

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

한국해양공학회지

제32권 제2호 (통권 제141호)

2018년 4월

Journal of Ocean Engineering
and Technology



Vol. 32, No. 2 (Serial Number 141)
April 2018

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장

김윤해 한국해양대학교

편집이사

정준모 인하대학교

신성원 한양대학교

안석환 중원대학교

최형식 한국해양대학교

편집위원

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

송창용 목포대학교

엄원석 연세대학교

윤현규 창원대학교

이우동 경상대학교

이종현 제주대학교

이탁기 경상대학교

임영섭 서울대학교

정동호 한국해양과학기술원

하태민 강원대학교

국제자문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

연구윤리위원회

위원장

서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원

윤현규 창원대학교

구원철 인하대학교

학회 임원

회장

윤종성 인제대학교

부회장

하문근 삼성중공업

고재용 목포해양대학교

김선진 부경대학교

조철희 인하대학교

정대연 대영엔지니어링

양영명 한국가스공사

Editorial Boards

Editor-in-Chief

Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Manuscript Editors

Joonmo Choung, Inha University, Korea

Sungwon Shin, Hanyang University, Korea

Seokhwan Ahn, Jungwon University, Korea

Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Editorial Board Members

Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea

Younghun Kim, Kyungnam University, Korea

Jinwhan Kim, KAIST, Korea

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

Jong Chun Park, Pusan National University, Korea

Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea

Won Suk Ohm, Yonsei University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Woo Dong Lee, Gyeongsang National University, Korea

Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea

Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea

Youngsub Lim, Seoul National University, Korea

Dongho Jung, KRISO, Korea

Taemin Ha, Kangwon National University, Korea

International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Research and Ethics Boards

Chief

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Management and Deliberative and Education Department

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Weoncheol Koo, Inha University, Korea

Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

President

Jong-Sung Yoon, Inje University, Korea

Vice President

Mun-Keun Ha, Samsung Heavy Industries, Korea

Jae-yong Ko, Mokpo National Maritime University, Korea

Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea

Chul Hee Jo, Inha University, Korea

Dae-Yeon Chung, DY Engineering, Korea

Youngmyung Yang, KOGAS, Korea

AIMS and SCOPE

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

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

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

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

Marine material engineering including: Metallic material engineering; Organic material engineering; Ceramics; Composite material engineering; Materials evaluation engineering; Surface engineering; Tribology;

Information technology and convergence fields including: Design for safety; IT-based design; IT-based production engineering; Welding mechanics; Design of underwater vehicle; Offshore energy system design; Environment and system evaluation; Control engineering; GPS and GIS; Inspection and sensor; Port and logistics; Leisure boat and deep sea water; Offshore process systems engineering;

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

GENERAL INFORMATION

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

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

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

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

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

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

© 2018 by The Korean Society of Ocean Engineers (KSOE) / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

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

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

Printed on April 30, 2018 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제32권 제2호 (통권 제141호)

2018년 4월

<학술논문>

- 플레어 각도에 따른 청수현상의 발생과정 및 갑판 위 유동특성 변화에 대한 실험적 연구
이강남 · 정광효 · 서성부 · 김문성 77
- 다층 지반의 열전도율을 고려한 해저배관의 총괄열전달계수식 제안
박동수 · 신문범 · 서영교 84
- FLNG개념설계 단계에서 SMR 및 DMR 액화공정의 잠재적 폭발위험도 비교
유원우 · 채민호 · 박재욱 · 임영섭 95
- 선박 및 해양 구조물 곡부재 치수 품질 관리를 위한 가공완성도 평가
권기연 · 이재용 106
- 평형해빈단면 개념을 이용하여 파랑 에너지 유입에 따른 해안선 변동 해석
김태곤 · 이정렬 116
- 동해 파랑관측 자료를 활용한 포물선형 평형해안선 식의 타당성 조사
임창빈 · 이정렬 123
- < 학술논문: 수중수상로봇분야 특집 >
- 무인 잠수정의 제어 성능 비교 연구
주성현 · 양선제 · 국태용 · 박종구 · 김용석 · 고낙용 · 문용선 131
- 해양 소방 안전을 위한 자율수상로봇 개발
정진석 · 사영민 · 김현식 138
- 영상통신용 수중광통신 시스템 연구
손현중 · 강진일 · Thieu Quang Minh Nhat · 김서강 · 최형식 143

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 32, Number 2

April, 2018

<Original Research Articles>

- Experimental Study on Variations in Behavior of Green Water and Flow Kinematics on Deck with Various Flare Angles
Gang Nam Lee, Kwang Hyo Jung, Sung Bu Suh and Mun Sung Kim 77
- Proposed OHTC Formula for Subsea Pipelines Considering Thermal Conductivities of Multi-Layered Soils
Dong-Su Park, Mun-Beom Shin and Young-Kyo Seo 84
- Potential Explosion Risk Comparison between SMR and DMR Liquefaction Processes at Conceptual Design Stage of FLNG
Wonwo You, Minh Chae, Jaeuk Park and Youngsub Lim 95
- Fabrication Assessment Method for Dimensional Quality Management of Curved Plates in Shipbuilding and Offshore Structures
Ki-Youn Kwon and Jaeyong Lee 106
- Analysis of Shoreline Response due to Wave Energy Incidence Using Equilibrium Beach Profile Concept
Tae-Kon Kim and Jung-Lyul Lee 116
- Performance Test of Parabolic Type Equilibrium Shoreline Formula Using Wave Data Observed in East Sea
Chang Bin Lim and Jung Lyul Lee 123
- <Original Research Article : Special Issue on Marine Robot Technology>**
- Performance Comparison of Control Design for Unmanned Underwater Vehicle
Sung-Hyeon Joo, Seon-Je Yang, Tae-Yong Kuc, Jong-Koo Park, Yong-Serk Kim, Nak-Yong Ko and Yong-Seon Moon 131
- Development of Autonomous Surface Robot for Marine Fire Safety
Jinseok Jeong, Youngmin Sa and Hyun-Sik Kim 138
- Study on Underwater Optical Communication System for Video Transmission
Hyun-Joong Son, Jin-Il Kang, Thieu Quang Minh Nhat, Seo Kang Kim and Hyeung-Sik Choi 143

Experimental Study on Variations in Behavior of Green Water and Flow Kinematics on Deck with Various Flare Angles

Gang Nam Lee^{ID*}, Kwang Hyo Jung^{ID*}, Sung Bu Suh^{**} and Mun Sung Kim^{***}

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

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

^{***}Offshore Engineering Team, Samsung Heavy Industries, Co. Ltd, Gyeonggi-do, Korea

플레어 각도에 따른 청수현상의 발생과정 및 갑판 위 유동특성 변화에 대한 실험적 연구

이강남^{ID*} · 정광효^{ID*} · 서성부^{**} · 김문성^{***}

^{*}부산대학교 조선해양공학과

^{**}동의대학교 조선해양공학과

^{***}삼성중공업 해양엔지니어링팀

KEY WORDS: Green water 청수현상, FPSO 부유식 원유생산저장하역설비, Flare angle 플레어 각도, Bubble image velocimetry 기포영상 유속측정법, Multi-phase flow 다상 유동장

ABSTRACT: In this study, a series of experiments were performed to investigate the variations in the behavior of green water generation and the flow kinematics of bubbly flow on deck with various flare angles. The experiments were conducted in a 2-D wave flume using a simplified model of a BW Pioneer FPSO operating in the Gulf of Mexico, with a 100-year return period wave condition. The green water phenomena were captured with a high speed CCD camera. The variations in the behavior of the green water generation were investigated with various flare angles, and the horizontal mean velocity profiles of bubbly flow on deck obtained using bubble image velocimetry (BIV) were provided. The differences in flow kinematics of bubbly flow on deck were analyzed with various flare angles.

1. 서 론

해양환경에서 장기간 운영되는 선박 및 해양구조물에 있어 파랑에 의한 충격하중은 설계 시 고려되어야 할 필수요소 중 하나이다. 그 중 갑판 위로 파랑이 넘어와 상부구조물 및 갑판에 충격을 주는 청수현상은 극한의 해상환경에서 빈번히 발생하며, 이에 의해 많은 선박 및 해양구조물들이 파손 혹은 침몰 등의 피해를 받은 사례가 보고되고 있다(Faulkner, 2001; Ersdal and Kvitrud, 2001; Leonhardsen et al., 2001; Sgouros et al., 2005).

청수현상을 고려한 선박 및 해양구조물의 설계를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지 청수현상에 관한 실험 연구는 크게 청수현상의 발생 확률 및 가능성 판단, 갑판 위 유동특성 분석, 그리고 청수현상으로 인한 하중예측 등 세 가지의 관점으로 분류 될 수 있다. Hamoudi and Varyani(1998)는 예인수조 실험을 통해 입사파의 파고 및 주기, 선속 및 건현 높이 등의 다양한 설계 변수에 대한 청수현상의 발생확률을 연구하였고, Soarse and Pascoal(2005)는 실험적 연구를 통해 FPSO(Floating production storage and offloading)에 발생하는 청수현상 및 갑판 위 자유수면 높이 변화에 대한 확률론적 모델을 제시하였다. Greco(2001)는 2차원 조파수조에서 단순화된 모형에 대해 청수현상의 유동특성 및 압력특성에 관한 연구를 수행하였으며 청수현상의 갑판 위 유동 형상이 돌진형 쇄파(Plunging wave breaker)의 형태로 나타난다는 것을 보였다. 국내에서는 Lim et al.(2012) 이 3가지 FPSO 선수형상에 대하여 청수현상의 하중을 측정하고, 어떠한 형상의 선형이 청수현상에 의한 하중을 더 절감할 수 있는지에 대한 연구를 수행하였다.

최근에는 전산기술의 향상 및 CFD(Computational fluid dynamics) 시뮬레이션 기법의 발달에 따라 FVM(Finite volume method),

Received 26 August 2017, revised 4 April 2018, accepted 12 April 2018

Corresponding author Kwang Hyo Jung: +82-51-510-2343, kjung@pusan.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8229-6655

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

MPS(Moving particle method) 등의 수치기법들을 이용한 청수현상 하중 및 발생확률을 예측하는 연구들이 주를 이루고 있다(Nielsen and Mayer, 2004; Yamasaki et al., 2005; Shibata and Koshizuka, 2007)

청수현상 저감을 위한 장치 및 선형개발을 위해서는 먼저 청수현상의 유동특성에 대한 분석이 필수적이다. Ryu and Chang (2005)은 영상유속측정법(Particle image velocimetry, PIV) 및 기포영상유속측정법(Bubble image velocimetry, BIV)를 이용하여 사각형 구조물에 돌진형 쇄파가 발생하였을 때의 다상 유동장을 계측하고, 갑판 위의 기포 속도장을 댐 붕괴(Dam breaking) 이론과 비교하였다. Lee et al.(2016)는 사각형 해양구조물에 발생하는 청수현상의 발생과정을 규명하고, 파고의 변화에 따른 청수현상의 다상 유동장 계측을 통한 유체동역학적 특성 분석 및 FVM을 이용한 CFD 시뮬레이션 결과와 비교·검증 하였다.

이러한 선박 혹은 해양구조물의 청수현상에 의한 피해 저감을 위하여 선형 설계 시 플레어 각도(Fig. 1)를 적용할 수 있다. 플레어 각도의 변화에 관하여 Buchner and Voogt(2000)는 FPSO의 선수 플레어 각도 변화에 따른 갑판 위 유동 속도 및 자유수면 변화에 대해 실험을 통한 정성적 연구를 수행하였으며, Faltinsen et al.(2002)은 플레어 각도가 작아지면 갑판 위로 올라오는 청수의 양은 줄어дна 갑판에 작용하는 청수 하중이 더 커지는 것을 수치적으로 보여주었다. 선급에서는 선형 설계 시 플레어 각도를 75°이하로 설계(ABS, 2015) 및 50°이상으로 설계

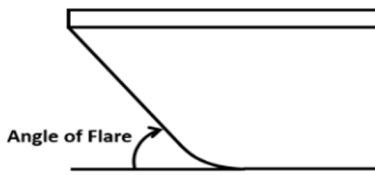


Fig. 1 Definition of flare angle

(LR, 2014) 등의 기준을 제시하고 있다. 그러나 청수현상의 비선형적 특성 및 다상유동에 대한 실험적 연구 기법 적용의 어려움으로 인해 플레어 각도 변화에 따른 청수현상에 대한 자세한 연구가 이루어지지 않은 것이 현실이며, 청수현상으로 인한 피해 저감 장치 개발 및 설계기술 개발 등을 위해서는 플레어 각도 변화에 따른 갑판 위 다상유동의 물리적 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 다양한 플레어 각도의 해양구조물과 100년 주기 설계 파랑조건 중 상위 1/3, 1/10, 1/100 평균의 파고를 가지는 규칙파의 간섭으로 인해 발생하는 청수현상을 실험적으로 구현하고, Lee et al.(2016)에서 규명한 플레어 각도 90°의 구조물에서 발생하는 청수현상의 발생과정과 비교하여 플레어 각도와 파고 변화에 따른 청수현상의 발생과정 및 갑판 위의 유동 특성 변화를 분석하였다. 구조물과 파랑 간섭으로 인해 발생하는 구조물 주변의 다상 유동장은 기포영상유속측정법을 적용하여 정량적으로 계측하고, 플레어 각도 변화에 따른 갑판 위 다상유동장의 속도분포 및 자유수면 높이 변화를 연구하였다.

2. 실험조건 및 기법

청수현상을 구현하기 위한 모형실험은 2차원 조파수조(길이 : 32m, 폭 : 0.6m, 높이 : 1m)에서 수행되었다. 이 수조는 피스톤 형태의 조파기 및 반대편에는 1:3의 경사를 가지는 소파장치가 설치되어 있으며(Fig. 2), Standing wave를 이용한 반사율 계측법(Hughes, 1993)을 이용하여 소파장치는 1.7%의 반사율을 가지는 것을 확인하고 본 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 구조물은 멕시코만(Gulf of Mexico)에서 운영 중인 BW Pioneer FPSO와 100년 빈도주기의 유의파고(Significant wave height)와 파정 주기(Peak period)를 가지는 해상조건을 1:125의 비로 상사하여 그 크기를 결정하였으며(API 2INT-MET,

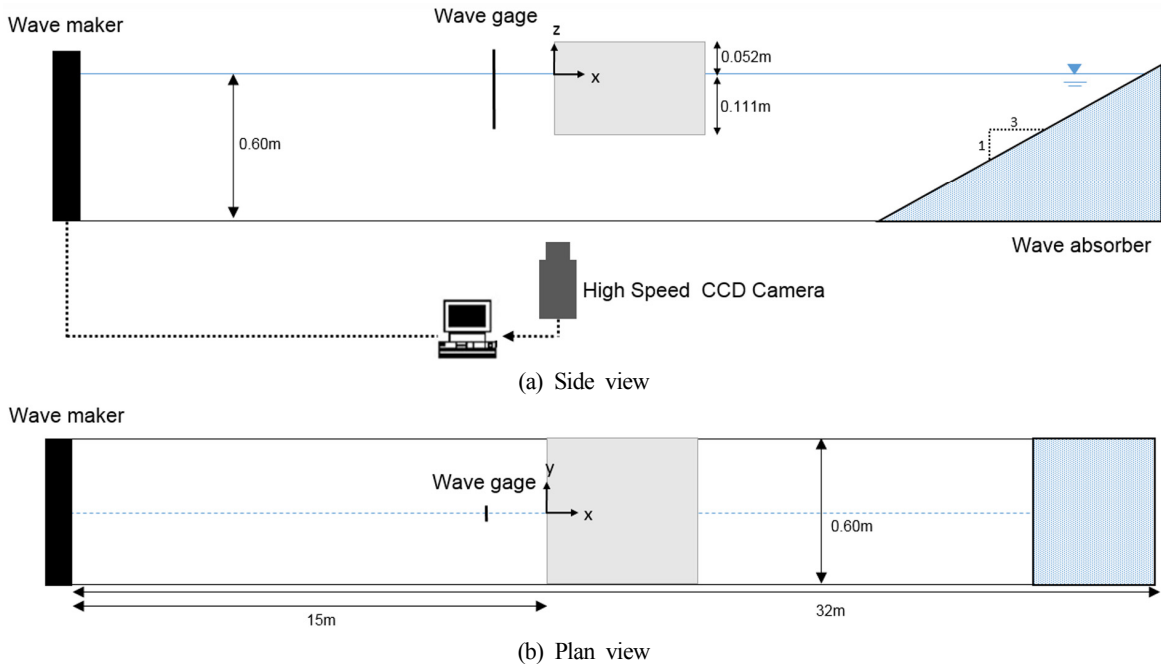


Fig. 2 Experimental setup for model test in 2-D wave tank

Table 1 Principle dimensions for FPSO and model

	BW Pioneer	Model
Length [m]	241	N/A
Breadth [m]	42	0.336
Depth [m]	20.4	0.163
Freeboard [m]	6.5	0.052
Draft [m]	13.9	0.111

Table 2 Wave conditions of Gulf of Mexico and the model test in wave tank

	West central of GOM	Model test
Wave height [m]	12.5 [$H_{1/3}$]	0.100 [$H_{1/3}$] 0.127 [$H_{1/10}$] 0.166 [$H_{1/100}$]
Peak period [s]	13	1.16

2007) 극한 해양환경에서의 청수현상 구현을 위해 유의파고보다 파 경사가 더 큰 상위 1/10과 1/100 평균의 파고를 실험 파고로 추가 선정하였다(Lee et al., 2016). 구조물은 조파기로부터 15m 떨어진 위치에 40×40mm의 알루미늄 구조물을 사용하여 수조의 윗면에 고정하였으며, 모든 실험은 소파장치에 반사된 입사파가 구조물에 도달하기 전에 실험을 수행하였다. 실험 중 수심은 0.6m로 고정하였다.

플레어 각도변화에 따른 청수현상의 발생과정 차이를 살펴보기 위해 4개의 플레어 각도(90°, 75°, 60°, 45°)를 가지는 구조물을 이용해 실험을 수행하였으며, 조파기에서 15m 떨어진 지점에 구조물과 자유수면이 만나는 점을 고정하여 각 구조물의 위치를 일정하게 유지하였다.

구조물의 크기 및 파랑조건은 Table 1, Table 2에 정리되어 있다. 규칙파에 의한 청수현상의 영상을 얻기 위하여 초고속 CCD (Charge coupled device) 카메라(Redlake Y-5) 및 50mm 광학렌즈 (Sigma, f/1.8)를 사용하였다. 영상은 초당 500장(500 Hz) 및 360×264mm² 크기의 측정장(Field of view)을 가지며, 이때의 공간 해상도는 0.076mm/pixel이다.

청수현상이 발생할 때에는 구조물과 파랑의 상호 간섭에 의해 많은 양의 기포가 생성되는데, 이러한 기포와 물이 뒤섞이는 다상유동장의 경우 입자영상유속측정법(Particle image velocimetry, PIV)을 이용한 속도장 계측이 어려워진다. 본 연구에서는 그림자

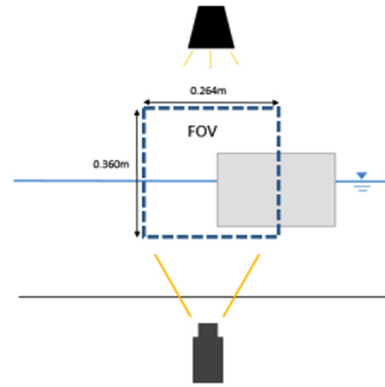


Fig. 3 Field of View for BIV measurement

기법(Shadow graphy image technique)으로 영상을 획득하여 다상유동 내부 기포의 형상 및 속도장을 계측하는 기포영상유속측정법(Bubble image velocimetry, BIV)을 사용하였다(Fig. 3). 기포영상유속측정법은 획득한 영상의 명암분포를 MQD(Minimum quadratic difference)기법을 이용하여 기포의 속도를 계산한다(Mori and Chang, 2003).

본 실험에서는 계측한 영상을 통해 32×32pixels의 계산영역(Interrogation area) 및 50%의 중첩(Overlap)을 적용하여 속도를 계산하였으며, 측정된 속도벡터 사이의 간격은 2.44mm이다.

3. 실험결과 및 토론

3.1 청수현상의 발생과정 비교

규칙파 중 플레어 각도 90°에서의 사각형 고정식 구조물에 발생하는 청수현상은 Table 3과 같은 다섯 과정을 거치며 발생하게 된다.

Fig. 4는 각 90°, 75°, 60°, 45°의 플레어 각도를 가지는 구조물에 대하여 청수현상이 가장 명확하게 발생하는 입사파고 $H_{1/100}$ 일 때의 청수현상 발생 단계별 순간 영상들을 보여주고 있다. 이미지는 그림자기법을 이용하여 획득되었으며, 자유수면 및 기포는 그림자에 의해 어둡게 나타난다.

Fig. 4 (a-1), (b-1), (c-1), (d-1)은 입사파와 구조물에 반사된 반사파가 중첩되면서 파도 전면부가 구조물 벽에 수평한 방향으로 굽어지는 과정인 Flip-through 단계를 보여준다. 플레어 각도가 90° 및 75°일 때에는 구조물의 벽면 부근에서 자유수면이 굽어지는 Flip-through의 현상이 명확히 발생하였으나, 60°와 45°에

Table 3 Behaviour of green water generation on a rectangular structure (Lee et al., 2016)

Behaviour of green water generation	Phenomena	Figures
Flip-through	The shape of the wave deformed vertically with a concave face before the wave front impacts on the weather side of the structure	Fig. 4 (a-1), (b-1), (c-1), (d-1)
Air-entrapment	Air is entrapped on the weather side of the structure	Fig. 4 (a-2), (b-2), (c-2), (d-2)
Wave run-up	The water level increases along the weather side and splashes up into air	Fig. 4 (a-3), (b-3), (c-3), (d-3)
Wave overturning	The wave that was splashed up into the air overturns like the plunging wave breaker and impacts on the deck	Fig. 4 (a-4), (b-4), (c-4), (d-4)
Water shipping	After the overturned wave impinges on the deck, the body of bubbly water is moved forward along the deck,	Fig. 4 (a-5), (b-5), (c-5), (d-5)

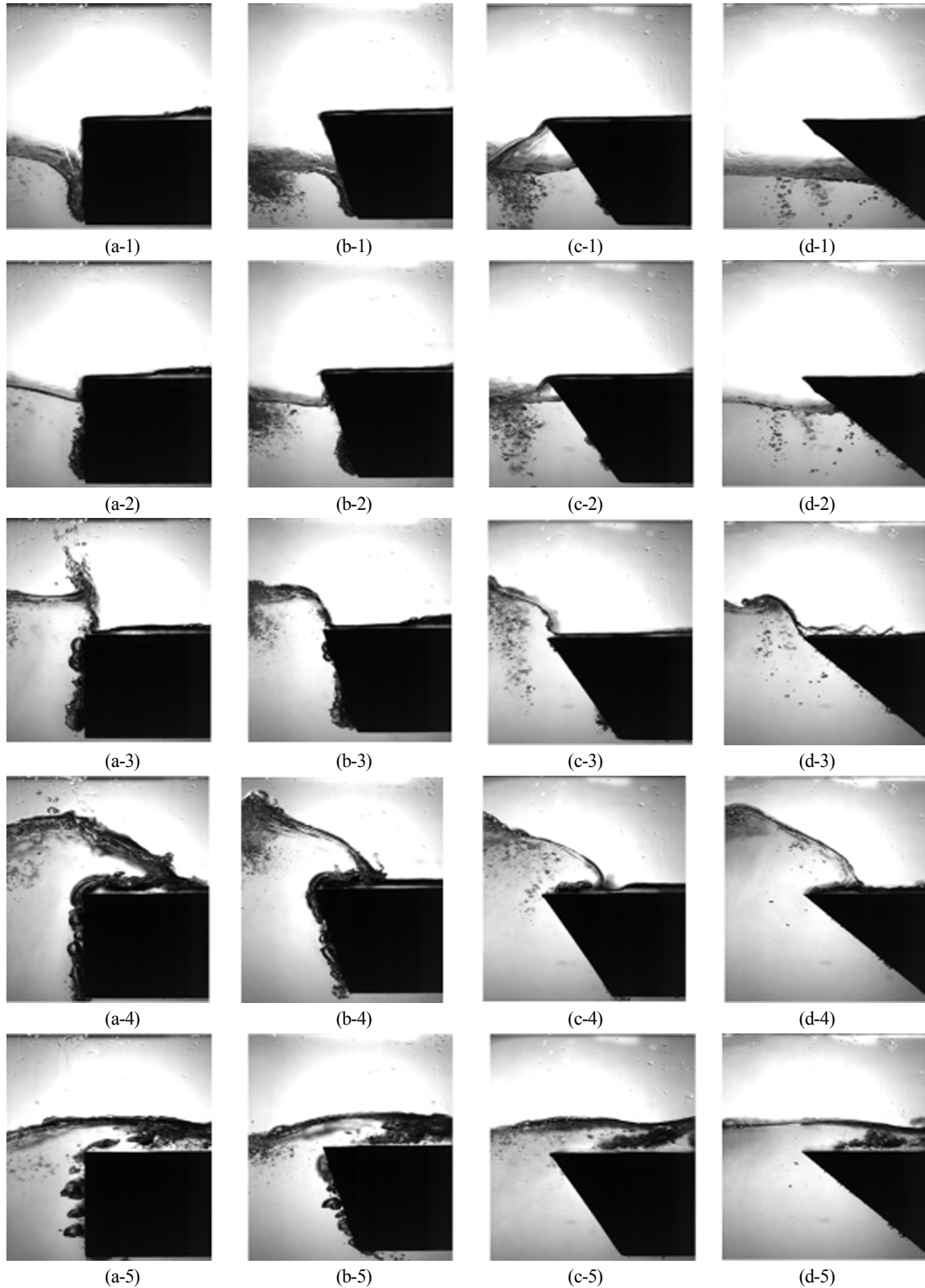


Fig. 4 Snapshots of the generation of green water with various flare angles ((a) 90°, (b) 75°, (c) 60°, (d) 45°) in wave condition of H1/100

서는 자유수면이 크게 변형되지 않고 구조물을 따라 올라가는 것을 볼 수 있다. 이러한 플레어 각도에 따른 Flip-through 단계의 발생 정도에 따라 입사파의 전면부가 구조물에 부딪히는 과정인 Air-entrapment 단계에서도 플레어 각도에 따른 현상의 차

이를 보이고 있다(Fig. 4 (a-2), (b-2), (c-2), (d-2)). 플레어 각도가 90° 및 75° 일 때에는 앞선 Flip-through 단계에서 굽어진 자유수면이 구조물 방향으로 전진하면서 구조물과 파 전면부 사이에 공기가 가두어지는 현상이 발생하는 것을 볼 수 있으나, 60°와 45°

에서는 Flip-through 단계를 거치지 않았기에 공기가 가두어지는 현상 없이 자유수면이 상승하는 것을 확인할 수 있다. Wave run-up 단계에서의 순간영상은 Fig. 4 (a-3), (b-3), (c-3), (d-3) 에 나타나 있다. 이 단계에서 발생하는 특징적인 현상인 물이 갑판 위로 뿜어지며 솟아오르는 Jet splash는 플레어 각도가 90°일 때에만 관측되었으며, 다른 플레어 각도를 가지는 구조물의 경우 run-up 단계에서 Jet splash 없이 각 구조물 벽을 따라 물이 상승하여 구조물 벽 바깥쪽 상부에서 반시계방향의 와(Vortex)를 만드는 것을 볼 수 있다. 이는 플레어 각도에 따라 반사되는 파도의 위상차이로 인해 구조물 앞에서 서로 다른 중첩현상이 발생하면서 생기는 것으로 판단된다. Wave run-up 과정에서 올라온 물이 돌진형 쇄파(Plunging wave breaking)의 형상을 보이며 갑판에 충격을 주는 Wave overturning 단계의 순간은 Fig. 4 (a-4), (b-4), (c-4), (d-4) 에서 나와 있다. 앞선 과정에서 발생한 플레어 각도에 따른 자유수면 형상 차이로 인해 Wave overturning 과정에서도 플레어 각도에 따라 서로 다른 현상을 보이고 있다. 플레어 각도가 90°일 때에는 Wave run-up 단계에서 발생한 Jet splash의 영향으로 갑판 위로 올라온 청수가 갑판에 부딪히는 위치인 Impinging point가 갑판 끝부분에서 가장 멀리 위치하며, 플레어 각도가 작아지면서 갑판의 끝부분으로 가까워지는 것을 영상을 통해 확인할 수 있다. 마지막 단계인 물이 갑판을 쓸고 지나가는 Water shipping 단계에서의 순간 영상은 Fig. 4 (a-5), (b-5), (c-5), (d-5) 에 나타내었다. 갑판 위를 지나가는 기포의 양은 플레어 각도 90°에서 가장 많고 플레어 각도가 작아질수록 기포의 양이 줄어드는 것을 영상을 통해 확인할 수 있으며, 이러한 갑판 위 기포 양의 차이는 Air-entrainment 단계에서 구조물과 파랑에 의해 발생하는 기포의 양의 차이에 기인하는 것으로 보여진다.

3.2 갑판 위 유동특성 비교

2차원 조파수조에서 규칙파와 구조물의 상호 간섭으로 인하여 발생하는 청수현상에 대하여 갑판 위 다상유동장의 유체동역학적 특성을 비교·분석하기 위해 기포영상유속측정법을 사용하여 갑판 위에서의 기포 속도장을 정량적으로 계측하였다.

청수현상으로 인해 발생하는 기포에 대한 속도 분석은 갑판 위 다상유동장의 물리적 특성을 이해하는 근거로 활용될 수 있다. 본 연구에서 실험적으로 구현한 청수현상의 경우 청수가 갑판을 지나가는 시간이 0.1 s 이내로 기포 수직운동의 완화시간(Relaxation time)에 속하며(Hysing et al., 2009), 그 시간 동안 기포의 수직방향 속도변화 및 기포의 이동거리는 수평방향의 거동에 비해 매우 미미하다. 이는 청수현상에 의해 발생한 갑판 위 유동은 기포의 부력에 비해 기포 주변 물에 의한 관성력의 영향이 지배적이라는 것을 의미하며, 청수현상 발생 시 기포의 속도는 주변 물의 속도와 유사하다는 보고가 이를 뒷받침하고 있다(Ryu and Jung, 2012).

기포영상유속측정법으로 얻은 청수현상의 기포 속도장을 이용하여 갑판 위의 영역을 Fig. 5와 같이 20mm × 2.5mm의 크기로 공간평균을 내어 수평방향 평균 속도장(\bar{u})을 계산하였으며, 입사파고 $H_{1/100}$ 일 때 플레어 각도의 변화에 따른 갑판 위 기포의 수평방향 평균 속도장을 파 위상속도($v_p = 1.72$ m/s)로 무차원

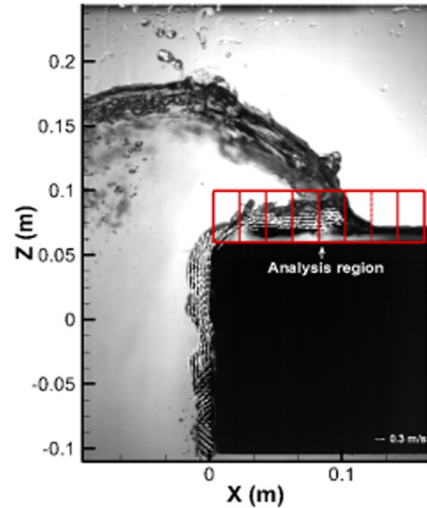


Fig. 5 Velocity distribution obtained by BIV measurement

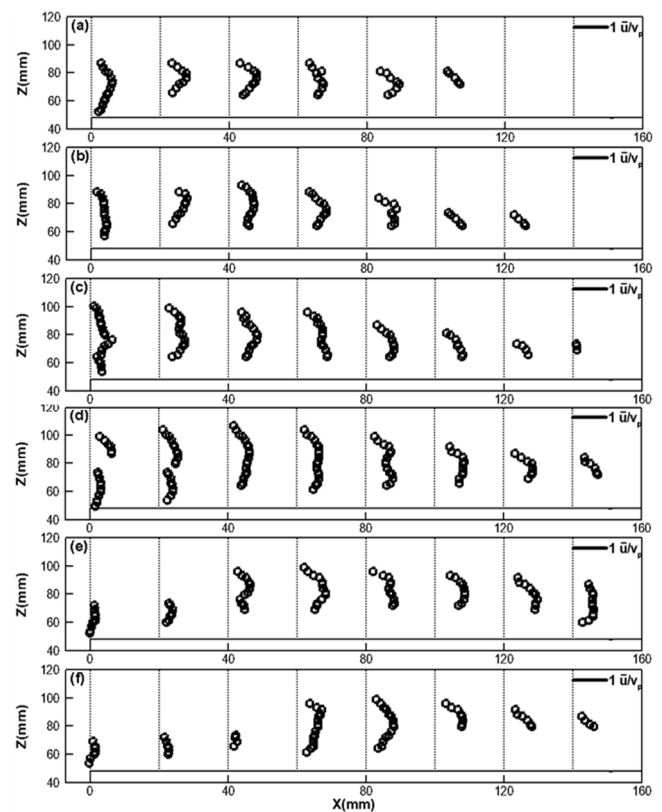


Fig. 6 Velocity distributions of bubbly flow obtained by BIV on the deck of structure with flare angle of 90°

화 하여 Fig. 6-9에 나타내었다. 구조물 끝부분부터 갑판 위 유동방향 20mm 당 표시된 점선을 기준으로 각각의 동근 기호까지 떨어진 거리는 각 계산영역에서의 수평방향 평균 기포속도를 의미한다. Figs. 6-9는 Wave overturning 단계부터 0.03s 간격으로 계산영역 내부의 평균 속도장을 나타낸 것이다.

플레어 각도가 90°, 75°, 60°, 45° 일 때 기포의 수평방향 평균 속도장은 각각 Figs. 6-9에 나타나 있다. 갑판 위에서 발생한 기포는 갑판을 따라 이동하면서 속도가 서서히 빨라지는 것을 정

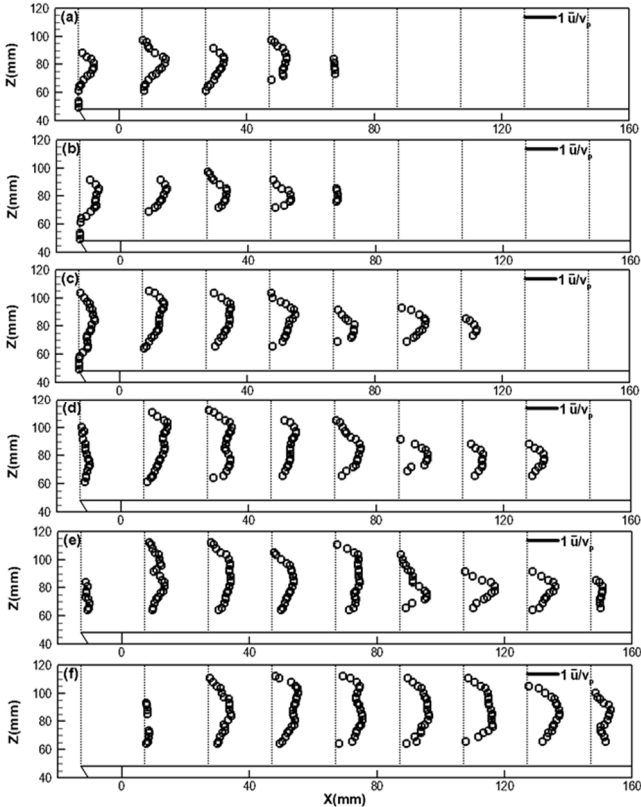


Fig. 7 Velocity distributions of bubbly flow obtained by BIV on the deck of structure with flare angle of 75°

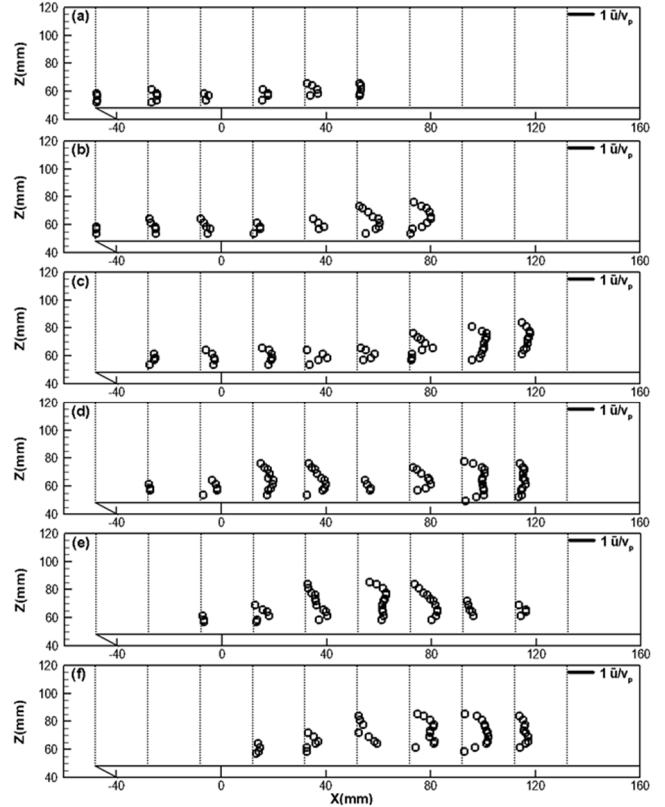


Fig. 9 Velocity distributions of bubbly flow obtained by BIV on the deck of structure with flare angle of 45°

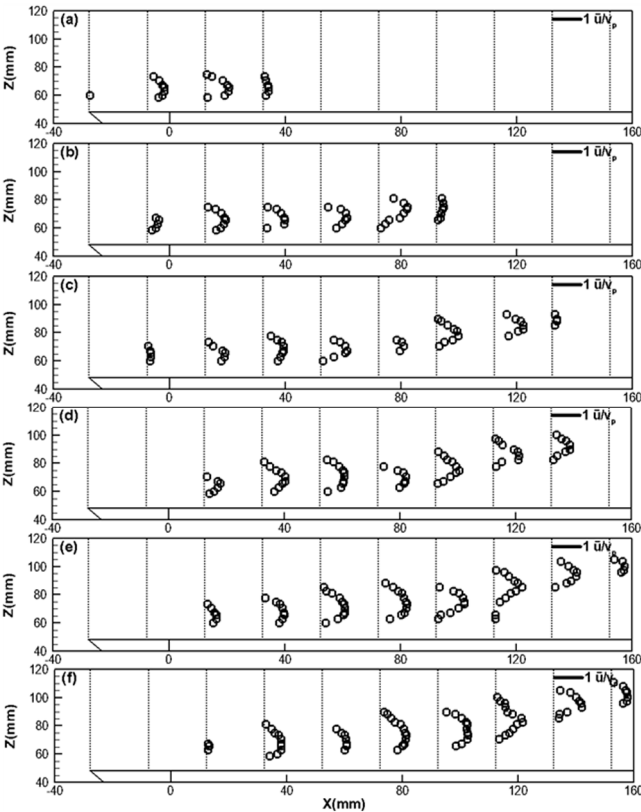


Fig. 8 Velocity distributions of bubbly flow obtained by BIV on the deck of structure with flare angle of 60°

량적으로 확인할 수 있으며, 유동의 중심에 분포하는 기포들이 자유수면 부근 및 갑판 근처의 기포들에 비해 상대적으로 더 큰 속도를 가지며 기포에서도 경계층과 유사한 속도 분포를 보이는 것을 볼 수 있다. 플레어 각도가 다름에도 불구하고, 갑판 위 기포의 최대속도는 갑판의 끝 부분부터 약 130 mm 떨어진 곳에 위치했으며 그 크기는 약 $0.6 \bar{u}/v_p$ 이다. 플레어 각도 60°와 45°(Figs. 8-9)일 때에는 플레어 각도 90°와 75°(Figs. 6-7)에 비해 갑판 위 기포의 양이 현저하게 줄어든 것을 확인할 수 있는데, 이는 플레어 각도에 따라 청수현상 발생과정 중 갑판 위로 물이 올라오기 전인 Flip through 및 Air-entrapment 과정에서의 차이로 인해 기포의 양이 차이가 나는 것으로 판단되며 플레어 각도가 작아질수록 갑판 위로 올라오는 기포의 양이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 기포의 흐름이 진행될수록 기포가 전반적으로 갑판에서 서서히 떨어지며 위쪽으로 상승하는 모습이 보이는데, 이는 기포의 부력에 의한 영향 뿐만 아니라 갑판 위에 남아있는 물과 부딪히면서 기포들이 위로 상승하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 조파수조에서 100년 빈도주기의 파랑조건을 반영한 규칙파와 고정된 구조물의 상호 간섭에 의해 발생하는 청수현상을 실험적으로 구현하고, 구조물의 플레어 각도에 따른 청수현상의 발생과정 차이 및 기포영상유속측정법을 이용하여 얻은 갑판 위 기포 유동특성의 차이를 비교·분석하였다.

실험적 연구를 통하여 청수현상은 구조물의 플레어 각도에 따라 각각 다른 발생과정을 통해 생성되는 것을 확인하였다. 플레어 각도가 큰 구조물(90° , 75°)은 청수현상 생성 시 자유수면이 구조물의 아래쪽에서 굽어지는 Flip-through의 단계를 거치는 반면 플레어 각도가 작은 구조물(60° , 45°)은 Flip-through를 거치지 않으면서 공기가 가두어지는 Air-entrapment 과정 또한 일어나지 않았다. 이러한 발생과정의 차이에 의해 청수가 갑판 위를 지나가는 과정인 Water shipping 단계에서 갑판 위 유동에 포함된 기포의 양이 급격하게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 또한 Wave run-up 단계에서 발생하는 현상인 제트 흐름은 플레어 각도가 90° 일 때에만 발생하였고, 플레어 각도가 작아질수록 Wave overturning 단계에서 물이 갑판에 충격을 주는 위치인 Impinging point가 좌·우 방향으로 가까워지는 것을 확인하였다.

기포영상유속측정법을 활용하여 플레어 각도에 따른 청수현상 발생 시 갑판 위 유동의 수평방향 평균 속도장(\bar{u})을 제시하였다. 갑판 위 기포의 속도는 경계층과 유사한 속도분포를 보였으며, 그 최대속도는 약 $0.6 \bar{u}/v_p$ 으로 측정되었다.

본 연구에서 수행한 청수현상의 발생과정 및 다상유동에 대한 이해와 분석은 청수현상 저감을 위한 선박 및 해양구조물 선형개발에 활용될 수 있으며, 추후 플레어 각도에 따른 청수현상에 의한 구조물의 정확한 피해 예측을 위해 압력분포 및 유량 계측, 파랑과 구조물의 상대운동 등을 고려한 실험적 연구를 지속적으로 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- American Bureau of Shipping(ABS), 2015. Rules for Building and Classing, Mobile Offshore Drilling Units.
- API Bulletin 2INT-MET, 2007. Interim Guidance on Hurricane Conditions in the Gulf of Mexico.
- Buchner, B., Voogt, A., 2000. The Effect of Bow Flare Angle on FPSO Green Water Loading. OMAE 2000.
- Ersdal, G., Kvitrud, A., 2000. Green Water Incidents on Norwegian Production Ships. Proceedings of the Tenth International Conference on Offshore and Polar Engineering (ISOPE 2000), Seattle, USA, 1, 211-218.
- Faulkner, D.J., 2001. Survival Design of Cargo Hatch Structures. RINA Conference Design and Operation for Abnormal Conditions II, London United Kingdom.
- Faltisen, O.M., Greco, M., Landrini, M., 2002. Green Water Loading on a FPSO. OMAE 2002.
- Greco, M., 2001. A Two-dimensional Study of Green-water Loading. Ph. D. Thesis, University of Trondheim.
- Hamoudi, B., Varyani, K., 1998. Significant Load and Green Water on Deck of Offshore Units/Vessels. Ocean Engineering, 25(8), 715-731.
- Hughes, S.A., 1993. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series in Ocean Engineering, 7, World Scientific, Singapore.
- Hysing, S., Turek, S., Kuzmin, D., Parolini, N., Burman, E., Ganesan, S., Tobiska, L., 2009. Quantitative Benchmark Computations of Two-dimensional Bubble Dynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 60(11), 1259-1288.
- Lee, G.N., Jung, K.H., Chae, Y.J., Park, I.R., Malenica, S., Chung, Y.S., 2016. Experimental and Numerical Study of the Behaviour and Flow Kinematics of the Formation of Green Water on a Rectangular Structure. Brodogradnja / Shipbuilding, 67(3), 133-145.
- Leonhardsen, R., Ersdal, G., Kvitrud, A., 2001. Experience and Risk Assessment of FPSOs in Use on the Norwegian Continental Shelf: Descriptions of Events. Proceedings of the Eleventh International Conference on Offshore and Polar Engineering (ISOPE 2001), Stavanger Norway.
- Lim, H.J., Park, S.H., Rhee, S.H., 2012. Experiments and Numerical Validation for FPSO Bow Water Shipping. Journal of the society of Naval Architects of Korea, 49(1), 6-13.
- Lloyd's Register(LR), 2014. Rules and Regulations for the Classification of Offshore Units.
- Mori, N., Chang, K.A., 2003. Introduction to MPIV, User Reference Manual 14. [Online] Available at : <http://www.oceanwave.jp/software/mpiv.> [Accessed August 2018]
- Nielsen, K.B., Mayer, S., 2004. Numerical Prediction of Green Water Incidents. Ocean Engineering 31(3-4), 363-399.
- Ryu, Y., Chang, K.A., 2005. Breaking Wave Impinging and Green Water on a Two-dimensional Offshore Structure. Proceedings of the The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Ryu, Y., Jung, K., 2012. Multi-phase Flow Velocity Measurement Technique using Shadow Graphic Images. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(3), 61-65.
- Shibata, K., Koshizuka, S., 2007. Numerical Analysis of Shipping Water Impact on a Deck Using a Particle Method. Ocean Engineering, 34, 585-593.
- Sgouros, G., Pritchett, W., Schafer, D., Jones, D., 2005. Shell's Experience with Hurricane Ivan. Proceedings of API-2005 Hurricane Readiness and Recovery Conference, Houston USA.
- Soares, C.G., Pascoal, R., 2005. Experimental Study of the Probability Distributions of Green Water on the Bow of Floating Production Platforms. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 127(3), 234-242.
- Yamasaki, J., Miyata, H., Kanai, A., 2005. Finite-Difference Simulation of Green Water Impact on Fixed and Moving Bodies. Journal of Marine Science and Technology, 10(1), 1-10.

