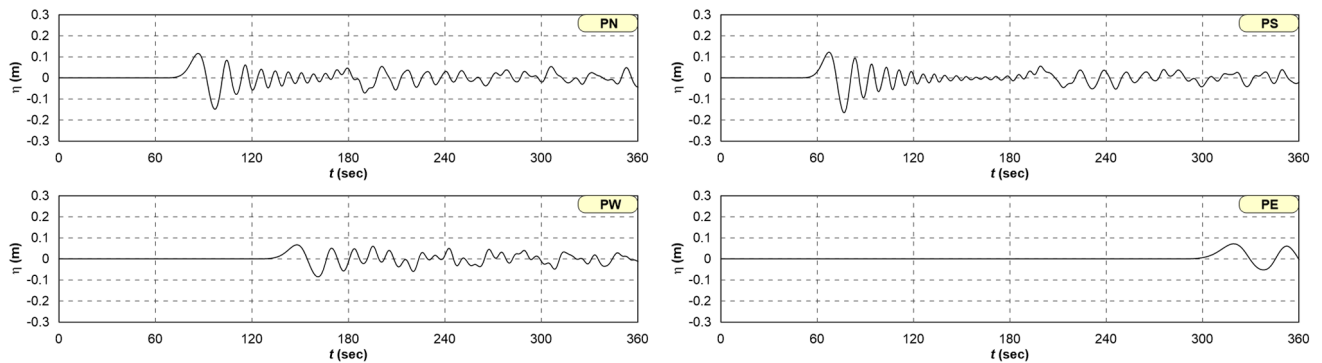


Fig. 11 Time-domain waveform under multiple-charge blasting in Scenario M4

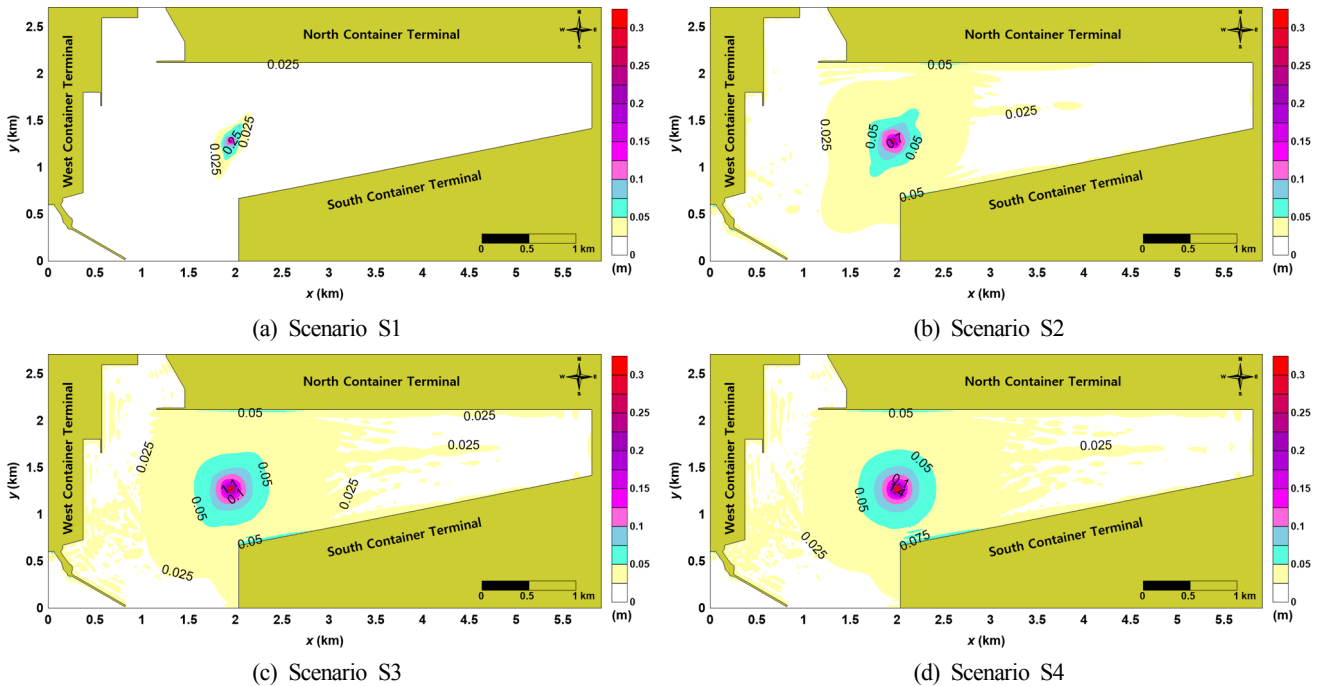


Fig. 12 Spatial distributions of maximum elevation of water wave by a single-charge blasting