Proposed OHTC Formula for Subsea Pipelines Considering Thermal Conductivities of Multi-Layered Soils

Dong-Su Park^{ID*}, Mun-Beom Shin^{ID*} and Young-Kyo Seo^{ID*}

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

다층 지반의 열전도율을 고려한 해저배관의 총괄열전달계수식 제안

박동수^{ID*} · 신문범^{ID*} · 서영교^{ID*}

*한국해양대학교 해양공학과

KEY WORDS: OHTC(Overall heat transfer coefficient) 총괄열전달계수, Heat loss 열손실, Multi-layered soils 다층 지반, Fourier's law 푸리에 열전도법칙, Thermal conductivity 열전도율

ABSTRACT: Subsea pipelines are designed to transport mixtures of oil, gas, and their associated impurities from a wellhead that can be in excess of approximately 100 °C, while the external temperature may be approximately 5 °C. Heat can be lost from a subsea pipeline containing a high-temperature fluid to the surrounding environment. It is important that the pipeline be designed to ensure that the heat loss is small enough to maintain sufficient flow from the unwanted deposition of hydrate and wax, which occurs at a critical temperature of about 40 °C. Therefore, it is essential to estimate the heat loss of a subsea pipeline in various circumstances. In previous studies, overall heat transfer coefficient(OHTC) formulas were considered only for a single soil type. Thus, it is difficult to characterize the OHTC of the actual seabed with multiple soil layers. In this paper, an OHTC formula that considers multi-layered soils is proposed for more precise OHTC estimation.

Nomenclature

α_0	배관의 매립깊이에 따라 달라지는 보조 기하학적인 양 [-]
A	해저지반 단위면적 [m ²]
A_{par}	열에 관한 보조의 기하학적인 양 [-]
B'_g	지반의 비오트 수 [-]
B'_p	배관의 비오트 수 [-]
Δx_i	다층 지반에서 지반층의 두께 [m]
D_{ext}	단일 배관 및 단열재로 보강된 배관의 최 외경 [m]
D_{int}	배관 내경 [m]
D_{ref}	총괄열전달계수 산정을 위한 참조 직경 [m]
D_{soil}	' h_{soil} '과 동등한 열 저항을 주기위한 흙의 영향반경 [m]
D_{steel}	단열재를 제외한 배관의 외경 [m]
e	' h_{amb} '와 동등한 열저항을 주기위한 흙의 두께 [m]
H	해저지반으로부터 매립된 해저배관 중심까지의 깊이 [m]

h_{amb}	매립정도에 따른 외부유체의 임의의 경막계수 [W/m ² K]
h_{buried}	' U_{buried} ' 계산 시 사용하는 해저배관의 내부경막계수, 배관벽의 열전달계수, 해저지반의 열전달계수를 혼합한 열전달계수 [W/m ² K]
h_{ground}	' U_{ground} ' 계산 시 사용하는 해저배관의 내부경막계수, 배관벽의 열전달계수 그리고 해저지반의 열전달계수를 혼합한 열전달계수 [W/m ² K]
h_{ext}	배관 외부의 열전달계수 [W/m ² K]
h_{int}	배관 내부의 열전달계수 [W/m ² K]
h_{layer}	' U_{ground} ' 계산 시 사용하는 해저배관의 내부경막계수, 배관벽의 열전달계수 그리고 다층 지반의 열전달계수를 혼합한 열전달계수 [W/m ² K]
h_{blayer}	' U_{buried} ' 계산 시 사용하는 해저배관의 내부경막계수, 배관벽의 열전달계수 그리고 다층 지반의 열전달계수를 혼합한 열전달계수 [W/m ² K]
h_{soil}	해저지반의 열전달계수 [W/m ² K]

Received 1 November 2017, revised 5 February 2018, accepted 12 April 2018

Corresponding author Young-Kyo Seo: +82-51-410-4683, yseo@kmou.ac.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8838-113X>

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2017 in Pangyo.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

k_{amb}	외부유체의 열전도율 [W/mK]
k_f	배관내부유체의 열전도율 [W/mK]
k_i	다층 지반에서 해당 층의 열전도율 [W/mK]
k_{equiv}	다층 지반을 고려한 등가열전도율 [W/mK]
k_{soil}	단일 해저지반의 열전도율 [W/mK W/m K]
\dot{m}	해저배관 내부 질량 흐름율 [kg/s]
Q	열 전달율 [W]
R_{int}	해저배관 내벽에 관내 유동의 대류에 의한 열 저항 [m ² K/W]
R_{wall}	해저배관 내벽에서 배관외벽으로 전도에 의한 열 저항 [m ² K/W]
R_{ext}	해저배관 외벽에서 유동의 대류에 의한 열 저항 [m ² K/W]
T	다층 지반 층별 경계면에서의 온도 [K]
U	총괄열전달계수 [W/m ² K]
U_{buried}	완전히 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 [W/m ² K]
$U_{unburied}$	매립되지 않은 해저배관의 총괄열전달계수 [W/m ² K]
U_{ground}	해저지반과 부분 매립된 해저배관의 열전달계수 [W/m ² K]
U_{wall}	단일 해저배관 벽 및 단열재로 보강된 해저배관 벽의 열전달계수 [W/m ² K]
$U_{int+wall}$	해저배관 내벽의 경막계수 및 열전달계수로 이루어진 열전달계수 [W/m ² K]

1. 서 론

해양플랜트 성장과 심해저 자원의 채굴기술이 발전됨에 따라 심해저의 석유 및 천연가스 수송을 위한 해저배관의 수요가 증가하며 수송 시 열운용(Thermal management) 및 유동 안정성(Flow assurance) 문제가 연구 주제로 부상하고 있다. 해저배관은 가동 중 온도가 40°C(극한온도) 이하로 떨어지게 되면 고상염(Hydrate) 및 왁스(Wax) 등으로 운용을 일시적으로 중지(Shut down)하게 되는데 이는 엄청난 경제적 손실을 초래한다.

최근 섰다운 시 해저배관의 온도변화에 대한 연구(Xu et al., 2010)가 진행되었고 이러한 온도변화(열손실)에 의한 고상염 및 왁스생성을 예방하기 위해서는 해저배관의 총괄열전달 계수를 토대로 해저배관의 단열설계를 해야 한다. 총괄열전달계수는 해저배관과 해저배관주위의 해저지반 그리고 해수의 열전도율에 따라 달라지므로 이들 각각의 열전도율로 인한 총괄열전달계수의 이해가 필요하다. 해저배관의 고상염 및 왁스의 생성방지를 위해 파이프 외벽에 Solid polypropylene, Polypropylene foam 그리고 Polyurethane 등을 다층으로 제작하는 PIP(Pipe-in-pipe) System, DEH(Direct electric heating) system 등 여러 가지 단열방법이 연구 및 개발되고 있다(Bai and Bai, 2005). 그러나 경제적이며 보편적인 단열방법은 Trenching and Backfilling 방법으로, 해저지반에 해저배관이 설치될 가이드라인을 굴착하여 해저배관을 놓은 후 그 위를 뒤채움 흙(Backfill)으로 덮는 것이다. 후자의 방법에 관한 연구로는 수치해석을 통한 매립된 해저배관의 환경에 따른 온도분포에 대한 연구(Bai and Niedzwecki, 2014)가 있다. 또한 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 산정을 위한 이

론식 연구가 진행되어 왔으며 이론식들은 해수와 해저지반의 경계면 및 해저배관 외벽면의 경계조건을 수정하여 제안하였다.

먼저 등온의 조건 즉 디리클레(Dirichlet) 경계조건을 가정한 Carslaw and Jaeger 이론식(Carslaw and Jaeger, 1959)이 제안되었다. 다음으로 해수와 해저지반의 경계면은 Carslaw and Jaeger 이론식과 같이 디리클레 경계조건을 가정하지만 해저배관 외벽은 혼합(Mixed)경계조건을 가정하는 Morud and Simonsen 이론식(Morud and Simonsen, 2007)이 제안되었다. 그리고 해수 및 해저지반의 경계면과 해저배관 외벽면의 경계조건을 모두 혼합경계조건으로 가정한 Ovuworie 이론식(Ovuworie, 2010)이 제안되었고 최근 Ovuworie 이론식을 일부 수정한 Zakarian 이론식(Zakarian et al., 2012)이 제안되었다. Zakarian 이론식의 경우 모형실험(Oh et al., 2014)에 의해 검증이 실시되었다.

지금까지 제안되었던 이론식들은 총괄열전달계수 계산을 위한 지반을 열전도율이 일정한 단일 지반으로 간주하였다. 하지만 실제 해저지반은 다층 지반으로 구성되어있으며 해저면에서 아래로 깊이가 증가함에 따라 함수비 등 여러 가지 요인으로 인하여 열전도율이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 실제 해저지반과 같은 각 지반 층의 열전도율이 다른 다층 지반에 해저배관이 매립되었을 때의 총괄열전달계수를 Zakarian 이론식(Zakarian et al., 2012)을 변형하여 다층 지반을 고려 할 수 있게 제안하고자 한다. 다층지반의 등가열전도율을 산정하는 식은 Kelvin의 선형 열원모델(Line source model)을 응용한 식이 제안되었다(Yoon et al., 2014). 하지만 이는 지면에 수직으로 관입된 보어홀의 열전달에 의해 산정되는 식이며 해저지반과 수평으로 일부 매립 혹은 완전 매립된 해저배관에 적용하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 다층판에서의 Fourier 열전도법칙을 응용하여 산정한 등가열전도율 식을 다층지반을 고려한 총괄열전달계수 제안 식에 적용하였다. 제안 식은 수치해석과 비교하여 검토하였으며 해저지반의 열전도율은 Hamdham and Clarke(2010) 그리고 Park and Seo(2017)의 연구를 참고하였다.

2. 선행연구 검토

2.1 총괄열전달계수 개념

총괄열전달계수는 고체 벽을 두고 고온유체에서 저온유체로 열이 전달되는 경우의 모든 전열저항을 고려한 총괄적인 열전달 계수이다. Fig. 1과 같이 매립되지 않은 해저배관의 총괄열전달계수($U_{unburied}$)는 다음과 같다.

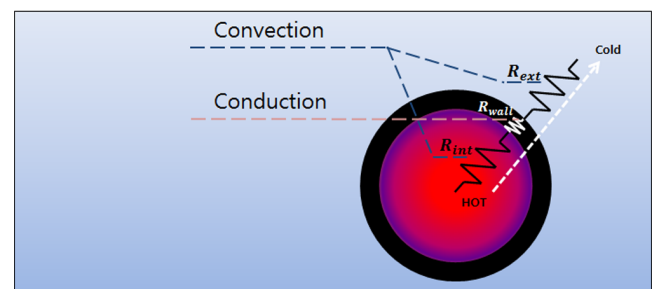


Fig. 1 Thermal resistances of an unburied subsea pipeline

해저배관 내벽에서 관내 유동의 대류에 의한 열 저항 R_{int} , 해저배관내벽에서 해저배관의벽으로 전도에 의한 열 저항 R_{wall} 그리고 해저배관 외벽에서 유동의 대류에 의한 열 저항 R_{ext} 의 영향을 고려해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{unburied} = \frac{1}{D_{ref}(R_{int} + R_{wall} + R_{ext})} \quad (1)$$

2.2 해저배관 총괄열전달계수 이론식

부분적으로 매립되었거나, 완전히 매립된 해저배관의 총괄열 전달계수(U)는 식 (2)와 같으며 여기서 해저배관이 해수에 노출된 정도를 나타내는 θ_b 는 Fig. 2와 같다(Bai and Bai, 2005).

$$U = \begin{cases} \frac{\theta_b}{\pi} U_{unburied} + \left(1 - \frac{\theta_b}{\pi}\right) U_{ground} & \text{if } -\frac{D_{ext}}{2} \leq H < \frac{D_{ext}}{2} \\ U_{buried} & \text{if } \frac{D_{ext}}{2} \leq H \end{cases} \quad (2)$$

기존 해저배관의 총괄열전달계수 이론식들은 식 (2)에서 해저

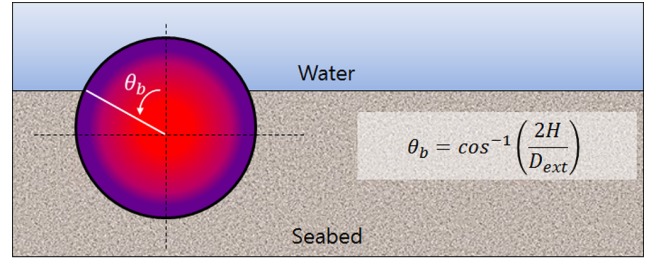


Fig. 2 Angle of a exposed surface of a subsea pipeline

배관이 부분적으로 매립되었을 때의 U_{ground} , 완전히 매립되었을 때의 U_{buried} 을 정의하였으며 대표적인 이론식들은 Table 1과 같다. Table 1과 같이 기존 이론식들은 지반을 단일 지반 즉 하나의 열전도율(k_{soil})을 가지는 지반으로 가정하였다. 본 연구에서는 각각 다른 열전도율($k_1, k_2, k_3 \dots$)로 구성된 다층 지반을 하나의 등가열전도율(k_{equiv})로 치환하였다. 그리고 기존 이론식 중 수치해석(Zakarian et al., 2012) 및 실내모형실험(Oh et al., 2014)으로 그 정확도가 검증된 Zakarian 이론식의 단일지반 열전도율 k_{soil} 을 k_{equiv} 로 변환 및 조건을 추가하여 다층지반을 고려한 총괄열전달계수 식을 제안하고자 한다.

Table 1 Overall heat transfer coefficient formulas

Name of formula	Overall heat transfer coefficient formula	
Carslaw and Jaeger's formula	$U_{ground} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{soil+amb}^*} \right)^{-1}$	$U_{buried} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{soil+amb}} \right)^{-1}$
	$h_{soil+amb}^* = \frac{k_{soil}}{\frac{D_{ref}}{2} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{2e^*}{D_{ext}} \right)}$	$e^* = \frac{D_{ext}}{2} \left[\exp \left(\frac{2k_{soil}}{D_{ext}h_{ext}} \right) - 1 \right]$
	$h_{soil+amb} = \frac{k_{soil}}{\frac{D_{ext}}{2} \cosh^{-1} \left(\frac{2(H+e)}{D_{ext}} \right)}$	$e = \frac{D_{soil}}{2} \left[\exp \left(\frac{2k_{soil}}{D_{soil}h_{amb}} \right) - 1 \right]$
	$D_{soil} = \frac{2k_{soil}}{D_{ext}\alpha_0} \quad \alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)$	$h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{soil}} h_{ext}$
Morud and Simonsen formula	$U_{ground} = \left(\frac{1}{h_{ground}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$	$U_{buried} = \left(\frac{1}{h_{buried}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$
	$h_{ground} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \begin{cases} \frac{2}{\theta_b(\pi - \theta_b)} \frac{C_1}{\sqrt{C_2^2 - 1}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{C_2 + 1}{C_2 - 1}} \tan \left(\frac{\theta_b}{2} \right) \right) \right] & \text{(if } C_2 > 1) \\ \frac{1}{\theta_b(\pi - \theta_b)} \frac{C_1}{\sqrt{1 - C_2^2}} \ln \left[\frac{\tan \left(\frac{\theta_b}{2} \right) + \sqrt{\frac{1 - C_2}{1 + C_2}}}{\tan \left(\frac{\theta_b}{2} \right) - \sqrt{\frac{1 - C_2}{1 + C_2}}} \right] & \text{(if } C_2 < 1) \end{cases}$	
	$h_{buried} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{B_p}{[1 + B_p^2 \alpha_0^2 + 2B_p \alpha_0 \coth(\alpha_0)]^{1/2}}$	$B_p = \frac{U_{int+wall} D_{ref}}{2k_{soil}} \quad C_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)^2}$
	$C_2 = \frac{2H}{D_{ext}} + \frac{C_1}{\theta_b B_p}$	$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} \right)^{-1} \quad h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext}$

Table 1 Overall heat transfer coefficient formulas (Continued)

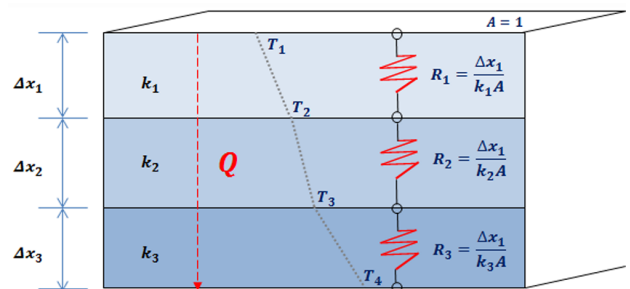
Name of formula	Overall heat transfer coefficient formula
	$U_{ground} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{ground}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad U_{buried} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{buried}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$
Ovuworie formula	$h_{ground} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{1}{\pi \left(1 + \frac{B_p}{B_g} \right)} \begin{cases} \frac{2B_p \sin(\beta_o) \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{1-A_{par}}{1+A_{par}}} \right)}{\sqrt{1-A_{par}^2}} & (\text{if } -1 < A_{par} < 1) \\ B_p \sin(\beta_o) & (\text{if } A_{par} = 1) \\ \frac{2B_p \sin(\beta_o) \tanh^{-1} \left(\sqrt{\frac{A_{par}-1}{A_{par}+1}} \right)}{\sqrt{A_{par}^2-1}} & (\text{if } A_{par} > 1) \end{cases}$
	$h_{buried} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{B_p \sinh(\alpha_0)}{\left[\left(\cosh(\alpha_0) + B_p \alpha_0 \sinh(\alpha_0) + \frac{B_p}{B_g} \right)^2 - \left(1 + \frac{B_p}{B_g} \right)^2 \right]^{1/2}}$
	$B_p = \frac{U_{int+wall} D_{ext}}{2k_{soil}} \quad B_g = \frac{h_{amb} D_{ext}}{2k_{soil}} \quad \beta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)$
	$A_{par} = \left(1 + \frac{B_p}{B_g} \right)^{-1} \left[\cos(\beta_o) + B_p (\pi - \beta_o) \sin(\beta_o) - \frac{B_p}{B_g} \right]$
	$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} \right)^{-1} \quad h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext}$
	$U_{ground} = \left(\frac{1}{h_{ground}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad U_{buried} = \left(\frac{1}{h_{buried}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$
Zakarian formula	$h_{ground} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{B_p}{\left[\left(1 + \frac{B_p}{B_g} \right) (1 + 2B_p) \right]^{1/2}}$
	$h_{buried} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{B_p \sinh(\alpha_0)}{\left[\left(\cosh(\alpha_0) + B_p \alpha_0 \sinh(\alpha_0) + \frac{B_p}{B_g} \right)^2 - \left(1 + \frac{B_p}{B_g} \right)^2 \right]^{1/2}}$
	$B_p = \frac{U_{int+wall} D_{ref}}{2k_{soil}} \quad B_g = \frac{h_{amb} D_{ref}}{2k_{soil}} \quad \alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)$
	$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} \right)^{-1} \quad h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext}$

3. 다층 지반을 고려한 총괄열전달계수 제안 식

다층 지반의 각각 다른 열전도율을 등가열전도율로 치환하기 위하여 Fourier의 열전도법칙을 적용하여 Fig. 3과 같은 각지반 층의 다른 열전도율을 Fig. 4와 같은 등가열전도율로 치환하였다.

3.1 Fourier의 열전도법칙

물체에 온도구배가 존재한다면 높은 온도에서 낮은 온도로 에너지가 이동하게 된다. 여기서 온도구배에 의한 열 전달을

**Fig. 3** Heat transfer through a multi-layered plates

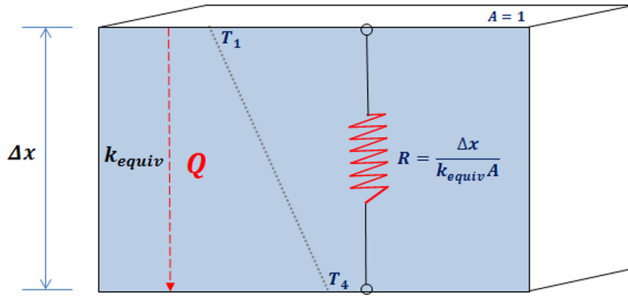


Fig. 4 Equivalent thermal conductivity of multi-layered plates

(Heat transfer rate)은 식 (3)과 같이 나타내며 이를 Fourier의 열전도 법칙이라 한다(Holman, 2009).

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

식 (3)을 토대로 Fig. 3과 같이 각각 다른 열전도율로 구성된 지반 층의 단위면적당($A=1\text{m}^2$) 열 전달율을 고려하여 열 저항과의 관계식을 도출하면 식 (4)와 같으며 이때 각 층에 작용하는 열 전달율(Q)은 동일하다.

$$Q = \frac{T_2 - T_1}{R_1} = \frac{T_3 - T_2}{R_2} = \frac{T_4 - T_3}{R_3} \quad (4)$$

또한 식 (4)는 식 (5)와같이 정의할 수 있다.

$$Q = -k_1 \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_1} = -k_2 \frac{T_3 - T_2}{\Delta x_2} = -k_3 \frac{T_4 - T_3}{\Delta x_3} \quad (5)$$

식 (5)의 세 식의 관계를 고려한 열 전달율은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{T_4 - T_1}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3}} \quad (6)$$

3.2 해저지반 등가열전도율 산정

Fig. 3과 같이 각각 다른 열전도율을 가지는 다층으로 구성된 해저지반의 열전도율을 Fig. 4와 같이 하나의 열전도율로 나타내기 위해 열 전달율을 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$Q = \frac{T_4 - T_1}{R} = k_{equiv} \frac{T_4 - T_1}{\Delta x} \quad (7)$$

등가열전도율은 식 (6)과 식 (7)의 관계에 의해 다음과 같이 식 (8)로 정의할 수 있다.

$$k_{equiv} = \frac{\Delta x}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3}} \quad (8)$$

위에서 정의한 내용을 바탕으로 2개 이상의 지반 층이 존재할 때 열전도율은 다음과 같이 정의하였다.

$$k_{equiv} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{k_i}} \quad (9)$$

3.3 다층 지반을 고려한 해저배관 총괄열전달계수 제안

본 연구에서는 Zakarian 이론식을 토대로 수정하여 제안하고자 하며 이를 Proposed formula로 명명하였다. Proposed formula는 Zakarian 이론식의 단일지반 열전도율 항(k_{soil})을 등가열전도율(k_{equiv})로 변환하고 다층지반의 범위를 정하였다.

해저배관이 부분적으로 매립되었을 때의 U_{ground} 는 식 (10), 완전히 매립되었을 때의 U_{buried} 는 식 (11)과 같다.

$$U_{ground} = \left(\frac{1}{h_{layer}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad (10)$$

$$U_{buried} = \left(\frac{1}{h_{blayer}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에서 해저배관내부 경막계수, 파이프 벽의 열전달계수 그리고 다층 지반의 열전달계수를 결합한 h_{layer} 와 h_{blayer} 은 다음과 같이 각각 식 (12)와 식 (13)과 같다.

$$h_{layer} = \frac{2k_{equiv}}{D_{ref}} \frac{Bi_p}{\left[\left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right) (1 + 2Bi_p) \right]^{1/2}} \quad (12)$$

$$h_{blayer} = \frac{2k_{equiv}}{D_{ref}} \quad (13)$$

$$\times \frac{Bi_p \sinh(\alpha_0)}{\left[\left(\cosh(\alpha_0) + Bi_p \alpha_0 \sinh(\alpha_0) + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 - \left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

식 (12)와 식 (13)의 Bi_p 와 Bi_g 는 해저배관과 해저지반의 비오트 수(Biot number)이며 식 (14) 및 식 (15)와 같다.

$$Bi_p = \frac{U_{int+wall} D_{ref}}{2k_{equiv}} \quad (14)$$

$$Bi_g = \frac{h_{amb} D_{ref}}{2k_{equiv}} \quad (15)$$

$$\alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right) \quad (16)$$

식 (16)의 α_0 는 해저배관의 매립깊이에 따라 달라지는 보조

기하학적인 양이며, 식 (17)은 해저배관 내부의 경막계수 그리고 해저배관 벽의 열전달계수를 혼합한 열전달계수이다.

$$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} \right)^{-1} \quad (17)$$

또한 해저배관 외부의 경막계수는 식 (18)과 같다.

$$h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext} \quad (18)$$

식 (19)는 앞서 식 (9)와 같이 Fourier의 열전도 법칙을 다층관에 적용한 개념을 다양한 열전도율을 가지는 다층지반에 응용하여 정의된 등가열전도율이다. 등가열전도율을 적용할 다층지반의 범위는 식 (20)과 같으며 다층지반의 범위는 매립깊이(H)에 따라 D_{ext} 와 α 의 조합으로 구성된다.

$$k_{equiv} = \frac{\Delta x}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{k_i}} \quad \left(\because \Delta x = \sum_{i=1}^n \Delta x_i \right) \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{When, } H \leq \frac{D_{ext}}{2} \\ \rightarrow 0 \leq \Delta x \leq D_{ext} + H \\ \\ \text{When, } H > \frac{D_{ext}}{2} \text{ and } H \leq \frac{2\alpha_0 + 1.3D_{ext}}{2} \\ \rightarrow 0 \leq \Delta x \leq \frac{2H + 1.3D_{ext} + 2\alpha_0}{2} \\ \\ \text{When, } H > \frac{D_{ext}}{2} \text{ and } H > \frac{2\alpha_0 + 1.3D_{ext}}{2} \\ \rightarrow \frac{2H - 1.3D_{ext} - 2\alpha_0}{2} \leq \Delta x \leq \frac{2H + 1.3D_{ext} + 2\alpha_0}{2} \end{array} \right. \quad (20)$$

4. 수치 해석

본 연구에서 제안된 Proposed formula를 검토하기 위해 실험 데이터와 비교연구(Huminic and Huminic, 2013; Papukchiev and Buchholz, 2017)로 열전달 해석의 정확성이 검증된 상용수치해석 프로그램인 ANSYS CFX v13.0을 사용하였다. 해저배관에 일정온도의 원유를 유입시켜 모델 전체의 온도가 정상상태에 이르렀을 때 해저배관의 출구, 입구, 해저배관 표면의 수치해석결과(평균온도)를 이용하여 총괄열전달계수를 산정하고 Proposed formula의 계산결과와 비교 분석하였다.

4.1 모델링 및 격자생성

수치해석을 위해 해석영역은 Fig. 5와 같이 모델링 하였다. 본 해석에서는 3차원 모델을 사용하였으며, 격자는 Fig. 6과 같이 해석의 정확도를 높이기 위해 해저배관 주변 격자를 조밀하게

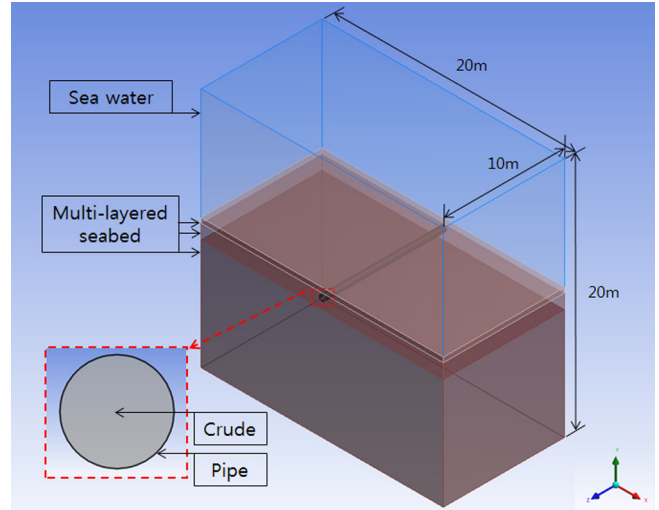


Fig. 5 Characteristics of numerical model

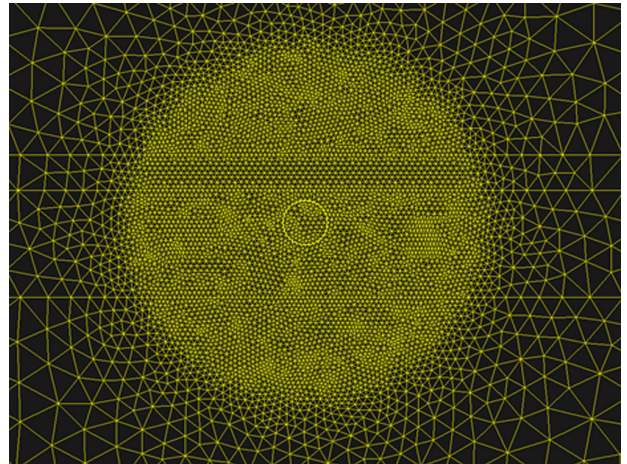


Fig. 6 Grid for numerical analysis

Table 2 Coefficients of turbulent model

	β'	β_1	β_2	σ_k	σ_ω	α
Φ_1	0.009	0.075	-	0.5	0.5	$\frac{5}{9}$
Φ_2	0.009	-	0.0828	1	0.865	$\frac{\beta}{\beta'} - \frac{\sigma_\omega 2k^2}{\sqrt{\beta}}$

구성하였다. 격자에 대한 영향을 평가하기 위해 격자 의존성 검사를 수행하였고 온도분포가 정상상태에 이르렀을 때 약 15만 개의 노드 수에서 격자 의존성이 사라진다고 판단하였다.

4.2 지배방정식

정상상태, 비압축성 난류유동으로 지배방정식은 연속방정식인 식 (21) 그리고 운동량 방정식인 식 (22)와 같다(ANSYS Inc., 2010a).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (22)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] - \rho \overline{(u_i' u_j')}$$

위 식처럼 시간 평균화된 Navier-Stokes 방정식은 Reynolds 응력 즉, $-\rho \overline{(u_i' u_j')}$ 항이 추가적으로 포함된다. 경계층 근처의 결과를 확인하기 위해서는 $k-\omega$ 모델이 적합하지만 벽면에서 멀어질수록 수렴성이 떨어진다는 단점이 있고 벽면에서 층분이 떨어진 자유유동에는 $k-\epsilon$ 모델이 적합하지만 벽면 부근의 예측은 부정확하다. 따라서 본 연구에서 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점을 결합한 $k-\omega SST$ (Shear stress transport) 모델을 적용하였다. $k-\omega SST$ 모델은 혼성합수인 F_1 을 이용하여 $k-\omega$ 모델과 F_1 을 곱하고, $k-\epsilon$ 모델에는 $(1-F_1)$ 을 곱하여 $k-\omega$ 형태로 다시 쓰면 식 (23) 및 식 (24)와 같다. 여기서 벽면 근처에서는 $F_1 = 0$ 로 $k-\omega$ 모델, 자유유동에서는 $F_1 = 1$ 로 $k-\epsilon$ 모델이 된다 (ANSYS Inc., 2010a).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_j)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta' \rho \omega k \quad (23)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \rho \omega^2 + 2(1-F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (24)$$

각 난류 상수들을 F_1 에 의한 식으로 표현하면 식 (25)와 같으며 ϕ_1 은 $k-\epsilon$ 모델, ϕ_2 은 $k-\omega$ 모델이며 모델의 상수는 Table 2와 같다(ANSYS Inc., 2010a).

$$\Phi = F_1 \phi_1 + (1-F_1) \phi_2 \quad (25)$$

4.3 초기조건 및 경계조건

본 연구의 수치해석은 유한체적법(Finite volume method)을 통해 해석을 수행하며, 고해상도기법(High resolution scheme)을 사용하는 ANSYS CFX v13.0을 이용하여 초기조건 및 경계조건을 설정하였으며 모델의 온도분포가 변하지 않는 정상상태의 해석을 수행하였다(ANSYS Inc., 2010b).

수치해석을 위한 초기조건 및 경계조건은 Fig. 7과 같으며, 모델의 초기온도는 4°C로 설정하였다. 해수(Sea water)의 벽면은 점착 조건(No slip wall)로 4°C의 고정온도를 부여하였으며 입구(Inlet), 출구(Outlet)의 유속은 0.05m/s를 유지시켰다.

원유(Crude)는 API 37.5도의 브렌트유(Brent oil)의 밀도, 점성계수, 비열 그리고 열전도율을 사용하였으며 입구는 Velocity inlet 그리고 출구는 Velocity outlet 조건으로 유속 2.5m/s로 설정하였고 원유의 입구온도는 70°C로 설정하였다.

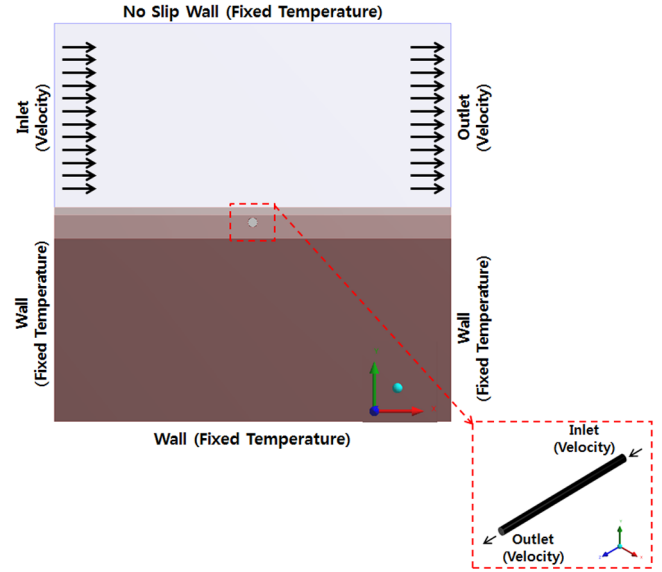


Fig. 7 Boundary condition of numerical model

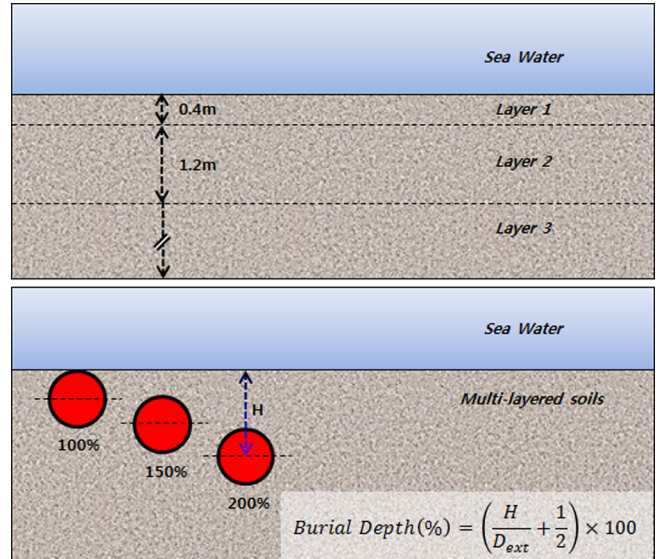


Fig. 8 Organization of multi-layered soils and burial depth

해저배관의 규격은 API(American petroleum institute)의 석유수송용 강제인 API 5L X52 PSL 2의 규격을 적용하였다. 지반은 Fig. 8과 같은 3개의 층(Layer)로 모델링 하였으며 각 층의 벽면은 점착조건을 부여하였고, 각 층의 열전도율은 Hamdham and Clarke(2010) 및 Park and Seo(2017)을 참고하였다.

4.4 수치해석 결과를 이용한 총괄열전달계수 계산 이론

식 (26)과 같이 해저배관의 입 출구의 온도구배를 이용해 열전달율 Q 를 구하였다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T = \dot{m} C_p (T_{inlet} - T_{outlet}) \quad (26)$$

식 (26)에서 계산한 Q 와 원유의 평균온도($T_{crude,m}$) 및 해저배관 표면의 평균온도($T_{pipewall,m}$)를 이용해 식 (27)에 대입하여

h_{ext} 와 h_{int} 를 계산한다. 여기서 계산된 h_{ext} , h_{int} 를 식 (1)에 대입하여 총괄열전달계수를 계산하였다.

$$h = \frac{q}{A(T_{crude,m} - T_{pipewall,m})} \quad (27)$$

5. 해석 케이스 및 결과비교

다층지반을 고려한 매립된 해저배관의 Proposed formula을 검토하기 위해 케이스 해석을 실시하였다. 먼저 해석 케이스 1에서는 다양한 비오투 수를 가지는 해저배관에 대한 해석을 통해 해저배관 종류에 따른 Proposed formula의 적용 가능성을 검토하였다. 해석 케이스 2에서는 같은 비오투 수를 가지는 해저배관을 기준으로 다양한 열전도율 및 층 두께를 가지는 다층지반에 대해 Proposed formula의 적용가능성을 검토하였다.

5.1 해석 케이스 1 : 다양한 비오투 수의 해저배관

해석 케이스 1은 해저배관 벽의 열전달계수 및 해저지반의 열전도율에 의해 결정되는 비오투 수를 기준으로 세 가지 해저배관에 대한 해석을 실시하였다. 해저배관과 총괄열전달계수 그리고 비오투 수의 관계는 Table 3와 같다(Zakarian et al., 2012).

Table 3 Typical biot number and OHTC by type of pipeline

Type of subsea pipeline	Typical OHTC [W/m ² K]	Typical biot number
PIP system Insulated pipeline	0.5 - 15	$Bi_p \leq 4$ (Low)
Insulated pipe Concrete weight coated pipeline	15 - 50	$4 < Bi_p \leq 50$ (Intermediate)
Uninsulated pipeline	50 - 1500	$50 < Bi_p$ (High)

5.1.1 높은 비오투 수 해저배관(Uninsulated pipeline)

높은 비오투 수의 해저배관은 단열재가 없는 해저배관을 토대로 Proposed formula 계산 및 수치해석을 실시하였다. 본 해저배관은 비오투 수가 약 146인 경우로 해저배관의 외경, 내경, 열전도율 그리고 해저지반의 층별 깊이 및 열전도율은 Table 4와 같다.

Table 4 Properties of high biot number pipe and soils

Subsea pipe and multi-layered soils	Subsea pipe diameter [m]	Depth of layer [m]	Thermal conductivity [W/mK]
Pipe inner diameter	0.4826	-	51
Pipe outer diameter	0.508	-	
Soil layer 1	-	0 ~ 0.4	1.31
Soil layer 2	-	0.4 ~ 1.6	1.4
Soil layer 3	-	1.6 ~ ∞	1.6

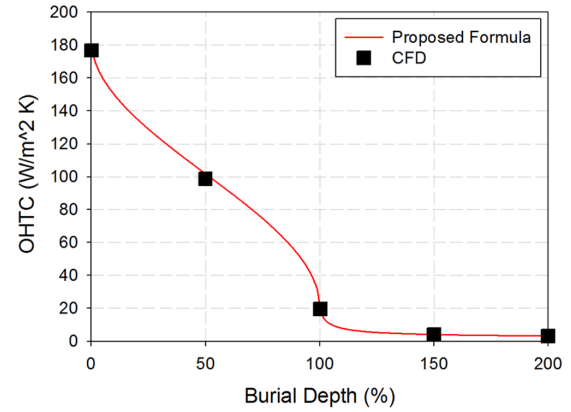


Fig. 10 OHTC result of high biot number of pipe

총괄열전달계수 계산 및 해석결과는 Fig. 10과 같다. 매립깊이 0%, 즉 해수에 완전 노출된 해저배관의 총괄열전달계수는 약 180W/m²K을 나타내었고 매립깊이 200%일 때 총괄열전달계수는 약 3W/m²K의 결과를 확인 할 수 있었다. 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에서 Proposed formula계산 결과 및 수치해석 결과의 평균오차는 약 2.4%를 나타내었다.

5.1.2 중간 크기 비오투 수 해저배관(CWC pipeline)

중간 크기 비오투 수 해저배관은 아스팔트 및 콘크리트를 단열제로 사용하는 CWC(Concrete weight coated)배관에 대한 계산 및 수치해석을 실시하였다.

Table 5 Properties of intermediate biot number pipe and soils

Subsea pipe and multi-layered soils	Subsea pipe diameter [m]	Depth of layer [m]	Thermal conductivity [W/mK]
Pipe inner diameter	0.4826	-	51
Pipe outer diameter	0.508	-	
Asphalt	0.515	-	0.74
Concrete	0.615	-	2.9
Soil layer 1	-	0 ~ 0.4	1.31
Soil layer 2	-	0.4 ~ 1.6	1.4
Soil layer 3	-	1.6 ~ ∞	1.6

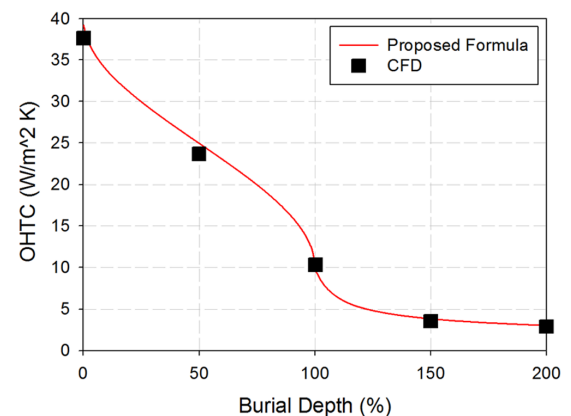


Fig. 11 OHTC result of Intermediate biot number of pipe

본 해저배관의 비오투 수는 약 9의 경우이며 해저배관과 단열재의 외경, 내경, 열전도를 그리고 해저지반의 층별 깊이 및 열전도율은 Table 5에 나타내었다.

총괄열전달계수 계산 및 수치해석 결과는 Fig. 11과 같이 매립 깊이가 0%일 때 약 40W/m²K, 매립깊이 200%에서 약 3W/m²K로 나타났다. 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에서 Proposed formula 계산결과 및 수치해석 결과를 비교하였을 때 오차는 약 5.6%정도로 나타났다.

5.1.3 낮은 비오투 수 해저배관(Well-insulated pipeline)

낮은 비오투 수에 대한 해석을 수행하기 위해 폴리프로필렌 (Polypropylene)으로 단열된 해저배관을 설정하여 Proposed formula 계산 및 수치해석을 수행하였다. 해저배관과 단열재 및 해저지반의 물성치는 Table 6과 같으며 비오투 수는 1.99이다.

본 해저배관의 결과는 Fig. 12와 같다. 매립되지 않았을 때의 총괄열전달계수는 약 10W/m²K이며 200%매립 되었을 때 약 2.4W/m²K의 총괄열전달계수 결과를 확인 할 수 있었다. Proposed formula 계산 결과와 수치해석 결과의 차이는 6.3%를 초과하지 않았다.

Table 6 Properties of low biot number pipe and soils

Subsea pipe and multi-layered soils	Subsea pipe diameter [m]	Depth of layer [m]	Thermal conductivity [W/mK]
Pipe inner diameter	0.4826	-	51
Pipe outer diameter	0.508	-	
Polypropylene	0.552	-	0.22
Soil layer 1	-	0 ~ 0.4	1.31
Soil layer 2	-	0.4 ~ 1.6	1.4
Soil layer 3	-	1.6 ~ ∞	1.6

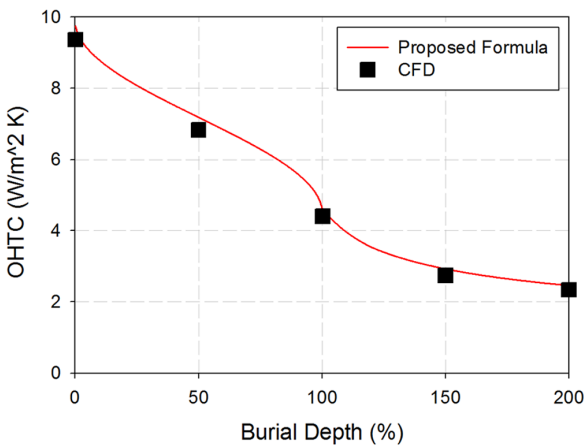


Fig. 12 OHTC result of low biot number of pipe

5.2 해석 케이스 2 : 다양한 다층지반 구성

두 번째로 한 가지 해저배관을 기준으로 다양한 다층지반에 대한 해석을 실시하였다. 먼저 3층으로 구성된 해저지반의 각 층의 열전도율을 변경하여 해석을 실시하였고 다음으로 두께

및 지반 층 개수가 다른 조건의 해석을 실시하였다.

5.2.1 다른 열전도율을 가지는 각 지반 층(Scenario 1과 2)

층의 두께가 일정한 다층지반에 각 층의 열전도율을 변경하여 해석을 수행하였다. 본 시나리오 1과 시나리오 2는 중간 크기 비오투 수의 해저배관을 사용하였으며 해석 케이스 1의 다층지반 층 개수 및 층 두께를 설정, 열전도율을 변경하여 해석을 수행하였다. 다층지반의 열전도율 구성은 Table 7과 같다.

Table 7 Properties of Scenario 1 and Scenario 2

Multi-layered soils	Depth of layer [m]	Thermal conductivity [W/mK]	
		Scenario 1	Scenario 2
Layer 1	0 ~ 0.4	1.31	1.31
Layer 2	0.4 ~ 1.6	1.4	2.75
Layer 3	1.6 ~ ∞	1.6	4.44

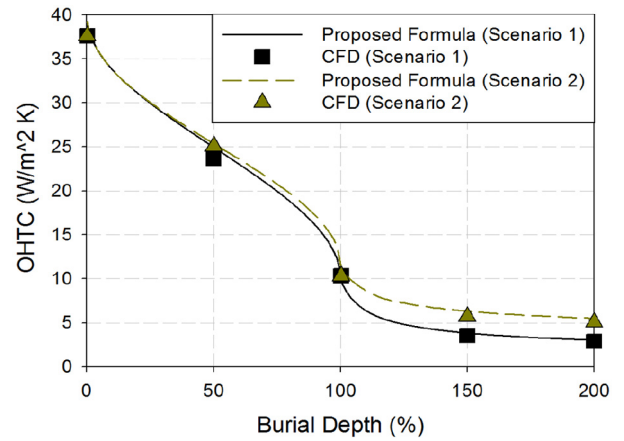


Fig. 13 OHTC results of Scenario 1 and Scenario 2

본 해석 결과는 Fig. 13과 같다. 시나리오 1과 시나리오 2의 Proposed formula 계산결과와 수치해석 결과의 평균 오차는 약 6%의 결과를 확인 할 수 있었다.

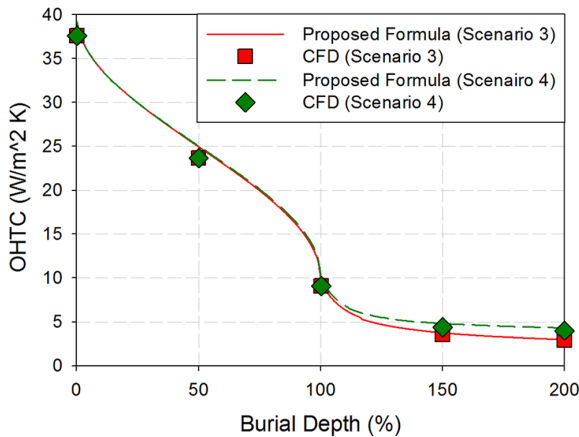
두 시나리오는 매립깊이 100%까지는 거의 유사한 경향을 확인할 수 있는데 이는 일부 매립된 해저배관의 경우 해수가 해저배관의 총괄열전달계수에 지배적인 요인으로 작용하기 때문이다. 또한 두 시나리오 결과는 완전매립 즉 매립깊이 100%에서 200%까지 차이를 확인 할 수 있는데, 이는 매립깊이가 깊어질수록 해저배관의 총괄열전달계수에 해저지반이 지배적인 요인으로 작용하기 때문이다. 매립깊이 200%에서 시나리오 1과 시나리오 2의 등가열전도율(k_{equiv})은 각각 1.4756W/m²K, 2.8667W/m²K이며 등가열전도율이 큰 다층지반에 매립된 시나리오 2가 시나리오 1에 비해 총괄열전달계수 결과가 높게 나타났다.

5.2.2 다른 두께를 가지는 지반 층(Scenario 3과 4)

중간 크기 비오투 수의 해저배관이 다양한 두께의 층으로 구성된 다층지반에 매립되었을 때를 가정하여 해석을 실시하였다. 다층지반의 두께 및 열전도율 구성은 Table 8과 같으며 시나리오 3은 세 개의 층으로 구성하였다. 그리고 시나리오 4는 4개의

Table 8 Properties of Scenario 3 and Scenario 4

Multi-layered soils	Depth of layer [m]		Thermal conductivity [W/mK]	
	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 3	Scenario 4
Layer 1	0 ~ 0.4	0 ~ 0.4	1.31	1.31
Layer 2	0.4 ~ 2.0	0.4 ~ 1.5	1.4	1.6
Layer 3	2.0 ~ ∞	1.5 ~ 2.0	1.6	2.75
Layer 4	-	2.0 ~ ∞	-	4.44

**Fig. 14** OHTC results of Scenario 3 and Scenario 4

층으로 구성하였다. 해석결과는 Fig. 14와 같다. 시나리오 3 및 시나리오 4의 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에서 Proposed formula 계산결과와 수치해석 결과를 비교했을 때 평균오차는 각각 5.5%, 7.04%로 나타났다.

6. 결 론

본 논문은 기존 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 이론식을 검토하였고, 실제 해저지반이 다층 지반 즉, 다양한 열전도율을 가지는 층으로 구성된 점에 착안하여 기존 해저배관 총괄열전달계수 이론식 중 Zakarian이론식(Zakarian et al., 2012)을 토대로 변형한 식을 제안하였으며 Proposed formula라 명명하였다. 이를 위해 다층 지반의 열전도율은 Fourier의 열전도법칙을 적용하였으며 각각의 다른 열전도율을 가지는 다층 지반을 하나의 등가 열전도율로 환산하여 식에 적용시켰다.

Proposed formula를 검토하기 위해 상용수치해석 프로그램인 ANSYS v13.0을 사용하여 수치 해석적 실험을 수행하였다. 해저배관의 총괄열전달계수는 모델의 온도분포가 일정한 온도를 유지하는 정상상태 일 때 해저배관의 입구, 출구, 해저배관표면 등의 온도를 측정하여 측정된 온도를 토대로 산정하였다.

Proposed formula의 적용가능성을 검토하기 위해 두 가지 케이스에 대해 Proposed formula 계산 및 수치해석을 수행하였다. 첫 번째 케이스는 해저배관 벽의 열전달계수 및 해저지반의 열전도율에 의해 결정되는 비오투 수를 기준으로 분류하였으며 세 가지 해저배관을 설정하였다. 해저배관은 높은 비오투 수($4 < B_p \leq 50$)에 해당하는 해저배관 즉 비오투 수가 약 146인 경우의

해저배관, 비오투 수($4 < B_p \leq 50$)에 해당하는 중간크기 비오투 수 해저배관 즉 비오투 수가 약 9인 해저배관 그리고 낮은 비오투 수($B_p \leq 4$)에 해당하는 해저배관 즉 비오투 수가 약 1.99인 해저배관을 설정하였다.

Proposed formula 계산결과 및 수치 해석적 실험 결과를 비교 하였을 때 해저배관의 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에서 평균 5%이내의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 Proposed formula는 다양한 비오투 수를 가지는 해저배관의 총괄열전달계수 계산에 적용가능하다고 판단된다. 두 번째 케이스는 다양한 다층지반 환경에서 Proposed formula의 적용 가능성을 검토하기 위해 다른 열전도율을 가지는 지반 층에 대한 시나리오와 두께가 다르고 지반 층의 개수가 다른 다층지반의 시나리오를 설정하였다. 전체 시나리오의 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에서 평균 6%의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 Proposed formula는 다양한 다층지반 환경에서 해저배관의 총괄열전달계수 계산에 적용가능하다고 판단된다.

본 논문은 다층 지반의 다양한 열전도율을 고려한 해저배관의 총괄열전달계수 이론식을 제안하기 위해 수치 해석적 방법으로 비교 검토하였으며 향후 실내모형실험을 통해 Proposed formula의 적용 가능성에 대한 보다 정밀한 검증연구를 진행 할 예정이다.

후 기

본 연구는 2017년 한국해양대학교 부산 산학융합지구조성사업단 산학협력 R&D과제“다층 지반을 고려한 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 산정”과제와 2017년 산업통상자원부 지원 산업핵심기술과제“ARC7 극지환경용 해양플랜트 내빙구조 설계 기술 개발”과제의 지원으로 수행된 결과임.

References

- ANSYS Inc., 2010a. ANSYS CFX Theory Guide. ANSYS v130, Canonsburg.
- ANSYS Inc., 2010b. ANSYS CFX Tutorials. ANSYS v130, Canonsburg.
- Bai, Y., Bai, Q., 2005. Subsea Pipelines and Riser. 1st edition, Elsevier Ltd., Kidlington, Oxford.
- Bai, Y., Niedzwecki, J.M., 2014. Modeling Deepwater Seabed Steady-state Thermal Fields around Buried Pipeline Including Trenching and Backfill Effect. Computers and Geotechnics, 61, 221-229.
- Carlsaw, H.A., Jaeger, J.C., 1959. Conduction of Heat in Solides. 2nd edition, Clarendon Press, Oxford.
- Hamdham, B.G., Clarke, B.G., 2010. Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine sand Soils. Proceedings of World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- Holman, J.P., 2009. Heat Transfer. 10th edition, McGraw-Hill, New York.
- Huminc, G., Huminc, A., 2013. Numerical Study on Heat Transfer

- Characteristics of Thermosyphon Heat Pipes using Nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 76, 393-399.
- Morud, J.C., Simonsen, A., 2007. Heat Transfer from Partially Buried Pipes. 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia.
- Oh, D.-W., Park, J.M., Lee, K.H., Zakarian, E., Lee, J., 2014. Effect of Buried Depth on Steady-state Heat-transfer Characteristics for Pipeline-flow Assurance. *SPE Journal*, 19(06), 1,162-1,168.
- Ovuworle, C., 2010. Steady-State Heat Transfer Models for Fully and Partially Buried Pipelines. CPS/SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition, Beijing, China.
- Papukchiev, A., Buchholz, S., 2017. Validation of ANSYS CFX for Gas and Liquid Metal Flows with Conjugate Heat Transfer within the European Project THINS. *Nuclear Engineering and Design*, 312, 338-350.
- Park, D.S., Seo, Y.K., 2017. Experimental and Numerical Methods for Thermal Conductivity of Backfill Soils for Subsea Pipeline. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(2), 103-110.
- Yoon, S., Lee, S.P., Go, G.H., Xue, J., Park, H., Park, D.W., 2014. Thermal Transfer Behavior in Two Types of W-shape Ground Heat Exchangers Installed in Multilayer Soils. *Geomechanics and Engineering*, 6(1), 79-98.
- Xu, C., Yu, B., Zhang, Z.W., Zhang, J.J., Wei, J.J., Sun, S.Y., 2010. Numerical Simulation of a Buried Hot Crude Oil Pipeline During Shutdown. *Petroleum Science*, 7(1), 73-82.
- Zakarian, E., Holbeach, J., Morgan, J., 2012. A Holistic Approach to Steady-State Heat Transfer From Partially and Fully Buried Pipelines. *Offshore Technology Conference*, Huston.

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

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

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

**Hyundai Motor Company Co., Ltd., Hwaseong, South Korea

***Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Seongnam, South Korea

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

FLNG개념설계 단계에서 SMR 및 DMR 액화공정의 잠재적 폭발위험도 비교

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

*서울대학교 조선해양공학과

**현대자동차

***삼성중공업

****서울대학교 해양시스템공학연구소

KEY WORDS: Conceptual design 개념 설계, Explosion risk 폭발위험, Inherent safety 고유안전성, Liquefaction 액화, FLNG 부유식 액화천연가스

ABSTRACT: An FLNG (floating liquefied natural gas) or LNG FPSO (floating production, storage and offloading) unit is a notable offshore unit with the increasing demand for LNG. The liquefaction process on an FLNG unit is the most important process because it determines the economic feasibility, but would be a hazard source because of the large quantity of hydrocarbons. While a high efficiency process such as C3MR has been preferred for onshore liquefaction processes, a relatively simple process such as the SMR (single mixed refrigerant) or DMR (dual mixed refrigerant) liquefaction process has been selected for offshore units because they require a more compact size, lighter weight, and higher safety due to their space limitation for facilities and long distance from shore. It is known that an SMR has the advantages of a simple configuration, small footprint, and lower risk. However, with an increased production rate, the inherent safety of SMR needs to be evaluated because of its small train capacity. In this study, the potential explosion risks of the SMR and DMR liquefaction processes were evaluated at the conceptual design stage. The results showed that an SMR has a lower overpressure than a DMR at the same frequency, only with a small production capacity of 0.9 MTPA. With increased capacity, the overpressure of the SMR was higher than that of the DMR. The increased number of trains increased the frequency in spite of the small amount of equipment per train. This showed that the inherent risk of an SMR is not always lower than that of a DMR, and an additional risk management strategy is recommended when an SMR is selected as the concept for an FLNG liquefaction process compared to the DMR liquefaction process.

1. 서 론

FLNG(Floating liquefied natural gas), 혹은 LNG-FPSO(Floating production, storage and offloading)는 해양에서 LNG를 생산하는 해양시설로, 해저면의 상태에 크게 영향을 받지 않고 천해에서 심해까지 설치가 가능하며 설비의 이동 및 재활용이 가능하고, 육상에 설치되는 사회적 법적 제약을 경감할 수 있는 장점이

있다(Zhao et al., 2011; Mokhatab et al., 2013). LNG는 기체상태에 비하여 부피가 약 400-600배 줄어들기 때문에 천연가스의 원거리 수송을 위하여 널리 사용되고 있으며, 향후 그 수요와 공급이 더욱 증가할 것으로 기대받고 있다. LNG생산에 있어서 가장 핵심이 되는 것은 액화공정 설계 기술로 70년대부터 다양한 공정 설계안이 제시되어 왔다(Barron, 1985; Venkatarathnam and Timmerhaus, 2008; Timmerhaus and Flynn, 2013). 초기에는 다른

Received 3 November 2017, revised 22 March 2018, accepted 12 April 2018

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

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

성분의 냉매를 순차적으로 이용하는 복합 사이클이나(Kanoğlu, 2002; Mokhatab and Poe, 2012) 단일 혼합냉매를 냉매로 이용하는 SMR(Single mixed refrigerant)을 사용하였다(Swenson, 1977; Moein et al., 2015). 이후 다중 사이클 구조가 도입되면서 APCI (Air Products and Chemicals Inc.)에서 프로판(C3)을 사전냉각용으로 사용하는 C3MR(Propane precooled mixed refrigerant) 이 개발되어 산업적으로 널리 이용되어 왔다(Gaumer and Newton, 1973; Lee et al., 2012). Shell은 두가지 혼합냉매를 이용하는 DMR(Dual mixed refrigerant) 냉각 공정을 제안하였으며, C3MR과 동급의 효율을 가짐을 보였다(Buijs et al., 2005; Wang et al., 2012). 최근에는 높은 효율을 갖는 삼중냉각사이클 공정인 AP-X등의 설계가 제시되고 있다(Barclay and Yang, 2006; Wang et al., 2012).

해양 액화시설의 경우, SMR과 DMR이 적절한 것으로 보고되고 있다(Barclay and Yang, 2006). 경제성 극대화를 위하여 큰 용량과 높은 효율을 추구하는 육상과는 달리, 해양의 경우 공간과 무게의 제약, 사고에 대한 대처 및 대피의 어려움으로 인하여 단순한 구조, 쉬운 운전, 경량 및 소형 설비를 선호하는 경향이 있다(Drysdale and Sylvester-Evans, 1998; Barclay and Yang, 2006; Bukowski et al., 2011; Paik et al., 2011), DMR은 프로판을 혼합냉매로 대체하여 위험도를 낮추었으며(Shell Global, 2016), SMR은 단순한 구조 및 가볍고 작은 설비로 아직도 해양에서 유효하게 적용되고 있다(Barclay and Yang, 2006).

SMR의 경우, 상대적으로 작은 생산용량으로 인하여 생산량을 늘리려면 소용량 모듈을 병렬배치하는 다중 트레인(Multi-train) 구조를 채택하고 있다. Lavaca bay FLNG의 경우, SMR 4트레인이 계획되었었는데(Corneliussen and Samnøy, 2015), 트레인의 개수 증가는 곧 장치수가 증가하는 것을 의미하며, 이는 누출 빈도를 증가시켜 잠재적 위험도를 높일 수 있다. 이러한 잠재적 위험성은 개념설계나 기본설계단계에서는 잘 드러나지 않아 파악하기 어려우나, 이후 정량적 위험도 평가(QRA, Quantitative risk assessment)를 거치며 설계 변경 원인을 제공할 수 있는 잠재요인이 된다. 이를 대비하기 위해서는 개념 설계 단계부터 안전에 대한 통찰을 설계 반영할 수 있어야 한다.

공정 설계 및 최적화 부문에 있어서 많은 연구자들이 SMR 및 DMR액화공정을 비교 평가하여 왔으나, 효율에 초점을 맞춘 경우가 많다. Barclay and Yang(2006)은 SMR 및 DMR 액화공정에 대해서 평가하고 해양시설을 위해서는 SMR이 충분히 높은 효율을 보인다고 결론지었다. Xu et al.(2013), Xu et al.(2014a)와 Xu et al.(2014b) 등은 SMR 냉매조성을 다양한 조건 하에서 최적화하였다. Khan et al.(2012)와 Khan et al.(2013)은 다양한 알고리즘을 이용하여 SMR공정 효율을 최적화하였다. Lee et al.(2012)은 FLNG에 적합한 SMR 구성안을 제시하고 개선된 효율을 보였다. 이외에도 다른 많은 연구자들이SMR/DMR 공정 효율 개선 연구를 수행하여 왔다(Buijs et al., 2005; Aspelund et al., 2010; Lim et al., 2010; Bukowski et al., 2011; Pwaga, 2011; Hwang et al., 2013; Corneliussen and Samnøy, 2015; Moein et al., 2015). SMR 위험도에 대한 연구 또한 많이 수행되어 왔으나, DMR과 비교하여 정량적으로 분석한 연구는 많지 않다. Talib and Price(2011), Talib and Germinder(2016)는 SMR이 해양 상부 공정에 적용하기 좋은 선택지이며 위험도 또한 낮다고 언급하

고 있으나, 구체적인 위험도 평가 결과를 보이고 있지는 않다. Kim et al.(2013)은 FLNG는 SMR이 효율이 높고 장치수 및 공간이 작은 장점이 있으며, 효율이 높기 때문에 위험도를 고려하여도 질소 팽창 액화공정에 비해서 평생주기 비용이 유리하다고 보고하고 있으나, 위험도가 구체적으로 어떻게 비교가 되었는지는 상세히 기술되지 않았다. Hocquet(2013)은 폭발 위험도 분석 방법론을 설명하고 FLNG에 적용하는 경우의 문제점을 설명하였으나, 액화공정 변경시 발생하는 차이에 대해서는 언급한 바 없다. Kim et al.(2014)에서는 SMR의 내재된 위험도와 비용을 최소화하는 최적화연구를 수행하였으나, 단일 트레인에서만 수행된 것이며 DMR과의 비교는 이루어지지 않았다. Dan et al.(2014)은 DMR공정의 화재폭발 분석을 수행하고 SIL(Safety integrity level)을 만족하기 위하여 요구되는 보호층에 대하여 연구를 수행하였으나, 다른 액화공정과 비교는 이루어지지 않았다. Lee et al.(2015) 및 Yu et al.(2015)에서는 N2 팽창, SMR, DMR 액화공정의 설계 고려점을 비교하였으나 결과는 정성적으로 비교되었고 정량적인 정보는 제공되지 않았다.

본 논문에서는 폭발 위험도 분석 방법론을 차용하여 개념설계단계에서 다른 정보가 동일하다고 가정하는 경우 동일한 생산용량을 가지는 SMR 액화공정과 DMR액화공정의 잠재적 폭발 위험도를 비교하여 상대적 잠재 위험도를 도출하고자 하였다. 이를 위하여 SMR 및 DMR 액화공정을 모사하고 이를 최적화하여 효율을 극대화 하였고, 최적화된 운전조건에서 폭발 위험도를 분석하여 어떠한 차이가 나타나는지를 연구하였다.

2. 배경지식-폭발 위험도 분석 방법론

폭발은 가스의 급격한 팽창으로 인하여 에너지가 방출되는 현상으로 폭발 위험도 분석 방법론은 사고발생 빈도(Frequency)와 그 결과(Consequence)를 동시에 고려하여 평가한다. 통상 해양시설의 안전성을 평가하기 위하여 수행되는 QRA의 일부로써 많이 활용되며, 일반적인 절차는 다음과 같다. (1) 폭발 시나리오를 수립. 누출의 위치, 누출 가스의 방향, 누출가스의 양, 바람의 방향 및 속력 등을 고려(Vinnem, 2014). 개념설계 단계에서 부족한 정보들은 기존 수행이력에서 가장 확률이 높은 시나리오들로부터 차용 가능(Dan et al., 2014). (2) 폭발 빈도를 추산. 일반적으로 폭발빈도는 누출 빈도와 점화 확률의 곱으로 나타내지며, 누출 빈도와 점화확률은 통계적 데이터를 기반으로 얻을 수 있다(OGP, 2010a; OGP, 2010b). (3) 폭발 결과에 대하여 평가. 일반적으로 폭발로 인하여 발생하는 과압(Overpressure)으로 평가된다. 보다 정교한 연산을 위해서 전산유체해석 기법이 적용될 수 있으나, 배치에 대한 정보가 부족하고 빠른 평가가 요구되는 개념설계단계에서는 단축 모델을 이용하는 것이 경제적이다. TNT(Trinitrotoluene) 등가모델은 TNT폭발 실험을 기반으로 얻은 최대과압과 환산거리의 경험식을 기반으로 하며, 빠른 계산이 가능한 장점으로 인하여 현재까지도 널리 사용되고 있다(Crowl et al., 2003). (4) 위험도 분석을 위해서는 다양한 평가기준이 사용될 수 있는데, 해양 폭발 위험도 분석에서 종종 이용되는 한 예는 초과누적도표(Exceedance diagram)를 이용하는 방법이다(Vinnem, 2014). 이는 주어진 과압보다 높은 과압이 발생할 수 있는 빈도를 누적하여 나타낸 도표로 허용가능한 빈

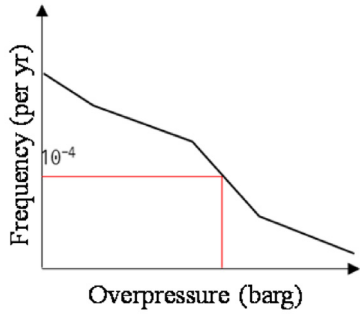


Fig. 1 Example of an exceedance diagram

도를 만족하는 과압을 평가하는데 사용될 수 있다. Fig. 1은 그 예로 해양 시설의 경우 ALARP(As low as reasonably practicable) 기준빈도인 연간 10^{-4} 빈도를 많이 사용한다. 통상 QRA단계에서 폭발 위험도 분석은 장비내의 유체정보는 물론, 각 장비의 크기 및 배치, 장비가 포함된 모듈간의 배치, 다양한 변화가 가능한 외부조건을 고려하여 다수의 시나리오 수립 및 평가가 필요하다. 이는 많은 정보량과 비용 투자를 요구하므로, 개념설계 단계에서는 제대로 이루어지기 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 2종류의 액화공정에 대하여 개념설계 단계에서의 잠재적 폭발 위험도를 비교하기 위하여 기존 폭발 위험도 분석 방법론을 차용, 가정을 통하여 시나리오를 단순화하여 정보가 부족한

상태에서도 위험성 분석을 수행, 공정이 가지고 있는 내재적 위험도를 분석하고자 하였다.

3. 모델링 및 시뮬레이션

본 연구에서는 SMR과 DMR 액화공정 모사하고 이를 최적화한 뒤, 누출 시나리오 및 격리 구간(Isolated segments)을 정의하였다. 각 격리 구간 내의 유체 재고량(Inventory)별로 누출 위치 및 유량에 대한 시나리오가 정의되었고, 변수들은 보수적으로 가장 안 좋은 경우를 기준으로 선택되었다. Fig. 2는 SMR 및 DMR공정의 PFD (Process flow diagram)을 나타내었다. 공정 모사는 Aspen HYSYS V8.8, Peng-Robinson EOS를 이용하여 수행되었으며, 초기값은 Venkatarathnam and Timmerhaus(2008)의 문헌을 기반으로 결정되었다. 유전 알고리즘을 이용하여 에너지 소모량을 최소화하는 방향을 최적화하였다. 유전 최적화 알고리즘은 지역 최적화를 확률적으로 극복할 수 있는 유사전역 최적화 알고리즘으로 도함수 연산을 요구하지 않아 연산식 접근이 허용되지 않는 소프트웨어와 연결하여 사용하기 유리하다. SMR에서는 냉매의 유량, 혼합냉매의 조성(N_2 , C_1 , C_2 , C_3 , nC_4), 압력(4단 압축)의 10개 변수를, DMR에서는 사전냉각(Precooler) 사이클의 냉매 유량, 분할 비율, 냉매 조성(C_2 , C_3 , nC_4), 압력(3단 압축) 및 본냉각 사이클의 냉매유량, 냉매조성(N_2 , C_1 , C_2 , C_3),

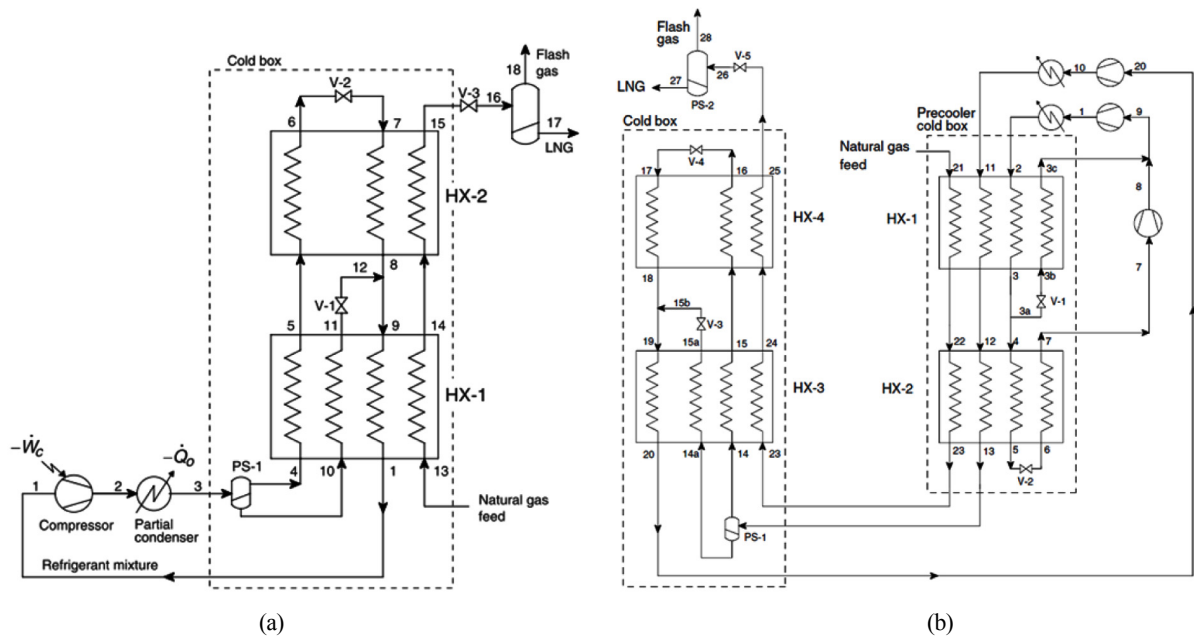


Fig. 2 Process flow diagrams (PFDs) of (a) SMR process and (b) DMR process

Table 1 Optimization parameters and constraints for the liquefaction processes

Optimization parameters	Values
Feed (natural gas) operating pressure	65 bar
Pressure drop in heat exchangers	0 bar
Adiabatic efficiency of compressors	80 %
Precooling temperature	240 K
Inequality constraints	
Minimum temperature approach in heat exchangers	≥ 3.0 K

Table 2 Number of trains and explosion scenarios in each case

Cases (production rate)	Capacity Per Train [MTPA]	Number of Trains	Explosion Scenario Per Trains
Case 1 (0.9 MTPA)	SMR	0.9	1
	DMR	0.9	1
Case 2 (1.8 MTPA)	SMR	0.9	2
	DMR	1.8	1
Case 3 (3.6 MTPA)	SMR	0.9	4
	DMR	3.6	1

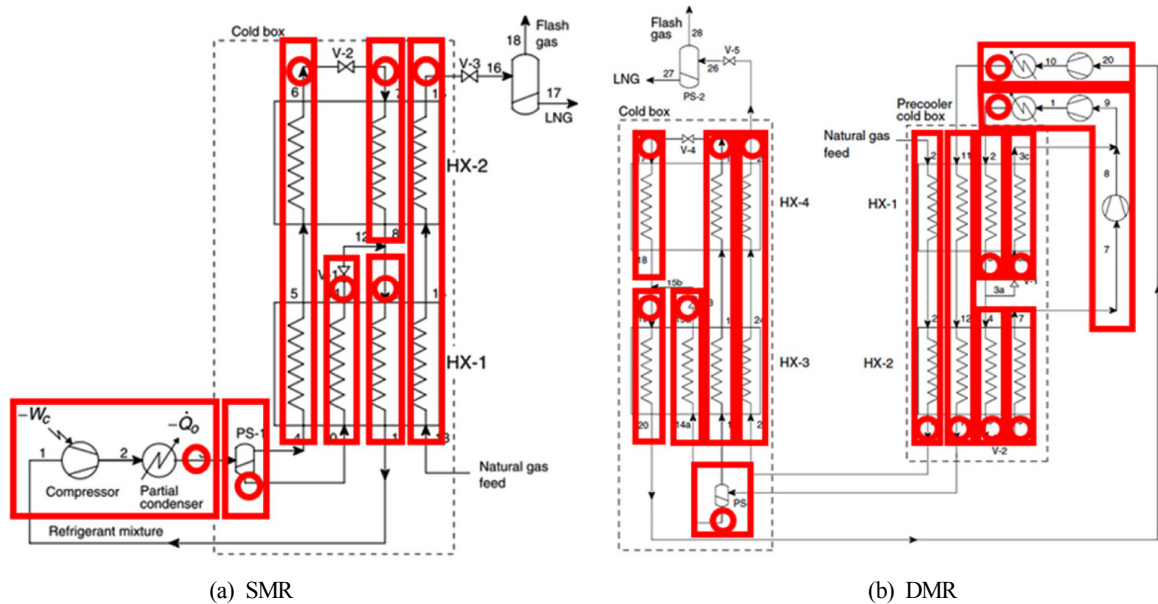


Fig. 3 Inventories and defined leak points for (a) SMR and (b) DMR.

압력(4단 압축)의 16개 변수를 최적화 변수로 선정하였다. 최적화 알고리즘 실행을 위하여 MATLAB R2014b이 연동 실행 되었고, 인구수 및 세대수 50이 적용되었다. 등식 제약조건은 시뮬레이터 내부 수렴조건을 이용하였으며, 부등식 제약은 열교환기의 최소온도차가 3도 이상임을 가정하였다. Table 1은 최적화에 적용된 계수 및 부등식 제약조건을 나타낸다.

본 연구에서는 단독으로 운전 가능한 가장 작은 설비집합체인 트레인의 용량과 개수를 고려하여 Table 2와 같이 3가지 사례를 가정하고 이를 기반으로 시나리오를 구축하였다. SMR의 경우 최대 트레인 용량이 1MTPA (Million tons per annum) 이하로 알려져 있으므로(Mokhatab and Poe, 2012; Mokhatab et al., 2013), 3.6MTPA생산(Case 3)을 위해서는 4개의 트레인이 필요하다고 가정하였다. DMR의 경우 트레인 용량 한계가 높으므로 각 생산용량별로 단일 트레인으로 구성하는 것으로 가정하였다(Pek and van der Velde, 2013).

공정 모사 결과를 기반으로 주요 공정 설비(분리기, 열교환기, 압축기 등)를 기반으로 격리 구간을 할당하고 각 구간내의 유체 재고량(Inventory)을 연산하였다. Fig 3과 같이 SMR공정의 경우 7개의 구간 및 그 재고량을, DMR공정의 경우 14개의 구간 및 그 재고량을 평가하였다. 수직분리기(Verticla separataor)의 크기는 API 및 GPSA 추정법을 이용하여 계산되었으며(API, 2009; GPSA, 2012), 열교환기의 크기는 Aspen exchanger design rating

V8.8 (EDR)을 이용하여 추산되었다. 누출점은 보수적으로 각각의 격리 구간에서 최대의 유출량을 유발하는 위치로 가정되었으며, 누출직경은 30mm, 100mm, 200mm의 세가지 경우를 가정하였다. 폭발위험도의 경우 바람의 세기가 강하면 누출된 가스가 분산되어 폭발 위험도가 감소하므로, 보수적으로 가장 안 좋은 상황을 가정하기 위하여 일반적인 해양 환경에 비하여 가벼운 바람이 존재하는 F레벨(풍속 1.5m/s)로 가정하였다. 풍향과 조류의 방향은 일치한다고 가정하였고, 터렛 계류된 FPSO의 경우 선수를 회전시킬 수 있으므로 선수에서 선미측으로 풍향을 가정하였다. 누출 빈도 및 점화 빈도는 OGP(International Association of Oil & Gas Producers) 통계 자료를 인용하여 사용하였다(OGP, 2010a; OGP, 2010b). 보수적인 해석을 위하여 운전 압력에서 긴급차단(Emergency shutdown)이나 긴급감압(Blowdown)이 있기 전까지 운전압력을 유지하면서 지속적으로 누출이 발생하는 완전 누출

Table 3 The ignition probability data used for correlations (OGP, 2010a)

Scenario No.21	Leak rate [kg/s]	Ignition probability
Point 1	0.1	0.001
Point 2	5	0.03
Point 3	30	0.05

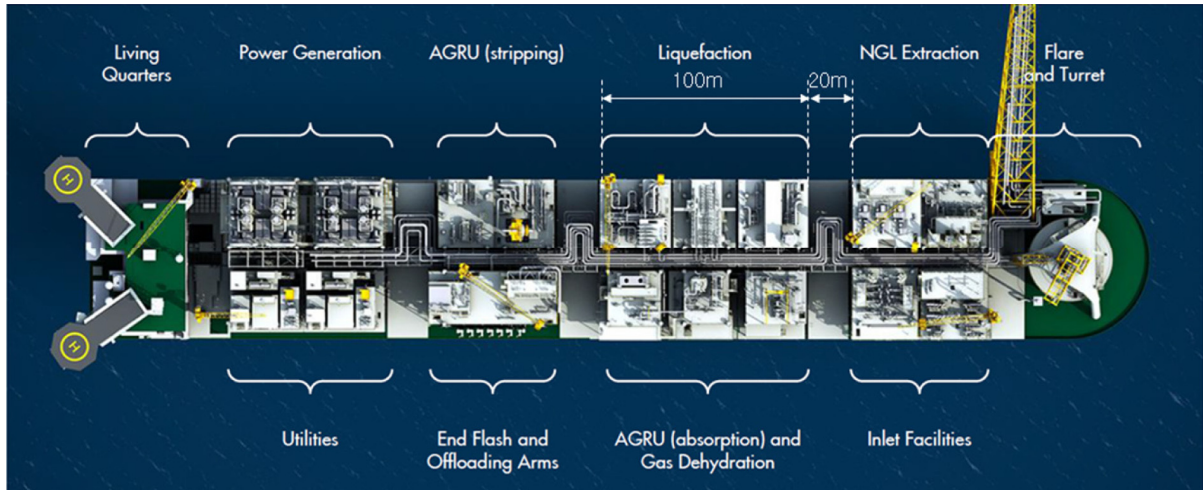


Fig. 4 Deck Plan of Shell Prelude FLNG (Jewitt, 2015)

(Full release) 조건을 가정하였다. 점화 확률은 Table 3과 같이 OGP가 제공하는 21번 시나리오(해양 공정 가스 모듈)의 데이터를 내삽하여 이용하였다.

잠재적 폭발 위험도를 분석하기 위하여 근접 모듈과의 경계 거리에서 과압을 추산하였다. Fig. 4와 같이 FLNG의 배치도를 차용하여(Jewitt, 2015) 액화공정 모듈의 크기는 100m, 인접 모듈과의 간격은 20m으로 가정하였다.

4. 결과 및 검토

Table 4는 SMR 및 DMR 액화 공정의 최적화 결과 얻어진 냉매의 최적 조성과 최대운전압력을 나타내고 있으며, 최저 온도구간이 모두 3도 이상으로 제약조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다. LNG 1ton/day를 생산하기 위하여 SMR이 13.7kW의 에너지를 소모하는 것이 비하여 DMR이 10.3kW의 보다 낮은 에너지 소모량을 보이고 있으며, 이는 기존 연구에서 보고된 결과와도 일치한다 (Khan and Lee, 2013; Lee et al., 2015). 부록 Table A1은 각 공정 및 사례별로 격리 구간별로 운전 온도, 압력, 재고량 및 누출 규모에 따른 빈도, 점화확률, 폭발확률 및 그 결과 과압을 나타내고 있다.

Fig. 5는 결과물로 도출된 SMR과 DMR 액화공정의 폭발위험도 초과 누적 도표(Exceedance diagram)를 각 사례별로 보여주고 있다. Fig. 5a는 0.9MTPA의 LNG 생산량을 대상으로 하는 경우로, SMR이 DMR에 비해서 동일한 빈도에서 전반적으로 낮은 과압을 나타내고 있다. Fig. 5b는 1.8MTPA의 LNG 생산량을 대상으로 하고 있으며, 결과는 SMR이 전반적으로 같은 빈도에서 DMR과 유사하거나 약간 더 높은 과압을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 트레인 생산용량의 한계로 SMR의 경우 1.9MTPA 생산을 위하여 2개의 트레인이 적용되었기 때문이다. 트레인의 수가 증가하면 단위 장비가 가지는 재고량은 증가하지 않으나 전체적인 장비의 숫자가 비례하여 증가하게 되므로, 누출 및 폭발 사과의 빈도가 상승하는 결과를 가져온다. DMR의 경우 단일 트레인 생산이 가능하므로 냉매 순환유량이 증가하고 재고량이 증가하여 사고의 폭발과압은 증가하였으나 사고 빈도는 크게 변화하지 않았다. Fig. 5c는 3.6MTPA의 LNG 생산을 위한 경우로, 트레인 개수의 증가로 인하여 SMR의 잠재위험도가 상승한 결과를 보여주고 있다. 결과적으로 전구간에서 동빈도를 가지는 경우 DMR이 SMR보다 낮은 과압을 보이고 있다.

요약하면, SMR은 단일 트레인으로 적용된 경우만 DMR보다 나은 잠재 폭발 위험도를 보였으며, 생산용량이 증가하여 요구되

Table 4 The results of process optimization for the liquefaction processes

Variables	SMR	DMR
MR Maximum operating pressure [bar]	46.9	48.6
MR Composition		
N2	0.02	0.03
C1	0.12	0.32
C2	0.26	0.36
C3	0.58	0.29
nC4	0.02	0.00
Constraints		
Minimum Temperature [°C]	3.01/3.08	3.03 / 3.33 3.05 / 3.11
Object function		
Specific energy consumption [kW/(ton/day)]	13.7	10.3

는 트레인 개수가 증가하면, SMR은 동빈도에서 DMR과 유사하거나 더 높은 과압을 보였다. 이는 증가하는 트레인의 개수가 장치의 수를 증가시켜 사고빈도가 증가하는 결과를 유발하였기 때문이다. 이는 통상적으로 SMR이 DMR에 비하여 단순하므로 안전하다는 인식이 항상 적용될 수 없음을 보여주며, 다중 트레인이 요구되는 경우 SMR을 채택하는 경우도 위험도 전략이 고려되어야 함을 알 수 있다.

이 연구에서 적용한 잠재 위험도 분석 방법론은 액화사이클에 내재된 폭발 위험성만을 단순화된 가정을 통하여 추산하여 비교하였다는 한계점을 가진다. 예를 들어 점화원은 모듈의 중심으로 일괄 가정되었고, 모듈의 크기가 동일하다고 가정되었으며, 실제 장비의 배치 및 모듈의 배치와 이에 따른 상승효과는 고려되지 않았다. 따라서 차후 연구에서는 보다 신뢰도 높은 안전 평가 결과를 얻기 위해서 보다 정교한 평가방법론의 구축을 필요로 한다. 그러나 그럼에도 불구하고, 동일한 조건에서 SMR이 가지는 내재적 위험도가 DMR보다 커질 수 있음은 중요한 통찰을 제공하며, 개념설계단계에서부터 안전이 고려되어야 할 필요성을 입증하여 준다.

5. 결 론

본 논문에서는 SMR 및 DMR 액화공정 개념설계를 기반으로 생산용량에 따라 각 공정에 내재된 잠재 폭발 위험도를 비교 분석하였다. SMR 및 DMR 액화공정은 공정 모사 소프트웨어를 통하여 모사되었고, 유전 알고리즘을 결합하여 최적화 되었다. 최적화된 공정 조건을 기반으로 폭발 빈도와 결과 과압이 평가되었으며, 초과누적 곡선을 이용하여 잠재 위험도를 비교하였다. 결과는 0.9MTPA 생산 시 SMR이 전반적으로 DMR에 비해서 동빈도에서 낮은 과압을 보였으나, 1.8MTPA 및 3.6MTPA 생산 시 SMR이 DMR과 유사하거나 더 높은 과압을 보였다. 즉 단일 트레인에서 생산하는 경우만이 SMR이 DMR보다 나은 내재적 폭발위험도를 나타내었다. 이는 생산량이 증가하여 다중트레인이 요구되는 경우 SMR의 장치수가 증가, 사고 빈도가 증가하는 결과가 초래되었기 때문이다. 즉 목표 생산량이 증가할수록 DMR이 효율뿐만 아니라 안전 측면에서도 SMR보다 나은 결과를 보였다. 이러한 결과는 SMR이 DMR에 비하여 안전하다고 평가되는 일반적인 시각이 항상 성립하지 않는 것을 보여주며, 대용량 LNG 생산 설비의 경우 SMR을 채택하는 경우 추가적인 안전 전략이 고려되어야 함을 보여준다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 해양플랜트 특성화대학 지원사업 및 해양플랜트 공정 설계 검증을 위해 설계 데이터 상호 응답이 가능한 해저-해상 통합 기본 모델 과제의 지원으로 수행된 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

API, 2009. Specification for Oil and Gas Separators. American

- Petroleum Institute, Washington D.C. USA.
- Aspelund, A., Gundersen, T., Myklebust, J., Nowak, M., Tomasgard, A., 2010. An Optimization-simulation Model for a Simple LNG Process. *Computers & Chemical Engineering*, 34(10), 1606-1617.
- Barclay, M., Yang, C., 2006. Offshore LNG: The Perfect Starting Point for the 2-Phase Expander? *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Houston USA.
- Barron, R., 1985. *Cryogenic Systems*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Buijs, K., Pek, B., Nagelvoort, R., 2005. Shell's LNG Technology for 7-10 Mtpa LNG Trains. *Proceedings of International Petroleum Technology Conference*, Doha Qatar.
- Bukowski, J., Liu, Y.N., Boccella, S., Kowalski, L., 2011. Innovations in Natural Gas Liquefaction Technology for Future LNG Plants and Floating LNG Facilities. *Proceedings of International Gas Union Research Conference*, Seoul South Korea.
- Corneliussen, M., Samnøy, E., 2015. Near Shore FLNG Concept Evaluations (Master thesis, NTNU). Available at <<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2350048>> (Accessed Apr 06 2018).
- Crowl, D.A., 2003. *Understanding Explosions*. Wiley-AIChE.
- Dan, S., Lee, C.J., Park, J., Shin, D., Yoon, E.S., 2014. Quantitative Risk Analysis of Fire and Explosion on the Top-side LNG-liquefaction Process of LNG-FPSO. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(5), 430-441.
- Drysdale, D., Sylvester-Evans, R., 1998. The Explosion and Fire on the Piper Alpha Platform, 6 July 1988. A Case Study. *Philosophical Transactions Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 356(1748), 2929-2951.
- Gaumer, L., Newton, C., 1973. Combined Cascade and Multicomponent Refrigeration System and Method. US 3763658 A, U.S. Patent and Trademark Office.
- GPSA, 2012. *Engineering Data Book*. Gas Processors Suppliers Association.
- Hocquet, J., 2013. Explosion Risk Analysis for FLNG Facilities. the Main Challenges *Chemical Engineering*, Trans. 31, 595-600.
- Hwang, J.H., Roh, M.I., Lee, K.Y., 2013. Determination of the Optimal Operating Conditions of the Dual Mixed Refrigerant Cycle for the LNG FPSO Topsides Liquefaction Process. *Computers & Chemical Engineering*, 49, 25-36.
- Jewitt, I., 2015. FLNG Safety. In *Gastech 2015*, Singapore.
- Kanoğlu, M., 2002. Exergy Analysis of Multistage Cascade Refrigeration Cycle Used for Natural Gas Liquefaction. *International Journal of Energy Research*, 26(8), 763-774.
- Khan, M.S., Lee, M., 2013. Design Optimization of Single Mixed Refrigerant Natural Gas Liquefaction Process using the Particle Swarm Paradigm with Nonlinear Constraints. *Energy*, 49, 146-155.
- Khan, M. S., Lee, S., Lee, M., 2012. Optimization of Single Mixed Refrigerant Natural Gas Liquefaction Plant with Nonlinear

- Programming. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7(S1), S62-S70.
- Khan, M. S., Lee, S., Rangaiah, G., Lee, M., 2013. Knowledge Based Decision Making Method for the Selection of Mixed Refrigerant Systems for Energy Efficient LNG Processes. *Applied energy*, 111, 1018-1031.
- Kim, I.H., Dan, S., Cho, S., Lee, G., Yoon, E.S., 2014. Optimization of Single-stage Mixed Refrigerant LNG Process Considering Inherent Explosion Risks. *Korean Chemical Engineering*, 52(4), 467-474.
- Kim, J.S., Nam, K., Park, J., Kim, T.J., Kim, Y.C., 2013. Introduction to FLNG FEED Study. *Proceedings of Offshore Technology Conference*.
- Lee, J., Jo, A., Lee, H., Park, K., 2015. Design Considerations for the Condensate Stabilization and Liquefaction Units in LNG FPSO. *Proceedings of The 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- Lee, S., Long, N.V.D., Lee, M., 2012. Design and Optimization of Natural Gas Liquefaction and Recovery Processes for Offshore Floating Liquefied Natural Gas Plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(30), 10021-10030.
- Lim, W., Tak, K., Moon, I., Choi, K., 2010. Simulation and Comparison of Liquefaction Technologies for LNG Offshore Plant Design. *Proceedings of the 9th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*.
- Moein, P., Sarmad, M., Ebrahimi, H., Zare, M., Pakseresht, S., Vakili, S. Z., 2015. APCI-LNG Single Mixed Refrigerant Process for Natural Gas Liquefaction Cycle: Analysis and Optimization *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 470-479.
- Mokhatab, S., Mak, J.Y., Valappil, J.V., Wood, D.A., 2013. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Gulf Professional Publishing.
- Mokhatab, S., Poe, W.A., 2012. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Gulf Professional Publishing.
- OGP, 2010a. Risk Assessment Data Directory - Ignition Probabilities. IOGP Report 434-06, International Association of Oil and Gas Producers.
- OGP, 2010b. Risk Assessment Data Directory - Process Release Frequencies. IOGP Report 434-01, International Association of Oil and Gas Producers.
- Paik, J.K., Czujko, J., Kim, B.J., Seo, J.K., Ryu, H.S., Ha, Y.C., Janiszewski, P., Musial, B., 2011. Quantitative Assessment of Hydrocarbon Explosion and Fire Risks in Offshore Installations. *Marine Structures*, 24(2), 73-96.
- Pek, B., van der Velde, H., 2013. A High Capacity Floating LNG Design. *Proceedings of 17th International Conference and Exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG 17)*, Houston USA.
- Pwaga, S.S., 2011. Sensitivity Analysis of Proposed LNG liquefaction Processes for LNG FPSO. Master Thesis, NTNU. Available at <<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/234536>> (Accessed Apr 6, 2018).
- Shell Global, 2016. Prelude FLNG - Overview. Retrieved from <http://www.shell.com/about-us/major-projects/prelude-flng/prelude-flng-an-overview.html>
- Swenson, L.K., 1977. Single Mixed Refrigerant, Closed Loop Process for Liquefying Natural Gas. US 4033735 A, U.S. Patent and Trademark Office.
- Talib, J.H., Germinder, B., 2016. Game-Changing Floating LNG Solutions. *Proceedings of Offshore Technology Conference*.
- Talib, J.H., Price, B., 2011. Development of Floating LNG Production Units with Modular/Scalable SMR Processes. *Proceedings of Offshore Technology Conference*.
- Timmerhaus, K.D., Flynn, T.M., 2013. *Cryogenic Process Engineering*. Springer.
- Venkatarathnam, G., Timmerhaus, K.D., 2008. *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes*. Springer.
- Vinnem, J.-E., 2014. *Offshore Risk Assessment: Principles, Modelling and Applications of QRA Studies*. Springer.
- Wang, M., Zhang, J., Xu, Q., 2012. Optimal Design and Operation of a C3MR Refrigeration System for Natural Gas Liquefaction. *Computers & Chemical Engineering*, 39, 84-95.
- Xu, X., Liu, J., Cao, L., 2014a. Optimization and Analysis of Mixed Refrigerant Composition for the PRICO Natural Gas Liquefaction Process. *Cryogenics*, 59, 60-69.
- Xu, X., Liu, J., Cao, L., Pang, W., 2014b. Automatically Varying the Composition of a Mixed Refrigerant Solution for Single Mixed Refrigerant LNG (Liquefied Natural Gas) Process at Changing Working Conditions. *Energy*, 64, 931-941.
- Xu, X., Liu, J., Jiang, C., Cao, L., 2013. The Correlation between Mixed Refrigerant Composition and Ambient Conditions in the PRICO LNG Process. *Applied Energy*, 102, 1127-1136.
- Yu, X., Xie, B., Wu, Y., Wang, C., Wang, Q., Cheng, B., 2015. Floating Liquid Natural Gas (FLNG) Liquefaction Process Analysis for South China Sea Deep Water Gas Field. *Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- Zhao, W., Yang, J., Hu, Z., Wei, Y., 2011. Recent Developments on the Hydrodynamics of Floating Liquid Natural Gas (FLNG). *Ocean Engineering*, 38(14), 1555-1567.