Table 6은 수중발파 시나리오별 PS, PN, PW, PE에서의 최대수위(η_{max})가 발생하는 시간을 각각 나타낸 것이다. 전술처럼 수중발파지점으로부터 직선거리가 가까운 PS, PN, PW, PE 순으로 수면파가 도달한다. 그리고 단일발파 및 다중발파에서 발파수심이 깊어 수면파동이 큰 시나리오(Scenario S4와 M4)에서 각각의 안벽에 도달하는 시간이 빨라진다. 이것은 Dean and Dalrymple

(1991)의 고립파 근사이론과 같이 수심과 수면변위가 클수록 파속식 (14)이 빠르기 때문이다.

4.3 최대수위분포

Fig. 12는 단일 수중발파에서 시나리오별 최대수위(η_{max})의 공간분포를 나타낸다. Fig. 12에서 (a), (b), (c), (d)는 Scenario S1-S4

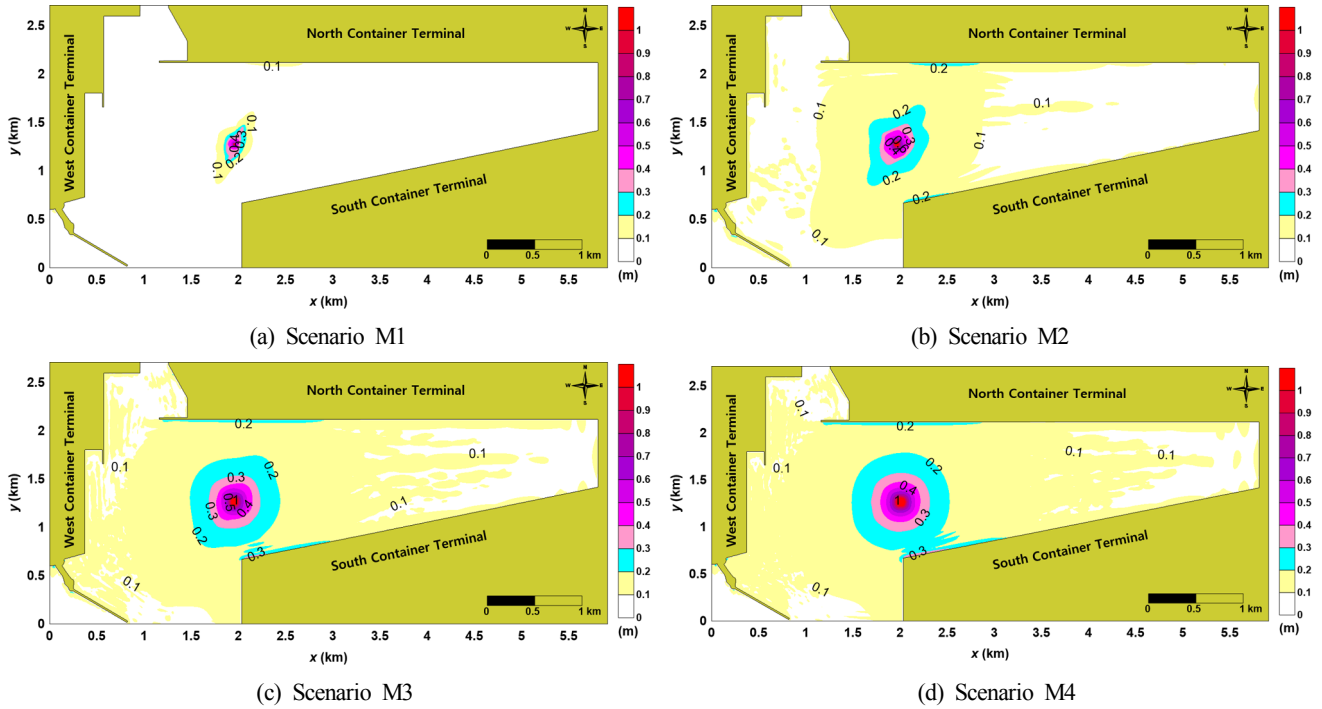


Fig. 13 Spatial distributions of maximum elevation of water wave by a multiple-charge blasting

를 나타내며, 발파수심은 -1m, -6m, -11m, -15m, 장약량은 124kg, 90kg, 58kg, 25kg이다.

Fig. 12로부터 장약량이 많음에도 불구하고, Scenario S1에서 가장 작은 η_{max} 가 발생하는 것은 발파수심이 낮아 수중발파에 의한 수면파동이 발달하지 못하기 때문이며, Fig. 8을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 발파수심이 깊을수록 수중발파에 의한 η_{max} 가 증가하고, 영향 범위도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 13은 다중 수중발파에서 시나리오별 η_{max} 의 공간분포이며, (a), (b), (c), (d)는 Scenario M1-M4를 나타내며, 발파수심은 -1m, -6m, -11m, -15m, 장약량은 520kg, 462kg, 405kg, 360kg이다.

Fig. 13을 Fig. 12와 비교하면, 같은 발파수심에서 장약량이 많은 다중발파의 경우(즉, Fig. 12보다 Fig. 13)에 η_{max} 가 클 뿐 아니라, 수면파의 영향 범위도 넓어진다. 한편 발파수심이 15m인 Scenario S4와 M4를 직접 비교하면, Scenario M4가 장약량이 14.4배 많음에도 η_{max} 와 영향 범위가 많이 증가하지 않는다. 이것은 Le Méhauté and Wang(1996)의 제안식 (4)에서도 알 수 있듯이 장약량(W)에 따른 η_{max} 의 변화가 크지 않기 때문이다.

부산신항만 컨테이너 터미널에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 Table 5에 나타난 각각의 터미널의 측정지점 PN, PS, PW, PE에서의 η_{max} 를 Table 7에 나타낸다.

Table 7로부터 알 수 있듯이 단일 수중발파 Scenario S1-S4는 부산신항만 컨테이너 터미널에 미치는 영향이 미미하다. 그리고 다중발파에서 가장 큰 수면파동이 발생하는 Scenario M4의 경우에 직선거리가 가장 짧은 남컨테이너 터미널 PS지점의 η_{max} 는 0.29m로 그렇게 크지 않다.

본 연구에서 검토한 단일발파 및 다중발파 그리고 단계별 시나리오에 따른 수면파는 주변 컨테이너 터미널에 미치는 영향이 그다지 크지 않다. 하지만 수중발파지점이 터미널에 가까울수록 η_{max} 가 증

Table 7 Maximum elevation of water wave by underwater blasting in each of measuring points

Scenario	Measuring point [m]			
	PN	PS	PW	PE
S1	0.02	0.02	0.01	0.01
S2	0.04	0.04	0.03	0.03
S3	0.05	0.06	0.03	0.03
S4	0.06	0.06	0.03	0.03
M1	0.1	0.08	0.05	0.03
M2	0.19	0.19	0.12	0.12
M3	0.24	0.26	0.15	0.13
M4	0.27	0.29	0.15	0.12

가하는 경향이 나타남으로 Table 4의 발파지점에 따른 수면파의 특성을 다음에서 검토한다.

4.4 발파지점별 수면파의 전파

Fig. 14는 Table 7에서 가장 큰 η_{max} 가 발생한 Scenario M4에서 Table 4에 표시한 발파지점별 η_{max} 의 공간분포를 나타낸다. Fig. 14에서 (a)는 북쪽, (b)는 남쪽, (c)는 서쪽, (d)는 동쪽 각각의 가장자리에서 수중발파를 진행한 결과이다.