Appendix

Table A1 The results of process condition, hole size, inventory size, frequency and consequence for each isolated section of (a) Case 1 SMR, (b) Case 1 DMR, (c) Case 2 SMR, (d) Case 2 DMR, (e) Case 3 SMR, (f) Case 3 DMR

Section ID	Related stream	Pres. [bar]	Temp. [K]	Inventory [kg]	Hole size [mm]	Leak freq.	Ignition probability	Explosion frequency	Overpres. at 70 m [barg]
(a) Case 1 (0.9 MTPA), SMR 1 train									
SMR-1-1	10	46.9	305.0	16588.6	30	2.48E-05	4.80E-02	1.19E-06	0.034
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.159
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.324
SMR-1-2	6	46.9	113.0	1669.3	30	2.48E-05	4.99E-02	1.24E-06	0.062
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.099
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.087
SMR-1-3	11	46.9	254.5	425.8	30	2.48E-05	4.90E-02	1.22E-06	0.049
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.056
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.056
SMR-1-4	3	46.9	305.0	396.0	30	2.57E-05	3.19E-02	8.19E-07	0.013
					100	3.48E-06	5.00E-02	1.74E-07	0.048
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.057
SMR-1-5	7	3.1	109.6	170.5	30	2.51E-05	3.21E-02	8.07E-07	0.033
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.036
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.036
SMR-1-6	15	65.0	113.0	1509.3	30	2.47E-05	5.00E-02	1.24E-06	0.058
					100	1.12E-05	5.00E-02	5.60E-07	0.095
					30	3.03E-05	2.56E-03	7.74E-08	0.003
SMR-1-7	9	3.1	228.4	169.9	100	4.01E-06	2.08E-02	8.33E-08	0.011
					200	8.11E-06	3.95E-02	3.20E-07	0.024
					30	2.48E-05	4.68E-02	1.16E-06	0.045
DMR-1-1	14a	48.7	240.0	13792.9	100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.214
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.302
					30	2.47E-05	4.86E-02	1.20E-06	0.047
DMR-1-2	16	48.2	113.0	439.2	100	1.12E-05	5.00E-02	5.60E-07	0.055
					30	2.50E-05	4.30E-02	1.07E-06	0.038
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.096
DMR-1-3	3	19.2	273.0	1390.4	200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.101
					30	2.51E-05	4.15E-02	1.04E-06	0.027
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.053
DMR-1-4	2	19.2	310.0	299.9	200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.051
					30	2.54E-05	3.22E-02	8.18E-07	0.010
					100	3.43E-06	5.00E-02	1.72E-07	0.033
DMR-1-5	11	48.6	305.0	123.5	200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.038
					30	2.47E-05	5.00E-02	1.24E-06	0.058
					100	1.12E-05	5.00E-02	5.60E-07	0.099
DMR-1-6	25	65.0	113.0	1689.4	30	2.48E-05	3.25E-02	8.07E-07	0.014
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.038
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.037
DMR-1-7	23	65.0	240.0	148.8	30	2.48E-05	9.04E-03	2.25E-07	0.033
					100	8.59E-06	4.02E-02	3.46E-07	0.053
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.054
DMR-1-8	3b	7.6	270.0	332.7	30	2.50E-05	2.97E-02	7.42E-07	0.030
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.073
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.071
DMR-1-9	13	48.6	240.0	784.9	30	2.50E-05	2.97E-02	7.42E-07	0.030
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.073
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.071

Table A1 The results of process condition, hole size, inventory size, frequency and consequence for each isolated section of (a) Case 1 SMR, (b) Case 1 DMR, (c) Case 2 SMR, (d) Case 2 DMR, (e) Case 3 SMR, (f) Case 3 DMR [Continuation]

Section ID	Related stream	Pres. [bar]	Temp. [K]	Inventory [kg]	Hole size [mm]	Leak freq.	Ignition probability	Explosion frequency	Overpres. at 70 m [barg]
DMR-1-10	5	19.2	240.0	591.4	30	2.47E-05	4.34E-02	1.07E-06	0.054
					100	1.12E-05	5.00E-02	5.60E-07	0.060
DMR-1-11	6	2.8	236.6	182.7	30	2.48E-05	3.14E-02	7.79E-07	0.036
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.032
DMR-1-12	15a	48.6	144.7	1053.7	200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.035
					30	2.48E-05	4.95E-02	1.23E-06	0.063
DMR-1-13	19	3.0	140.2	109.8	100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.087
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.079
DMR-1-14	17	3.0	106.5	80.3	30	3.03E-05	3.96E-03	1.20E-07	0.004
					100	4.01E-06	3.07E-02	1.23E-07	0.014
					200	8.11E-06	4.56E-02	3.70E-07	0.030
					30	2.47E-05	2.57E-03	6.36E-08	0.027
					100	1.12E-05	2.09E-02	2.34E-07	0.024
					(c) Case 2 (1.8 MTPA), SMR 2 trains				
SMR-1-1	10	46.9	305.0	16588.6	30	4.97E-05	4.80E-02	2.38E-06	0.034
					100	1.72E-05	5.00E-02	8.59E-07	0.159
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.324
					30	4.97E-05	4.99E-02	2.48E-06	0.062
SMR-1-2	6	46.9	113.0	1669.3	100	1.72E-05	5.00E-02	8.59E-07	0.099
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.087
SMR-1-3	11	46.9	254.5	425.8	30	4.97E-05	4.90E-02	2.43E-06	0.049
					100	1.72E-05	5.00E-02	8.59E-07	0.056
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.056
					30	5.14E-05	3.19E-02	1.64E-06	0.013
SMR-1-4	3	46.9	305.0	396.0	100	6.96E-06	5.00E-02	3.48E-07	0.048
					200	1.57E-05	5.00E-02	7.87E-07	0.057
SMR-1-5	7	3.1	109.6	170.5	30	5.02E-05	3.21E-02	1.61E-06	0.033
					100	6.76E-06	5.00E-02	3.38E-07	0.036
					200	1.57E-05	5.00E-02	7.87E-07	0.036
					30	4.94E-05	5.00E-02	2.47E-06	0.058
SMR-1-6	15	65.0	113.0	1509.3	100	2.24E-05	5.00E-02	1.12E-06	0.095
					30	6.05E-05	2.56E-03	1.55E-07	0.003
SMR-1-7	9	3.1	228.4	169.9	100	8.02E-06	2.08E-02	1.67E-07	0.011
					200	1.62E-05	3.95E-02	6.40E-07	0.024
(d) Case 2 (1.8 MTPA), DMR 1 train									
DMR-1-1	14a	48.7	240.0	27466.8	30	2.50E-05	4.68E-02	1.17E-06	0.045
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.220
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.452
					30	2.47E-05	4.86E-02	1.20E-06	0.059
DMR-1-2	16	48.2	113.0	878.3	100	1.12E-05	5.00E-02	5.60E-07	0.072
					30	2.51E-05	4.30E-02	1.08E-06	0.038
DMR-1-3	3	19.2	273.0	2780.8	100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.124
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.137
DMR-1-4	2	19.2	310.0	599.8	30	2.54E-05	4.15E-02	1.05E-06	0.027
					100	3.43E-06	5.00E-02	1.72E-07	0.067
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.067
					30	2.57E-05	3.22E-02	8.28E-07	0.010
DMR-1-5	11	48.6	305.0	246.9	100	3.48E-06	5.00E-02	1.74E-07	0.039
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.048

Table A1 The results of process condition, hole size, inventory size, frequency and consequence for each isolated section of (a) Case 1 SMR, (b) Case 1 DMR, (c) Case 2 SMR, (d) Case 2 DMR, (e) Case 3 SMR, (f) Case 3 DMR [Continuation]

Section ID	Related stream	Pres. [bar]	Temp. [K]	Inventory [kg]	Hole size [mm]	Leak freq.	Ignition probability	Explosion frequency	Overpres. at 70 m [barg]
DMR-1-6	25	65.0	113.0	3344.6	30	2.48E-05	5.00E-02	1.24E-06	0.058
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.136
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.146
DMR-1-7	23	65.0	240.0	292.9	30	2.50E-05	3.25E-02	8.12E-07	0.014
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.047
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.051
DMR-1-8	3b	7.6	270.0	650.5	30	2.50E-05	9.04E-03	2.26E-07	0.033
					100	5.99E-06	4.02E-02	2.41E-07	0.068
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.070
DMR-1-9	13	48.6	240.0	1561.5	30	2.51E-05	2.97E-02	7.46E-07	0.030
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.092
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.098
DMR-1-10	5	19.2	240.0	1164.6	30	2.48E-05	4.34E-02	1.08E-06	0.061
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.078
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.072
DMR-1-11	6	2.8	236.6	356.5	30	2.50E-05	3.14E-02	7.83E-07	0.046
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.046
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.045
DMR-1-12	15a	48.6	144.7	2077.7	30	2.50E-05	4.95E-02	1.24E-06	0.064
					100	5.99E-06	5.00E-02	2.99E-07	0.116
					200	5.25E-06	5.00E-02	2.62E-07	0.106
DMR-1-13	19	3.0	140.2	207.8	30	3.03E-05	3.96E-03	1.20E-07	0.004
					100	4.01E-06	3.07E-02	1.23E-07	0.014
					200	8.11E-06	4.56E-02	3.70E-07	0.031
DMR-1-14	17	3.0	106.5	158.4	30	2.48E-05	2.57E-03	6.39E-08	0.035
					100	8.59E-06	2.09E-02	1.79E-07	0.034
					200	2.62E-06	3.96E-02	1.04E-07	0.033
(e) Case 3 (3.6 MTPA), SMR 4 trains					30	9.93E-05	4.80E-02	4.77E-06	0.034
SMR-1-1	10	46.9	305.0	16588.6	100	3.44E-05	5.00E-02	1.72E-06	0.159
					200	1.05E-05	5.00E-02	5.25E-07	0.324
					30	9.93E-05	4.99E-02	4.96E-06	0.062
SMR-1-2	6	46.9	113.0	1669.3	100	3.44E-05	5.00E-02	1.72E-06	0.099
					200	1.05E-05	5.00E-02	5.25E-07	0.087
					30	9.93E-05	4.90E-02	4.87E-06	0.049
SMR-1-3	11	46.9	254.5	425.8	100	3.44E-05	5.00E-02	1.72E-06	0.056
					200	1.05E-05	5.00E-02	5.25E-07	0.056
					30	1.03E-04	3.19E-02	3.28E-06	0.013
SMR-1-4	3	46.9	305.0	396.0	100	1.39E-05	5.00E-02	6.96E-07	0.048
					200	3.15E-05	5.00E-02	1.57E-06	0.057
					30	1.00E-04	3.21E-02	3.23E-06	0.033
SMR-1-5	7	3.1	109.6	170.5	100	1.35E-05	5.00E-02	6.76E-07	0.036
					200	3.15E-05	5.00E-02	1.57E-06	0.036
					30	9.88E-05	5.00E-02	4.94E-06	0.058
SMR-1-6	15	65.0	113.0	1509.3	100	4.48E-05	5.00E-02	2.24E-06	0.095
					30	1.21E-04	2.56E-03	3.10E-07	0.003
					100	1.60E-05	2.08E-02	3.33E-07	0.011
SMR-1-7	9	3.1	228.4	169.9	200	3.24E-05	3.95E-02	1.28E-06	0.024

Table A1 The results of process condition, hole size, inventory size, frequency and consequence for each isolated section of (a) Case 1 SMR, (b) Case 1 DMR, (c) Case 2 SMR, (d) Case 2 DMR, (e) Case 3 SMR, (f) Case 3 DMR [Continuation]

Section ID	Related stream	Pres. [bar]	Temp. [K]	Inventory [kg]	Hole size [mm]	Leak freq.	Ignition probability	Explosion frequency	Overpres. at 70 m [barg]
(f) Case 3 (3.6MTPA), DMR 1 train									
DMR-1-1	14a	48.7	240.0	54711.7	30	2.57E-05	4.68E-02	1.20E-06	0.045
					100	3.48E-06	5.00E-02	1.74E-07	0.220
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.635
DMR-1-2	16	48.2	113.0	1660.9	30	2.48E-05	4.86E-02	1.21E-06	0.066
					100	8.59E-06	5.00E-02	4.30E-07	0.092
					200	2.62E-06	5.00E-02	1.31E-07	0.094
DMR-1-3	3	19.2	273.0	4066.6	30	2.60E-05	4.30E-02	1.12E-06	0.038
					100	3.53E-06	5.00E-02	1.77E-07	0.140
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.165
DMR-1-4	2	19.2	310.0	1232.7	30	3.03E-05	4.15E-02	1.25E-06	0.027
					100	4.01E-06	5.00E-02	2.01E-07	0.085
					200	8.11E-06	5.00E-02	4.06E-07	0.093
DMR-1-5	11	48.6	305.0	388.4	30	3.03E-05	3.22E-02	9.74E-07	0.010
					100	4.01E-06	5.00E-02	2.01E-07	0.042
					200	8.11E-06	5.00E-02	4.06E-07	0.056
DMR-1-6	25	65.0	113.0	6912.6	30	2.51E-05	5.00E-02	1.26E-06	0.058
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.193
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.212
DMR-1-7	23	65.0	240.0	577.8	30	2.51E-05	3.25E-02	8.16E-07	0.014
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.055
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.066
DMR-1-8	3b	7.6	270.0	1306.0	30	2.57E-05	9.04E-03	2.32E-07	0.033
					100	3.48E-06	4.02E-02	1.40E-07	0.091
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.093
DMR-1-9	13	48.6	240.0	3106.9	30	2.60E-05	2.97E-02	7.73E-07	0.030
					100	3.53E-06	5.00E-02	1.77E-07	0.114
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.137
DMR-1-10	5	19.2	240.0	2252.3	30	2.51E-05	4.34E-02	1.09E-06	0.066
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.102
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.094
DMR-1-11	6	2.8	236.6	550.0	30	2.54E-05	3.14E-02	7.96E-07	0.053
					100	3.43E-06	5.00E-02	1.72E-07	0.055
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.055
DMR-1-12	15a	48.6	144.7	4829.8	30	2.51E-05	4.95E-02	1.24E-06	0.064
					100	3.38E-06	5.00E-02	1.69E-07	0.171
					200	7.87E-06	5.00E-02	3.94E-07	0.158
DMR-1-13	19	3.0	140.2	412.1	30	3.03E-05	3.96E-03	1.20E-07	0.004
					100	4.01E-06	3.07E-02	1.23E-07	0.014
					200	8.11E-06	4.56E-02	3.70E-07	0.031
DMR-1-14	17	3.0	106.5	354.6	30	2.51E-05	2.57E-03	6.46E-08	0.047
					100	3.38E-06	2.09E-02	7.06E-08	0.045
					200	7.87E-06	3.96E-02	3.11E-07	0.044

Fabrication Assessment Method for Dimensional Quality Management of Curved Plates in Shipbuilding and Offshore Structures

Ki-Youn Kwon* and Jaeyong Lee^{ORCID}**

*School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea
**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-eui University, Busan, Korea

선박 및 해양 구조물 곡부재 치수 품질 관리를 위한 가공완성도 평가

권기연* · 이재용^{ORCID}**

*금오공과대학교 산업공학부
**동의대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Assessment of completion 완성도 평가, Curved plate 곡부재, Dimensional quality management 치수 품질 관리, Surface registration 곡면 정합

ABSTRACT: The forward and afterward parts of ships and offshore structures are designed to improve the fuel consumption performance. These are made of curved plates with a large thickness. If a fabricated curved plate has some dimensional errors, a lot of additional cost is incurred in the assembly process. Thus, an accurate dimensional assessment is very important for fabrication. In this paper, we propose an assessment method for the dimensional quality management of curved plates. This can be applied to data measured using a variety of three-dimensional instruments, with boundary measurement points automatically classified and sorted to create a measurement surface. The assessment is evaluated after matching the CAD surface and the measured surface considering constrained conditions. The fabrication assessment is evaluated as a probability of how much the tolerance is satisfied.

1. 서 론

선박 및 해양 플랜트 일부 선종의 선수미 부분은 추진 저항을 감소시켜 연비를 증가시키기 위해 Fig. 1과 같이 다양한 곡률을 가지는 곡면으로 이루어져 있다. 일반적으로 20~50mm 내외의 두꺼운 철판으로 구성되어 있으며 1~2m 크기의 곡부재를 만들어 용접을 통해 블록을 조립한다. 선수미 곡부재 가공에 대한 자동화는 많은 연구가 이루어졌지만(Bae et al., 2012; Park et al., 2016; Zhang et al., 2011; Zhou et al., 2014), 기존 작업을 모두 대체할 만큼 아직 상용화가 되지는 않고 있다. 일부 단일 방향 곡률을 가지는 형상에 대해서는 냉간가공을 하고 있으나(Fig. 2(a)), 이를 제외한 것은 대부분 조선소들이 열간가공 방식을 이용해서 곡부재를 가공하고 있다. 열간가공은 프레스(Press)를 이용해서 한 쪽 방향으로 곡률 형상을 만든 후, 작업자들이 경험에 의존하여 가스 토치를 이용해서 가열하고 물을 뿌려서 냉각 작업을 반복해서 설계 형상의 모양대로 만들어 가는 방식이다

(Fig. 2(b)). 가공의 완성도 평가를 위해 주로 나무 목형을 이용하고 있으며(Fig. 2(c)), 최종 가공 후 치수 품질 체크를 위해 3차원 계측기가 일부 활용되고 있다. 곡부재는 열간가공에 의해 만들어지므로 초기 치수 대비 수축 현상이 발생한다. 따라서 최종 가공 후의 형상에 대한 정확한 예측이 어려워서 약간의 여유 마진을 가지고 제작하며, 가열이 끝난 후에는 Fig. 2(d)와 같이 마진을 절단해 준다.

가공된 곡부재의 완성도는 기본적으로 나무 목형 및 줄자를 이용해서 평가하여왔다. 곡률 평가는 목형(Fig. 2(c)), 길이 및 거리는 줄자를 이용하는데, 나무 목형을 이용하는 경우에는 작업자의 판단력에 의존하고 있다. 이로 인해 나무를 놓는 기준 위치와 방향에 따라 달라질 수 있으며, 일부 구간의 오차로 인해 왜곡된 판단을 할 수가 있다. 특히 Fig. 2(c)와 같은 경우 나무 목형의 기울어짐에 따라 다른 결과를 초래할 수 있다. 또한 줄자를 이용할 경우 측정 오차가 발생할 수 있으며, 열간가공으로 인해 부재 끝 단이 매끄럽지 않은 경우가 많아서 계측 오차

Received 22 January 2018, revised 24 February 2018, accepted 12 April 2018

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

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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



Fig. 1 Forward parts of ships and offshore structures

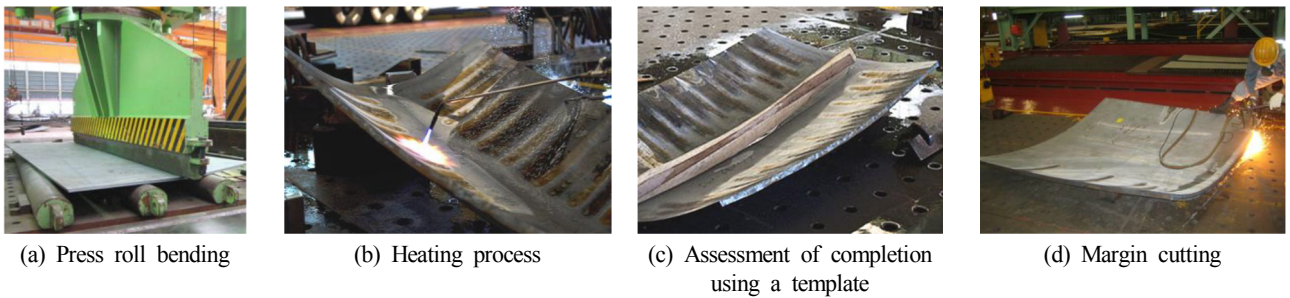


Fig. 2 Fabrication of a curved plate

를 유발 할 수 있다. 이와 같은 문제점 들을 보완하기 위해 3차원 계측시스템들이 활용되고 있다. 계측기를 이용해서 가공된 부재의 일부 포인트 또는 전체를 측정해서 계측곡면을 생성한다. 일반적으로 선박 건조 과정에 있어서 블록의 치수 품질을 관리할 때는 주요 부재와 보강재가 교차하는 위치를 측정해서 포인트 기반으로 오차 분석을 수행한다(Kwan et al., 2015; Kwon, 2016). 그러나 곡부재의 경우는 내부 곡률에 따라서 오차가 발생할 수 있으므로, 부재 곡면 전체가 관심대상이다. 상대적으로 계측포인트가 많아서 최근에 3차원 레이저 스캐너(3D laser scanner)(Hiekata et al., 2011; Li et al., 2016) 및 사진계측시스템(Photogrammetry)(Wang et al., 2016)이 주로 활용되고 있다. 측정된 데이터는 곡면으로 모델링하여 설계곡면과 비교하여 가공완성도를 평가한다(Huang et al., 2015; Mehrad et al., 2014; Park et al., 2007). 곡부재는 가공 완성 후, 일부 면을 절단해야

하는데, 절단 길이를 최소화 하기 위해 제한 조건을 고려한 곡부재 정합 방법이 사용되었다(Park et al., 2007). 그리고 Park 등 (Park et al., 2016)은 레이저비전시스템(LVS, Laser vision system)을 이용하여 자동으로 곡부재를 계측한 후 설계곡면과 비교하여 가공완성도를 평가하였다. 기존 연구 사례들은 주로 계측곡면과 설계곡면을 비교했을 때 거리 오차 값을 가공 완성도 수치로 사용하였으며(Jung et al., 2009; Hiekata et al., 2011), 허용공차를 고려해서 작업자가 직관적으로 판단할 수 있도록 100%에 가까운 것이 완성도가 높게 나오도록 수치적으로 표현했다(Park et al., 2016).

현재 곡부재 치수품질 관리를 위해 사진계측시스템 및 3차원 레이저스캐너가 많이 활용되고 있다. 그러나 기존 연구 사례들은 이와 같은 계측시스템으로 획득된 데이터에 대한 곡면 모델링 및 분석에 대한 자동화 방법이 제시되지 않았다. Fig. 3은 본

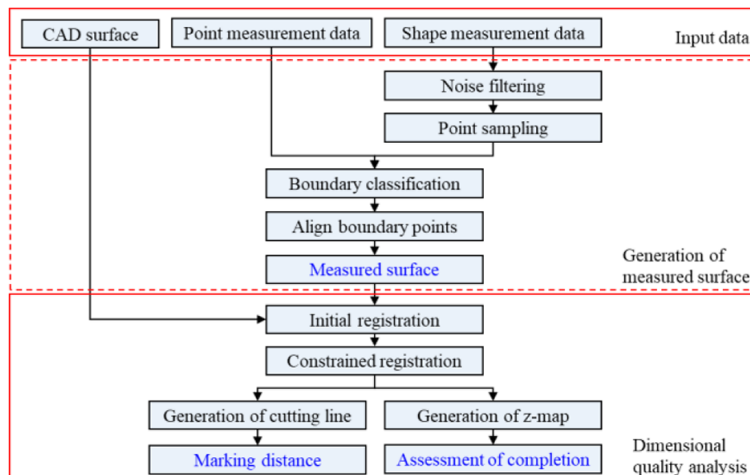


Fig. 3 Schematic of dimensional quality management process

논문에서 제시하는 곡부재 치수품질 관리를 위한 전체 과정을 보여주고 있으며, 다양한 계측기로부터 획득된 데이터에 대해 가공 완성도를 평가할 수 있는 방법을 제안한다. 또한 별도의 마킹(Marking) 장비 없이 기존 계측데이터를 활용하여 여유 마진을 절단할 수 있는 방법을 제안하고, 가공 완성도 평가에서 선박 건조의 특성을 고려하여 확률 개념을 추가로 도입하였다. 이는 작업의 효율성을 위해 모든 과정이 자동으로 이루어질 수 있도록 하였다. 측정된 데이터로부터 계측곡면을 자동으로 모델링(Modeling)하고, 설계곡면과 제약조건을 고려하여 정합을 수행한 후, 가공완성도 및 최종 여유 마진 절단선을 산출한다. 특히 제약조건을 고려한 정합은 절단 길이를 최소화하기 위해 다양한 조건이 고려될 수 있도록 하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 곡부재 계측에 사용되는 계측기에 대해서 소개하고, 3절에서는 자동 곡면 모델링에 대해 설명한다. 4절에서는 제약조건을 고려한 곡면 정합 방법 및 가공완성도 계산 방법에 대해 설명하고, 5절에서 실험 및 검증 결과를 살펴보고, 6절에서 결론에 대해서 논의한다.

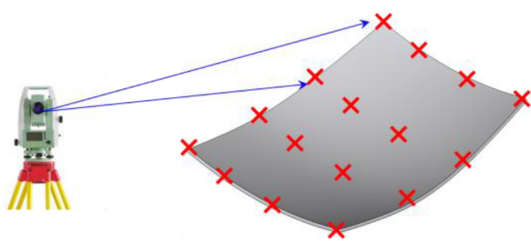
2. 부재 계측

곡부재의 경우는 내부 곡률에 따라서 오차가 발생할 수 있으므로, 부재 곡면 전체가 관심 대상이다. 따라서 곡면을 측정할 포인트를 이용해서 생성된 계측곡면(Measured surface)과 설계곡면(CAD surface)을 비교해서 가공 완성도를 평가한다. 현재 곡부재를 측정하기 위해 이용되는 계측기는 일부 대표되는 점들을 측정하는 방식과 곡면 전체를 계측하는 방식 두 가지로 구분할 수 있다.

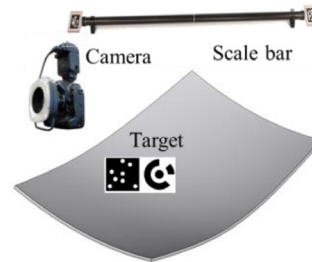
대표 포인트 측정 방식은 일부 포인트를 측정해서 곡면을 생

성하는 방식으로 측정 포인트의 개수 및 위치에 따라 실제 곡면과 모델링된 곡면 사이에 많은 오차를 유발할 수 있다. 모델링 오차를 최소로 가져가기 위해서는 곡률이 큰 곳에서는 좀더 많은 포인트를 측정하고, 그렇지 않은 곳에서는 적은 포인트를 균등하게 측정할 필요가 있다. 측정된 포인트를 이용해서 곡면을 복원하는데, 많이 측정하면 할수록 복원된 곡면의 정밀도가 향상될 수 있다. 그러나 측정 포인트가 증가함으로써 계측 시간이 많이 소요되므로 적절한 포인트 수가 필요하다. 일반적으로 선수미 곡부재는 1~2m 정도의 크기이며, 곡률에 대한 관리 수준은 ±5mm 정도이다. 따라서 곡면 복원 오차는 1~2mm 이내로 가져가야 하며, 부재 곡률에 따라 차이가 있지만 대략적으로 20~100개 정도의 포인트가 필요하다. 측정포인트 개수는 크기 뿐만 아니라 모양에 따라 달라질 수 있으므로 향후 형상에 따라 적절한 포인트 측정 위치를 가이드 해주는 것이 필요하다. Fig. 4(a)는 토탈스테이션(Total station)을 이용하여 계측하는 방식으로 비교적 정밀한 계측데이터를 획득할 수 있지만, 많은 측정 시간이 소요되어 거의 사용되고 있지 않다. Fig. 4(b)는 사진 계측을 이용한 방법으로 정밀한 계측을 위해 타겟(Target)을 이용하는 것이 필요하지만 빠른 시간 안에 측정이 가능하다. 사진 계측 시스템은 카메라, 타겟, 이미지로부터 3차원 좌표 값을 획득하는 복원 SW 및 크기를 보정하는 스케일 바(Scale bar)로 구성된다(Geodetic Systems, 2017).

전체 계측 방식은 곡부재의 모든 영역에 대해서 매우 조밀하게 측정하는 방식이다. Fig. 5(a)는 갠트리(Gantry)에 장착된 LVS를 이용하여 측정하는 방식이며, Fig. 5(b)는 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 측정하는 방식이다. 이는 타겟 없이 레이저를 이용해서 곡면을 스캔(Scan)하는 방식이어서 빠른 시간 안에 많은 영역을 측정할 수 있지만, 계측 정밀도는 다소 떨어진다. 실 곡

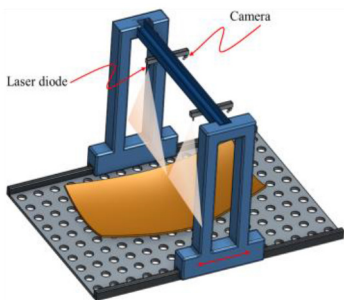


(a) Total station

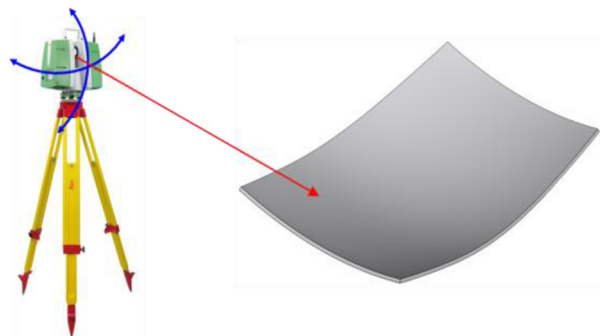


(b) Photogrammetry

Fig. 4 Points measuring method



(a) Laser vision system



(b) 3D laser scanner

Fig. 5 Shape scanning method



(a) Measured points using a total station(20 points)



(b) Measured points using 3D laser scanner (21,918 points)

Fig. 6 Examples of measured points (plate size: 1100×800×20)

부재의 경계에는 가열 작업으로 인해 검게 탄 부분 및 절단 작업에서 발생하는 반짝이는 부분에 많은 노이즈가 존재하는데, 이로 인해 측정 오차가 많이 발생할 수 있다. 또한 부재는 두꺼운 판으로 구성되어 있어 정확한 부재 경계를 구분하기가 어렵다.

Fig. 6은 토탈스테이션 및 3차원 레이저 스캐너를 이용해서 곡 부재를 계측한 예를 보여준다. 해당 부재 크기는 길이 1100mm, 폭 800mm이며 포인트 계측의 경우 20포인트를 측정하였다. 토탈스테이션 경우에는 측정을 위해 타겟을 곡부재에 부착해야 하는데, 설치 오차 및 측정을 위한 시준 오차가 발생할 수 있으며, 3D 레이저로 스캐닝 한 데이터는 부재 경계에서 많은 노이즈를 가지고 있다. 따라서 이와 같은 경우는 실제 제작된 곡부재의 에지(Edge) 길이 계산은 어려우며, 내부 곡률에 대한 판단만이 유효하다.

3. 곡면 모델링

3.1 포인트 샘플링

일부 포인트를 측정할 경우 모든 포인트들이 중요하고 계측

곡면 모델링 작업에 활용된다. 그러나 LVS 및 스캐너를 이용해서 계측한 경우, 레이저를 이용하는 방식이어서 간격 조절에 따라 수천 개에서 수백만 개까지 포인트가 획득될 수 있다. 또한 곡부재 주변에 해당하는 부분도 측정될 수 있다. 따라서 우선 곡부재의 영역만을 남기고 주변을 제거해 주는 것이 필요하다. 이는 포인트가 군집해 있는 구간을 나누고 가장 포인트가 많이 몰려있는 영역을 찾으면 곡부재에 해당하는 포인트들의 집합을 만들 수 있다(Park et al., 2016). 또한 곡부재 영역 내에서도 레이저 난반사 등으로 인해 오차가 발생할 수 있는데, 주변 점들과 비교해서 높이 차이가 많이 발생하는 점들을 제거시켜 준다. 많은 수의 포인트를 이용해서 곡면을 보간(Interpolation)하는 데에는 시간이 소요되므로 샘플링(Sampling)을 해서 이용할 필요가 있다. Fig. 7과 같이 계측 영역에 일정한 구를 배치시키고, 구 안에 1개의 포인트만을 남김으로써 균일하게 샘플링을 할 수가 있다. 구의 배치에 따라 샘플링 결과가 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 측정된 데이터 전체를 포함하는 공간 박스를 구성하고, 중립면에 우선적으로 구를 배치하고 상하 영역에 대해서 배치하였다. 구의 크기 또한 곡면 모델링 시간 및 복원 오차에 영향을

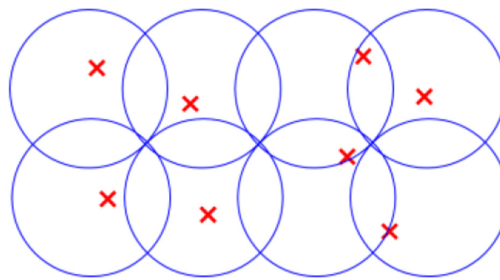
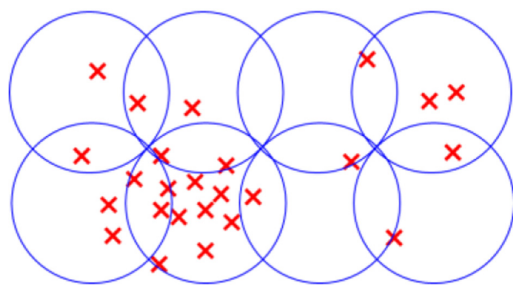


Fig. 7 Sampling points



(a) 21,918 points



(b) 1,212 points

Fig. 8 Example of sampling

미친다. 본 연구에서는 50mm를 사용하였다. Fig. 8은 샘플링 결과를 보여주고 있으며, 21,918개의 포인트가 1,212개로 표현된다.

3.2 곡면 생성

일반적으로 측정된 포인트는 계측 편의성을 높이기 위해 일정한 순서나 방향 없이 무작위로 구성되어 있다. 또한 3.1 절에서 샘플링 된 포인트 또한 임의로 구성되어 있다. 이를 이용해서 곡면을 생성하기 위해서는 경계에 해당하는 포인트를 구분하고, 경계 포인트들을 순서에 맞게 정렬하는 것이 필요하다. 측정된 포인트들을 XY평면으로 이동을 시킨 후, Fig. 9(a)와 같이 주변 점들과의 각도를 계산하여 각도 기준표를 작성한다. 그림 Fig. 9(a)는 각도를 16등분 한 것으로 현재 포인트와 주변 포인트가 이루는 각도 값에 해당하는 부분을 채운다. 빈칸이 연속적으로 5개 이상 존재할 경우 이 포인트는 경계에 해당되고, 그렇지 않은 경우는 내부 포인트에 해당된다. 경계에 해당되는 포인트가 넓은 구간에서 측정이 이루어지지 않은 경우는 이와 같은 방법으로 자동으로 분류가 되지 않는다. 이런 경우는 사용자가 직접 경계와 내부부를 구분 지어 주는 것이 필요하다. 내부와 경계 포인트를 구별한 후에는 경계 포인트들을 순서에 맞게 정렬한다. Fig. 9(b)의 P0에서 P1 방향을 정렬하는 방향이라고 하면, P2는 진행 방향에 가장 가까운 점이어서 다음 순서로 채택된다. P2에서는 P4가 가장 가까운 점이나, P1, P2, P3의 각도가 180도에 더 가까워 다음 점으로는 P3가 선택된다. 이 경우 거리와 각도의 영향을 모두 고려해서 다음 점을 선택한다. 경계

점들이 순서에 맞게 정렬되면, 포인트들 간의 각도를 고려해서 에지를 나누어 준다. 측정된 모든 점들을 보간을 통해 기저 곡면(Basis surface)을 생성하고, 경계 곡선을 이용해서 기저 곡면을 트림한 형태로 최종 계측곡면을 생성한다(Fig. 9(c)). 여기서 기저 곡면은 B-spline을 이용하였다.

4. 가공 완성도 평가

4.1 제약 조건을 고려한 곡면 정합

가공 완성도를 평가하기 위해서는 계측곡면과 설계곡면의 곡률을 비교해야 하는데, 이를 위해서는 두 곡면을 오차가 최소가 되는 위치에서 정합을 해야 한다. 정합은 두 곡면에서 포인트를 균일하게 샘플링하여 ICP(Iterative closest point)를 이용한다 (Horn, 1987; Besl and Mckay, 1992). 그러나 두 곡면의 초기 위치에 따라서 전혀 다른 결과가 나올 수 있어서 기준이 되는 위치를 우선 맞춰 주어야 한다. 가공 부재는 여유 마진이 있는 상태이며 일반적으로 2면 또는 3면 절단을 수행한다. 초기 정합은 두 곡면의 곡선들의 길이 값과 기준면에 해당하는 곡선의 방향을 이용해서 수행한다(Fig. 10(a)). 식 (1)에서 N은 곡면의 곡선 개수이며, l_i^M 는 계측곡면의 곡선 길이이고, l_j^C 는 설계곡면의 곡선 길이이다. 식 (2) K는 곡률 오차를 계산하기 위한 샘플링 포인트 개수이다. 초기 정합은 우선 계측곡면과 설계곡면의 길이가 비슷한 위치를 찾고, 뒤집히지 않도록 z 방향 오차를 고려해서 식 (2)의 값이 최소가 되는 위치를 찾는다. 길이 만을 고려할 경

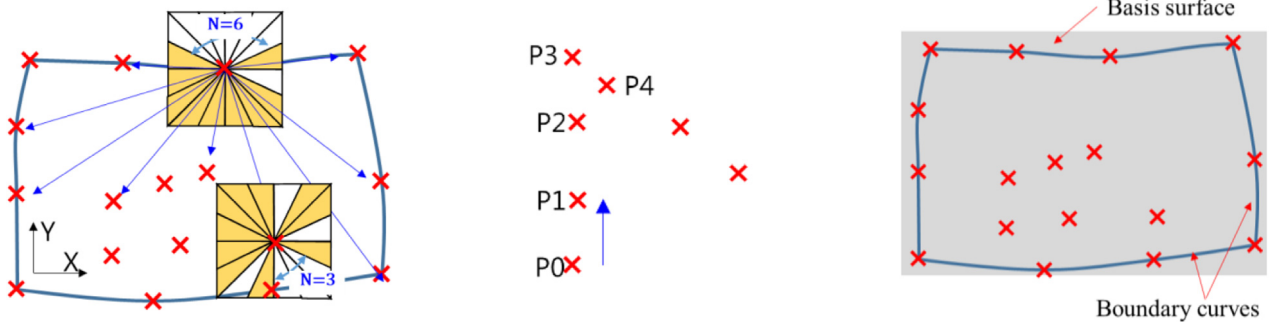


Fig. 9 Generation of measured surface

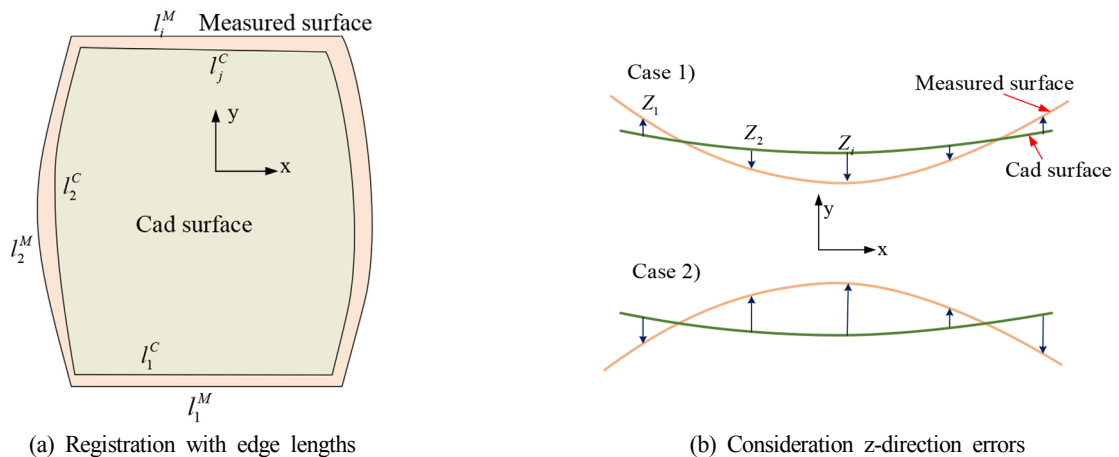


Fig. 10 Initial registration measured and CAD surfaces

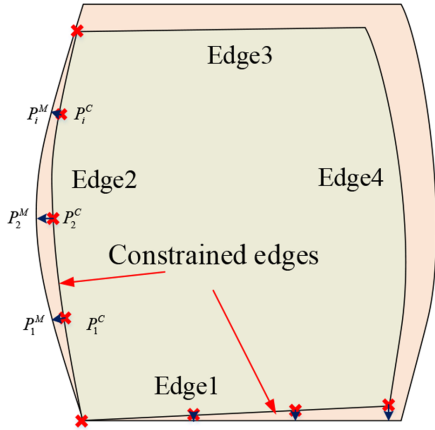


Fig. 11 Registration with constrained edges

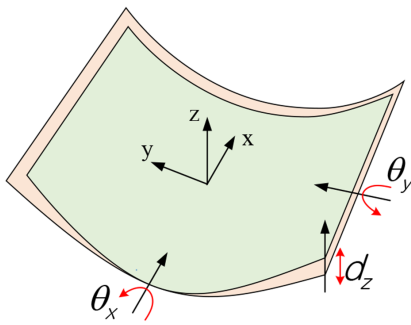


Fig. 12 Registration with constrained edges

우 Fig. 10(b)의 두 번째 경우와 같이 정합이 될 수 있다.

$$\phi_l = \sum_{i=1, j=1}^N (l_i^M - l_j^C)^2 \tag{1}$$

$$\phi_z = \sum_{i=1}^K (z_i^M - z_i^C)^2 \tag{2}$$

대략적인 위치를 맞춘 후 기준이 되는 위치를 맞추어야 한다. 만약 기준이 되는 위치가 없는 경우는 두 곡면의 중심점을 기준으로 하고, 기준이 되는 예지가 있는 경우 매칭되는 예지에 대해서 포인트를 샘플링하여 오차가 최소가 되는 위치를 찾는다. Fig. 11은 예지 1, 2가 기준이 되는 2면 기준 정합 예를 나타내고 있으며, 두 예지에 대해서 포인트를 샘플링한 후 ICP를 적용하여 오차가 최소가 되는 위치를 찾는다. 이 때 각 포인트에서 z값은 무시하고 x, y 값에 대해서만 수행한다. 일반적으로 ICP는 스케일의 변화가 없다고 가정하면 x, y, z 방향 이동 및 회전에 해당하는 6개의 미지수가 존재한다. 두 집합 간의 포인트 변환은 식 (3)으로 표현된다.

$$p^s = sRp^e + T \tag{3}$$

여기서, p^s 은 이동 후의 포인트를 의미하고, p^e 는 이동 전의 포인트, 즉 설계곡면의 포인트와 매핑 될 계측곡면의 포인트를 의미한다. 또한, 변수 s 는 스케일링(Scaling) 값으로써 측정에 사용하는 계측기는 스케일에 의한 차이는 없으므로 값을 1로 부여한다. R 은 회전 행렬로써 x, y, z 방향의 회전을 의미하고, T 는

이동 행렬로써 x, y, z 방향의 이동 변위를 의미한다. 이 경우는 z값을 무시하므로 x, y 방향 이동 및 z방향 회전 값만 존재한다.

초기 정합이 완료되면, 기준면을 유지한 상태에서 두 곡면 간의 곡률 오차가 최소가 되는 위치를 찾아야 한다. 이를 위해 설계곡면을 기준으로 샘플링 포인트를 추출하여 이에 대응되는 계측곡면의 포인트를 찾는다. 추출된 포인트를 이용하여 ICP를 적용하며, 이 경우 Fig. 12와 같이 x, y 방향 회전 및 z방향 이동만 존재하도록 해야 한다. 따라서 계산된 결과에서 x, y 방향 이동 및 z 방향 회전 값은 제거시킨 후, 설계곡면을 이동시킨다.

4.2 가공 완성도 평가

가공된 곡면의 완성도를 평가하기 위해 정합 된 상태에서 z값의 차이를 가시화 한다. 이를 위해 곡면에 균일한 삼각형 요소를 생성하고(Fig. 13), 각 절점에서 설계 곡면에서 계측 곡면까지의 거리를 계산한다. 각 절점에서 거리 값을 계산하고, Fig. 14와 같이 삼각형 요소를 세분화해서 색깔을 부여한다.

일반적으로 곡부재의 z방향 허용 오차는 ±5mm 수준이다. 완성도를 수치적으로 판단할 때 다음 두 가지 방법으로 접근할 수 있다.