Fig. 14로부터 동쪽의 다목적 터미널을 제외하고는 수중발파지점에 인접할수록 남쪽, 북쪽, 서쪽 컨테이너 터미널에서 전반적으로 η_{max} 가 상승하고, 영향 범위가 넓어지는 경향을 보인다. 이것은 수중발파에 의한 수면파가 방사형으로 전파되기 때문에 영향권을 벗어나는 경우엔 η_{max} 가 매우 작지만, 그렇지 않으면 컨테이너 터미널 안벽에서 유의미한 η_{max} 가 발생함을 알 수 있

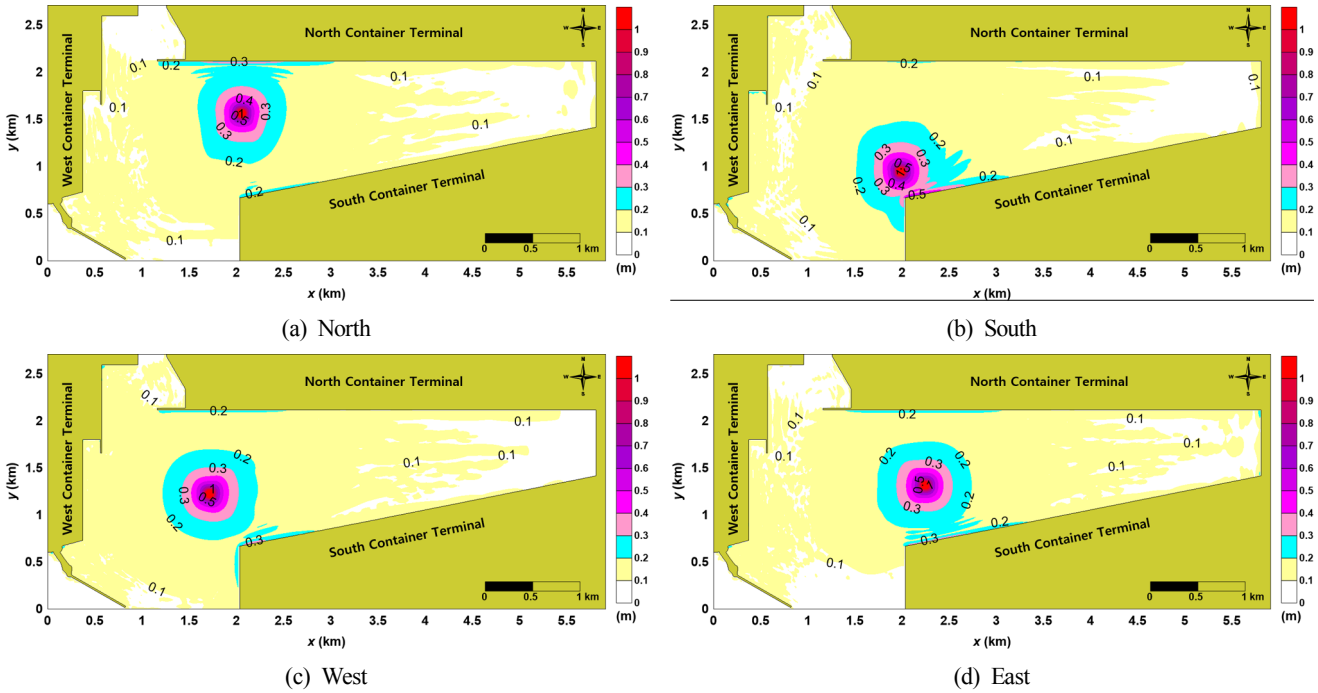


Fig. 14 Spatial distributions of maximum elevation of water wave due to blasting positions

Table 8 Maximum elevation of water wave in each of blasting positions

Position	Measuring point [m]			
	PN	PS	PW	PE
Center	0.27	0.29	0.15	0.12
North	0.36	0.21	0.15	0.1
South	0.21	0.49	0.14	0.12
West	0.23	0.26	0.17	0.07
East	0.25	0.24	0.14	0.15

다. 이에 정량적 분석을 위해 Table 8에 각 컨테이너 터미널의 측정지점 PN, PS, PW, PE에서의 η_{max} 를 나타낸다.