- (1) 허용 오차를 벗어나는 비율
- (2) 허용 오차를 벗어나는 확률 계산

Fig. 15에서 각 절점에 대해 z방향 오차가 저장되어 있으며, z방향 오차가 허용 오차를 벗어난 개수를 계산하면 비율을 계산할 수 있다. Fig. 15(a)에서 ±5mm를 벗어나는 위치는 세 곳이며 완성도는 6/9(66.7%)이다. 이는 단순히 개수로만 계산을 하여 경우에 따라서는 정확한 평가가 되지 못한다. Fig. 15에서 (b), (c)의 경우 모두 허용 범위 안에 포함되어 개수 기준으로 완성도는 100%이다. 그러나 이는 후공정에서 오차를 유발할 수 있는 확률은 Fig. 15(b)가 훨씬 높다. 만약 가공된 인접한 곡판이 정 반대의 오차를 가진다면, 최대 10mm까지 오차가 발생할 수 있다. 특히 블록 제작은 대부분 수작업에 의해 이루어져 많은 오차를 유발하는 인자들이 있다. 예를 들어 곡부재 조립을 위해서는 핀지그(Pin zig)를 셋팅하여, 핀지그 위에서 조립 작업을 수행한다. 이 과정에서 설치 오차가 발생하며, 곡부재 내부에 취부되는 내부재 또한 오차를 가지고 있다. 따라서 치수품질로 인해 발생하는 수정 비용을 최대한 줄이기 위해서는 정규 치수에 가깝게 제작하는 것이 유리하며, 확률 개념을 도입하여 평가함으

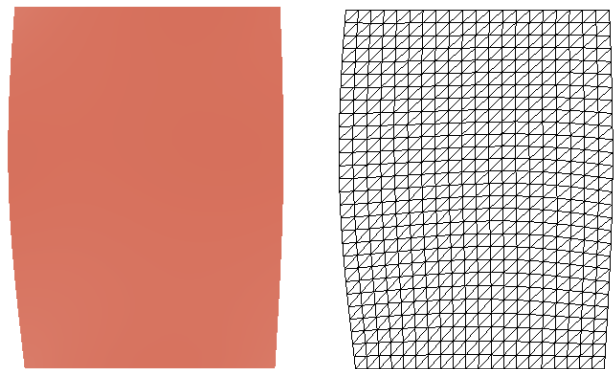


Fig. 13 Triangular mesh generation for curvature comparing

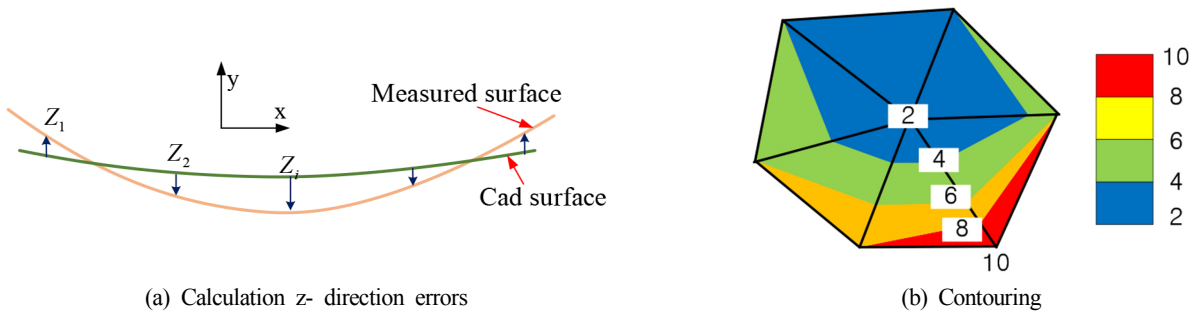


Fig. 14 Generation of a z-map using errors

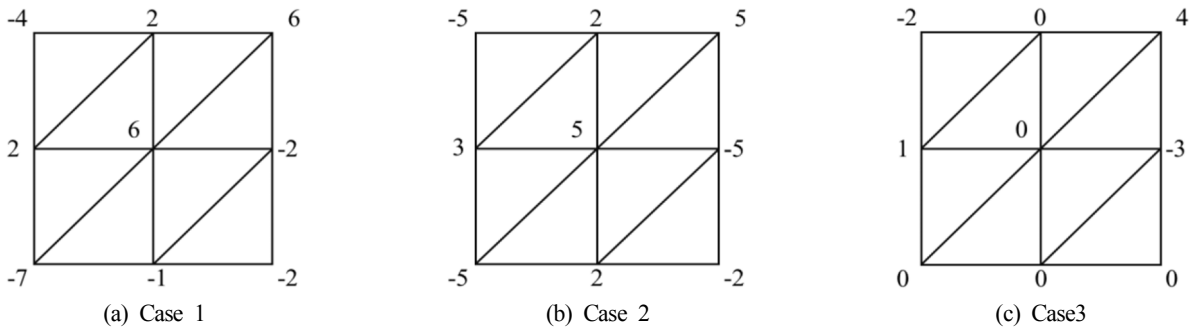


Fig. 15 Assessment of completion example

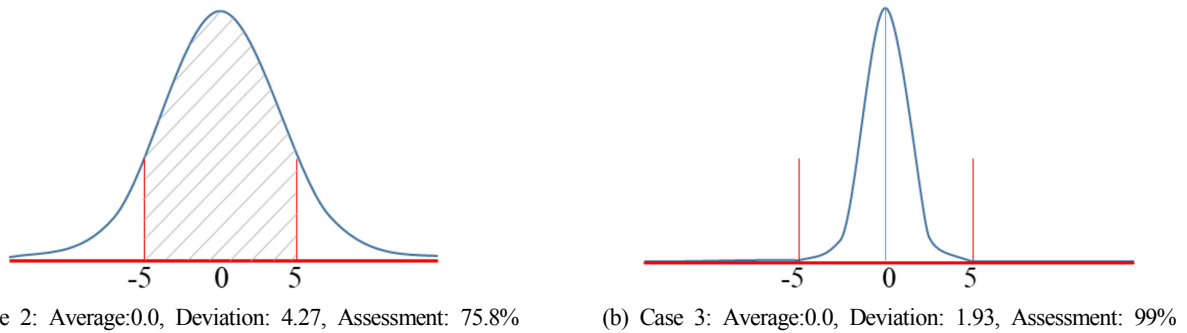


Fig. 16 Assessment of completion using probability

Table 1 Assessment of completion

	Case 1	Case 2	Case 3
Error count	3	0	0
Deviation	4.39	4.27	1.94
Assessment (Count)	66.7%	100%	100%
Assessment (Probability)	74.6%	75.8%	99.0%
Assessment (Mixed)	70.6%	87.9%	99.5%

로써 이를 보완할 수 있다. 완성도는 평균과 편차를 이용해서 허용 공차를 만족하는 확률로 표현할 수 있다. Fig. 15(b), Fig. 15(c)는 확률로서 판단하면 75.8%, 99%로 계산되어 많은 차이가 발생한다(Fig. 16). 그러나 이와 같이 확률로만 판단할 경우 오차가 허용 공차 $\pm 5\text{mm}$ 를 모두 만족시켰음에도 불구하고 Fig. 15(b)의 완성도가 Fig. 15(a)와 비슷한 수준으로 평가가 되었다. 허용 공차를 만족시킬 경우 후 공정에서 문제를 일으킬 가능성이 상대적으로 줄어들 수 있으므로, 이 두 완성도를 혼합하여 사용하는 평가 방법을 제안한다. 본 연구에서 혼합 방법은 개수

와 확률에 동일 가중치를 적용하여 평균을 구하였다. 이와 같이 혼합하여 적용한 경우 최종 완성도는 70.6%, 87.9% 및 99.5% 이다(Table 1).

4.3 절단선 마킹

최종적으로 설계곡면과 같은 크기를 맞추기 위해 여유 마진 부분을 절단한다. 정합된 결과에서 설계곡면의 경계 곡선들을 계측곡면에 투영한 곡선들이 절단선에 해당된다. 가공된 부재를 절단을 하기 위해서는 이 위치를 부재에 마킹해야 한다.

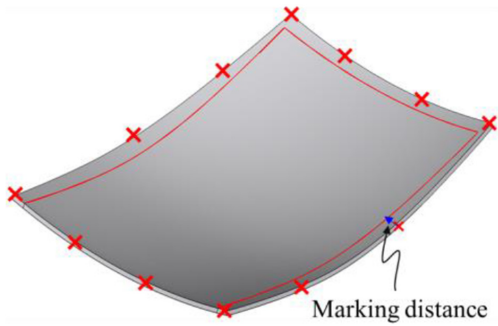


Fig. 17 Cutting lines

Park 등(Park et al., 2016)이 개발한 장비는 갠트리 기준으로 계측이 이루어져 장비를 이용해서 자동으로 마킹이 가능하지만, 이와 같은 장비를 구성할 수 없을 경우 부재에서 계측된 위치를 기준으로 해서 마킹이 가능하다. 예를 들어 사진계측기를 이용할 경우 타겟이 부착된 위치에서 절단 곡선까지의 거리 값을 계산해 줌으로써 이를 이용해서 부재에 마킹할 수 있다(Fig. 17). 즉 각 계측 점마다 마킹 선까지의 거리 값을 제공해 주면, 작업자는 각 계측 포인트에서 이 위치를 부재에 표시하고 이 점들을 연결하여 절단 작업을 수행할 수 있다.

5. 적용 예

Fig. 18은 계측곡면과 설계곡면에 대해서 구속 조건이 부여되지 않은 최적 정합 상태를 보여주고 있다. Fig. 18(b)는 설계곡면을 계측곡면 위로 투영한 후 삼각형 요소망을 생성한 모습이며, 요소의 각 절점에서 두 곡면 사이의 거리를 계산하여, Fig. 18(c)와 같이 오차 분포를 가시화 한다. Fig. 19(a)는 아랫면을 구속한 상태에서 정합한 결과이며, Fig. 19(b)는 아랫면과 왼쪽면 두 에지에 대해서 구속 조건을 고려해서 정합 한 결과이다. 각각에 대한 가공 완성도는 Table 2에 나타나 있으며, 최종 가공 완성도는 최적일 때가 85.3%, 1개 에지 구속 조건일 때 81.9%, 2개 에지 구속 조건일 때 80.5%이다. 결과에서 알 수 있듯이 구속 조건이 있는 경우 이를 고려해서 정합을 수행하기 때문에 완성도가 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 19(c)는 여유 마진을 절단하기 위한 마킹 위치를 보여주고 있다. 계측된 위치에서 주어진 값만큼 떨어진 위치가 절단될 위치이다. Fig. 20은 3D 레이저 스캐너로 측정된 데이터에 대해서 구속 조건이 없는 상태에서 완성도를 평가한 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 경계 부분이 매끄럽지 못하며, 토탈스테이션의 계측 포인트 수가 다소 적고, 두 계측기 간의 오차로 인해 약간의 완성도 값에 차이가 나타났

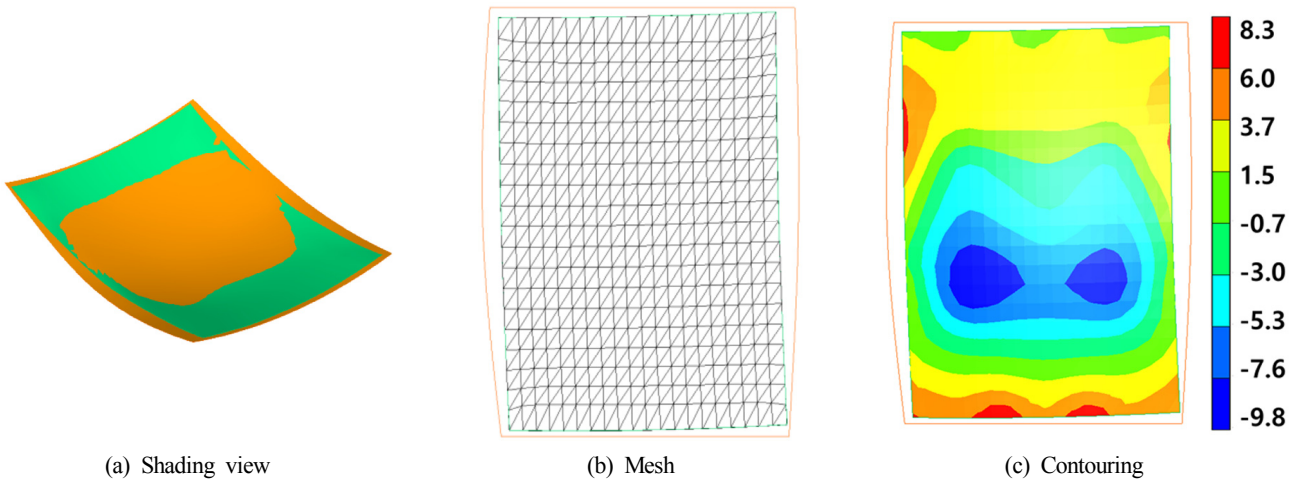


Fig. 18 Optimal registration

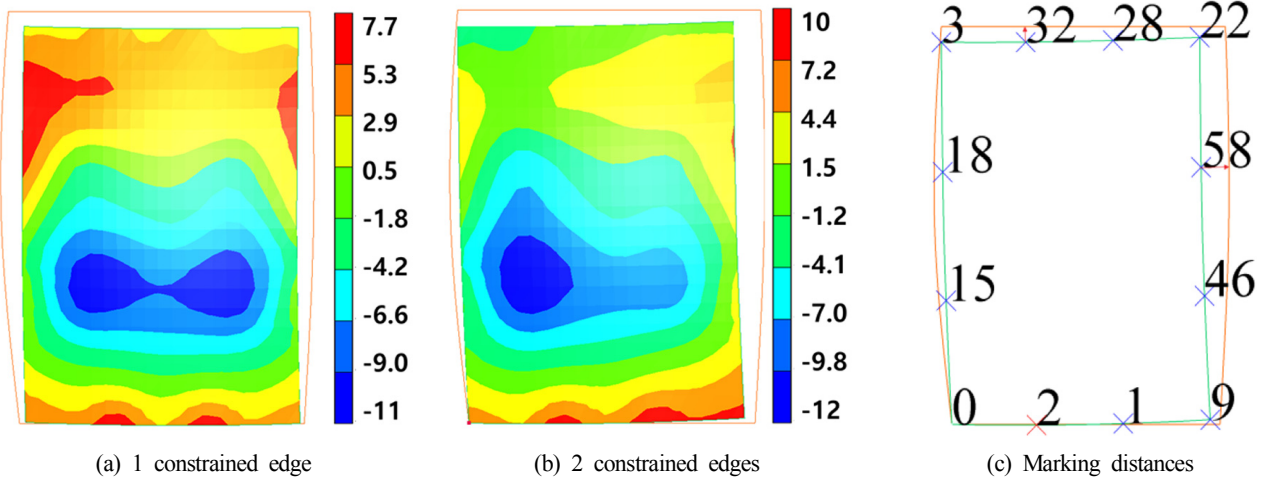
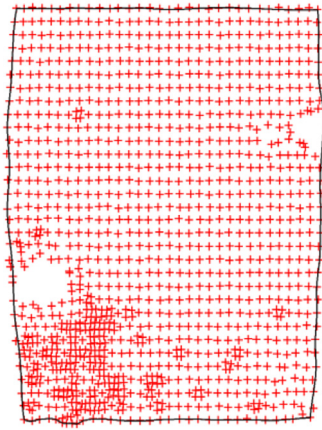


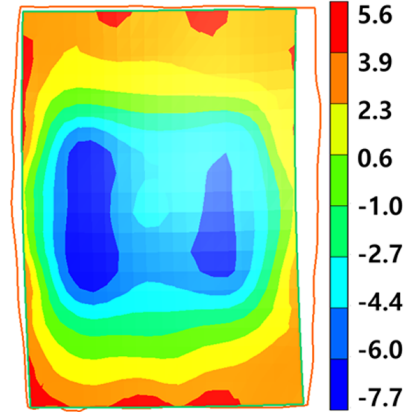
Fig. 19 Registration with constrained conditions

Table 2 Assessment of completion

	Center	1 edge	2 edges
Assessment (Count)	93.7%	91.6%	91.8%
Assessment (Probability)	77%	72.1%	69.1%
Assessment (Mixed)	85.3%	81.9%	80.5%



(a) Measured surface using filtered points



(b) Assessment Count: 97.9%, Probability: 81.1, Mixed: 89.5%

Fig. 20 Example of 3D laser scanner

다. 일반적으로 실제 부재가 크게 제작되어 경계 부분의 오차가 크더라도 곡률을 평가하는 데에는 문제가 없다고 판단된다.

본 논문에서 제시한 방법은 포인트 측정 및 형상 전체 측정 방식에 대한 데이터에 대해 적용 가능하여 범용으로 사용될 수 있으며, 자동으로 곡면 모델링을 수행하여 작업 효율성을 높일 수 있다. 또한 부재의 특성에 맞게 제약조건을 고려해서 정합을 수행하여 가공 완성도를 평가하고, 실제 부재 절단을 위한 마킹 값을 산출하여 별도의 자동화 장비 없이 부재에 직접 마킹을 할 수 있다.

6. 결 론

선수미 등의 곡부재는 후 공정 조립 과정에서 오차가 발생했을 때, 수정의 어려움으로 인해 많은 추가비용을 유발할 수 있다. 따라서 정확하게 완성도를 평가하여, 가공 단계에서 양품을 생산해야 한다. 일반 선박 블록처럼 특정 포인트를 측정하여 치수 품질을 평가하는 데에는 제한이 있으며, 3차원 계측기를 이용하여 부재 전체를 측정하여 평가되고 있다. 측정된 데이터로부터 가공 부재에 대한 곡면을 모델링하고, 이를 설계 곡면과 비교하는데 이 과정에서 작업 기준을 반영한 곡면 정합 방법이 요구되며, 작업자가 쉽게 판단할 수 있도록 가공완성도를 보여주는 것이 필요하다. 또한 열간 가공으로 인한 수축으로 인해 부재의 크기가 변할 수 있어 주로 마진을 두어 가공을 한 후에 절단 작업을 통해 최종 형상을 완성한다. 본 논문에서는 다양한 3차원 계측기로부터 측정된 데이터에 대해 곡부재 완성도를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 이는 모든 종류의 계측기로부터 측정된 데이터에 대해서 경계 및 내부를 분류하고, 경계 점을 정렬하여 계측곡면을 자동으로 모델링하고, 설계곡면과 비교하여 가공완성도를 평가할 수 있도록 하였다. 계측곡면과 설

계곡면은 절단면을 최소화하기 위해 특정 면을 맞출 수 있도록 하였으며, 여유 마진을 실제 절단하는 위치를 기존 계측데이터를 활용하여 이용할 수 있도록 하였다. 또한 가공완성도는 공정의 허용오차 안에 들어올 확실적인 개념과 개수를 혼용하여 사용하였다. 이는 허용오차 안에 물건을 제작하는 것도 중요하고, 최대한 0오차에 가깝게 제작해야 한다는 관점에서 이와 같이 제안하였다.

측정된 데이터를 이용하여 곡면을 복원하는 과정에서 모델링 오차가 발생할 수 있다. 따라서 부재 크기 및 모양에 따라 어떤 포인트를 이용하는 것이 가장 오차가 적게 발생하는지에 대한 평가가 필요하다. 향후 모델링 오차를 최소화 할 수 있도록 일부 포인트 측정하는 경우 측정 위치에 대한 작업 지시 및 형상 전체를 스캔하는 경우 샘플링 방법에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비에 의하여 지원된 논문입니다.

References

- Bae, K.Y., Yang, Y.S., Hyun, C.M., 2012. Analysis of Triangle Heating Technique using High Frequency Induction Heating in Forming Process of Steel Plate. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(4), 539-545.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 586-606.
- Geodetic Systems, 2017. Picture Perfect Measurements. [Online]

- Available at: <<http://www.geodetic.com/applications/ship-building/>> [Accessed January 2018].
- Hiekata, K., Yamato, H., Enomoto, M., Oida, Y., Furukawa, Y., Makino, Y., Sugihiro, T., 2011. Development and Case Studies of Accuracy Evaluation System for Curved Shell Plates by Laser Scanner. *Journal of Ship Production and Design*, 27(2), 84-90.
- Horn, K.P., 1987, Closed-form Solution of Absolute Orientation using Unit Quaternions. *Journal of the Optical Society of America*, 4(4), 629-633.
- Huang, S., Wang, H., Zhao, Y., Lin, Z., 2015. An Analytical Representation of Conformal Mapping for Genus-zero Implicit Surfaces and its Application to Surface Shape Similarity Assessment. *Computer-Aided Design*, 64, 9-21.
- Jung, J.M., Park, C.M., Park, D.C., 2009. A Study on the In-line Assessment of Completion for Fabrication of Curved Plates. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(1), 135-139.
- Kwan, S.J., Kim, D.E., 2015. An Efficient Erection Simulation Methodology for the Modular Construction of Offshore Platform Based on Points Cloud Data. ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers.
- Kwon, K.Y., 2016. A Weighted Points Registration Method to Analyze Dimensional Errors Occurring during Shipbuilding Process. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 21(2), 151-158.
- Li, R., Lee, K.H., Lee, J.M., Nam, B.W., Kim, D.S., 2016. A Study on Matching Method of Hull Blocks Based on Point Clouds for Error Prediction. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 29(2), 123-130.
- Mehrad, V., Xue, D., Gu, P., 2014. Robust Localization to Align Measured Points on the Manufactured Surface with Design Surface for Freeform Surface Inspection. *Computer-Aided Design*, 53, 90-103.
- Park, J., Kim, D., Mun, S., Kwon, K., Lee, J., Ko, K.H., 2016. Automated Thermal Forming of Curved Plates in Shipbuilding: System Development and Validation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(10), 1128-1145.
- Park, J., Shin, J., Ko, K.H., 2007. Geometric Assessment for Fabrication of Large Hull Pieces in Shipbuilding. *Computer-Aided Design*, 39(10), 870-881.
- Wang, Z., Wu, Z., Zhen, X., Yang, R., Xi, J., 2016. An Onsite Inspection Sensor for the Formation of Hull Plates Based on Active Binocular Stereovision. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(2), 279-292.
- Zhou, B., Han, X., Tan, S.K., Liu, Z.C., 2014. Study on Plate Forming Using the Line Heating Process of Multiple-torch. *Journal of Ship Production and Design*, 30(3), 142-151.
- Zhang, X., Yang, Y., Liu, Y., 2011. Feasibility Research on Application of a High Frequency Induction Heat to Line Heating Technology. *Journal of Marine Science and Application*, 10(4), 456-464.

Analysis of Shoreline Response due to Wave Energy Incidence Using Equilibrium Beach Profile Concept

Tae-Kon Kim^{ID*} and Jung-Lyul Lee^{ID**}

^{*}School of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^{**}School of Water Resources Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

평형해빈단면 개념을 이용하여 파랑 에너지 유입에 따른 해안선 변동 해석

김태곤^{ID*} · 이정렬^{ID**}

^{*}성균관대학교 건설환경시스템공학과

^{**}성균관대학교 수자원대학원

KEY WORDS: Cross-shore sediment transport 횡단표사, Scale factor 축척계수, Median grain size 중앙입경, Beach erosion 해변침식, Detached breakwater 이안제

ABSTRACT: Dean's equilibrium beach profile formula was used to investigate the correlation between the static shoreline position and the incident wave energy. The effect of the longshore sediment transport was neglected, and the results showed the reasonable agreement compared with the field observations of Yates et al.(2009), which were conducted for almost 5 years on southern California beaches, USA. The shoreline response varies with the scale factor of Dean's equilibrium beach profile. This implies that the shoreline response could be simply estimated using the sampled grain size without laborious long-term field work. Therefore, the present study results are expected to be practically used for the layout design of submerged or exposed detached breakwaters although the further work is required for performance verification. In addition, after laborous mathematical reviews, the linear relation between incident energy and shoreline response, which was obtained from Yates's field study, yielded a clear mathematical equation showing how the beach slope is related to the grain size.

1. 서 론

최근 연안에서 빈번히 발생하는 침식문제가 사회적 이슈로 크게 대두되고, 이를 예방 또는 방지하고자 하는 모니터링 및 침식저감 기술의 필요성이 증대되고 있다. 그러나 이러한 모니터링 자료의 분석이나 침식저감 기술의 사전 타당성을 평가할 만한 실질적인 연구 성과는 국내뿐만 아니라 전 세계적으로도 아직 만족할 만한 수준에 도달하지 못하고 있다. 본 연구에서는 파랑 에너지를 제어하여 횡단표사로 인하여 발생하는 침식 문제를 해결하기 위한 수단으로 검토되는 이안제나 잠제 등의 해안구조물이 해안선 침식을 얼마나 효과적으로 제어할 수 있는지를 정량적으로 평가하는 데 유용한 방법론을 제시한다.

연안역에서 모래, 자갈 등 퇴적물이 쌓여 있는 곳을 해변이라고 하며, 해변은 파랑, 폭풍 등 계절적인 요인에 따른 파랑과 바람의 변화와 수십·수백 년의 기후 및 해수면 변화 등 다양한

범위에서 퇴적물 공급과 운반 사이의 상호 작용에 의해 발달한다. 그 중에서도 자연적인 해변의 형성과 변화에 있어 파랑의 영향은 매우 중요한 요인이다.

파랑 에너지와 해안선 변화는 밀접한 관련이 있다. 파랑 에너지에 따라 형성되는 횡단표사의 유입과 유출의 변화에 의하여 해안선의 변화가 초래된다. 횡단표사는 해안선과 수직방향으로 이동하는 표사를 말하며, 연안역으로 횡단표사 유입과 유출의 관계에 따라 해변의 침식과 퇴적 특성이 결정되며, 결과적으로 해안선이 전진하고 후퇴하는 등의 반응을 일으킨다. 일반적으로 파랑 에너지가 낮은 여름철에는 연안역으로의 횡단표사가 우월하여 해안선이 전진하고 파랑 에너지가 큰 겨울철에는 해변 단의 전면이 깎이며, 외해로의 횡단표사가 발생하여 해안선이 후퇴하는 침식이 발생한다(Kim and Lee, 2015).

파랑 에너지 유입에 의한 해안선의 전진 또는 후퇴 등의 반응은 Larson and Kraus(1989)에 의하여 이론적으로 처음 제안되었

Received 27 March 2018, revised 21 April 2018, accepted 23 April 2018

Corresponding author Jung-Lyul Lee: +82-31-290-7519, jllee@skku.edu ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9410-9725

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

다. 그 후 Dean(1991)은 양빈 프로젝트에 적용하여 이론적 타당성을 검증하였고, Kriebel and Dean(1993)과 Miller and Dean(2004)은 폭풍에 의한 현지 해안선 반응에 대한 모델링으로 확장하였다. 최근에 Yates et al.(2009)은 해변이 지속적으로 파랑 에너지에 노출되는 경우 고유한 해안선 위치로 수렴할 것이라는 가정 하에 약 65km에 달하는 미국 서부 캘리포니아 해변에서 약 5년간 파랑 에너지, 평균해수면, 해변측량 그리고 그에 따른 해안선의 전진 또는 후퇴 양상에 대한 현장관측을 수행하였다.

본 연구에서는 유입 파랑 에너지와 해안선 위치의 변화에 대한 상관관계를 분석 하는 과정에서 평형 해변 단면 이론을 적용한다. 이 이론은 처음 해안 종방향(Cross-shore)으로의 표사이동과 관련하여 Bruun(1954)와 Bruun(1962)에 의하여 제시되었다. 그 후 평형해빈단면 이론은 초기 직선적 해빈 단면에 대한 침식 폭 추정(Suh and Dalrymple, 1988), 해빈단면의 응답모형(Larson and Kraus, 1989)과 양빈 프로젝트에의 적용(Dean, 1991), 사구에서의 해빈단면의 시간적 변화(Plant et al., 1999), 해수면 상승에 의한 해빈단면의 변화(Dubois, 1990), 폭풍해일(Kriebel and Dean, 1993)과 폭풍(Miller and Dean, 2004) 등에 의한 해빈단면의 시간적 변화 등을 예측하는 실질적인 개념으로 널리 적용되어 왔다.

해안선 변화 및 평형해빈단면에 관한 우리나라 연구 사례를 살펴보면 해안선 변형 예측에 대한 수치모델 연구(Park et al., 1993), 해수면 상승에 의한 해안선의 잠재적 후퇴거리의 산정(Son, 1993), 횡단표사에 따른 해안선 변화에 관한 실험적 연구(Son and Lee, 2000), 강원도 해수욕장의 유영폭 및 해빈단면 축척계수 조사 분석(Lee and Kim, 2006) 그리고 해빈 종단면 변형의 수치모의(Cheon and Ahn, 2008) 등에 대한 연구가 수행되었다. 그러나 선진국에 비하면 아직 미비하며 실제 연안침식을 완화시키기 위한 해안구조물의 구조설계 및 배치설계 등의 적용 사례에 대한 연구가 현재까지는 부족하다. 그로 인하여 양빈 또는 우회양빈(Sand bypassing) 등 인위적 해빈조성 공법이나 돌제 또는 잠제 등의 많은 해안구조물이 설치되고 있음에도 현재까지 성공적인 것으로 평가되는 사업사례가 비교적 드문 만큼 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 Dean(1977)의 평형해빈단면의 개념을 이용하여 유입되는 파랑 에너지에 따라 수렴하는 고유한 해안선 위치간의 변화관계를 분석한다. 연안표사에 따른 영향은 무시하였으며, Yates et al.(2009)의 현장관측 결과와 비교하고, 그 개념의 타당성을 또한 검증한다. Yates et al.(2009)은 5년간의 현장 관측으로부터 유입되는 파랑 에너지에 따른 고유한 해안선 위치에 대한 관계식을 얻어냈지만 모든 해안에 대하여 이러한 관측이 수행되지 않고는 그 관계를 명확히 파악하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 관측을 수행하지 않고도 해변 입자 특성으로부터 그 관계를 얻어내는 방법론을 제시한다.

2. Yates의 현장관측 실험

Yates et al.(2009)은 유입되는 파랑 에너지에 따라 해안선의 위치가 어떻게 반응하는 지에 대한 연구를 수행하기 위하여 Fig. 1과 같이 미국 캘리포니아주의 San Diego County에 위치한 길이 약 65km에 달하는 해안의 4개 지점(Torrey Pines, Cardiff,

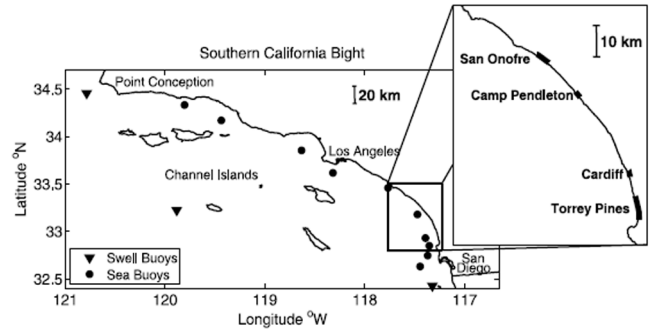


Fig. 1 Study site of Yates et al.(2009)

Table 1 General beach characteristic of survey sites (Yates et al., 2009)

Survey site	Beach width [m]	Beach slope	MSL D_{50} [mm]	D_{50} at 1~2 m [mm]
Torrey pines	20 - 120	0.01 - 0.03	0.23	0.18
Cardiff	20 - 50	0.02 - 0.04	0.16	-
Camp pendleton	50 - 130	0.02 - 0.04	0.20	0.23
San onofre	20 - 70	0.03 - 0.05	0.26	0.35

Camp Pendleton and San Onofre)에서의 파랑 관측과 해변 측량 등 주기적인 모니터링을 실시하였다. 조사장소에 대한 일반적인 특성(해빈 폭, 해변경사, 모래입경 등)은 Table 1에 제시되었다. 모든 해변에서의 소조와 대조는 대략 1.0m 및 2.5m인 것으로 파악되었다.

Fig. 2는 4개 지점 가운데 Torrey Pines에서의 해변 측량 결과와 수심 10m에서 관측된 파랑 자료, 그리고 해안선의 변동에 대한 상세한 결과를 보여준다. 해변 측량 자료는 주 또는 월별 관측 자료의 월평균 값으로 제시되었으며 파랑 관측 자료는 스펙트럼 자료의 시간당 평균값으로 제시되었다. 2007년 4월과 2008년 1월에 실시된 해변 측량 결과가 각각 제시되었으며 또한 2007년 10월 22일에 관측된 해변 종단면 기준점 T3에서의 해빈단면 측량 결과가 3개월 후인 2008년 1월 22일에 동일 기

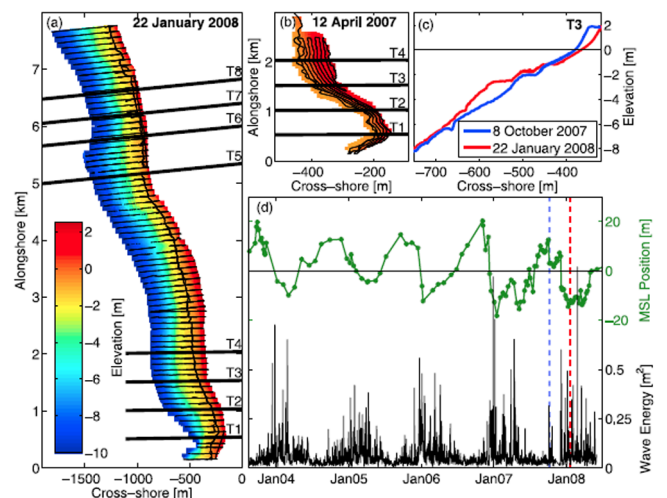


Fig. 2 Survey examples measured in Torrey Pines Beach (Yates et al., 2009)

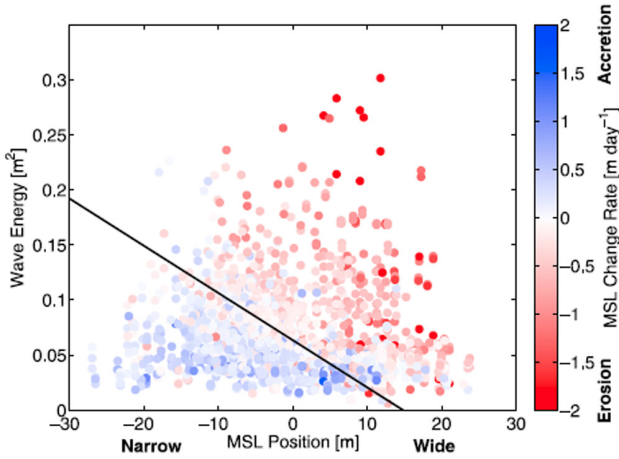


Fig. 3 Mean sea level(MSL) changing rate w.r.t. incident wave energy in Torrey Pines Beach (Yates et al., 2009)

준점에서 관측된 해빈단면 자료와 서로 비교되었다. Torrey Pines의 해안에서 500m 간격으로 4km에 걸쳐 T1부터 T8까지의 기준점에 대하여 관측이 수행되었다. Fig. 2의 우측 하단에 제시된 파랑 에너지 관측 자료를 살펴보면 계절적 변동성을 보이고 있으며 이로 인하여 우측 상단에 서로 비교된 해빈단면 결과에서와 같이 해안선이 후퇴되고 대신 쇄파점 주변에서 연안 사주가 형성된 모습을 보여주고 있다.

유입 파랑 에너지 E 에 따라서 해안선 위치 MSL(Mean sea level)에서의 해안선 전진이나 후퇴 경향을 살핀 후 후퇴(Erosion)를 빨간색, 전진(Accretion)을 파란색으로 표기하면 후퇴와 전진이 발생하지 않는 경계를 파악할 수 있다. Fig. 3에서 보이는 것과 같이 후퇴와 전진이 발생하지 않는 경계를 검정색 선으로 그릴 수 있고, 이 선은 유입되는 파랑 에너지에 대하여 수렴되는 해안선 위치인 것으로 추정할 수 있다.

따라서 이러한 관계식을 얻으면 유입 파랑 에너지에 따라서 해안선이 어떻게 반응할 지를 미리 예측할 수 있으므로 지나치게 해안선이 후퇴하는 해안에서 고파랑을 제어하는 잠제나 이안제 등의 해안구조물을 두어 배후 해안으로의 파랑 에너지 유입을 감소시켜 해안선 후퇴를 제어할 수 있게 된다. 이러한 접근 방법에서 연안 표사로 인한 영향은 무시되며 연안표사의 영

향이 포함된다면 해안선의 변동 폭은 대부분 더 늘어나는 것으로 간주될 수 있다.

따라서 Fig. 3으로부터 파랑 에너지 E 가 지속적으로 유입되는 경우 해안선이 궁극적으로 평형해안선의 위치 S_{eq} 로 수렴되는데 이를 직선이라고 가정하면 다음과 같다.

$$S_{eq} = \frac{E-b}{a} \quad \text{or} \quad E = aS_{eq} + b \quad (1)$$

여기서 유입파랑 에너지 E 는 불규칙 파의 경우 아래와 같이 유의파고 H_s 의 함수로 정의된다.

$$E = \frac{H_s^2}{16} \quad (2)$$

그리고 a 와 b 는 S 를 가로축으로 둘 때 각각 직선의 경사와 절편이 된다. $S=0$ 인 해안선 위치는 연평균 파랑 에너지 \bar{E}_0 에 의하여 수렴되는 해안선의 위치로서 이는 식 (1)에서 $b = \bar{E}_0$ 이 되는 조건을 제공한다.

3. 평형해빈단면에 의한 상관관계 분석

3.1 Dean의 평형해빈단면

Dean(1977)은 Florida Peninsula 근방의 Long Island의 동쪽 끝에서부터 Texas-Mexico 접경지역까지 미국 502개의 해빈단면에 대한 현지측량을 실시하였으며 각 해빈단면 자료를 취합하고 가장 잘 Fitting하는 보편적 해빈단면 형상을 식 (3)와 같이 유일한 계수인 해빈축척계수 A 로 표현되는 식을 제안하였다.

$$h(y) = Ay^{2/3} \quad (3)$$

여기서 $h(y)$ 는 수심, y 는 해안선에서부터의 이안거리, A 는 해빈축척계수(Beach scale factor)로 입경에 의존하는 계수이며 단위는 $m^{1/3}$ 이다. 해빈축척계수 A 는 중앙입경과 밀접한 관계가 있는 계수로서 이를 추정하는 방법은 다양하다. Moore(1982)는 토사의

Table 2 Scale factors according to median grain size (Dean et al., 1977)

Summary of Recommended A Values (Unit of A Parameter are $m^{1/3}$)										
D [mm]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.0840	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.100	0.1030	0.1060	0.1090	0.1120	0.1150	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230
0.3	0.125	0.1270	0.1290	0.1310	0.1330	0.1350	0.1370	0.1390	0.1410	0.1430
0.4	0.145	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.1530	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.161	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.1670	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.173	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.1790	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.185	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.194	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.1980	0.1988	0.1966	0.2004	0.2012
0.9	0.202	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.2060	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.210	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

유효 크기 사이의 상관관계를 정량화하기 위해 수많은 단면조사를 했고, 분석에 따르면 가파른 단면과 조개껍질이 대부분인 가벼운 모래질의 해변단면에 대해서도 잘 적용되었다. Dean et al.(2001)은 퇴적물의 중앙입경 D_{50} 의 크기를 0.01mm의 간격으로 0.1mm로부터 1.09mm까지의 A 값을 Table 2에 제시하였다.

3.2 수렴해안선 위치의 추정

평형해빈단면식은 쇄파대 내에서 적용되는 식이므로 그 식의 적용 한계는 해안선으로부터 쇄파점(Breaking point)까지이다. 그러므로 파고에 따라서 달라지는 쇄파점이 임의의 해변 경사를 따라 발생한다고 가정하면 수렴해안선의 위치를 구할 수 있다. 쇄파고 H_b 에 대하여 쇄파가 시작되는 수심 h_b 을 산정하기 위하여 가장 간단하면서도 널리 사용되는 Miche(1944)의 수식을 적용하였다.

$$h_b = \frac{H_b}{\gamma} \tag{4}$$

여기서 아래첨자 b 는 쇄파점에서 h_b 의 값을 의미하며 γ 는 0.7~1.3의 범위를 갖는 값으로 여기서는 평상파에 적용되는 $\gamma=0.78$ 을 사용하였다. 식 (4)를 적용하고 Dean(1977)의 평형해빈단면식을 이용하면 Fig. 4의 y 기준점으로부터 해안선의 변화 폭인 Δy 를 아래와 같이 산출할 수 있다.

$$\Delta y = mh_b - \left(\frac{h_b}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{5}$$

여기서 m 은 Fig. 4에 도시된 바와 같이 평형해빈단면식이 유효한 외해 한계점 즉, 쇄파 시작점을 연결한 선의 경사로서 직선인 것으로 가정되었다.

Fig. 4에서 수렴해안선 위치의 변화를 나타내는 S 가 파랑 에너지가 0인 경우에 수렴되는 해안선 위치가 기준이 되는 것이 아니라 가장 빈도가 높은 파랑 에너지인 평균 파랑 에너지에 의하여 수렴되는 해안선의 위치인 O 점이 기준이 된다면 수렴해안선 위치 S_{eq} 에 대한 식은 아래 식과 같이 주어진다.

$$S_{eq} = \left[A^{-3/2} \left(\bar{h}_b^{3/2} - h_b^{3/2} \right) \right] - m(\bar{h}_b - h_b) \tag{6}$$

Fig. 4에서 S_o 는 파랑 에너지가 거의 유입되지 않는 상태의

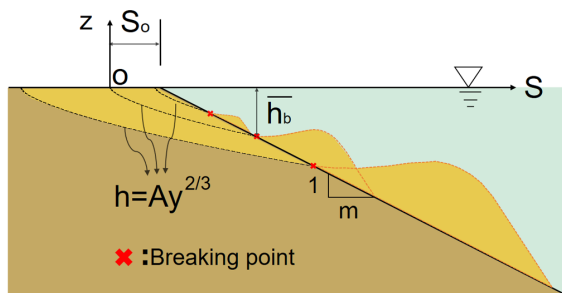


Fig. 4 Definition sketch of shoreline response concept using an equilibrium beach profile

평형해안선 위치로서 천수 효과를 무시하면 식 (1)에서 $-b/a$ 에 해당되는 값이며 식 (6)에서 $h_b=0$ 으로 두면 얻을 수 있는 값이다. 즉,

$$m\bar{h}_b - \left(\frac{\bar{h}_b}{A}\right)^{-3/2} = \frac{b}{a} = \frac{\bar{E}_b}{a} \tag{7}$$

식 (1)과 유사한 형태로 식 (7)을 식 (6)에 대입하면 다음 결과를 얻는다.

$$S_{eq} = \left[\frac{16}{\gamma^2} \left(\frac{m}{h_b} - \frac{1}{A^{3/2}h_b^{1/2}} \right) \right] (E_b - \bar{E}_b) \tag{8}$$

식 (8)의 대괄호 안의 값은 $-1/a$ 에 해당되며 관측 결과에 따르면 이 결과는 유입 에너지에 관계없이 거의 일정한 값으로 추정되었다. 따라서 다음과 같이 식 (1)과 유사한 식으로 변환될 수 있다.

$$S_{eq} = \frac{E_b - \bar{E}_b}{a} \tag{9}$$

Fig. 3과 같이 식 (8)에서 대괄호 안의 값이 유입 에너지에 관계없이 거의 일정한 값이 된다면 해변경사 m 이 Scale factor A 와 어떤 관계가 있는지를 또한 판단할 수 있다. 다소 까다로운 수학적 검토 후 해변 경사와 축척 계수간의 관계가 아래와 같은 경우 수심의 영향을 덜 받고 거의 일정한 값을 제공하는 것으로 판단되었다.

$$m = \frac{f}{A^{3/2}} \tag{10}$$

식 (10)을 식 (8)에 적용하면 a 에 대하여 다음 결과를 얻는다.

$$a \approx \frac{\gamma^2 A^{3/2}}{16} \left(\frac{h_b}{f - \sqrt{h_b}} \right) \tag{11}$$

여기서 f 는 해변 조건과 관계없이 거의 일정한 상수인 것으로 간주될 수 있다. 식 (11)은 또한 해변경사 m 의 함수로도 아래와 같이 주어진다.

$$a \approx \frac{\gamma^2 f}{16m} \left(\frac{h_b}{f - \sqrt{h_b}} \right) \tag{12}$$

따라서 Table 1에 제시된 해변 경사와 입경 자료를 이용하여 식 (9)로부터 f 를 추산하고 평균을 구하면 약 1.17의 평균값을 갖는다. 계산 과정은 Table 2에 제시되었다. f 의 값이 0.86부터 1.80까지 큰 변화를 보이고 있다. Table 1에서와 같이 해변 경사가 대략적으로 제시되었으며 해변 경사와 중앙 입경 자료를 서로 비교하였을 때 해변 경사가 급할수록 입경이 커지는 보편적인 경향이 만족되지 못하고 있다. 따라서 유입 파고에 따라 부

Table 3 Results of parameter f at survey sites

Survey Site	Beach Slope 1/m	Mean Slope 1:m	MSL D_{50} [mm]	D_{50} at 1~2 m [mm]	Scale Factor A [$m^{1/3}$]	Parameter f [$m^{1/2}$]
Torrey pines	0.01 - 0.03	50.0	0.23	0.18	0.1090	1.80
Cardiff	0.02 - 0.04	33.3	0.16	-	0.0872	0.86
Camp pendleton	0.02 - 0.04	33.3	0.20	0.23	0.1000	1.05
San onofre	0.03 - 0.05	25.0	0.26	0.35	0.1170	1.00

Table 4 Results of D_{50} estimated from the beach slopes

Survey site	Observed			Estimated		
	Mean slope 1/m	MSL D_{50} [mm]	D_{50} at 1~2 m [mm]	Parameter f [$m^{1/2}$]	Scale factor A [$m^{1/3}$]	Grain size D_{50} [mm]
Torrey pines	50.0	0.23	0.18	mean 1.18	0.0823	0.14-0.15
Cardiff	33.3	0.16	-		0.1079	0.22-0.23
Camp pendleton	33.3	0.20	0.23	0.1079	0.22-0.23	
San onofre	25.0	0.26	0.35	0.1306	0.32-0.33	

유사 이동이 심한 점을 고려하면 MSL에서의 모래 입경의 대표성이 해변 경사에 비하여 부족할 수도 있다고 판단된다. 식 (9)에 각 해변의 평균 해변경사를 적용하고 f 의 평균값인 1.18을 취하면 각 해변의 축척계수인 A 를 구할 수 있다 그리고 Table 2로부터 구해진 A 값에 해당하는 중앙 입경 D_{50} 를 구한 결과를 제시하면 Table 4와 같다. 파랑 조건에 둔감하고 전반적인 해변의 특성을 잘 반영하는 해변 경사가 해변 특성의 대표성을 갖는다고 보았을 때 이렇게 추산한 중앙 입경은 장기간 평균된 입경 정보를 제공할 것으로 판단된다.

Dean(1977)의 평형해빈단면 이론식으로부터 얻은 식 (11) 또는 식 (12)는 Yates et al.(2009)에서 수행한 장시간의 관측이 없이도 기존 모니터링 자료인 중앙 입경이나 해변 경사로부터 직접 쇄파되는 점에서의 파랑 에너지를 안다면 해안선이 어떻게 수렴하게 되는지를 파악할 수 있는 간편한 수단이 된다. Table 5는 Yates et al.(2009)의 관측 자료로부터 얻은 결과로서 식 (1)의 a 와 식 (11)의 근사 해인 a 결과를 서로 비교한 것이다. 식 (11)에서 a 는 수심에 따라 약간의 변화를 보이는 데 Table 5의 결과는 수심 3m에 대한 결과를 제시한 것이다.

Torrey Pines 해변과 Camp Pendleton 해변의 경우 해변경사 자료로부터 얻은 결과가 더 근접한 결과를 제시하고 있으나 Cardiff 해변의 경우는 MSL에서 관측된 중앙입경 자료로부터 얻은 결과가 더 근접한 결과를 보이고 있다. 여기서 유념할 것

은 관측된 a 값은 수심 10m에서 관측된 파랑 에너지로부터 얻어진 결과이며 계산된 a 는 쇄파점에서의 파랑 에너지로부터 추출한 것이다. 참고로 수심 10m에서 주기 6초인 파랑의 파랑 에너지가 $0.2m^2$ 인 경우 10m 지점으로부터 쇄파점까지의 천수계수는 약 1.13이 된다.

식 (6)을 이용하면 유입되는 파랑 에너지별로 해안선이 어떻게 반응하는지를 살펴볼 수 있다. 식 (6)에 주어진 쇄파점에서의 파고로 수심 10m에서의 파고로의 변환을 위하여 조석의 영향은 무시하고 천수 효과를 반영하였다. 파랑 자료가 없는 관계로 굴절은 무시되었다. Fig. 5는 Torrey Pines 해변에 대한 결과로서 Fig. 3과 같은 조건에 대하여 적용한 식 (8)의 결과이다. 해변경사 m 은 평균값인 50으로 간주하였으나 Table 5에 주어진 바와 같이 축척계수는 2가지 값에 대하여 적용되었다. 즉, MSL에서 채취한 모래의 중앙입경을 사용하여 얻은 $A=0.109m^{1/3}$ 의 경우와 $m=50$ 로부터 식 (10)의 관계를 이용한 얻은 $A=0.0818m^{1/3}$ 의 경우이다. 후자의 경우 관측 결과와 유사한 결과를 보이고 있으나 전자의 경우는 해변경사에 비하여 중앙입경이 크게 관측되어서 Table 5의 Observed a 에 제시된 ± 2.0 의 오차 범위 내에 놓이지 못한 것으로 판단된다. 수심 1~2m에서 관측된 중앙입경은 MSL에 비하여 작은 입경인 0.18mm인 것으로 관측되었으나 MSL에서 대체로 큰 입경을 보이는 경향이 있다는 점을 고려하면 아직도 본 연구 성과를 만족시키지 못하는 관측 결과인 것으로 판단된다.

Table 5 Comparison of correlation curve slope a for survey sites

Survey site	MSL D_{50} [mm]	Scale factor A [$m^{1/3}$]	Observed a [$\times 10^{-3} m^2/m$]	Calculated a [$\times 10^{-3} m^2/m$] at $h_b = 3 m$
	Beach slope m			
Torrey pines	0.23	0.1090	-4.5 \pm 2.0	-7.4
	50.0	0.0818		-4.9
Cardiff	0.16	0.0872	-4.2 \pm 1.0	-5.3
	33.3	0.1073		-7.3
Camp pendleton	0.20	0.1000	-8.5 \pm 1.7	-6.5
	33.3	0.1073		-7.3

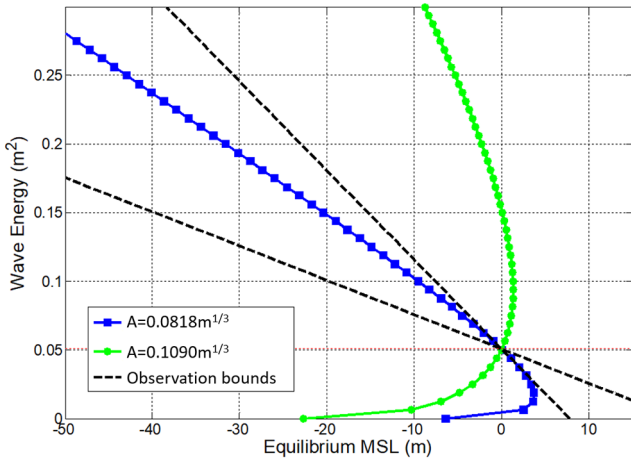


Fig. 5 Comparison between observed and predicted MSL changing rates for Torrey Pines beach (A unit : $m^{1/3}$)

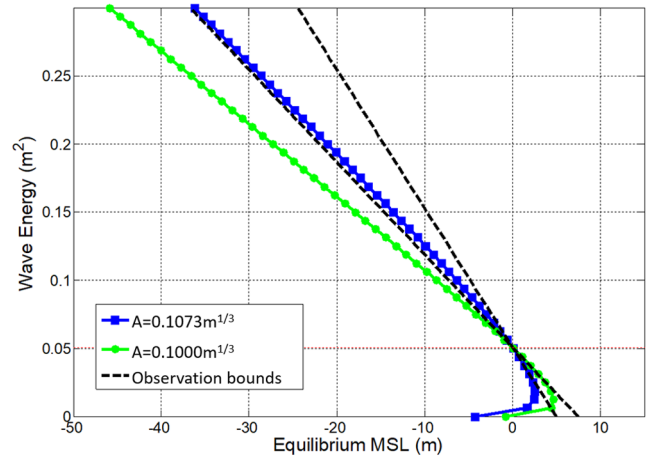


Fig. 7 Comparison between observed and predicted MSL changing rates for Camp Pendleton beach (A unit : $m^{1/3}$)

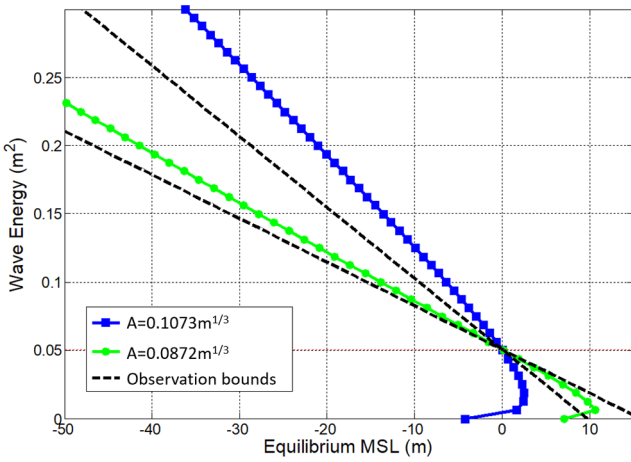


Fig. 6 Comparison between observed and predicted MSL changing rates for Cardiff beach (A unit : $m^{1/3}$)

Cardiff 해변에 대해서는 해변 경사 m 을 평균 해변 경사 값인 33.3으로 적용하고 얻은 결과가 Fig. 6에 도시되었다. Torrey Pines 해변과 마찬가지로 축척 계수는 2가지 값에 대하여 적용되었다. 즉, MSL에서 채취한 모래의 중앙입경을 사용하여 얻은 $A=0.0872m^{1/3}$ 의 경우와 $m=33.3$ 으로부터 식 (10)의 관계를 이용하여 얻은 $A=0.1073m^{1/3}$ 의 두가지 경우이다. Torrey Pines 해변과 달리 전자의 경우 관측 결과와 비교적 유사한 결과를 보이고 있으나 후자의 경우는 해변경사에 비하여 중앙입경이 작게 관측되어서 Table 5의 Observed a 에 제시된 ± 1.0 의 오차 범위 내로 들어오지 못했다.

Camp Pendleton 해변에 대해서도 Cardiff 해변과 같이 해변 경사 m 을 33.3으로 적용하였다. Fig. 7에 그 결과가 도시되었다. MSL에서 채취한 모래의 중앙입경을 사용하여 얻은 $A=0.10m^{1/3}$ 의 경우와 $m=33.3$ 으로부터 얻은 $A=0.1073m^{1/3}$ 의 경우이다. Torrey Pines 해변과 마찬가지로 후자의 경우 관측 결과와 좀 더 유사한 결과를 보이고 있으나 전자의 경우는 해변경사에 비하여 중앙입경이 작게 관측되어서 Table 5의 Observed a 에 제시된 ± 1.7 의 오차 범위 내로 들어오지 못했다. 그러나 수심 1~2m에서 관측된

중앙입경이 MSL에 비하여 훨씬 큰 것을 감안하면 본 연구 성과를 충분히 만족시킬 수 있는 해변 조건을 갖춘 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면 Dean(1977)의 평형해빈단면식을 이용하여 유입파랑 에너지 또는 유입파고로부터 해안선이 반응하는 것을 손쉽게 예측할 수 있으리라 판단된다. 축척계수 또는 중앙입경이 커질수록 해안선의 반응은 둔화되며 해변 단면 특성을 결정하는 축척계수와 해변경사 간의 밀접한 상관관계가 존재할 것으로 판단된다. 식 (6)을 적용하는 경우 식 (11) 또는 식 (12)로부터 직접 해안선의 상관계수 a 를 얻은 결과와 비교하여 에너지와 해안선의 상관계수를 통하여 예측한 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 식 (6)은 평균파고보다 작은 파랑이 유입하는 경우 해안선이 오히려 음수의 S_{eq} 를 보이며 침식되는 결과를 보이고 있어 이에 대하여 향후 현장 자료와의 비교를 통하여 확인이 필요하다. 당장 이러한 문제점은 식 (6)을 직접 이용하는 것이 아니라 식 (8)을 적용하면 해결될 수 있다. 그러나 향후 현장 관측을 통하여 저파랑이 유입되는 경우는 물론 전반적으로 본 논문에서 제시한 개념의 타당성이 확인될 필요성은 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 미국 캘리포니아 해변에서 수행된 Yates et al.(2009)의 현장관측 실험 결과로서 얻은 유입파랑 에너지와 수렴해안선위치와의 상관관계 계수들의 편리한 추정을 위하여 Dean(1991)의 평형해빈단면의 축척계수 A 와 평균해빈단면 경사 m 으로부터 유입 파랑 에너지와 수렴 해안선의 간단한 관계식을 제시하였다. 이 식의 결과는 Yates et al.(2009)의 3지점에서 제시된 상관관계 계수와 비교되었으며 대체로 만족할만한 결과를 얻었다. 또한 Yates et al.(2009)의 실험 결과로부터 평형해빈단면의 축척계수 A 와 평균해빈단면 경사 m 간의 관계를 분석하였으며 이 결과를 이용하여 유입파랑 에너지에 민감한 중앙입경보다 둔감한 해빈단면경사를 이용하면 Yates의 결과와 좀 더 안정적이면서도 유사한 결과를 낳는 것으로 분석되었다.

따라서 Yates et al.(2009)과 같은 현장관측 실험을 수행하지

않아도 횡단표사로부터 발생하는 해안선의 전진 및 후퇴 경향을 유입하는 파랑 에너지의 함수로 쉽게 추정할 수 있는 방법인 것으로 평가되며, 특히 고파랑 내습으로 인한 해안침식을 완화하기 위한 대표적으로 해안구조물인 잠제 및 이안제의 침식저감 기능 설계에도 중요한 정보를 제공할 수 있는 것으로 판단된다. 향후 국내의 해안선 모니터링 자료와 해빈 단면 모니터링 자료를 적용하여 좀 더 정밀한 비교 및 검증이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 “연안침식 저감기술 개발” 성과 중 일부이며, (주)대영엔지니어링의 “침식저감 해안구조물의 배치설계 연구”의 연구비 지원과 공동 논의 결과로 구체적 성과를 이루었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bruun, P., 1954. Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. Technical Memorandum No. 44, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Bruun, P., 1962. Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88(1), 117-132.
- Cheon, S.H., Ahn, K.M., 2008. Numerical Simulation of Beach Profile Changes. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(1), 101-109.
- Dean, R.G., 1977. Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Technical Report No. 12, Department of Civil Engineering, University of Delaware.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53-84.
- Dean, R.G., Walton, T.L., Kriebel, D.L., 2001. Cross-shore sediment transport. *Coastal Engineering Manual*, U.S. Army Coastal and Hydraulics Laboratory.
- Dubois, R.N., 1990. Barrier-beach erosion and rising sea level. *Geology*, 18(11), 1150-1152.
- Kim, D.S., Lee, K.L., 2015. Seasonal Changes of Shorelines and Beaches on East Sea Coast, South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 50(2), 147-164.
- Kriebel, D.L., Dean, R.G., 1993. Convolution Method for Time-Dependent Beach Profile Response. *Journal of Waterway, Port, Coastal Ocean Engineering*, 119(2), 204-226.
- Larson, M., Kraus, N.C., 1989. SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change - Report 1 Empirical Foundation and Model Development. Technical Report, CERC-89-9, US Army Corps of Engineering.
- Lee, J.L., Kim, I.H., 2006. A Survey and Analysis of Swim Zone Width and Beach Scale Factor for Gangwon Beaches. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 18(3), 241-250.
- Miche, R., 1944. Mouvement Ondulatoires De La Mer en Profondeur Constante ou Decroissante. *Annales de Ponts et Chaussees*.
- Miller, J.K., Dean, R.G., 2004. A Simple New Shoreline Change Model. *Coastal Engineering*, 51(7), 531-556.
- Moor, B.D., 1982. Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height. MCE Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, 164.
- Park, J.C., Han, K.M., Kim, J.J., 1993. A Study on the Numerical Model for Predicting Shoreline Changes. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 7(1), 156-161.
- Plant, N.G., Holman, R.A., Freilich, M.H., 1999. A Simple Model for Interannual Sandbar Behavior. *Journal of Geophys. Res.*, 104(C7), 15755-15776.
- Son, C.B., 1993. Prediction of Potential Shoreline Retreat by Sea Level Rise. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 11(1), 34-40.
- Son, C.B., Lee, S.K., 2000. An Experimental Study on the Shoreline Change during Beach Process. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 14(3), 55-60.
- Suh, K.D., Dalrymple, R.A., 1988. Expression for Shoreline Advancement of Initially Plane Beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 114(6), 770-777.
- Yates, M.L., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., 2009. Equilibrium Shoreline Response: Observations and Modeling. *Journal of Geophysical Research*, 114(C9), C09014.

Performance Test of Parabolic Type Equilibrium Shoreline Formula Using Wave Data Observed in East Sea

Chang Bin Lim^{ID*} and Jung Lyul Lee^{ID**}

^{*}School of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^{**}School of Water Resources Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

동해 파랑관측 자료를 활용한 포물선형 평형해안선 식의 타당성 조사

임창빈^{ID*} · 이정렬^{ID**}

^{*}성균관대학교 건설환경시스템공학부

^{**}성균관대학교 수자원대학원

KEY WORDS: East Coast 동해안, Groyne 돌제, Wave directional spectrum 파향스펙트럼, Wave rose 파랑장미도, Littoral drift rose 연안표사장미도, Shoreline gradient 해안선 기울기

ABSTRACT: The present study investigated the validity of an equilibrium shoreline empirical formula for real phenomena. Among three types of equilibrium shoreline formulas, Hsu's parabolic type static formula was employed, which is well-known and the most practical for shoreline estimation after coastal or harbor structure construction. The wave data observed at Maengbang beach and the CERC formula on longshore sediment transport were used in the present investigation. A comparison study was only conducted for the case of a shoreline change after the construction of a groyne. Reasonable agreement was seen between the observed wave data and the data obtained under a wave angle spreading function $S = 3.5$. However, significant changes were observed when S increased. Thus, careful application is required when using Hsu's formula

1. 서 론

오늘날 전 세계적으로 해안에는 항만구조물 뿐만 아니라 다양한 해안구조물 등 많은 인공 구조물들이 파랑의 제어나 표시의 제어를 위하여 해안가에 설치되고 있다. 항만 구조물이 들어서는 경우 주변 해역의 파랑장의 변화가 발생하여 궁극적으로 해안선의 변화가 초래된다. 우리나라의 경우 연안침식 문제를 유발한 사례는 매우 많은 실정이다. 대표적인 사례만 들면 강원도 속초시의 속초항, 강릉시의 강릉항, 삼척시의 궁촌항과 LNG (Liquefied natural gas)기지, 경북 포항시의 포항신항, 전북 고창군 구시포항, 제주도 서귀포시의 성산항 등의 항만 구조물이 그런 예이다. 그러나 그 변화를 예측하는 데 있어서 아직도 기술적으로 많은 불확실성이 존재한다.

특히 침식 문제를 해결하기 위하여 연안 해역에 배치되는 해안구조물이 오히려 더 심각한 침식문제를 야기하기도 하는 국내 사례는 해안공학의 국내 기술 수준이 아직도 선진국 수준에 도달하지 못하였다는 것을 반증한다. 대표적인 사례는 강원 속

초시의 영랑해변의 헤드랜드 공법의 배치 부실설계이다. 심지어 이런 실패 사례가 있었음에도 비슷한 형태의 항만구조물을 설치하여 유사한 침식 사례를 낳고 있는 경북 울진군 봉평해안의 헤드랜드 공법의 사례이다. 최근 Kang et al.(2010)은 강원 속초시 영랑해변의 침식 사례를 활용하여 해빈침식대책으로 건설된 인공구조물 축조 후 해안선 침식 현상을 정성적으로 관찰하였다. 그리고 이를 통해 올바르게 많은 해안구조물의 건설은 오히려 더 심한 침식피해를 일으킬 수 있음을 증명하였다. 또한 잠제의 본래의 기능은 고파랑 제어와 이에 의한 침식 폭저감임에도 연안표사 제어가 필요한 침식 해변에서도 무분별하게 남용하는 일련의 사례는 국내 연안 침식문제 해결에 있어 아직도 해안구조물의 배치설계 수준이 전문성을 갖추지 못한 민낯을 드러내고 있음을 반증한다.

최근 이러한 항만 및 해안 구조물의 설치에 따른 해안선의 새로운 변화를 예측하기 위한 실제 지형과의 맞춤에 의한 모방 연구, 현장 조건을 비슷하게 재현하는 수리모형 실험 연구, 그리고 모의 계산 기술을 활용한 수치모형 개발 연구 등이 활발

Received 22 March 2018, revised 21 April 2018, accepted 23 April 2018

Corresponding author Jung-Lyul Lee: +82-31-290-7519, jllee@skku.edu ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9410-9725

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

히 이루어지고 있다. 표사이동 메커니즘에 기반을 두게 된 수치 모형은 단기적인 침퇴적율의 예측에는 제한적인 신뢰성을 갖추고 적용되고 있다. 그러나 아직 해저면 변화가 동반된 1~2년 이상의 장기적인 예측에는 적용되지 못하거나 신뢰도가 낮은 수준이다. 따라서 해안구조물의 설치에 따른 해안선 예측 등은 아직도 모방 연구 결과에 크게 의존할 수밖에 없는 실정이다. 최근 Lee and Hsu(2017)는 연안표사량 식과 고파랑에 대한 해안선의 반응 관계를 결합하여 장기적인 연안표사는 물론 단기적인 횡단 표사를 결합한 모형을 개발하였다. 특히 Hsu의 평형해안선으로 수립하도록 하여 불확실성이 많은 장기적인 변화임에도 모의 연구 결과를 반영하여 실용적이면서도 사전 검토 수단으로서 유용한 해안선변형모형을 개발하였다.

평형해안선에 대한 경험식 제시가 대표적인 모방 연구 결과물로서 다음과 같이 3가지 종류가 종종 인용된다. 즉, 로그 나선형(Log spiral; Yasso, 1965), 포물선 형(Parabolic shape; Hsu et al., 1987), 그리고 쌍곡선 탄젠트 형 (Hyperbolic tangent shape; Moreno and Kraus 1999) 등이 있다. 특히 Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식은 Suh and Dalrymple(1987)의 수리 실험 결과와 유사한 결과를 제시하는 경험식이다. 그리고 대부분의 인공구조물 축조 후의 해안선 변형 문제에 있어서 사전에 해안선 변형을 검토하는 데 상당히 유용한 검토 수단으로서 충분한 신뢰성을 확보한 것으로 판단하고 있다(Lee and Hsu, 2017).

Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식은 우리나라 해안선 변화 예측에도 만족할 만한 결과를 도출하고 있는 것으로 판단하고 있는 상태이다. 하지만 아직 그 효용성에 비하여 연안정비사업 등의 침식 저감시설로서의 해안구조물의 배치 설계에 도입되지 못하고 있는 실정이다. Gonzalez et al.,(2010)은 Hsu et al.,(1987)의 평형해안선 경험식을 실제 스페인 Poniente 해변에 적용시켜 장기적인 해안선 변화와 매우 유사한 실험 결과물도 도출함을 통해 타당성을 입증하였다. 그리고 이를 활용하여 양빈 계획을 수립하거나 해안구조물 건설 이후에 해안선 변화를 예측하는 수단으로 활용하게 될 것이다.

Hsu의 평형 해안선 경험식은 이와 같이 특별한 모니터링 자료가 없어도 인공 해안구조물의 축조 후에 해안선 변화를 추정하는데 있어 독보적인 수단인 것으로 평가받는다. 본 연구에서는 Hsu의 평형 해안선 경험식이 파랑 관측 자료와 연안표사량 공식을 통하여 얼마나 타당한지를 평가한다. 또한 파향스펙트럼의 분포 특성에 따라서 평형 해안선이 어떻게 반응하는 지를 살펴본다.

2. Hsu의 평형해안선

2.1 Hsu의 평형해안선 경험식

Hsu et al.,(1987)이 제시한 포물선형의 평형 해안형상 경험식은 다음 식 (1)-(2)와 같이 주어진다.

$$R(\theta) = \frac{a}{\sin\beta} \left[C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \right] \text{ for } \theta \geq \beta \tag{1}$$

$$R(\theta) = \frac{a}{\sin\theta} \text{ for } \theta \leq \beta \tag{2}$$

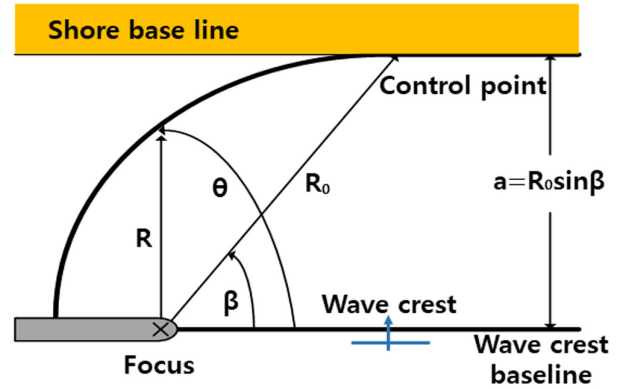


Fig. 1 Definition sketch of Hsu's formula

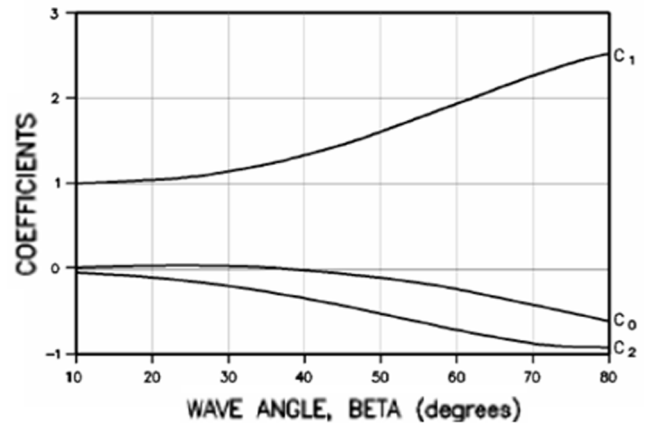


Fig. 2 Coefficients of Hsu's formula (Hsu et al., 1987)

여기서, R 은 포물선 초점(Parabolic focus)로부터 해안선까지의 거리, a 는 초점을 지나는 주파향 파봉선(파봉기준선)과 이와 평행하게 평형기준점(Control point)을 지나 선(해안기준선)과의 이격 거리, β 는 파봉기준선과 초점으로부터 평형기준점을 지나 선이 이루어지는 각도, θ 는 파봉기준선과 초점으로부터 평형해안선을 연결한 선이 이루는 각도, 그리고 C_0 와 C_1 , C_2 는 Fitting 계수이며, Appendix Table A1에 제시된 바와 같이 Hsu and Evans(1989)에 의해 제공되었다. $\theta \geq \beta$ 인 Bay구간과 $\theta \leq \beta$ 인 직선구간이 서로 연결되기 위해서는 계수 3개의 총합이 1이 되어야 한다.

백사장이 길게 발달하여 영향점이 초점에서 멀리 떨어진 경우에는 간단한 근사치를 얻을 수 있다. 이 경우에는 β 의 값이 0에 가까워지면, $\sin\beta$ 가 β 에 수렴하고, C_0 와 C_2 항은 무시할 수 있으며, C_1 은 1에 수렴한다. 그러므로 식(1)에 대한 간단한 근사치는 식 (3)와 같은 간단한 관계식 $R(\theta)$ 로 표현된다.

$$R(\theta) = \frac{\beta}{\sin\beta} \frac{a}{\theta} \tag{3}$$

이 경우에는 초점을 지나 주파향 파봉선과 평형기준점을 지나 선과의 이격거리 a 와 파봉기준선과 초점으로부터 평형해안선을 연결한 선이 이루는 각도 θ 만 알게 된다면 평형해안선을 추정할 수 있게 된다.

2.2 동해의 Hsu의 평형해안선의 회전각 산정

위와 같은 Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식으로부터 동해안의 평형해안선을 추정할 수 있다. Hsu의 평형해안선 경험식 (1)으로부터 θ 방향에 대한 평형해안선의 회전 각도를 구하면 아래의 식 (4)과 같다.

$$\frac{\partial R}{R\partial\theta} = S = -\frac{1}{R} \frac{a}{\theta \sin\beta} \left[C_1 \frac{\beta}{\theta} + 2C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \right] \quad (4)$$

또한 식 (2)의 경우와 같이 만약 β 가 0에 가까워서 연안표사의 상류 경계인 Control point가 무한한 위치에 놓여 있다면 식 (4)에서 C_2 가 0으로 취급되어 아래 식 (5)와 같이 간단한 형태의 수식이 된다.

$$\frac{\partial R}{R\partial\theta} = S = -\frac{\beta}{R \sin\beta} \frac{a}{\theta^2} \quad (5)$$

그리고 Fig. 3에 도시된 바와 같이 기존 해안에 대한 회전각도 ϕ 로 변환하기 위하여 아래 과정이 추가된다.

$$\phi = \theta + \psi - \frac{\pi}{2} = \theta + \tan^{-1}(S) - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

이와 같은 과정을 통하여 Hsu의 평형해안선 경험식으로부터 포물선형 평형해안선의 회전각을 구할 수 있다.

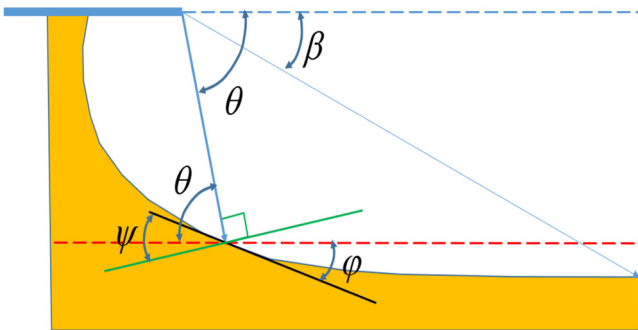


Fig. 3 Definition sketch of equilibrium shoreline gradient ϕ

3. 동해의 방파제 건설 후 해안선 변화 추정

3.1 연안표사공식

연안 표사는 입사 파랑이 해안선에 빗각으로 유입되는 경우에 파랑의 작용으로 연안을 따라 이동한다. 전체 해변단면을 따라 적분된 전연안표사 이동량 Q(Total longshore sediment transport rate)는 아래 식 (7)과 같이 쇄파지점에서의 파력의 크기, 해안선과 파봉선간의 사이각, 표사의 단위중량 등에 따라 산정되며 미공병단에 의하여 제안된 식으로 CERC(Coastal Engineering Research Center)식이라고도 한다.

$$Q_y = \frac{I_y}{(\rho_s - \rho)(1-p)g} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 해수의 비중이고 ρ_s 는 모래 입자의 비중, p 는 0.3~0.4의 값을 갖는 토사 공극율(Sediment porosity), g 는 중력가속도이다. 그리고

$$I_y = K(EC_g)_b \cos\alpha_b \sin\alpha_b = \frac{K}{16} \rho g H_b^2 \sqrt{gh_b} \sin 2\alpha_b \quad (8)$$

여기서 EC_g 는 Wave energy flux이며, H_b 는 쇄파고, h_b 는 쇄파수심, α_b 는 쇄파점에서 해안선과 파봉선간의 사이각, K 는 상수로서 표사량 조건에 따라 대개 작게는 0.04로부터 크게는 1.1까지 다양한 값을 가질 수 있지만 보통 0.77로 간주된다. 식 (8)에서 $H_b = \gamma h$ 로 두고 표사의 단위 중량, 공극율 등 파랑 조건과 관련되지 않은 것을 상수 C' 으로 두고 정리하면 다음과 같이 쇄파고 H_b 와 쇄파입사각 α_b 의 함수로 주어지는 연안 표사량(Longshore sediment transport rate) Q_y 을 얻을 수 있다.

$$Q_y = C' H_b^{5/2} \sin 2\alpha_b \quad (9)$$

여기서 $C' = \frac{K\sqrt{g/\kappa}}{16(s-1)(1-p)}$ 이며 대부분의 모래에 대해 약 0.167의 값을 갖는다. 여기서 $K=0.77$, $g=9.81\text{m/s}^2$, 그리고 대부분의 해사에 적용되는 $s=2.57$, $p=0.35$ 가 적용되었다.

심해 파랑 자료로부터 연안 표사량을 직접 추정하는 것은 상당히 유용하다. 해안의 등수심선이 직선적이고 해안선에 모두 평행하다면 아래와 같이 심해 파 정보로 표현된다.

$$Q_y = C_o' H_o^{2.4} T_o^{0.2} \cos\alpha_o^{1.2} \sin\alpha_o \quad (10)$$

여기서 $C_o' = \frac{Kg^{0.6}}{16(s-1)(1-p)(2\pi)^{0.2}\kappa^{0.4}}$ 이며 대부분의 모래에 대해 약 0.142의 값을 갖는다. 일반적으로 주기가 표사량에 미치는 영향은 무시할 만하다.

해안선 방향에 따라 심해 입사 파향이 달라지므로 Fig. 4에서 정의된 바와 같이 진북으로부터의 해안선의 경사각 χ 를 고려하면 식 (10)의 단위시간당 표사량은 다음과 같이 된다. 해안선의 방향 χ 는 Fig. 4에서 도시된 것과 같이 해안선이 진북(N)을 향하면 $\chi=0^\circ$ 가 되며 동편에 바다가 존재하게끔 방향 설정을 하였다. 따라서 해안선이 $\chi=180^\circ$ 에 대하여 해안선은 진남(S)를 향하고 바다는 서편에 위치하게 된다.

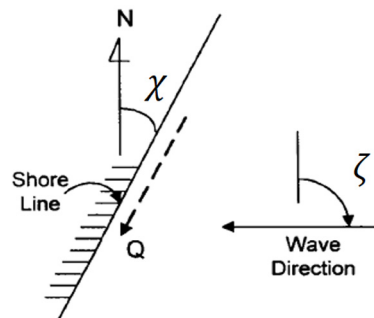


Fig. 4 Definition of the inclination angle of the shoreline from the true north (N) and the wave direction angle of incidence wave

Fig. 4와 같이 정북 N으로부터 정의된 해안선 방향 χ , 입사 파향 ξ 에 따라 식 (11)의 단위시간당 표사량은 다음과 같이 변환된다.

$$Q_y = \frac{Kg^{0.6}H_o^{2.4}T_o^{0.2}\cos\zeta^{1.2}\sin\zeta}{16(s-1)(1-p)(4\pi)^{0.2}\kappa^{0.4}} \quad (11)$$

여기서 $\zeta = \xi - \chi - \pi/2$ 이고 표사량의 양수(+)는 북쪽을 향하고 음수(-)는 남쪽을 향한다. 또한 식 (10)과 같이 상수를 도입하여 표현하면 아래와 같이 입사파랑 조건으로 표현된다.

$$Q_y = C_o' H_o^{2.4} T_o^{0.2} \cos\zeta^{1.2} \sin\zeta \quad (12)$$

3.2 입사파랑의 특성 분석

2013년 9월 27일부터 10시 30분부터 2016년 11월 21일 9시 30분까지 삼척시 맹방 해변 전면 (위도: 37°24' 00.0" N, 경도 129°14' 05.2" E)의 수심 32.4m에서 관측되어 30분 간격으로 산출된 총

55,235data에 대한 파고, 주기 및 파향의 시계열 변화가 Figs. 6, 7, 8에 각각 도시되었다. 계절별 특성을 파악하기 쉽도록 봄(Green), 여름(Blue), 가을(Red), 겨울(Black)을 색깔별로 다르게 도시하였다.

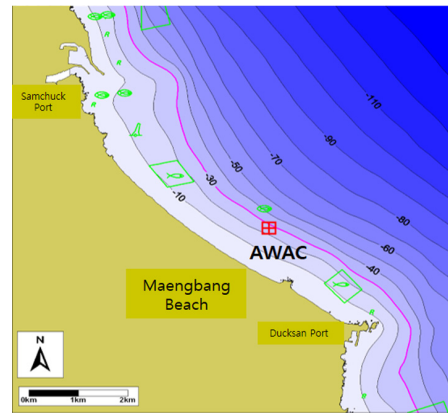


Fig. 5 Location of wave gage (AWAC)

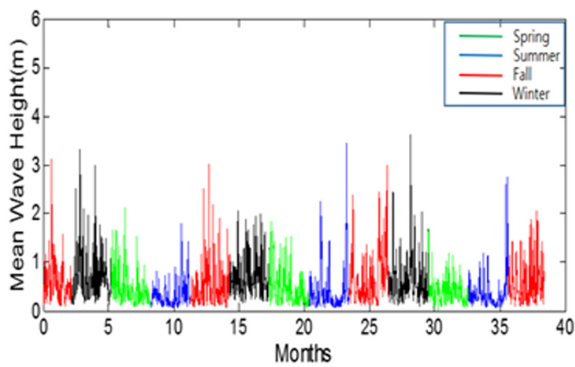


Fig. 6 Temporal variation of wave height

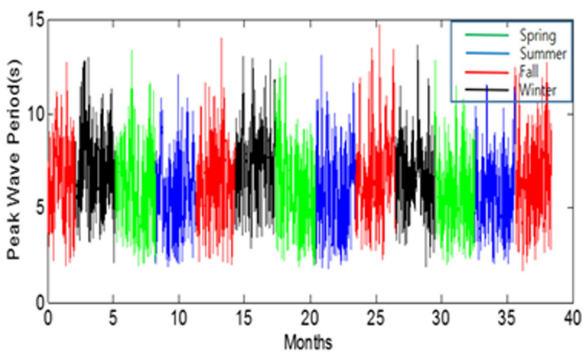
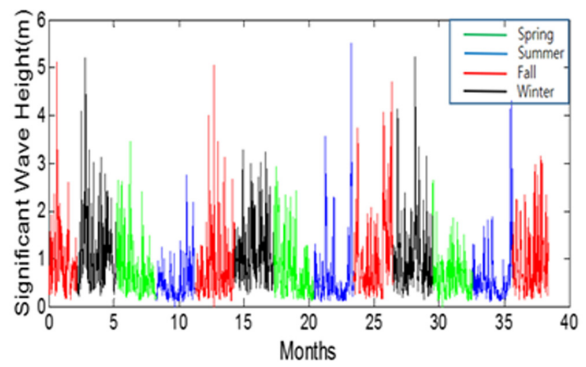


Fig. 7 Temporal variation of period

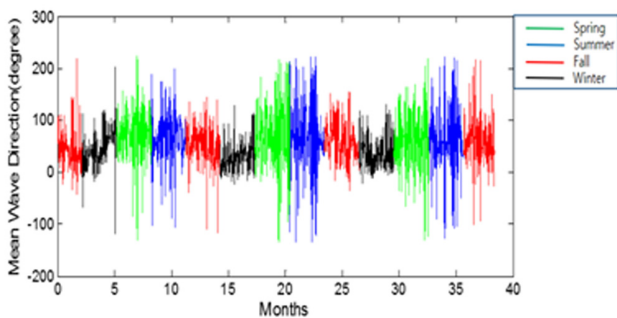
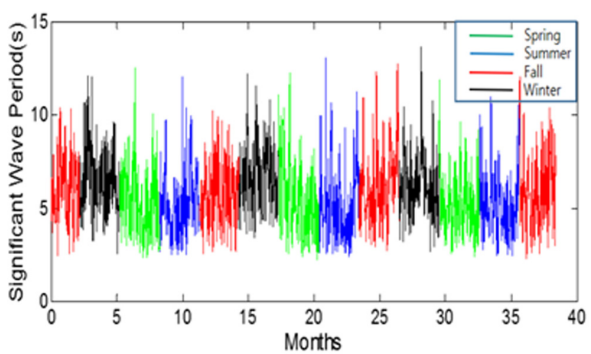
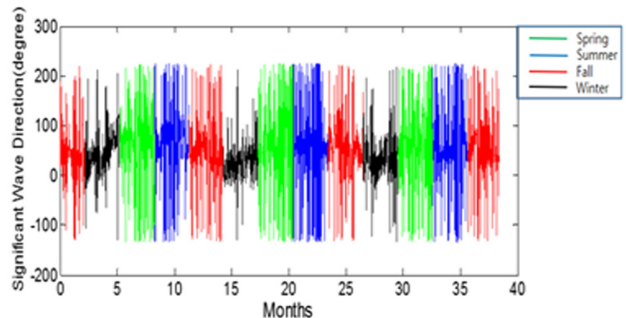


Fig. 8 Temporal variation of wave direction



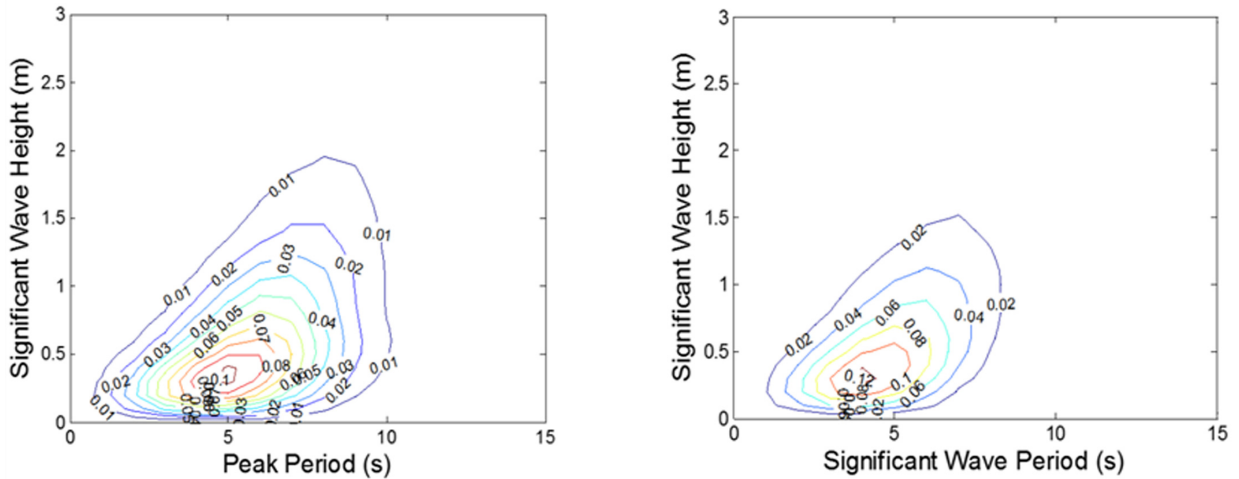


Fig. 9 Joint probability distribution of wave height-wave period

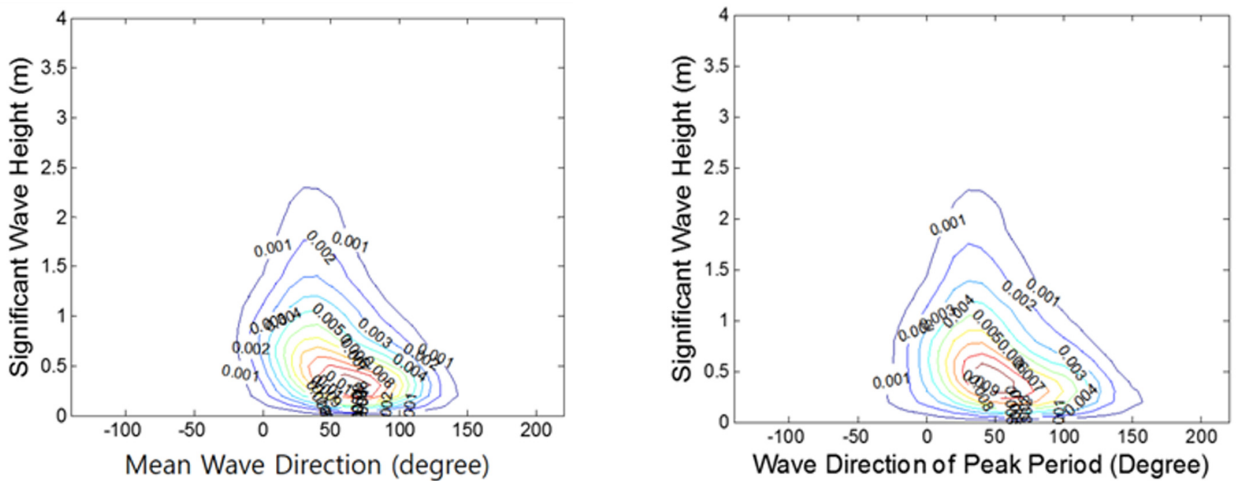


Fig. 10 Joint probability distribution of wave height-wave direction

Figs. 9-10은 파고와 주기 그리고 파고와 파향의 상관성(Correlation)을 파악하기 위하여 Joint probability를 도식한 것이다. 최고 빈도 입사 파고가 0.5m보다 작고, 최고 빈도 입사 파향은 NE인 것으로 파악되고 있다.

위의 파랑자료를 이용하여 현재 파랑의 주 입사 방향을 기준으로 파랑 스펙트럼의 파향분포도를 도식하면 Fig. 11과 같다. 이 파향분포도는 수심 32.4m에 관측된 파랑 정보이므로 Fig. 5에 도식된 수심 자료에서처럼 등수심선이 직선적이고 해안선과 거의 평행한 것으로 간주될 수 있다고 보고 심해에서의 파향분포도를 함께 도식하였다. 또한 Mitsuyasu and Mizuno(1976)의 파향분포함수와 비교하여 E계열(0°~ 90°)은 비교적 분포가 완만하여 S=8 정도인 것으로 간주되고 N계열(-90°~0°)은 비교적 뾰족하여 S=20정도인 것으로 간주된다. Mitsuyasu의 파향분포함수는 S의 함수로 아래 식과 같이 주어진다. 단, Fig. 11의 파향분포함수는 연평균 파랑 자료로부터 도식된 것으로 Event성 단기 파랑 자료의 파향분포 함수보다 좀 더 완만한 분포 특성을 보인다.

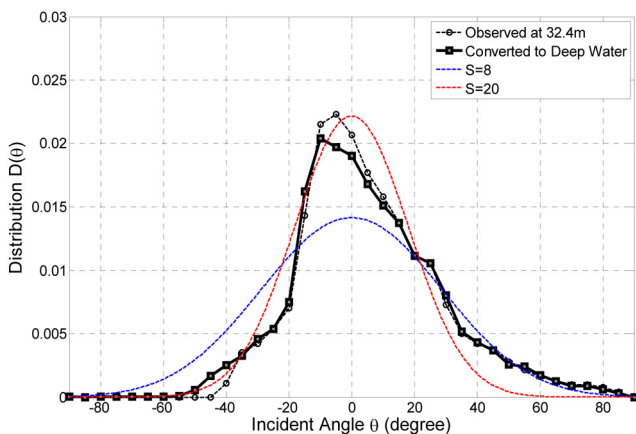


Fig. 11 Wave direction distribution measured at 32.4m water depth on Maengbang beach

$$D(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma^2(S+1)}{\Gamma(S+1/2)} \cos^2s\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (13)$$

현재의 해안선 구배에 대한 연안표사량의 분포가 Fig. 12에 도식되었다. 겨울철 유입되는 파랑 계열은 남쪽으로의 표사이동을 유발하며 여름철 유입되는 파랑 계열 E Group에 대하여 북쪽으로는 표

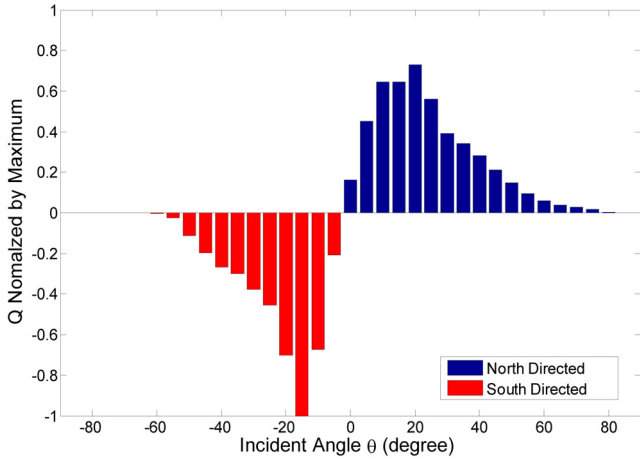


Fig. 12 Distribution of Littoral Drift Q w.r.t. Incident Wave Angle

사이동을 유발하며 현재 해안선의 장기적인 변화가 없다면 북측과 남측 연안표사량의 총량은 균형을 이뤄서 Fig. 12와 같이 총 연안표사량은 0이 되어야 한다. 그러나 구조물이 들어서면 유입 파랑의 차단이 발생하여 이 연안표사량이 새로운 균형을 이루도록 해안선의 구배가 바뀌며 새로운 평형해안선으로서의 변화가 발생한다.

4. Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식 신뢰성 검토

4.1 연안표사량에 의한 평형해안선과 Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식 비교

본 절에서는 파랑 자료로부터 평형해안선을 추정하는 방법론을 제시하며 또한 Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식이 얼마나 타당한지를 살핀다. 평형을 이루는 해안선은 연평균 연안표사량이 0이 되는 경우로 가정할 수 있다. 물론 표사계에서 순연안표사량이 존재하는 특수한 경우는 이에 대한 영향을 보정하는 것이 필요하지만 본 연구에서는 순연안표사량이 존재하지 않는다고 가정한다. 따라서 이안제나 방파제 등 구조물이 설치되는 경우 해안으로의 파랑 유입 환경의 변화로 해안선이 변화하는데 파랑 환경의 변화로 인하여 발생하는 연간 누적된 연안표사량의 값이 0이 되는 해안선 기울기를 평형해안선 기울기(Angle of static shoreline gradient)로 가정한다.

Fig. 13는 T형 돌체가 무한한 길이의 직선적인 사질 해안에 설치되는 경우의 우측 해안에서의 해안선 기울기의 변화가 발생하는 경우이다. θ 가 30, 60, 90, 120, 150°에 대하여 파랑장미도와 연안표사장미도가 함께 도시되었다. 여기서 파랑장미도의 각 파향성분 i 가 해안선 위치에서 입사파향이 Focus F 를 통해서 입사하는 경우 회절계수 0.5를 갖도록 하고 주변 파향 45°폭에서 구조물 배후에서 회절 효과가 반영되도록 아래와 같이 간단한 식에 의하여 회절 영향을 반영하였다. 구조물 배후에서의 수심은 평형에 이르기까지 지속적으로 변화하므로 정확한 회절 영향을 반영하기 쉽지 않으므로 이와 같이 간단하게 처리되었다.

$$K_d(\zeta_i) = \cos^2[2(\zeta_i - \theta - \pi/8)] \text{ for } -\pi/8 \leq (\zeta_i - \theta) \leq \pi/8 \quad (14)$$

전술한 바와 같이 관측된 파랑 정보를 심해 정보로 변환한 후 구

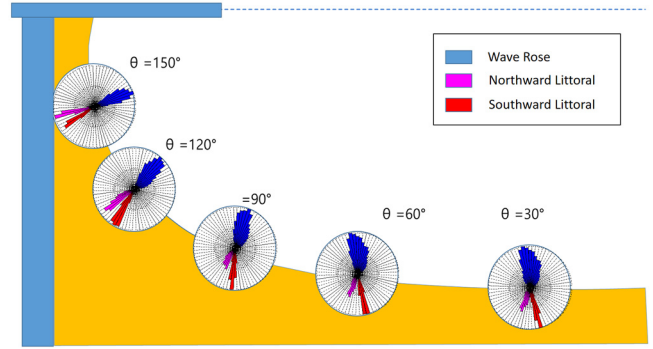


Fig. 13. Wave roses (blue) and littoral drift roses (red) w.r.t $\theta=30, 60, 90, 120, 150^\circ$

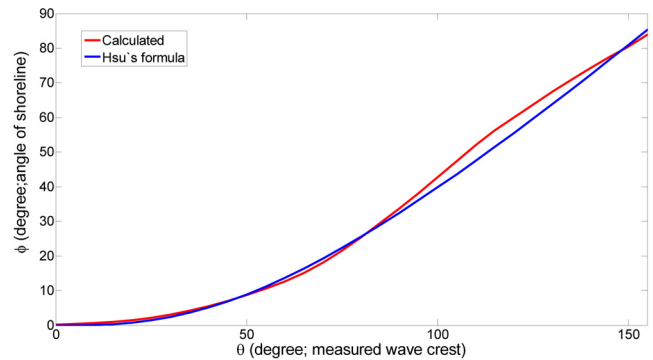


Fig. 14 Comparison of estimated shoreline gradient and shoreline gradient obtained from the Hsu's formula

조물에 의하여 차단 또는 회절이 되는 파랑 효과를 반영하고 식 (10)의 연안표사량 공식을 이용하여 연안표사량이 0이 되는 해안선 구배 ϕ 를 $\theta=0^\circ$ 부터 $\theta=160^\circ$ 까지 계산한 결과가 Fig. 14에 실선으로도 도시되었다. 또한 식 (6)의 Hsu의 경험식과 비교한 결과가 함께 파선으로도 도시되었다. 대부분 동해에 위치한 항만 구조물과 같이 Fig. 13과 같이 T형 돌체 구조물이 좌측 편에 놓여있는 관계로 $S=8$ 인 E계열 파랑이 해안선 변화에 영향을 미친 것으로 판단된다.