Table 8로부터 각 컨테이너 터미널로부터 수중발파지점이 가까운 경우, η_{max} 가 증가한다. 특히, 토도로부터 직선거리가 가까운 남과 북의 컨테이너 터미널에서 η_{max} 가 증가하며, 남쪽 발파 시에 PS에서 0.2m, 북쪽 발파 시에 PN에서 0.09m 크다. 그리고 토도와 거리가 상대적으로 먼 서쪽 컨테이너 터미널과 다목적 터미널의 측정지점 PW와 PN에서는 η_{max} 의 증가가 크지 않다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 수중발파에 의한 수면파의 발생 및 전파를 모의하기 위하여 3차원 수치파동수조(LES-WASS-3D Ver. 2.0; Lee and Hur, 2014a)를 개량하였다. 그 과정에서 수중발파에 의한 수면파를 생성을 위하여 발파수심과 장약량에 따라 파 제원을 추정할 수 있는 경험식을 수면파 조파에 이용하였다. 그리고 수치파동수조에서 수중발파에 따른 수면파의 생성과 전파 과정에서의 최대수위분포를 비교·검증하였다. 이 수치파동수조에 토도

제거를 위한 수중발파 시나리오를 적용하여 수면파 생성과 전파를 모의하였다. 이를 통해 얻어진 주요한 결과를 다음과 같이 기술한다.

(1) 본 연구에서는 수중발파에 의한 수면파를 생성하기 위하여 Le Méhauté and Wang(1996)의 경험식을 무반사 조파시스템에 적용하는 조파방법을 제안하였다. 그리고 비교·검증을 통해 수중발파에 따른 수면파의 생성 및 전파에 관한 수치파동수조의 타당성 및 유효성을 확보하였다.

(2) 3차원 수치파동수조에서 토도 제거를 위한 수중발파 시나리오별 수면파의 생성 및 전파를 모의하였다. 그 결과 단일/다중발파의 각 조건에서 장약량이 많을수록, 발파수심이 깊을수록 수면파동이 커졌다. 또한 발파수심이 깊을수록 η_{max} 가 크고, 파속이 증가하여 컨테이너 터미널 안벽에 도달하는 시간이 빨라졌다.

(3) 수중발파지점이 각 컨테이너 터미널에 가까울수록 η_{max} 가 커지는 경향을 나타내었다. 특히, 남과 북의 컨테이너 터미널 안벽에서 중앙발파보다 남쪽 또는 북쪽발파 시에 η_{max} 가 증가하였다. 그리고 서컨테이너 및 다목적 터미널에서는 증가 폭이 크지 않았다.

(4) 본 연구에서 검토한 토도 제거를 위한 수중발파 시나리오에 따른 수면파는 가동 중인 부산신항만의 터미널에 미치는 영향이 크지 않음을 확인하였다.

수중발파에 의한 충격파, 압력강하에 의한 공동현상, 기포의 생성과 상승(팽창과 수축) 등의 복합적 상호작용 때문에 발생하는 수면파동을 CFD를 이용하여 직접 모의할 수 있지만, 광역에서의 전파과정까지 추정하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 수중발파에 의한 수면파가 주변 해역에 미치는 영향을 분석에는 본 연구처럼 장약량과 발파수심에 따른 수면파의 제원을 산정하여 수면파를 생성하는 것이 더 효과적이다. 향후, 부산신항

만에서 토도 제거를 위해 진행하고 있는 수중발파 시의 수면변위 자료를 수집하여 수치파동수조에서 실제 조건을 적용한 모의결과와 비교·검토를 수행할 예정이다.

후 기

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1C1B6007461).