식 (15)의 적분 기법에 의하여 파랑 자료로부터 얻은 평형해안선 기울기 ϕ 는 Fig. 16과 같이 평형해안선으로 변환될 수 있다.

$$y = \sum_{i=1}^N (\tan \varphi) \times dx \quad (15)$$

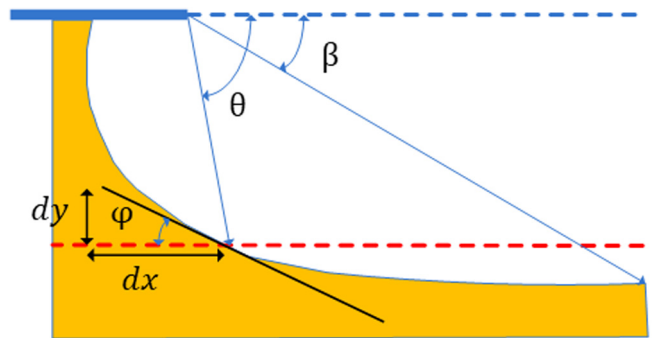


Fig. 15 Definition sketch of estimating the shoreline by integrating shoreline gradients

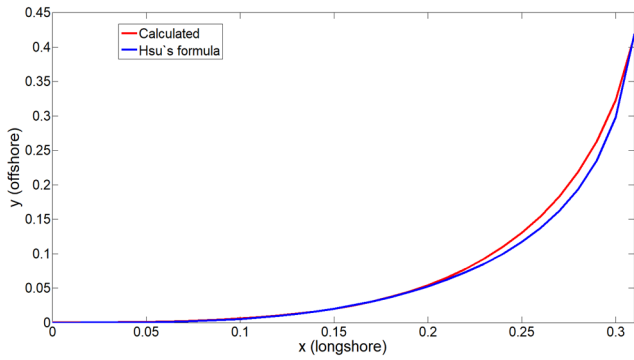


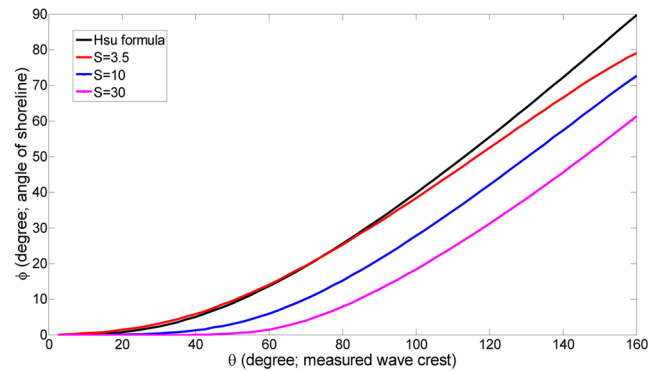
Fig. 16 Comparison of estimated shoreline and empirical shoreline of Hsu et al.(1987)

여기서, φ 는 원래의 직선 해안선에 대한 회전각, y 는 원래의 직선 해안선과 평형해안선의 수직거리 그리고 x 는 기준점에서부터 평형해안선의 수평거리이다. Fig. 16은 θ 의 값에 따른 φ 의 값을 추정된 평형해안선과 Hsu의 평형해안선을 비교한 것이다.

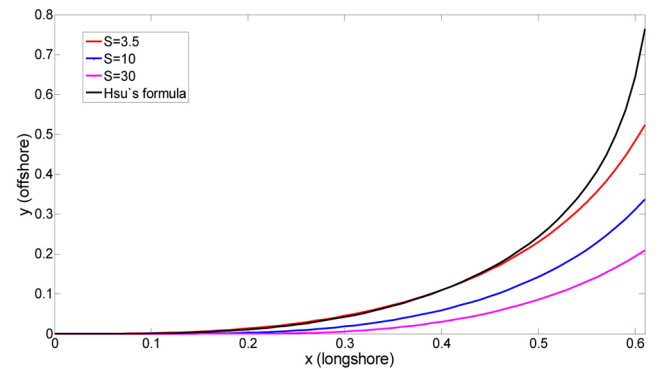
4.2. 파향스펙트럼 분포의 민감도 분석

본 절에서는 파향분포도에 따라 평형 해안선이 어떻게 변하는 지를 살펴보았다. 식 (13)에서 파향 집중도 계수 $S=5, 10, 20, 30$ 에 대하여 파향 별 파고분포 특성에 따라 동일 구조물이 배치된 조건에서 추산되는 평형 해안선의 구배 변화와 위치 변화를 살펴보았다. S 값에 따른 파향 스펙트럼의 분포도가 Fig. 17에 도시되었으며 평형 해안선의 기울기 변화와 위치 변화는 Fig. 18에 각각 도시되었다. 파향분포함수에 따라 평형해안선이 다소 다른 경향을 보이고 있으며 Mitsuyasu의 분산계수 S 가 3.5일 때 Hsu et al.(1987)의 경험식과 비교하여 전반적으로 잘 일치하는 경향을 보이고 있지만 S 가 커질수록 해안선 구배는 점점 완만해지고 구조물 배후에서 해안선 전진 폭이 크게 감소함을 알 수 있었다. S 가 커진다는 것은 Fig. 17에서 알 수 있듯이 파랑에너지의 파향 분산성이 작고 집중도가 크다는 것을 의미한다.

그러나 연간 파향별 파고스펙트럼의 분포는 Event성 단기 파랑 자료의 분포와 비교하여 분명히 좀 더 완만한 분포 특성을 보일 것으로 판단되며 이에 대한 좀 더 정밀한 파랑 자료의 조사 분석이 요구된다. 만약 연간 파향별 심해파고의 스펙트럼이 파향 집중도 계수 S 가 3.5에서 크게 벗어나지 않아 평형 해안선



(a)



(b)

Fig. 18 Comparison of estimated and Hsu's results in terms of shoreline gradient(a) and shoreline position(b)

의 변화 폭이 작다면 S 에 따른 보정 없이 Hsu의 경험식의 직접 활용도가 클 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라 동해안에서 관측된 파랑 자료로부터 평형해안선을 추정하는 방법론을 제시하며 또한 Hsu et al.(1987)의 평형해안선 경험식과 비교하여 그 식이 우리나라 해안에 얼마나 타당한지를 살펴보았다. 관측된 파랑 자료로부터 평형해안선의 구배를 추정하는 방법을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 관측된 파랑 정보를 심해 정보로 변환한 후, 둘째 구조물에 의하여 차단 또는 회전되는 파랑 효과를 반영하고, 마지막으로 연안표사량 공식을 이용하여 연안표사량이 0이 되는 해안선 기울기가 결정된다. 이와 같은 방법을 통하여 동해안 파랑 관측 자료를 이용한 평형해안선과 Hsu의 평형해안선 경험식의 비교 · 검토하였으며 해안선의 모양이 비슷한 추세를 보이고 있음을 확인하였다.

그러나 파향분포함수에 따라 평형해안선이 다소 다른 경향을 보이며 Mitsuyasu의 분산계수 $S=3.5$ 일 때 Hsu의 경험식과 가장 잘 일치하였다. 하지만 S 가 커질수록 해안선 기울기는 점점 완만해지며 구조물 배후에서 해안선 전진 폭이 무시하기 어려울 정도로 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 파랑 정보가 없는 경우는 Hsu의 경험식을 적용할 수밖에 없지만 만약 입사파랑 정보의 획득이 가능하다면 이의 영향을 분명히 반영할 필요가 있다고

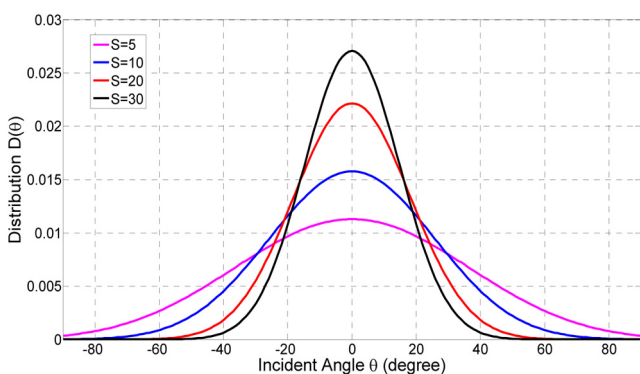


Fig. 17 Wave direction distribution of wave spectrum according to S value

판단된다. 앞으로 Hsu의 경험식을 동해안의 현장 관측된 해안선 자료와의 비교 및 검토를 통하여 더욱 활용성이 높아질 것이라 예상된다. 그리고 동해뿐만 아니라 서해와 남해에서도 Hsu의 평형해안선 공식의 신뢰성 검토를 통하여 경험식의 타당성을 좀더 밝힐 수 있을 것이라 예상된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 “연안침식 저감기술 개발” 성과 중 일부이며, (주)한국항만기술단의 “침식저감 해안구조물의 배치설계 연구“ 의 연구비 지원과 공동 논의로 구체적 성과를 이루었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 관측된 파랑 정보를 기꺼이 제공해주신 (주)지오시스템리서치 연구진에게도 감사의 말씀드립니다.

References

Gonzalez, M., Medina, R., Losada M., 2010. On the Design of Beach Nourishment Projects Using Static Equilibrium Concepts: Application to the Spanish Coast. *Journal of Coastal Engineering*, 57, 227-240.

Hsu, J.R.C., Silvester, R., Xia, Y.M., 1987. New Characteristics of Equilibrium Shaped Bays. *Proceedings of 8th Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 140-144.

Hsu, J.R.C., Evans, C., 1989. Parabolic Bay Shapes and Applications. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, London, Part 2, 87, 557-570.

Kang, Y.K., Park, H.B., Yoon, H.S., 2010. Shoreline Changes Caused by the Construction of Coastal Erosion Control Structure at the Youngrang Coast in Sockcho, East Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 13(4), 296-304.

Lee, J.L., Hsu, J.R.C., 2017. Numerical Simulation of Dynamic Shoreline Changes Behind a Detached Breakwater by Using an Equilibrium Formula. *Proceedings of ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, OMAE2017-62622, V07AT06A036-V07AT06A036.

Mitsuyasu, H., Mizuno, S., 1976. Directional Spectra of Ocean Surface Waves. *Proceedings of Coastal Engineering*, 329-348.

Moreno, L.J., Kraus, N.C., 1999. Equilibrium Shape of Headland-bay Beaches for Engineering Design. *Proceedings of Coastal Sediments*, ASCE, 860-875.

Suh, K.D., Dalrymple, R.A., 1987. Offshore Breakwaters in Laboratory and Field. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 113(2), 105-121.

Yasso, W.E., 1965. Plan Geometry of Headland-bay Beaches. *Journal of Geology*, 75(5), 702-714.

Appendix

Table A1 Hsu and Evans(1989) parabola's coefficients

β	C_0	C_1	C_2
20	0.054	1.040	-0.094
22	0.054	1.053	-0.109
24	0.054	1.069	-0.125
26	0.052	1.088	-0.144
28	0.050	1.110	-0.164
30	0.046	1.136	-0.186
32	0.041	1.166	-0.210
34	0.034	1.199	-0.237
36	0.026	1.236	-0.265
38	0.015	1.277	-0.296
40	0.003	1.322	-0.328
42	-0.011	1.370	-0.362
44	-0.027	1.422	-0.398
46	-0.045	1.478	-0.435
48	-0.066	1.537	-0.473
50	-0.088	1.598	-0.512
52	-0.112	1.662	-0.552
54	-0.138	1.729	-0.592
56	-0.166	1.797	-0.632
58	-0.196	1.866	-0.671
60	-0.227	1.936	-0.710
62	-0.260	2.006	-0.746
64	-0.295	2.076	-0.781
66	-0.331	2.145	-0.813
68	-0.368	2.212	-0.842
70	-0.405	2.276	-0.867
72	-0.444	2.336	-0.888
74	-0.483	2.393	-0.903
76	-0.522	2.444	-0.912
78	-0.561	2.489	-0.915
80	-0.600	2.526	-0.910

Table A2 Comparison of calculated shoreline of the East Sea and empirical formulas of Hsu et al., (1987)

θ	calculated shoreline	Hsu's shoreline
0	-0.2	0
5	-0.4	0
10	-0.6	-0.1
15	-1	-0.3
20	-1.4	-0.8
25	-2.1	-1.4
30	-3.1	-2.4
35	-4.2	-3.6
40	-5.5	-5.1
45	-7	-6.9
50	-8.7	-8.9
55	-10.6	-11.2
60	-12.7	-13.7
65	-15.1	-16.4
70	-18.1	-19.3
75	-21.6	-22.4
80	-25.4	-25.6
85	-29.5	-29
90	-33.7	-32.5
95	-38.1	-36.1
100	-42.7	-39.8
105	-47.4	-43.6
110	-52	-47.5
115	-56.3	-51.5
120	-60	-55.5
125	-63.7	-59.6
130	-67.4	-63.8
135	-70.9	-68
140	-74.2	-72.3
145	-77.4	-76.6
150	-80.5	-80.9
155	-83.9	-85.3
160	-88.3	-89.7

Performance Comparison of Control Design for Unmanned Underwater Vehicle

Sung-Hyeon Joo*, Seon-Je Yang*, Tae-Yong Kuc^{ID*}, Jong-Koo Park*, Yong-Serk Kim*, Nak-Yong Ko** and Yong-Seon Moon***

*Department of Electrical and Electronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

**Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

***Department of Electronic Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

무인 잠수정의 제어 성능 비교 연구

주성현* · 양선제* · 국태용^{ID*} · 박종구* · 김용석* · 고낙용** · 문용선***

*성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

**조선대학교 전자공학과

***순천대학교 전자공학과

KEY WORDS: Backstepping control 백스텝핑 제어, Phase-locked-loop control 위상 고정 루프, Underwater vehicle 수중 운동체, Remotely operated vehicle 원격조종장비, Unmanned underwater vehicle 무인 잠수정

ABSTRACT: In this paper, we propose an adaptive backstepping controller to control the exact position and orientation of a remotely operated underwater vehicle with parametric model uncertainty. To further improve the angular velocity control precision of each thruster, a phase locked loop (PLL) controller has been added to the backstepping controller. A comparison of two backstepping controllers with and without the PLL control loop has been performed using simulations and experiments. The test results showed that the tracking performance could be improved by using the PLL control loop in the proposed adaptive backstepping controller.

1. 서 론

무인 잠수정(UUV, Unmanned underwater vehicle) 중 대표적인 ROV(Remotely operated vehicle)는 원격으로 조종되는 심해자원 탐사 및 개발용 무인 잠수정이다. 육상 또는 수상의 운용시스템에서 원격으로 제어가 가능하여 사람이 작업하기 힘든 해저 환경에서 사람을 대신해 해저 자원의 탐사, 침몰된 선박의 인양 작업, 바다 밑바닥의 기름 제거 작업, 해저 케이블 설치, 각종 수중 구조물의 설치 및 수리 등에 사용된다. 이러한 수중환경은 조류의 방향이나 속도가 깊이에 따라 달라지고 변화가 심하므로 다양한 임무수행을 하는 ROV의 자세 유지를 위한 정밀한 제어시스템이 필요하다. 따라서 ROV와 같은 무인 잠수정의 활용이 늘어나는 최근 추세에 맞추어 무인 잠수정의 제어를 위한 다양한 제어기법의 개발과 적용 연구가 보고되고 있다. 예를 들

면, 슬라이딩 모드 제어(Sliding mode control)의 경우 선형화 없이 직접 비선형 동역학을 처리할 수 있는 장점을 가진 반면 제어방법이 복잡하고 많은 변수를 처리하기 어려운 점이 있다(Soylu et al., 2008; Raygosa-Barahona et al., 2011). 외부 환경의 변화에 따른 시스템 모델의 불확실성에 대처하기 위한 적응 제어(Adaptive control)의 경우 모델 기반 적응제어는 이상적인 모델을 만들어 추종 신호를 생성하는 방식과, 비모델 기반 적응제어는 제어 성능 특성을 나타내는 평가값을 정해 이를 기반으로 제어 변수를 바꾸는 방식이 있다. 그러나 비선형 모델에 대해서 많은 연산량이 요구되고, 모델이 복잡할수록 적용하기가 어렵다는 단점이 있다(Antonelli et al., 2004).

또 다른 제어 기법 중 신경 네트워크 제어(Neural network control)는 제어대상과 관련된 변수들을 설정하고 이들의 결합과 결합의 가중치를 변수로 설정하는 제어 기법이다. 이 제어 기법

Received 21 August 2017, revised 1 February 2018, accepted 5 February 2018

Corresponding author Tae-Yong Kuc: +82-31-290-7137, tykuc@skku.edu ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5816-0088

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2017 in Pangyo.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

은 가중치를 결정하는 중간층 설계가 어렵다. 그리고 층의 개수가 증가하면 제어 정밀도는 증가하지만 연산량이 증가하여 많은 연산시간이 요구된다(Yuh, 1990).

그 외 비선형 추종제어 방법 중 하나인 백스텝핑 제어(Backstepping control)는 목표치가 변할 때 그것을 제어량이 뒤쫓아 가는 제어 방식이다. 이 기법의 단점은 급격한 출력의 변화가 일어날 수 있다는 것이다. 하지만 다른 제어 기법을 함께 사용한다면 정밀한 제어가 가능하다(Wu and Karkoub., 2014.).

위에 제시된 대부분의 제어기법은 비선형 동역학을 모델링하고, 다양한 환경변수들을 처리하는데 한계를 가진다. 또한 시스템 동역학을 고려한 제어기법들의 경우 피드백 제어루프에 모터 등 추진기의 특성을 반영하고 있지 않아 환경이 많이 변하는 해양환경에서 작업 및 임무수행을 하는데 정확하고 빠른 대응이 어려울 것으로 예상된다. 동적 작업 및 임무수행을 위해서는 정확한 자세와 속도제어가 필요하고, 환경이나 시스템의 동적 특성에 맞는 신속한 제어를 위하여 모터 제어루프를 고려할 필요가 있다.

본 논문에서는 임무를 수행하기 위해 ROV가 이동해야 할 목표점이 주어질 경우, 속도 프로파일을 통한 목표 속도 생성부터 모터 제어까지 통합된 제어 방법을 제시한다. 외부 교란과 유체역학계수에 따른 적응 백스텝핑 제어(Adaptive backstepping control)와 위상 고정 루프(PLL, Phased locked loop) 제어 방법을 제시하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 PLL 모터제어 루프를 추가함으로써 제어성능을 높일 수 있음을 검증하고자 한다. 2장에서 ROV의 모델을 도입하고, 3장에서는 백스텝핑과 PLL제어기를 설계한다. 4장의 시뮬레이션과 5장의 실험을 통하여 위에서 소개한 PLL을 추가한 백스텝핑 제어기와 독립적인 백스텝핑 제어기의 성능을 비교한다. 끝으로 6장에서 연구결과를 요약하고 결론을 제시한다.

2. ROV 모델

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 Surge, Sway, Yaw 운동에 영향을 주는 4개의 수평 트러스터와 Heave, Roll, Pitch 운동에 영향을 주는 2개의 수직 트러스터가 장착된 ROV 모델을 사용하였

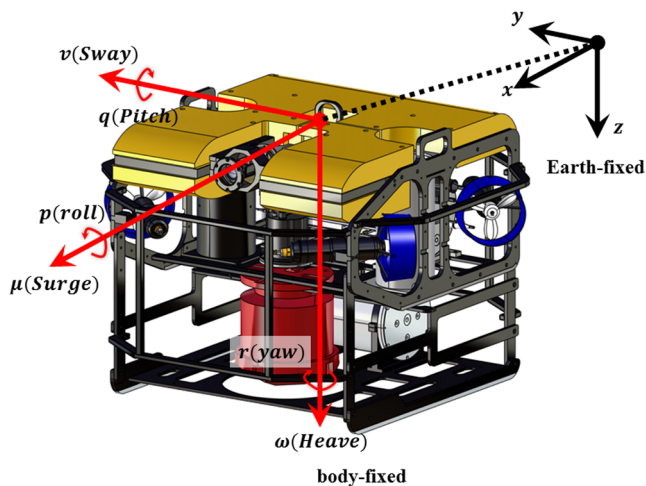


Fig. 1 Redone-technologies aROV100

다. 수직 트러스터의 장착 위치가 Roll, Pitch 운동에 많은 영향을 주지 않기 때문에 Roll과 Pitch운동에 대해서는 고려하지 않았다. 또한 ROV를 원격제어하기 위한 Tether cable의 영향은 무시하기로 한다. 이 ROV의 기구학 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\dot{\eta} = \mathcal{J}(\eta)\nu \quad (1)$$

$$\mathcal{J}(\eta) = \text{diag}(R(\eta), T(\eta)) \quad (2)$$

$$R(\eta) = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta - s_\phi c_\theta + c_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi s_\theta + c_\phi s_\theta c_\psi \\ s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}$$

$$T(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & s_\psi t_\theta & c_\psi t_\theta \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi/c_\theta & c_\psi/c_\theta \end{bmatrix}$$

$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ 는 전역좌표계(Earth-fixed frame)에서의 x, y, z 의 위치와 Roll, Pitch, Yaw의 오일러각이고, $\nu = [\mu, v, w, p, q, r]^T$ 는 ROV의 좌표계(Body-fixed frame)에서의 선속도와 각속도이다. 속도 자코비안은 식 (2)와 같다. Roll(ϕ)에 대한 $\sin\phi$ 는 s_ϕ , $\cos\phi$ 는 c_ϕ , $\tan\phi$ 는 t_ϕ 로 나타내었고 Pitch(θ), Yaw(ψ)에 대해서도 같은 방식으로 나타내었다.

아래의 식 (3)은 ROV의 동역학이다.

$$\dot{M}\nu + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + G(\eta) + F = \tau \quad (3)$$

$M \in R^{6 \times 6}$ 은 강체의 질량과 관성(Rigid body mass and inertia), 유체역학적 부가 질량(Hydrodynamic added mass)에 관한 행렬, $C \in R^{6 \times 6}$ 는 강체 코리올리력과 구심성(Rigid body Coriolis and centripetal matrix)에 대한 행렬, $D \in R^{6 \times 6}$ 는 유체 저항에 대한 선형 및 이차 감쇠에 대한 행렬, $G \in R^6$ 는 중력과 부력(Gravity and buoyancy)에 대한 벡터 그리고 $F \in R^6$ 는 유체 운동에 의한 외란(Disturbance)에 대한 항이다. $\tau \in R^6$ 는 ROV 트러스터의 힘과 모멘트에 대한 벡터이다(Lee et al., 2015; Fossen, 1994).

ROV 좌표계는 Fig. 1과 같이 무게중심(COM, Center of mass)에 위치하고 있기 때문에 $M \in R^{6 \times 6}$ 과 $C \in R^{6 \times 6}$ 는 대칭 양의 정부호행렬(Symmetric positive definite matrix)이고 반대칭행렬(Skew-symmetric matrix)이다. $M \in R^{6 \times 6}$ 을 구성하고 있는 질량과 관성 행렬, 부가질량 행렬은 아래의 식 (4)와 같다.

$$M = M_c + M_h \quad (4)$$

$$M_c = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & [I]_{xyz} \end{bmatrix}$$

$$[I]_{xyz} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

$$M_h = - \begin{bmatrix} \text{diag}(X_\mu, Y_\nu, Z_\omega) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & \text{diag}(K_p, L_q, N_r) \end{bmatrix}$$

$\{X_\mu, Y_\nu, Z_\omega, K_p, L_q, N_r\}$ 는 각각 x, y, z 방향에 따른 가속도 및 각

가속도로 인한 힘과 모멘트의 유체역학적 계수이다. 이 값들은 힘과 모멘트를 해당하는 방향의 가속도와 각가속도의 편미분으로 계산된다 $\left\{ \frac{\partial X}{\partial \mu}, \frac{\partial Y}{\partial v}, \frac{\partial Z}{\partial \omega}, \frac{\partial K}{\partial p}, \frac{\partial L}{\partial q}, \frac{\partial M}{\partial r} \right\}$. 강체 코리올리와 구심성에 대한 행렬은 아래의 식 (5)와 같다.

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서 $C_{21} = -C_{12}^T$, $C_{22} = -C_{22}^T$ 이다.

$$C_{12} = \begin{bmatrix} m(y_g q + z_g r) \\ -m(x_g q - w) - Z_\omega \\ -m(x_g r + \omega) - Y_v v \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -m(y_g p + \omega) + Z_\omega \omega & -m(z_g p - v) - Y_v v \\ m(z_g r + x_g p) & -m(z_g r + \mu) + X_\mu \mu \\ -m(y_g r - \mu) + X_\mu \mu & m(x_g p + y_g q) \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ -I_{yz} q + I_{xz} p - I_{zz} r + N_r r \\ I_{yz} r + I_{xy} p - I_{yy} q + L_q q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{yz} q - I_{xz} p + I_{zz} r - N_r r & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_{yy} q - L_q q \\ 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_{xx} p - K_p p \\ I_{xz} r + I_{xy} q - I_{xx} p + K_p p & 0 \end{bmatrix}$$

유체 저항에 대한 선형 및 이차 감쇠 행렬은 아래의 식 (6)과 같다.

$$D = \text{diag}(D_\mu, D_v, D_\omega, D_p, D_q, D_r) \quad (6)$$

$$D_\mu = -(X_\mu + X_{\mu\mu}|\mu|)$$

$$D_v = -(Y_v + Y_{vv}|v|)$$

$$D_\omega = -(Z_\omega + Z_{\omega\omega}|\omega|)$$

$$D_p = -(K_p + K_{pp}|p|)$$

$$D_q = -(L_q + L_{qq}|q|)$$

$$D_r = -(N_r + N_{rr}|r|)$$

수중 로봇은 저밀도 유체에서 움직이는 동안 유체운동은 동역학에 영향을 주어 운동에 방해하는 힘과 모멘트를 발생시킨다. 이런 외란에 대한 힘과 모멘트 벡터는 아래의 식 (7)과 같이 정의하여 시스템 모델에 포함시킨다.

$$F = \begin{bmatrix} m_f \dot{v}_i \\ m_f (R_b \times \dot{v}_i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에서 m_f 는 로봇에 의해 이동된 유체의 질량이고 $v_i = [\mu_f, v_f, \omega_f]^T$ 는 유체의 속도벡터, $R_b = [x_b, y_b, z_b]^T$ 는 부력 중심의 위치벡터이다.

중력과 부력에 대한 벡터는 식 (8)과 같다.

$$G(\eta) = \begin{bmatrix} G_f(\eta) \\ G_m(\eta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G_f(\eta) = \begin{bmatrix} (W_g - W_b) s_\theta \\ -(W_g - W_b) c_\theta s_\phi \\ -(W_g - W_b) c_\theta c_\phi \end{bmatrix}$$

$$G_m(\eta) = \begin{bmatrix} -(y_g W_g - y_b W_b) c_\theta c_\phi + (z_g W_g - z_b W_b) c_\theta s_\phi \\ (z_g W_g - z_b W_b) s_\theta + (x_g W_g - x_b W_b) c_\theta c_\phi \\ -(x_g W_g - x_b W_b) c_\theta s_\phi - (y_g W_g - y_b W_b) s_\theta \end{bmatrix}$$

ROV의 힘/모멘트 기구학은 아래의 식 (9)과 같이 주어진다.

$$\tau = Bu \quad (9)$$

$u = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6]^T$ 는 트러스터의 출력을 나타내는 벡터이다. 트러스터 구성 행렬(TCM, Thruster configuration matrix)은 ROV의 6개 트러스터의 기하학적 구조에 따라 결정된다. 여기에서 u_1 과 u_4 는 수직 트러스터의 추력이며 u_2, u_3, u_5, u_6 은 수평 트러스터의 추력이다. TCM은 아래 식 (10)과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} B_{x1} & B_{x2} & B_{x3} & B_{x4} & B_{x5} & B_{x6} \\ B_{y1} & B_{y2} & B_{y3} & B_{y4} & B_{y5} & B_{y6} \\ B_{z1} & B_{z2} & B_{z3} & B_{z4} & B_{z5} & B_{z6} \\ B_{\phi1} & B_{\phi2} & B_{\phi3} & B_{\phi4} & B_{\phi5} & B_{\phi6} \\ B_{\theta1} & B_{\theta2} & B_{\theta3} & B_{\theta4} & B_{\theta5} & B_{\theta6} \\ B_{\psi1} & B_{\psi2} & B_{\psi3} & B_{\psi4} & B_{\psi5} & B_{\psi6} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기에서

$$B_{x2} = -B_{x3} = B_{x5} = -B_{x6} = \cos\delta$$

$$B_{y2} = B_{y3} = -B_{y5} = -B_{y6} = \sin\delta$$

$$B_{z1} = B_{z4} = 1$$

$$B_{\phi2} = -B_{\phi3} = -B_{\phi5} = B_{\phi6} = r \sin\beta$$

$$B_{x1} = B_{x4} = 0$$

$$B_{y1} = B_{y4} = 0$$

$$B_{z2} = B_{z3} = B_{z5} = B_{z6} = 0$$

$$B_{\phi1} = B_{\phi2} = B_{\phi3} = B_{\phi4} = B_{\phi5} = B_{\phi6} = 0$$

$$B_{\theta1} = B_{\theta2} = B_{\theta3} = B_{\theta4} = B_{\theta5} = B_{\theta6} = 0$$

$$B_{\psi1} = B_{\psi4} = 0$$

δ 는 ROV 좌표계에서 $x-y$ 평면상에서의 x 축과 트러스터가 이루는 각도이고, r 은 ROV의 무게중심과 트러스터까지의 거리이다. $\beta = \delta + \alpha$ 이고, α 는 ROV 좌표계에서 $x-y$ 면상의 x 축과 r 벡터가 이루는 각도이다. 앞서 언급한 바와 같이 수직 트러스터는 Heave, Roll, Pitch운동에 영향을 주지만 트러스터 장착 위치로 인해 Roll과 Pitch운동에 대한 영향력은 무시하기로 하였으므로 $B_{\phi_i} (i=1,2,3,4,5,6)$ 와 $B_{\theta_i} (i=1,2,3,4,5,6)$ 는 0으로 두었다.

3. 제어기 설계

3.1 Backstepping control design

이 논문에서 제시하고자 하는 백스테핑 제어 모델은 아래의 Fig. 2와 같이 구성된다.

$$\dot{v}^* = J^{-1}(\eta_2)(\dot{\eta}_d + \Lambda_1 e_\eta) \quad (11)$$

$$\dot{\tau}^* = Y(\dot{v}, v, \eta, \dot{\Omega}, \Omega)\hat{\Phi} + \Lambda_2 e_v + J^T(\eta_2)e_\eta \quad (12)$$

$$Y(\dot{v}, v, \eta, \dot{\Omega}, \Omega) = [Y_1 \quad ; \quad Y_2]$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} \mu' - vr & wq & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu - |\mu|\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu r & v' - \varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -v - |v|v & 0 & 0 \\ -\mu q & vp & w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -w - |w|w & 0 \\ 0 & -vw & wv & p' - qr & rq & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & -w\mu & pr & q & -rp & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu v & v\mu & 0 & -qp & qp & r' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s\theta & 0 & 0 & 0 & \mu'_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c\theta s\phi & 0 & 0 & 0 & v'_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c\theta s\phi & 0 & 0 & 0 & w'_f & 0 & 0 & 0 \\ -p - |p|p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c\theta c\phi - c\theta s\phi & 0 & \mu'_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q - |q|q & 0 & 0 & 0 & -c\theta c\phi & 0 & -s\theta & 0 & 0 & v'_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r - |r|r & 0 & c\theta s\phi & s\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & w'_f & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\Phi} = \Pr[\hat{\Phi}(t - T)] + \frac{1}{\beta} Y^T(v, v, \eta, \dot{\Omega}, \Omega)e_v \quad (13)$$

$$u = B^{\#} \tau^* \quad (14)$$

$$u_i = \rho_i \Omega_i^2 \quad (15)$$

식 (11)은 ROV의 목표속도(v^*)를 구하는 식이다. 식 (1)과 식 (2)를 기반으로 위치의 오차를 보상해준다. $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ 이고,

$e_\eta = \eta_d - \eta$ 는 현재 위치 및 자세(η)와 목표 위치 및 자세(η_d)사이의 에러값을 나타낸다. $\Lambda_1 = \text{diag}(\Lambda_x, \Lambda_y, \Lambda_z, \Lambda_\phi, \Lambda_\theta, \Lambda_\psi)$ 는 양의 이득값이다.

식 (12)는 ROV의 목표 힘과 모멘트를 구하는 식이다. Regression matrix($Y(\dot{v}, v, \eta, \dot{\Omega}, \Omega)$)은 식 (3)을 기반으로 도출한 행렬로 트러스터의 홀센서와 AHRS(Attitude and heading reference system)로 각 원소의 값을 계산하였다. Unknown parameter vector($\hat{\Phi}_{26 \times 1}$)는 ROV의 불확실한 회전 모멘트와 유체역학 계수로 이루어진 벡터이고, $\hat{\Phi}_{26 \times 1}$ 는 식 (13)에 의해 계산된 Unknown parameter vector의 추정값이다. β 는 1보다 큰 양의 이득값이다. $e_v = v_d - v$ 는 ROV 좌표계에서 목표 속도(v_d)와 현재 속도(v)사이의 에러값을 나타낸다. $\Lambda_2 = \text{diag}(\Lambda_x, \Lambda_y, \Lambda_z, \Lambda_\phi, \Lambda_\theta, \Lambda_\psi)$ 는 양의 이득값이다.

식 (14)는 Inverse TCM에서 얻을 수 있는 식으로 식 (12)에서 계산된 힘과 모멘트(τ^*)를 4개의 수평 트러스터와 2개의 수직 트러스터의 추력으로 분리하기 위한 식이다. 이는 ROV의 기하학적 구조에 따라 달라지며 식 (9)와 식 (10)에서 TCM을 구하였다. $B^{\#}$ 은 ROV의 힘과 모멘트를 수직 및 수평방향 트러스터의 추력으로 분리해내기 위한 Pseudo inverse이다.

식 (15)는 Inverse Thruster Model이다. 이 식은 사용하는 트러스터의 모델에 따라 결정된다. 이 논문에서 사용된 트러스터의 추력에 따른 트러스터의 회전속도에 대한 자료는 트러스터의 제조사인 레드윈테크놀러지사에서 제공받아 정리하였다. i 는 트러스터의 번호이며 ρ_i 는 비례상수, Ω_i 는 트러스터의 회전속도이다.

3.2 PLL control design

PLL(Phased locked loop) 제어는 모터의 속도를 정밀하게 제어하기 위해 설계하였다. 이 논문에서 제시하고자 하는 PLL 모터

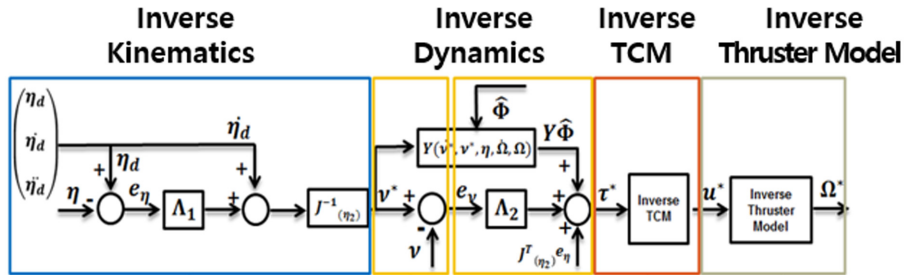


Fig. 2 Backstepping control block diagram

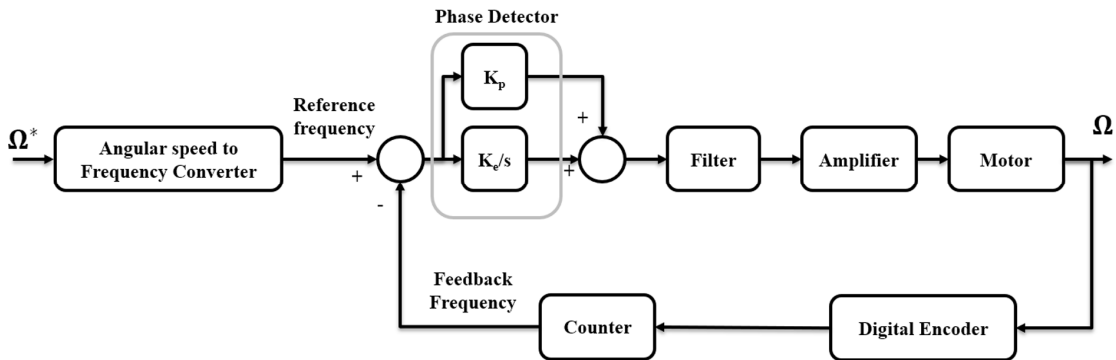


Fig. 3 Motor control block diagram using PLL controller

제어 모델은 아래의 Fig. 3과 같다.

제안된 PLL 모터 제어 모델의 동작 원리는 다음과 같다. 변환기를 사용하여 Backstepping 제어기에서 나온 출력을 주파수로 변화시켜 모터의 기준 주파수를 구한다. 그리고 모터의 회전속도를 디지털 엔코더를 이용하여 측정 후 출력 주파수로 변환한다. 이후 출력 주파수와 기준 주파수의 비교를 위해 카운터(Counter)로 고정주파수와 출력주파수의 비율에 따라 나누는 방식을 사용한다(Geiger, 1981; Wise., 1985). 출력 주파수와 기준 주파수의 차이를 위상 검출기(Phase Detector)에서 계산하고, PI 제어기를 이용하여 주파수를 보상해주는 입력 값을 생성한다. 필터에서는 위상 검출기(Phase Detector)로부터 나온 주파수 차이에 대해 고주파 성분을 제거하고, 리플현상을 제거해 준다. 마지막으로 증폭기를 이용하여 모터의 최종 입력값을 계산한다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 National Instrument 사의 LabVIEW 2015버전을 사용하였고 원점을 중심으로 가로 5m, 세로 5m의 정사각형 경로를 움직이면서 ROV의 위치와 경로에 대한 오차를 확인하였다. 아래의 Fig. 4는 경로를 움직일 때의 ROV의 x, y 좌표를 나타낸 그래프이다. 검은색 점선은 입력 경로, 파란색 선은 백스테핑 제어기와 PLL제어기를 함께 사용하였을 때의 ROV의 자취, 빨간색 선은 백스테핑 제어기만 사용하였을 경우 ROV의 자취를 나타낸 것이다. 그래프에서 보듯이 백스테핑 제어기만 사용하였을 때 보다 백스테핑 제어기와 PLL 제어기를 함께 사용하였을 때 좀 더 입력 경로를 잘 따라 가는 것을 확인할 수 있다.

**Backstepping controller + PLL
vs. Backstepping controller**

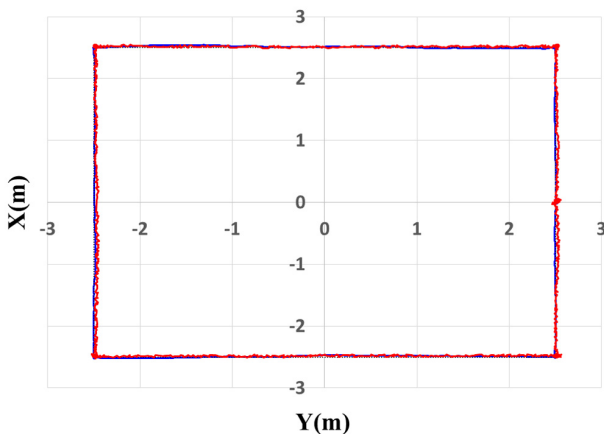


Fig. 4 Result of ROV execution simulation

Fig. 5와 Fig. 6은 입력 경로를 수행하는 동안 시간에 따른 x, y 좌표를 나타낸 것이다. 여기에서도 백스테핑 제어기만을 사용하였을 때보다 백스테핑 제어기와 PLL 제어기를 함께 사용할 경우 리플이 줄어들고 안정적인 경로 추종이 가능함을 볼 수 있다. 아래의 Table 1은 경로 주행 시 입력 x, y 좌표와 출력 x, y 좌표 상의 최대 오차값을 나타낸 것이다.

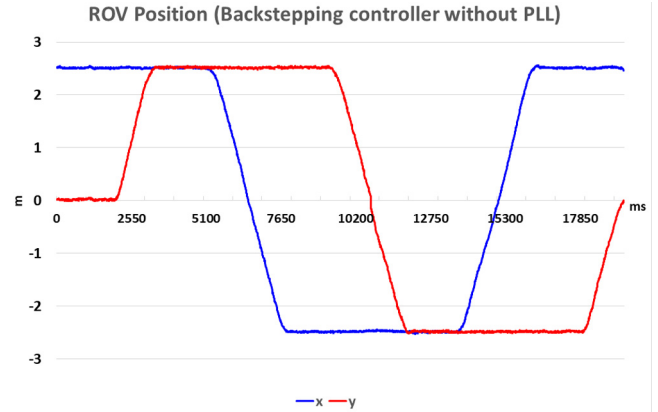


Fig. 5 Coordinate of x and y using backstepping controller only

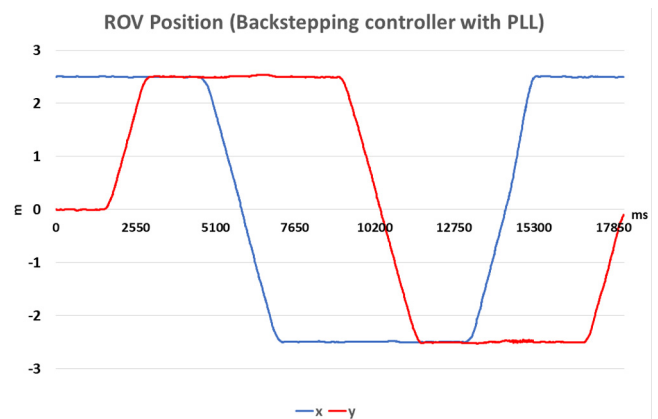


Fig. 6 Coordinate of x and y using backstepping and PLL controller

Table 1 ROV position maximum error according to input path

Error [m]	Backstepping + PLL	Backstepping
x Maximum	0.0156	0.0563
y Maximum	0.0181	0.0756

5. 실험

실험에 사용된 ROV는 Redone-technologies사의 aROV100이다. 이 ROV는 200m정도에서 사용되는 ROV로 최대 속도 1.3m/s(Surge 방향), 1.03m/s(Heave 방향)를 낼 수 있다. 무게는 60kg정도이며 전진 추력은 24kgf이다. 실험은 Redone-technologies사의 수중로봇실험 수조에서 이루어 졌으며, 수조의 크기는 5m×5m×5m이다.

Fig. 7(a)는 백스테핑 제어만을 통해 -Sway방향으로 이동시킨 결과이다. 흰색 점선은 처음 위치에서 ROV의 -Sway방향의 경로이며, 흰색 점들은 이동하면서 측정된 ROV 중심의 위치이다. 실험 결과에서 보면 -sway방향으로 이동하면서 처음 경로에서 점차 벗어나고 있는 모습을 볼 수 있다. Fig. 7(b)는 백스테핑 제어기와 PLL제어기를 함께 사용하여 Sway방향으로 이동시켰을 때의 결과이다. Fig. 7(a)와 마찬가지로 흰색 점선은 처음 위치에서 ROV의 -Sway방향의 경로이며, 흰색 점들은 측정된 ROV 중심의 위치를 표현한 것이다. 백스테핑 제어만 사용하였을 때와는 달리 ROV의 중심이 처음 경로를 벗어나지 않고 따라가고 있는 모습을 볼 수 있다.

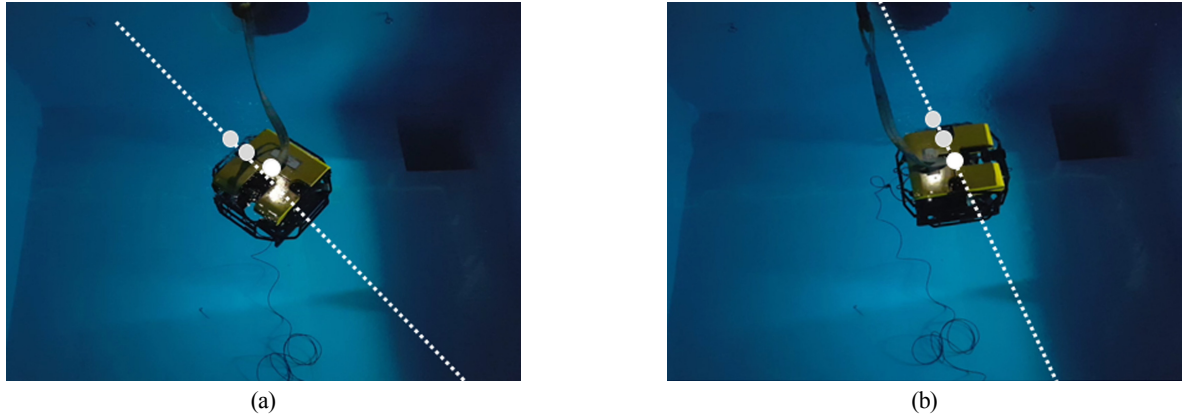


Fig. 7 (a) Sway direction path using backstepping controller only (b) Sway direction path using backstepping controller and PLL controller

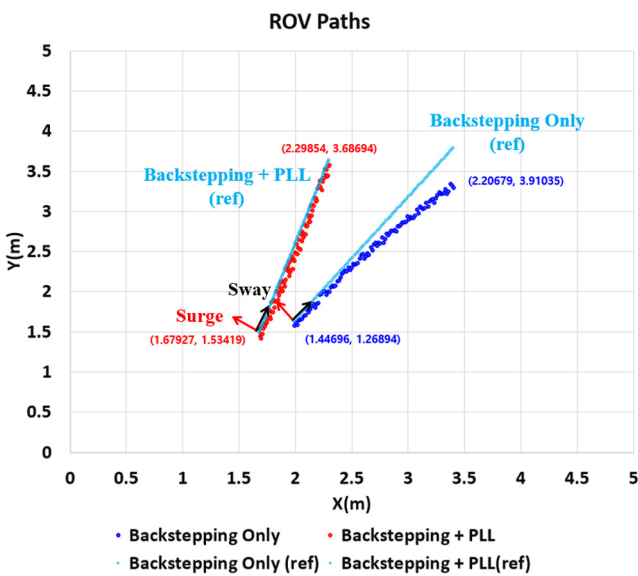


Fig. 8 ROV paths using backstepping controller with and without PLL controller

Table 2 ROV position maximum error according to input path

Error [m]	Backstepping + PLL	Backstepping
Maximum	0.0626	0.4895

Fig 8는 실험에서 측정된 ROV의 이동경로를 수치화해서 표현한 그래프이다. 빨간색 점들은 백스테핑 제어와 PLL 제어를 동시에 사용하였을 때 ROV가 -Sway방향으로 움직이면서 매 순간 측정된 ROV의 위치이고 파란색 점들은 백스테핑 제어만을 이용했을 때의 ROV의 위치이다. 하늘색 선분은 제어기의 성능을 평가하기 위하여 입력한 Reference 경로를 의미한다. Table 2에서 알 수 있듯이 백스테핑 제어기와 PLL 제어기를 동시에 사용한 경우가 PLL 제어기를 사용하지 않은 경우보다 최대 오차가 적은 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 6자유도 운동을 하는 ROV의 위치 및 자세를

제어하기 위해 적응 백스테핑과 PLL제어 방법을 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 PLL제어를 사용하지 않았을 때와 비교하여 적응 백스테핑과 PLL제어를 함께 사용하였을 때 위치 및 자세 제어가 안정적임을 보였다. 또한 Redone-technologies사의 aROV100에 직접 적용함으로써 적응 백스테핑제어와 PLL제어를 함께 사용한 경우가 ROV의 위치 및 자세제어에 더 안정적임을 실험을 통하여 검증하였다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 엔지니어링 개발연구센터(과제번호 : N0000990) 및 한국산업기술평가관리원(과제번호 : 10063413)의 지원을 받아 수행된 연구이다.