References

- An, B.D., Lee, I.J., Heo, T.M., 2007. A Case Study of Underwater Blasting Using Emulsion Explosives. *Explosives & Blasting*, 25(2), 71-78.
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992. A Continuum Model for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*, 100(2), 335-354. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y)
- Brorsen, M., Larsen, J., 1987. Source Generation of Nonlinear Gravity Waves with Boundary Integral Equation Method. *Coastal Engineering*, 11(2), 93-113. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(87\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0378-3839(87)90001-9)
- Carlson, T.J., Johnson, G.E., Woodley, C.M. Skalski, J.R., Seaburg, A., 2011. Compliance Monitoring of Underwater Blasting for Rock Removal at Warrior Point, Columbia River Channel Improvement Project, 2009/2010. Pacific Northwest National Laboratory Completion Report (PNNL-20388), Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers. <https://doi.org/10.2172/1023122>
- Choi, G., Jung, K., Jung, S.S., Kim, J.C., Lee, P.S., 2017. Underwater Explosion Experiments Using Pentolite. *Explosives & Blasting*, 35(3), 21-30.
- Choi, T.H., Kim, J.H., Song, H.L., Ko, C.S., 2015. Suggestion of Safety Level in Fish Farming by Impulsive Sound. *Tunnel and Underground Space*, 25(2), 125-132. <https://doi.org/10.7474/TUS.2015.25.2.125>
- Cole, R.H., 1948. *Underwater Explosions*. 1st Edition, Princeton University Press.
- Costanzo, F.A., 2011. Underwater Explosion Phenomena and Shock Physics. *Structural Dynamics*, 3, 917-938. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9834-7_82
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Advanced Series on Ocean Engineering, 2, World Scientific Publishing Company.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W.H., 1991. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Physics of Fluids*, 3(7), 1760-1765. <https://doi.org/10.1063/1.857955>
- Govoni, J.J., West, M.A., Settle, L.R., Lynch, R.T., Greene, M.D., 2008. Effects of Underwater Explosions on Larval Fish: Implications for a Coastal Engineering Project. *Journal of Coastal Research*, 24(2A), 228-233. <https://doi.org/10.2112/05-0518.1>
- Hamashima, H., Shibuta, M., Nishimura, Y., Itoh, S., 2010. Behavior of Bubble Pulse in Food Processing Using Underwater Shock Wave. *The International Journal of Multiphysics*, 4(2), 113-124. <http://dx.doi.org/10.1260/1750-9548.4.2.113>
- Hinatsu, M., 1992. Numerical Simulation of Unsteady Viscous Nonlinear Waves using Moving Grid System Fitted on a Free Surface. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 217, 1-11. https://doi.org/10.14856/kansai.217.0_1
- Hunter, K.S., Geers, T.L., 2002. Pressure and Velocity Fields Produced by an Underwater Explosion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(5), 2329-2329. <https://doi.org/10.1121/1.4779405>
- Hur, D.S., Lee, W.D., Bae, K.S., 2008. On Reasonable Boundary Condition for Inclined Seabed/Structure in Case of the Numerical Model with Quadrilateral Mesh System. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(5), 591-594.
- Hur, D.S., Lee, W.D., 2011. On Generation Methods of Oblique Incidence Waves in Three-Dimensional Numerical Wave Tank with Non-Reflected System. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(6), 401-406. <https://doi.org/10.9765/KSCO.2011.23.6.401>
- Hur, D.S., Lee, W.D., Cho, W.C., 2012. Three-Dimensional Flow Characteristics around Permeable Submerged Breakwaters with Open Inlet. *Ocean Engineering*, 44, 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.01.029>
- Jeung, M.S., Park, J.H., Song, Y.S., 2004. A Case Study of Underwater Blasting. *Explosives & Blasting*, 22(3), 57-64.
- Keevin, T.M., Hempen, G.L., 1997. *The Environmental Effects of Underwater Explosions With Methods to Mitigate Impacts*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Kim, Y.K., Kim, S.K., 2018. A Case of Underwater Blasting Performance Using a Structural Underwater Charging System. *Explosives & Blasting*, 36(2), 37-35.
- Klaseboer, E., Hung, K.C., Wang, C., Wang, C.W., Khoo, B.C., Boyce P., Debono, S., Charlier, H., 2005. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of an Underwater Explosion Bubble near a Resilient/Rigid Structure. *Journal of Fluid Mechanics*, 537, 387-413. <https://doi.org/10.1017/S0022112005005306>
- Le Méhauté, B., Wang, S., 1996. *Water Waves Generated by Underwater Explosion*. Advanced Series on Ocean Engineering, 10, World Scientific.
- Lee, S., Kang, D.W., Park, H.B., 2001. A Study on the Effective Oscillation Characteristics of the Constructions of Blasting Operations in Seaside. *Explosives & Blasting*, 19(1), 71-84.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2014a. Development of 3-D Hydrodynamical Model for Understanding Numerical Analysis of Density Current due to Salinity and Temperature and its Verification. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(3), 859-871. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.3.0859>

- Lee, W.D., Hur, D.S., 2014b. Development of a 3-D Coupled Hydro-Morphodynamic Model between Numerical Wave Tank and Morphodynamic Model under Wave-Current Interaction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(5), 1463-1476. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.5.1463>
- Lee, W.D., Park, J.R., Jeon, H.S., Hur, D.S., 2016. A Study on Stable Generation of Tsunami in Hydraulic/Numerical Wave Tank. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 36(5), 805-817. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.5.0805>
- Lee, W.D., Park, J.R., Jeon, H.S., Hur, D.S., 2017. Effects of Tsunami Waveform on Energy Dissipation of Aquatic Vegetation. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(2), 121-129. <https://doi.org/10.5574/KSOE.2017.31.2.121>
- Lee, W.D., Kim, J.O., Park, J.R., Hur, D.S., 2018. Effects of Tsunami Waveform on Overtopping and Inundation on a Vertical Seawall. *Journal of Korea Water Resources Association*, 51(8), 643-654.
- Lilly, D.K., 1992. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method. *Physics of Fluids A*, 4, 633-635. <https://doi.org/10.1063/1.858280>
- Miller, S.T., Jasak, H., Boger, D.A., Paterson, E.G., Nedungadi, A., 2013. A Pressure-Based, Compressible, Two-Phase Flow Finite Volume Method for Underwater Explosions. *Computers & Fluids*, 87, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.04.002>
- Ming, F.R., Zhang, A.M., Xue, Y.Z., Wang, S.P., 2016. Damage Characteristics of Ship Structures Subjected to Shockwaves of Underwater Contact Explosions. *Ocean Engineering*, 117, 359-382. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.040>
- Ohyama, T., Nadaoka, K., 1991. Development of a Numerical Wave Tank for Analysis of Non-Linear and Irregular Wave Field. *Fluid Dynamics Research*, 8, 231-251. [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(91\)90045-K](https://doi.org/10.1016/0169-5983(91)90045-K)
- Park, Y.S., Park, S.J., Kang S.H., Jeon, Y.B., Gong, G.J., 2006. An Experimental Study on Ground Vibration Equations by Underwater Blasting at Construction Site. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 16(7), 777-783. <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2006.16.7.777>
- Saadatfar, S., Zahmatkesh, A., 2018. Evaluation of Underwater Blast on Concrete Gravity Dams Using Three-Dimensional Finite-Element Model. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(1), 69-78. <https://doi.org/10.22060/AJCE.2018.13467.5416>
- Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99-164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- Wang, G., Zhang, S., Yu, M., Li, H., Kong, Y., 2014. Investigation of the Shock Wave Propagation Characteristics and Cavitation Effects of Underwater Explosion near Boundaries. *Applied Ocean Research*, 46, 40-53. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.02.003>
- Jeung, M.S., Park, J.H., Song, Y.S., 2004. A Case Study of Underwater Blasting. *Explosives & Blasting*, 22(3), 57-64.
- Warren, W.D., 1996. The Response of Surface Ships to Underwater Explosion. *Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne, Australia, DSTO-GD-109*
- Zhang, Z., Wang, L., Yao, X., Lang, J., 2017. Dynamics of an Underwater Explosion Bubble near a Rigid Wall: Effect of Slenderness Ratio, Installation, and Distance Parameter. *Journal of Coastal Research*, 33(4), 959-971. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00094.1>

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)

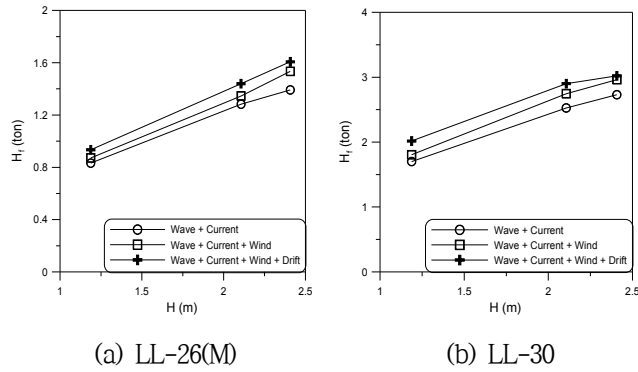


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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. The manuscript must be accompanied by a signed statement that it has been neither published nor currently submitted for publication elsewhere. The manuscript should be written in English or Korean and a minimum standard of the proficiency in the English or Korean language should be met before submission to the editorial office.

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

Submission checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any

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

Fundamental errors in published works

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

Article structure

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

Abstract

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

Keywords

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

Unit

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

Equations

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

Tables

Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Each table should be typed on a separate sheet of paper and be fully titled. All tables should be referred to in the text.

Figures

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

Reference

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

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

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

Examples:

Reference to a journal publication:

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

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

Reference to a book:

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

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

Reference to a proceeding:

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

Reference to a website:

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

Journal abbreviations

Journal names should not be abbreviated.

Revised manuscripts

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

Proofs and reprints

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

Peer review

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

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

Page charge

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

Editing checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Transfer of copyright

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

Authors' Checklist

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

< Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

< **Submission checklist** >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Ethical Codes of Research

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

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

A. Foundational Spirit

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

B. Fundamental Canons

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

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

C. Practical Platforms

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

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

D. The Scope of Manuscript

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

E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research

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

F. Screening System, Processing Criteria and Procedure

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

contributor a chance to defend him/herself.

2. Processing Criteria

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

3. Processing Procedure

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

G. Ethical codes of Editing

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

Supplementary Provisions

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

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

Publishing Agreement

Article details

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

YOUR STATUS

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

ASSIGNMENT OF COPYRIGHT

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

SCHOLARLY COMMUNICATION RIGHTS

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

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

Corresponding author :

name

signature

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

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

USER RIGHTS

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

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

REVERSION OF RIGHTS

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

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

1. 본 학회지에 투고하고자 하는 사람은 한국해양공학회 회원임을 원칙으로 하며 공저인 경우에는 적어도 1인 이상이 회원이어야 한다. 단, 본 학회의 편집위원회가 특별히 인정한 사람은 예외로 한다.
2. 원고는 학술논문, 기술보고 및 자료를 포함하고, 학술논문의 경우 다른 학술지에 게재되지 않은 것이라야 한다. 학술지라 함은 투고 논문에 대한 적절한 심사체계와 주기적 발간이 이루어지는 저널(Journal) 등을 의미한다. 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구 보고서, 학위논문, 학술기사 등 모든 원고는 투고가 가능하다. 또한 본 학회지에 게재되면 본 학회 편집위원회의 서면승인 없이 타학술지에 전부 또는 일부가 동일형식으로 발표되어서는 안되며, 저작권은 학회에 귀속된다.
3. 투고논문 중 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구보고서, 학위논문, 학술기사 등의 경우는 각주를 통해서 아래 예와 같이 원고 전체 혹은 부분이 출판되었음을 명시하여야 한다.

예) 본 논문은 2008년 제주도에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.
4. 원고는 인터넷 상에서 WebReview 시스템을 이용하여 제출하여야 하며 이때 본 학회의 논문투고양식(template)에 맞도록 한글(Hangul) 또는 MS 워드(MS Word) 파일을 첨부로 제출하여야 한다. 원고접수 시 소정의 심사료를 납부하여야 한다. 또한 저작권 위임동의서를 학회 사무국으로 제출하여야 한다.
5. 원고가 인터넷 상에서 접수된 날을 접수일자로 한다.
6. 원고의 채택여부는 논문심사규정에 따라 정한다.
7. 학회지에 게재될 원고의 규정면수는 6면 이내이고, 규정면수를 초과할 때 저자는 소정의 게재료 이외에 초과분에 대한 게재료를 납부하여야 한다.
8. 논문원고의 체제는 다음을 원칙으로 한다. (1)제목, (2)저자명, (3)주요기술용어(Key Words), (4)영문초록, (5)기호설명, (6)서론, (7)본론(이론해석, 실험방법, 결과, 결과의 해석, 고찰), (8)결론, (9)후기, (10)참고문헌, (11)부록, 기타
9. 상세한 편집 방법은 한국해양공학회지(JOET) 템플릿을 따른다.
10. 원고에 포함될 도표 및 사진은 한글 또는 MS워드에서 처리가 가능하여야 하며 그 선명도에 대한 책임은 저자가 진다.
11. 원고 내용 및 탈오자의 책임은 저자가 진다.
12. 편집위원회는 본 학회의 논문투고규정을 따르지 않는 원고에 대하여 심사 및 게재를 거부할 수 있다.
13. 기타 본 규정에 명시되지 않은 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

제33권 제4호(통권 제149호)

인 쇄 : 2019년 8월 26일

발 행 : 2019년 8월 31일

발행인 : 윤중성

편집인 : 정준모

발 행 소 : 사단법인 한국해양공학회

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

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

담당 : 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