References

Antonelli, G., Caccavale, F., Chiaverini, S., 2004. Adaptive Tracking Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Based on the Virtual Decomposition Approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3), 594-602.

Geiger, D.F., 1981. *Phaselock Loops for DC Motor Speed Control*. Hoboken, NJ, USA.

Lee, H.J., Yang, S.J., Park, J.G., Kuc, T.Y., Ko, N.Y., Moon, Y.S., 2015. PLL Controller for Precise Velocity Tracking of UUV: A new ROV Model and Its Control. *Control, Automation and Systems (ICCAS), 15th International Conference, IEEE*, 488-492.

Raygosa-Barahona, R., Parra-Vega, V., Olguin-Diaz, E., Munoz-Ubando, L., 2011. A Model-free Backstepping with Integral Sliding Mode Control for Underactuated ROVs. *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 8th International Conference, IEEE*.

Soylu, S., Buckham, B.J., Podhorodeski, R.P., 2008. A Chattering-free Sliding Mode Control for Underwater Vehicles with Fault-tolerant Infinity-norm Thrust Allocation. *Ocean Engineering*, 35(16), 1647-1659.

Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, London, UK.

- Wise, M.G., 1985. Digital Phase-locked Loop Speed Control for a Brushless D.C. Motor. Naval Postgraduate School Monterey, CA.
- Wu, H.M., Karkoub, M., 2014. Hierarchical Backstepping Control for Trajectory-tracking of Autonomous Underwater Vehicles Subject to Uncertainties. Control, Automation and Systems (ICCAS), 14th International Conference, IEEE, 1191-1196.
- Yuh, J., 1990. A Neural Net Controller for Underwater Robotic Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 15(3), 161-166.

Development of Autonomous Surface Robot for Marine Fire Safety

Jinseok Jeong*, Youngmin Sa* and Hyun-Sik Kim^{ID**}

*Department of Mechanical System Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea

**School of Mechanical Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea

해양 소방 안전을 위한 자율수상로봇 개발

정진석* · 사영민* · 김현식^{ID**}

*동명대학교 기계시스템공학과

**동명대학교 기계공학부

KEY WORDS: Marine fire safety 해양 소방 안전, Autonomous surface robot 자율수상로봇, Fire recognition and tracking 화재 인식 및 추적, Nozzle selection 노즐 선택, Position and attitude control 위치 및 자세 제어, Fire fighting 화재 진압

ABSTRACT: The marine industry is rapidly developing as a result of the increase in various needs in the marine environment. In addition, accidents involving ship fires and explosions and the resulting casualties are increasing. Generally, manpower and safety problems exist in fire fighting. A fire fighter in the form of an autonomous surface robot would be ideal for marine fire safety, because it has no manpower and safety problems. Therefore, an autonomous surface robot with the abilities of fire recognition and tracking, nozzle selection, position and attitude control, and fire fighting was developed and is discussed in this paper. The test and evaluation results of this robot showed the possibility of real-size applications and the need for additional studies.

1. 서 론

해양 환경에서의 다양한 요구가 증가함에 따라 해양산업이 빠르게 발전하고 있다. 이와 더불어 선박 화재 및 폭발 사고도 증가하고 있으며(Hong et al., 2009; Lee and Back, 2006; You and Chung, 2015), 그 결과에 따른 인명피해도 증가하고 있다. 화재를 미리 예방하는 것이 가장 바람직하지만 화재 발생 이후의 초기대응도 매우 중요하다(Kim et al., 2015; Ko et al., 2012). 또한 대형화를 막기 위해서는 신속한 출동과 화재진압이 필요하다.

하지만 해양화재 발생 시 초기대응은 해양이라는 특수한 환경으로 소방정과 소방함과 같은 선박을 활용하여 화재를 진압하는 방식을 사용하고 있다. 일반적으로 이 과정에서 필요한 인원은 선박 운전, 소방 호스 분사 등 최소 1인이 필요하다. 또한 배위에서 화재를 진압하기 위해서는 외란에 의해 흔들리는 불안정한 상황에 사람이 직접 소방 호스를 이용하여 물을 분사하는 방식이 대부분인데 이때 안전성의 문제가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 광학영상 정보로 화재를 인식하고, 화재가 진압될 때까지 화점을 지속적으로 추적하여 화재를 진압하

며, 외란으로부터 선체의 자세를 유지하면서 효율적인 화재진압이 가능한 자율식 수상로봇의 개발이 필요한 상황이다.

따라서 본 논문에서는 기존의 화재진압용 수상로봇의 장점을 유지하며 단점을 보완하는 로봇을 개발하였다(Sa et al., 2016). 또한 화재진압 시에는 인력이 필수적이라는 문제가 있으며, 화재진압 시 선체가 외란에 의해 자세를 유지하기 힘든 부분이 있다. 본 논문에서는 인력문제를 해결하고 효율적으로 화재를 진압하기 위해서 해양 소방 안전을 위한 자율식 수상로봇개발을 제안하고자 한다. 제안된 로봇은 기존의 화재진압용 수상로봇을 기반으로 개선되었으며, 광학영상과 온도정보를 기반으로 Host PC에서 제어가 가능하며, 자율로 화재를 진압할 수 있도록 화재를 인식하고 추적한다. 로봇의 개발은 글로벌 표준 프로세스를 기반으로 진행하였다(Kim, 2013; Kim et al., 2012).

2. 시스템 개발

로봇 하드웨어 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, Fig. 1과 같이 운용개념을 정립하였다.

Received 23 February 2018, revised 8 April 2018, accepted 12 April 2018

Corresponding author Hyun-Sik Kim: +82-10-3880-9430, huynskim@tu.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4821-9784

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2017 in Pohang

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

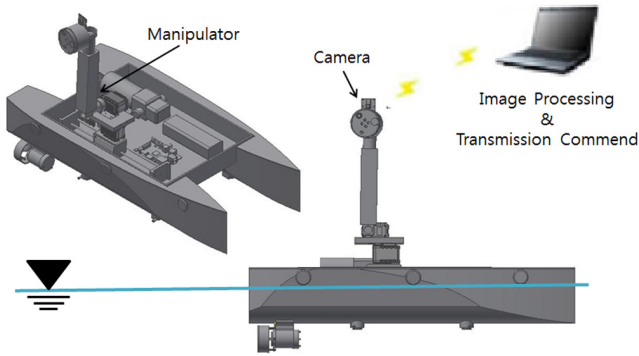


Fig. 1 Diagram of operation concept

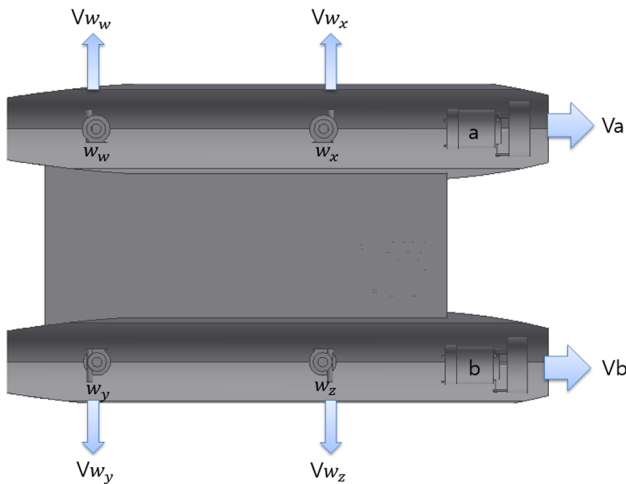


Fig. 2 Layout of waterjets

로봇의 몸체는 쌍동선형태로 구성되어 로봇팔을 장착하였다 (Kang et al., 1996). 이동시에는 접은 상태로 이동하여 외란의 영향을 최소화 하였고 임무 수행 시 로봇팔이 펼쳐질 수 있도록 구성하였다. 로봇의 운용은 로봇에 장착되어있는 카메라에서 전송된 영상정보와 온도정보를 기반으로 실시하게 된다. 원격으로도 제어가 가능하도록 Host PC를 통해 명령을 전달할 수 있도록 구성하였다. 또한 로봇은 획득한 카메라 정보를 기반으로 추적을 실시하고, 초음파거리센서와 워터젯을 이용하여 임무수행 시 외란으로부터 자세를 유지하여 자율적으로 화재를 진압할 때 도움을 주도록 하였다.

운용개념을 기반으로 3D틀을 사용하여 설계를 실시하였다. Fig. 2는 워터젯을 이용하여 추진기로 만들어 낼 수 없는 Sway, Yaw운동을 만들어내 임무 수행 시 유동적인 자세유지가 가능하도록 설계하였다. Fig. 2에서 W_w, W_x, W_y, W_z 는 각각의 워터젯을 나타내며, $V_{W_w}, V_{W_x}, V_{W_y}, V_{W_z}$ 는 워터젯의 추진력의 방향을 나타낸다. a 와 b 는 로봇의 추진을 담당하는 수중모터를 나타내며, V_a, V_b 는 수중모터의 추진력 방향을 나타낸다.

Fig. 3은 완성된 시제품의 모습이다. 3D모델링 기반으로 3D프린터를 이용해 전체적인 선체를 제작하였고 로봇의 상단은 아크릴을 사용해 몸체를 제작하였다. 다른 부분들은 상용포과 모델링하여 만든 제작품을 이용하여 구성하였다.

Host PC와 로봇의 제어는 시제품이 축소 모형임을 고려하여 블루투스 또는 지그비 등의 무선통신을 이용하여 통신을 할 수

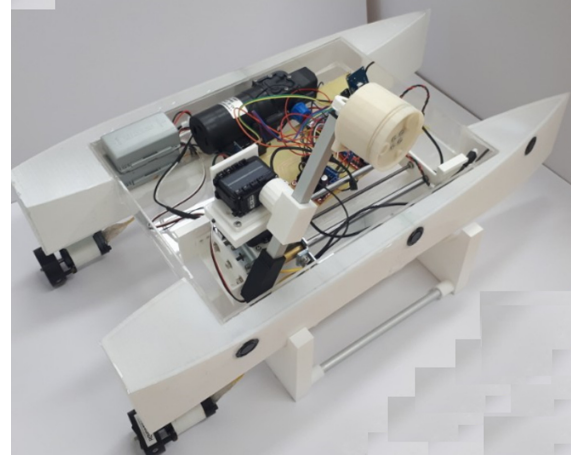


Fig. 3 Prototype of surface robot

Table 1 Specification of prototype

Size	Width [mm]	350
	length [mm]	600
	Height [mm]	100
Weight(on air) [kg]		16
Speed [m/s]		0 ~ 2.4
Operation time [min]		10 ~ 30
D.O.F		3 (Surge, Sway, Yaw)
Motor	Main propulsion	Water thruster (DC 12 V, 4781 rpm)
	Sub propulsion	Water jet (DC 3 V, 5500 rpm)
	Manipulator	Liner D/C Liner servo Dynamixel
Sensor	Distant	Waterproof ultrasonic
	Power	1000 mah 11.1 V

있도록 하였다. 자율제어를 할 수 있도록 카메라를 통해 획득한 광학영상정보와 온도정보로 영상처리를 하여 화재패턴을 분석하고 추적을 가능하게 하였다(He et al., 2014). 다음 Table 1은 완성된 로봇의 제원이다.

3. 자율 화재진압 기법

3.1 화재 인식 및 추적

기존의 로봇은 카메라의 영상정보로만 화재를 인식하고 진압했다. 하지만 화재는 연기나 화재시간 등으로 인해 영상정보로만 인식하기에는 한계가 있다. 따라서 영상정보와 온도정보를 같이 획득할 수 있는 FLIR(Forward looking infrared)카메라로 인식하기 최적의 정보를 얻을 수 있다. 따라서 광학정보로만 수행하기 힘든 작업을 수월하게 작업할 수 있도록 하였다. 획득한 영상의 영상처리 결과를 이용하여 자율제어기법을 실시한다. 이때 영상처리 방식은 RGB(Red-Green-Blue) 방식을 기반으로 진행하였다. RGB 방식은 적·녹·청을 혼합하여 원하는 색을 만

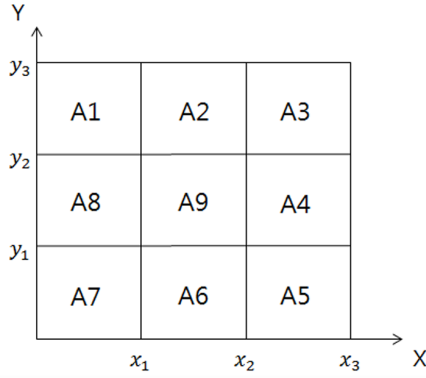


Fig. 4 Segment coordinates system

드는 방식이다. 즉, 화면상의 한 점의 색은 3색의 조합으로 만들어지는데, 조합으로 만들어지는 색은 다음과 같이 된다. R은 적색, G는 녹색, B는 청색이며, R과 G의 조합은 황색, R과 B의 조합은 붉은 보라색(마젠타), B와 G의 조합은 청록색(시안), 3색 조합은 백색, 어느 것도 비취지지 않으면 흑색으로 표현된다. 이를 이용하여 영상에서 화재를 인식하도록 한다. 화재를 인식하고 추적하기 위해 Fig. 4와 같이 좌표계를 설정하였다.

이해를 돕기 위해 Fig. 5와 같이 왼쪽하단 A7 영역에 화재가 인식된 경우로 예시를 들었다. 현재의 화재영상정보로부터 중심영역을 추출한 결과인 화점을 초록색 원을 표현하여 원하는 색의 RGB 값을 이용하여 화재를 인식하는 과정을 거친 영상에 해당한다.

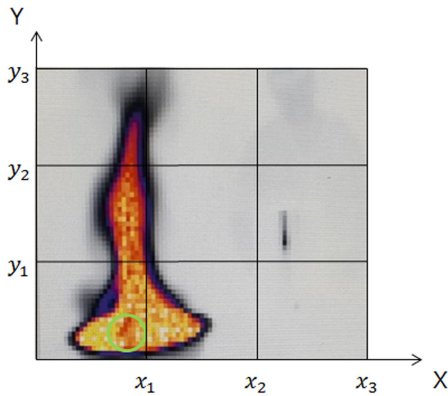


Fig. 5 Image processing example

먼저 영역의 중심을 설정하는 과정은 식 (1)로 나타내었다. 예를 들어 Fig. 4에 정의된 A9 영역의 중심을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$A9(x_c, y_c) = ((x_1 + x_2)/2, (y_1 + y_2)/2) \tag{1}$$

여기서 x_c 는 X축 기준의 좌표 값이고, y_c 는 Y축 기준의 좌표 값으로 정의하였다.

식 (2)는 Linear D/C 모터와 Linear servo 모터를 구동하여 초록색 원으로 나타낸 화점을 A7 영역에서 A9 영역으로 이동시키는 식이다. 상하는 Linear servo 모터, 좌우는 Linear D/C 모터를 이용하여 A7 영역에 위치한 화점에 대해서 Linear servo 모

터를 아래로 이동, Linear D/C 모터를 좌측으로 이동하여 A9 영역으로 위치할 수 있도록 하였다. Fig. 5에서 화점의 중심을 $Circle(x, y)$ 로 정의하였을 때, 앞서 설명한 알고리즘을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{if } Circle(x) < A7(x_c) \text{ then servo down} \\ & \text{if } Circle(y) < A7(y_c) \text{ then D/C left} \end{aligned} \tag{2}$$

그리고 식 (2)의 알고리즘은 다음의 조건을 만족할 때 까지 반복적으로 수행된다.

$$\begin{aligned} & x_1 < Circle(x) < x_2 \\ & y_1 < Circle(y) < y_2 \end{aligned} \tag{3}$$

반복적으로 식 (2)의 명령을 수행하여 식 (3)을 만족하게 되면 배 위의 워터펌프가 구동되어 범위에 존재하는 화재를 진압하게 된다. 진압 중 잔존하는 화재가 인식되면 다시 위 식을 반복 수행하여 지속적으로 추적하여 화재를 완벽하게 진압하도록 하였다. 예시로 활용된 알고리즘을 포함하여 A1~A9 영역별 9개의 지정된 알고리즘을 적용하여 화재영역이 인식되면 지속적인 추적이 가능하도록 하였다.

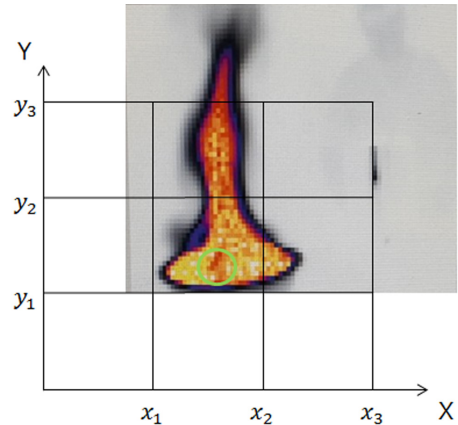


Fig. 6 Image processing result

3.2 노즐선택

화재패턴분석이 진행되면 패턴에 따른 노즐이 필요하다. 노즐은 상황에 따라 직사형, 분산형, 방사형 3가지로 분류하였다. 영역을 Fig. 7처럼 3영역 분할하여 구분하였다.

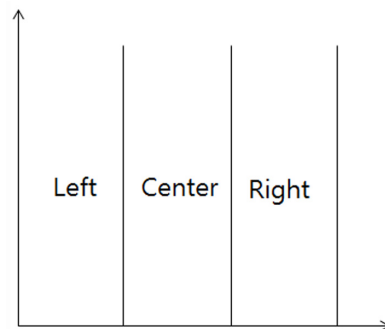


Fig. 7 Three-area segment

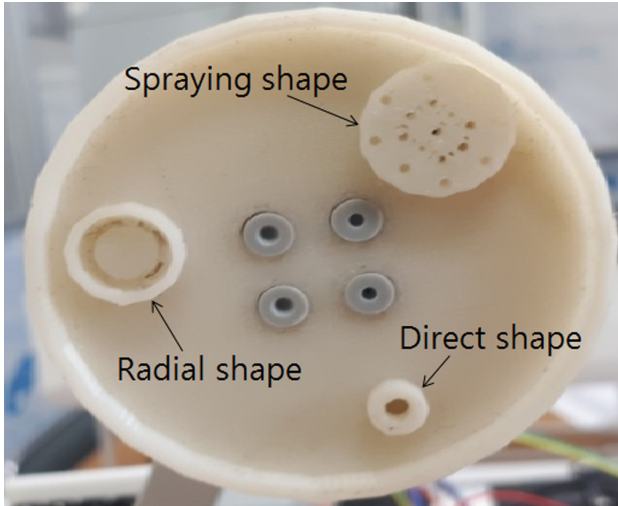


Fig. 8 Nozzle part

왼쪽, 중앙, 오른쪽 각각 한 범위에 속하면 노즐부의 직사형(Direct shape), 왼쪽과 중앙범위이거나 중앙과 오른쪽범위 또는 전범위에 속할 경우 방사형(Radial shape), 왼쪽과 오른쪽이 동시에 있는 패턴일 경우 분산형(Spraying shape) 노즐을 선택하도록 하였다. 노즐부의 형태는 Fig. 8에 나타내었다.

3.3 로봇의 자세유지

화재를 정확하게 인식하고, 패턴을 분석하기 위해서는 로봇과 화재지점의 일정한 거리유지가 필요하다. 같은 패턴이라도 거리가 멀거나 가깝다면 다른 패턴으로 인식하기 때문이다. 이를 해결하기 위해 로봇의 왼쪽측면에 3개의 초음파거리센서와 워터젯을 활용하여 거리를 유지하였다. Fig. 9는 로봇의 왼쪽측면에 부착한 초음파거리센서의 배치도를 나타내었으며, 각각의 센서는 전면부터 D1, D2, D3로 차례대로 정의하였다.



Fig. 9 Layout of distance sensors

앞서 설명한 시스템으로 로봇이 일직선을 유지 할 때 식 (4)를 이용하여 중앙에 위치한 D2값을 20~25cm를 유지하여, 그에 따른 정보를 얻고자한다.

$$\begin{aligned} & \text{if } (20 \leq D2 \leq 25) \text{ then motor stop} \\ & \text{if } (D2 < 20) \text{ then } W_y, W_z \text{ start} \\ & \text{if } (D2 > 25) \text{ then } W_w, W_x \text{ start} \end{aligned} \quad (4)$$

하지만 해양은 로봇이 일직선을 유지하며 거리를 조절하기 힘든 환경이다. 따라서 D1과 D3의 차를 이용하여 로봇 자체의 자세를 일직선으로 유지할 수 있어야 한다. 식 (4)의 첫 번째 식을 만족하는 경우에 식 (5)를 활용하여 D2와 D1의 값의 차를 계산하였을 때 양의 값이 나온다면 D1과 화재지점이 가까우며, D3과는 떨어진 경우이므로 워터젯 W_w 와 W_z 를 구동하여 우측

Table 2 Waterjet and sensor

	Left waterjet		Right waterjet	
	W_w	W_x	W_y	W_z
Less than 20 cm	0	0	255	255
More than 20 cm	255	255	0	0
Right Yaw movement	255	0	0	255
Left Yaw movement	0	255	255	0

Yaw운동을 하여 로봇을 일직선으로 유지하도록 하였다.

$$\begin{aligned} & \text{if } (D2 - D1 > 0) \text{ then } W_w, W_z \text{ start} \\ & \text{if } (D2 - D3 < 0) \text{ then } W_x, W_y \text{ start} \end{aligned} \quad (5)$$

Table 2는 워터젯과 초음파거리센서를 이용하여 획득한 정보를 활용하여 자세를 유지하는 알고리즘을 정리한 것이다. 워터젯의 출력은 최대출력인 255로 설정하였다.

4. 시험평가

개발된 로봇의 성능 검증을 위해 시험평가를 실시하였다. 시험평가 항목으로 다음 4가지로 설정하였다. Propulsion(T1)은 로봇의 추진과 관련된 시험평가 항목이며, Communication(T2)는 로봇을 제어하기 위해 로봇과 Host PC의 통신을 실시하여 제어 가능 여부를 확인하기 위한 항목이다. Manipulation(T3)는 로봇이 화재를 진압하기 위해 부착된 로봇팔을 동작하여 화재가 진압되는지 확인하는 항목이다. 마지막으로 Autonomous control(T4)는 III장에서 제안된 자율제어기법이 로봇에 적용되어 제어가 가능한지 확인하기 위한 항목이다. 요구항목은 요구사항 분석 결과인 이동성(R1), 관측성(R2), 조작성(R3), 안정성(R4), 유지보수성(R5)이며, 기능항목은 조파저항 최소화 기능(F1), 로봇추진 기능(F2), 화재추적 기능(F3), 로봇팔제어 기능(F4), 노즐선택 기능(F5), 화재진압 기능(F6), 자세유지 기능(F7), 모듈화 기능(F8), 프로그램 다운로드 기능(F9)이다. H/W 및 S/W 항목은 H/W 및 S/W Family tree의 구성품이다. Table 3은 각 항목이 추적성을 유지하는지를 확인하는 시험평가 결과를 나타낸 것이다.

Table 3 Test & Evaluation

Require-ment	Function	H/W	S/W	Test & Evaluation	Result
R1	F1	H1	-	T1	O
	F2	H3	S1	T1	O
R2	F3	H2, H42, H43	S2, S3, S4	T2, T3	O
	F4	H2, H42, H44	S2, S3	T1, T2, T3, T4	O
R3	F5	H2, H4	S2	T1, T2, T3, T4	O
	F6		S1, S2, S3, S4	T1, T2, T3, T4	O
R4	F7	H1, H32	S1, S3, S4	T1, T2	O
R5	F8	H1	-		O
	F9	H43	S4		O

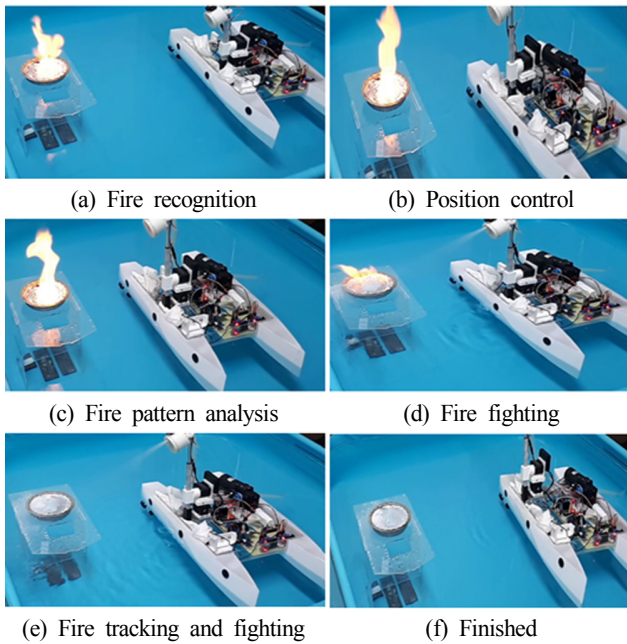


Fig. 10 Fire fighting

Fig. 10은 지금까지 설명한 자율제어기법을 이용하여 화재를 진압하는 과정이다. (a)는 화재를 인식하는 과정이고, (b)는 화재 지점과 거리를 유지하고, (c)는 인식한 화재의 패턴을 분석하여 알맞은 노즐을 선택하는 과정이다. (d)는 워터펌프를 구동하여 화재를 진압하고, (e)는 화재 진압 후 남아 있는 불씨를 추적하여 완전히 화재를 진압하는 과정이며, (f)는 화재가 완전히 진압된 것을 확인한 후 알고리즘이 종료된 상태이다.

5. 결 론

본 논문에서는 증가하는 해양화재를 진압하기 위해 기존의 문제점을 파악하고, 문제해결을 위해 기존의 화재진압용 로봇을 기반으로 자율제어가 가능한 화재진압용 로봇을 개발하였다. 로봇의 개발은 글로벌 표준 프로세스를 적용하여 진행되었다. 개발된 화재진압용 수상로봇은 FLIR카메라 영상을 기반으로 로봇팔 시스템을 이용하여 화재를 진압할 수 있도록 구성하였다. 또한 카메라에서 획득한 영상을 기반으로 영상을 인식하고 패턴을 분석하여 화재를 추적하는 알고리즘을 적용하였다. 그리고 화재진압 시 선박이 흔들리는 문제를 해결하기 위해 초음파 거리센서와 워터젯을 이용하여 화재지점과 거리를 유지하고 외란으로부터 자세를 유지할 수 있도록 하여 화재를 자율로 진압할 수 있는 자율제어기법을 설계하여 로봇에 적용하였다. 자율제어기법은 영상정보의 RGB값을 기반으로 화재의 패턴을 파악하고 화재를 진압할 때까지 추적하도록 영상처리를 실시하였다. 화재의 영상정보에 대해 영역분할을 이용하여 작업범위를 제한하고 화재의 분포정도를 이용하여 패턴을 분석하고, 화점을 파악하여 추적하도록 하여 로봇의 제어를 결정한다. 로봇의 성능 검증 및 자율제어기법의 실제 적용 가능성을 확인하기 위해 시험평가를 진행하였다. 시험평가를 실시하여 로봇의 개발 과정

에서 실시한 요구사항 및 기능분석, 설계 등의 결과와 실제 제작된 로봇의 결과물의 충족여부를 확인하였다. 시험평가를 통해 제안된 자율제어기법을 적용하여 화재진압이 가능한 것을 확인하였으며, 제안된 기법이 문제없이 적용되는 것을 확인하였으나 워터펌프 구동 시 로봇의 전체적인 밀림현상이 존재함을 확인하였다.

추후 연구에서는 워터펌프에 의한 밀림현상을 해결하기 위한 방안을 연구할 계획이다. 또한 제안된 자율제어기법에서는 FLIR카메라에서 들어오는 정보만으로 자율제어를 실시하였는데, 화재가 발생하지 않았을 시에는 열화상카메라의 특성상 운용에 어려움이 있으므로 이를 보완하기 위해 전역정보를 제공하는 카메라를 추가로 배치하여 상시 운용이 가능한 자율제어 로봇으로 연구할 계획이다.

References

- He, Q.-Z., Li, C.-H., Lu, S.-X., Huang, S.-S., 2014. Experimental Study of Pool Fire Burning Behaviors in Ceiling Vented Ship Cabins. *Procedia Engineering*, 71, 462-469.
- Hong, S., Park, C., Park, S., Yu, S., 2009. A Study on the Fire Detection Technology for Fire Protection of Ships. *Proceedings of Korea Society of Marine Engineering*, 241-242.
- Kang, C.G., Hong, S.Y., Suh, S.H., Lee, C.M., Kim, Y.G., Gong, I.Y., 1996. Attitude Control Tests for a High Speed Catamaran in Regular Head Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(2), 36-43.
- Kim, H.-S., 2013. Development of Balloon-based Autonomous Airborne Robot-kit. *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Science*, 8(8), 1213-1218.
- Kim, H.-S., Kang, H.-J., Ham, Y.-J., Park, S.S., 2012. Development of Underwater-type Autonomous Marine Robot-kit. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 22(3), 312-318.
- Kim, W.O., Kim, J.S., Park, W.C., 2015. A Study on the Improvement of Survival Rate of the Passengers and Crews according to FDS Analysis. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 39(3), 312-317.
- Ko, S.H., Kim, W.J., Kim, J.H., Choi, S.H., Oh, I.H., Lee, Y., 2012. Intelligent Fire Extinguish Monitoring System for Ship Safety. *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communication and Information Sciences*, 562-563.
- Lee, H.-P., Back, M.-H., 2006. A Study on Improvement of Fire Service Deployment Standard in Korea. *Fire Science and Engineering*, 20(1), 28-42.
- Sa, Y., Jeong, J., Kim, H.-S., 2016. Image Processing-Based Surface Robot For Fire Fighting. *Proceedings of KIIS Spring Conference*, 26(1), 139-140.
- You, J., Chung, Y.-J., 2015. Study on the Ship Fire Analysis According to Explosion Hazard. *Fire Science and Engineering*, 29(1), 80-86.

Study on Underwater Optical Communication System for Video Transmission

Hyun-Joong Son*, Jin-Il Kang**, Thieu Quang Minh Nhat*, Seo Kang Kim* and Hyeung-Sik Choi^{ID*}

*Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea
**BORsys Co. Ltd., Busan, Korea

영상통신용 수중광통신 시스템 연구

손현중* · 강진일** · Thieu Quang Minh Nhat* · 김서강* · 최형식^{ID*}

*한국해양대학교 기계에너지 시스템 공학과
**(주)볼시스

KEY WORDS: Underwater optical wireless communication 수중 광 무선 통신, Underwater communication 수중통신

ABSTRACT: In this study, we designed and developed an underwater LED communication system composed of an LED and a photo sensor. In addition, we experimented with video data transmission in a water tank. Two communication modules were installed in the 3 m water tank, and the image data transmission test was successfully performed at a rate of 20 frames per second(FPS), image resolution of 480 × 272, and data communication speed of 4 Mbps.

1. 서 론

최근 각국에서 해양에 대한 관심의 증가로 약 800여종 이상의 수중드론이 개발되어 해양탐사 및 자원개발에 사용되고 있으며 이러한 수중드론의 증가와 함께 이들의 임무도 점차 다양해지고 복잡해지고 있다. Side sonar scanner나 Multi-beam echo sounder 등을 장착하여 수중 지형을 매핑하여 해저 지형도를 만들고, 이를 수중드론 간에 통신으로 전송하거나 수중에 설치된 통신노드로 전송하는 형태로 발전하여 수중에서 대량의 정보를 빠르게 보내는 통신기술이 점점 중요한 이슈가 되고 있다(Farr et al., 2005).

현재 음향파 통신은 수중통신에 폭넓게 응용되고 있지만 후술할 다양한 문제점에 의해 수중에서 많은 용량의 데이터를 고속으로 전송하기 어렵다. 이를 해결하기 위한 방안으로 미국 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI), 메사추세츠 공과대학(Massachusetts Institute of Technology, MIT), 영국 소나다인사(Sonardyne International Ltd.) 등 수중로봇 최신 진국에서는 청색광 레이저 및 LED(Light emitting diode)를 이용한 수중 대용량 고속통신 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 음향파 수중통신과 가시광 수중통신 기술을 비교분석하고, 수중 광 무선통신에 대한 국내의 연구동향과 가시광 수중통신의 활용분야를 소개하였다. 또한 소개한 수중 광 무선통신을 활용한 다양한 수중드론 운용 시스템 아이디어를 실현하기 위한 수단으로 수중에서 화상데이터와 같이 대량의 데이터를 빠른 속도로 전송할 수 있는 통신기술을 확보하고자 LED와 광 검출센서로 구성된 수중 양방향 LED 통신 시스템을 연구 개발하였다. 그리고 개발한 통신 시스템을 수조에서 동화상데이터 전송 시험을 성공적으로 수행하였다.

2. 음향파 수중통신과 가시광 수중통신 비교 분석

수중에서는 전자기파의 도달거리가 매우 짧아 수중통신은 많은 어려움이 있기 때문에 최근까지 수중에서의 통신은 모두 음향파를 사용하여 이루어졌다. 수중 음향파 통신은 수중에서 신호감쇠가 작아 가장 광범위하게 사용되고 있으나 다음과 같은 문제점이 있으며, 수중 음향 링크의 다양한 범위에 대한 일반적인 대역폭을 Table 1에 나타내었다(Kaushal and Kaddoum, 2016).

Received 2 March 2018, revised 10 April 2018, accepted 20 April 2018

Corresponding author Hyeung-Sik Choi; +82-10-5581-2971, hchoi@kmou.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4060-8163

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2017 in Seongnam.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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

Table 1 Typical bandwidth for different ranges in underwater acoustic links

Distance	Range [km]	Bandwidth [kHz]	Data Rate
Very long	1000	< 1	~ 600 bps
Long	10 - 100	2 - 5	~ 5 kbps
Medium	1 - 10	10	~ 10 kbps
Short	0.1 - 1	20 - 50	~ 30 kbps
Very short	< 0.1	> 100	~ 500 kbps

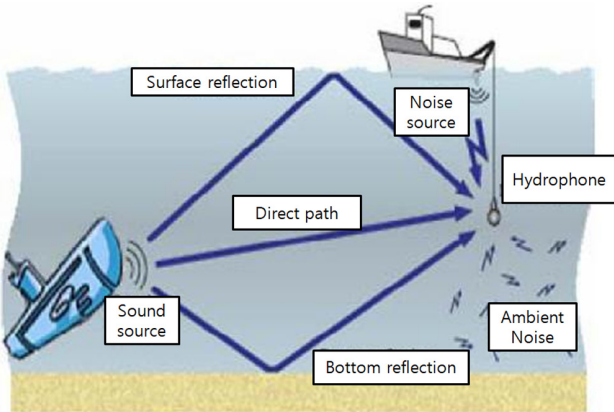


Fig. 1 Problems of Acoustic Communication

- 수중에서의 음파속도는 1500m/s전로 전자기파 속도에 비하여 매우 느리다.
- 해수의 온도 변화와 분포 영향에 민감하다.
- 해수면에서 발생하는 선박 엔진소음, 스크루 소음 등의 잡음에 취약하다.
- 음파의 반사와 굴절에 의한 다중경로 진행과의 간섭에 취약하다.
- 데이터 전송속도가 100bps ~ 100Kbps 이하로 제한되어 대용량 데이터 전송에 많은 어려움이 있다.
- 데이터 전송효율 대비 높은 전력이 요구되기 때문에 배터리 자원이 한정된 수중드론 적용에 많은 제약이 있다.
- 음향과 통신모뎀 시스템 크기가 크기 때문에 용적이 제한된 수중드론에 적용하기에 많은 제약이 있다.

이러한 음향과 통신의 단점을 보완하기 위해 청색광을 이용한 수중 고속통신 기술 개발에 대한 연구개발이 최근에 미국을 비롯한 선진 몇 개국에서 이루어지고 있다. 청색광은 수중 투과가 가장 우수한 특징을 보이고 다음 장점이 있다.

- 청색광의 수중 전파속도는 광속이므로 데이터 고속전송이 가능하다.
- 해수의 온도 변화와 분포 영향에 무관하다.
- 해수면에서 발생하는 선박 엔진소음, 스크루 소음 등의 잡음에 무관하다.
- 청색광의 수중 전파속도가 빠르기 때문에 반사와 굴절에 의한 간섭이 없다.

Table 2는 음향과 수중통신과 가시광 수중통신 기술을 비교하여 나타낸 것이다(Kaushal and Kaddoum, 2016).

3. 가시광 수중통신 국내외 연구동향

수중 광무선 통신 시스템의 국외 연구동향으로는 수중장비 최선진국인 미국에서 연구가 활발히 이루어지고 있으며 특히 우즈홀 해양연구소가 세계적으로 주목할만한 성과를 거두고 있다. 국내외 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 메사추세츠 공과대학(MIT)

MIT 대학에서는 5W 청색 LED 6개와 APD를 사용하여 1.2Mbps 단방향 통신을 30m 거리까지 통신 가능한 수중 광무선 통신모뎀을 개발하고 수중에서 케이블 없이 수중로봇을 제어하는 실험을 수행하였다(Doniec et al., 2010).

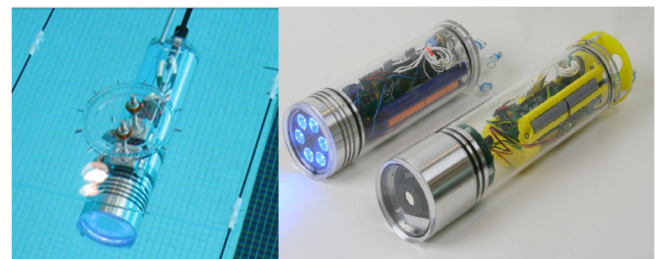


Fig. 2 Optical Communication Modem of MIT

Table 2 Acoustic Communication VS Optical Communication

Parameter	Acoustic	Optical
Attenuation	Distance and frequency dependent (0.1-4 dB/km)	0.39 dB/m (ocean) 11 dB/m (turbid)
Speed [m/s]	1500 m/s	≈ 225500000 m/s
Data rate	~ kbps	~ Gbps
Latency	High	Very Low
Distance	up to kms	≈ 10~100 meters
Bandwidth	1000 Km < 1 kHz 1~10 km ≈ 10 kHz	10~150 MHz
Transmission power	tens of Watts (typical value)	Few Watts
Efficiency	≈ 100 bit/Joules	≈ 30,000 bits/Joules
Performance parameters	Temperature, salinity and pressure	Absorption, scattering/turbidity, organic matter

3.2 노스캐롤라이나 대학(Univ. of North Carolina)

노스캐롤라이나 대학에서는 6각형 형태의 돔에 총 7개의 포토 센서, LED, 렌즈를 배치하여 광 검출 및 광 전송 시야각을 향상 시키고 상대방 광 통신 장치의 각도를 추정할 수 있는 수중 광 무선 통신 장치 연구 개발을 수행하였다(Simpson et al., 2012).

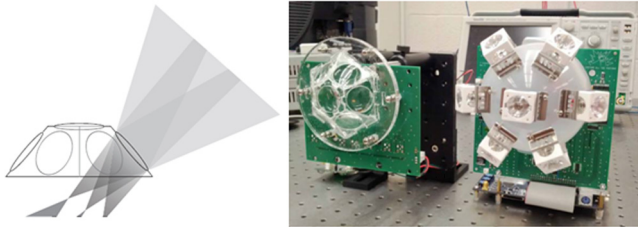


Fig. 3 Optical Communication Modem of N.C University

3.3 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institution)

우즈홀 해양연구소에서는 청색 LED 및 Laser와 광증배관 (Photomultiplier tube, PMT)으로 구성된 수중 가시광 통신 시스템을 오래 전부터 꾸준히 개발하였으며(Pontbriand et al., 2008) Table 3은 2015년 기준으로 도달한 성능을 나타낸 것이다(Pontbriand et al., 2015).

우즈홀 해양연구소는 개발한 가시광 수중통신 시스템을 실제 대양에서 다방면에 활용하고 있으며 대표적인 사례로는 북태평양 해저에 수중 광통신 모듈을 장착한 해저 관측노드(Fig. 4)를 설치하고 1년 동안 수집된 해저 관측노드의 대용량 수집 데이

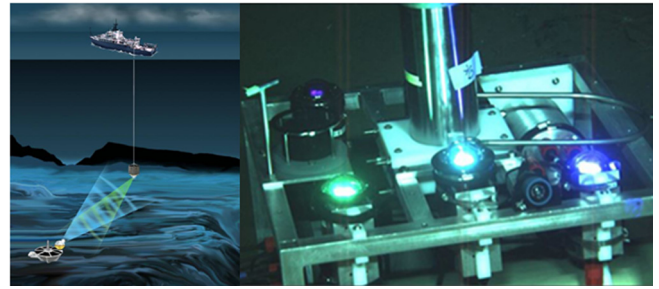


Fig. 4 Underwater optical communication observation node of WHOI

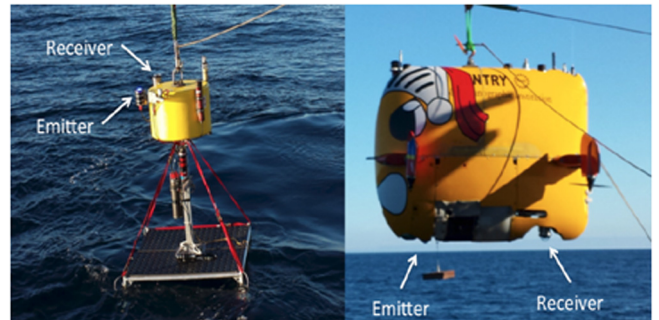


Fig. 5 Underwater optical communication network of WHOI

터를 광통신으로 회수에 성공함으로 해저 관측노드를 인양하는 비용과 시간을 절약한 사례가 있다(Farr et al., 2013).

또한 가시광통신 모듈을 장착한 해저 노드(Fig. 5)로 수중 광역통신망을 구축하여 수중에서 임무중인 AUV(Autonomous underwater vehicle)와 실시간 고속통신 네트워크를 구축하여 많은 데이터를 고속으로 취득하거나 실시간으로 AUV 제어 등의 기술을 개발하고 있다(Pontbriand et al., 2015).

Table 3 WHOI underwater optical wireless communication spec (2015 year)

Rate	Range [m]	Angle	Technology [receiver / source]
1 Mbps	138	Hemisphere	PMT / LED
10 Mbps	108	Hemisphere	PMT / LED
15 Mbps	80	Hemisphere	PMT / LED
> 400 Mbps	4	±7 degrees	PMT / Laser
10 Gbps	Contact	±2 degrees	Photodiode / Laser

3.4 영국 소나다인 사(Sonardyne International LTD)

음향과 통신장비 분야의 유명 업체인 영국 Sonardyne 사는 미국 우즈홀 해양연구소, MIT와 기술협약을 통해 수중 광 무선통신 모듈을 세계에서 최초로 상용화, 상업적으로 가치가 있음을 증명한 사례가 있다. 다음의 Table 4는 Sonardyne 사의 수중 광 무선통신 모듈 상용제품을 정리한 것이다.

Table 4 UK Sonardyne's underwater wireless communication module products

Model	BlueComm 100	BlueComm 200 (Operates only in deep water environments greater than 1000 meters)
Specification		
Light source	Blue LED Array	Blue LED Array
Bit rate	1 ~ 5 Mbps	1 ~ 12.5 Mbps
Communication range	up to 10 M	up to 150 M
Communications Interface	Ethernet	Ethernet

Photo



3.5 국내 연구동향

국내 연구동향으로는 한국해양대학교에서 수중 광 무선통신 기반기술을 확보하고자 관련 연구를 2013년도부터 꾸준히 진행하여 현재 천해에서 최대 통신속도 5Mbps, 최대 통신거리 20m 수준에 도달하였으며 이는 영국 Sonardyne 사에서 상용화 중인 천해용 수중 광 통신 모뎀(BlueComm 100)의 사양이 천해에서 최대 통신속도 5Mbps, 최대 통신거리 10m 인 점을 비교하면 통신속도는 동일하고 최대 통신거리가 10m 더 우수한 수준의 성능이다. Fig. 6은 한국해양대학교에서 개발해온 광 무선 통신 장치를 함께 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 7은 한국해양대학교의 기술을 이전 받아 (주)BORsys에서 제작한 BOLcomm 100(천해 100m용)의 사진이다.



Fig. 6 Optical Communication Modems of Korea Maritime University

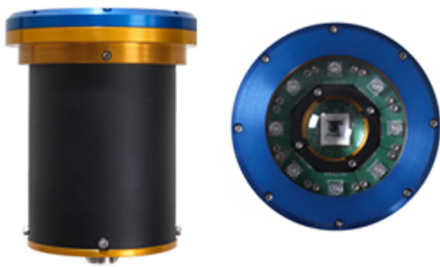


Fig. 7 Underwater Optical Communication Modem of BORsys Co Ltd. (BOLcomm100)

4. 가시광 수중통신 활용분야

가시광 수중통신 기술을 효과적으로 활용할 수 있는 분야로는 수중로봇 원격 고속통신, 다이버 통신, 해양방위, 광역 수중통신 네트워크 등을 들 수 있다. 또한 가시광 수중통신 기술은 이 장에서 소개한 분야에 국한되지 않고 이외에 다양한 활용분야가 존재한다.

4.1 수중로봇 원격 고속통신 분야

화상이나 데이터를 실시간으로 모니터링하거나 실시간 제어가 필요한 수중로봇 운용 시 유선 케이블을 사용하는 것이 일

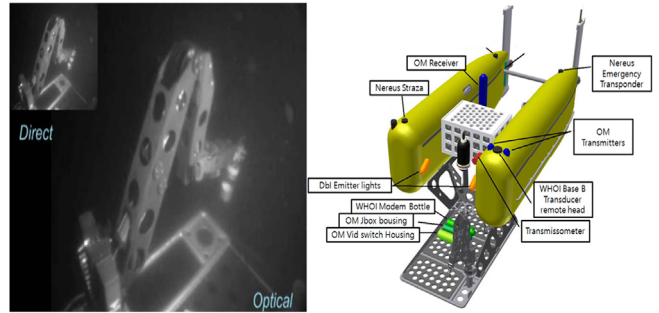


Fig. 8 WHOI's Un-Tether ROV

반적이거나 유선 케이블 통신의 경우 케이블 길이가 길어질수록 수중 운동체의 동작에 많은 저항력을 미치고 조류가 있는 환경에서 적용이 어려운 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 고속통신이 가능한 가시광 수중통신 기술을 적용하여 케이블이 없는 실시간 제어 수중로봇을 개발하려는 연구가 수행되고 있다. 다음 Fig. 8은 미국 우즈홀 해양연구소에서 가시광 통신 기술을 적용하여 개발 및 시범 운용중인 Un-Tether ROV (Remotely operated vehicle)이다(Bowen et al., 2013).

AUV의 운용을 위해서는 진수 및 회수 작업을 위해 운용 인력이 탑승한 모선이 수반되어야 하며 임무 종료 후 취득 데이터를 얻기 위해서는 반드시 수중로봇을 인양 하여야만 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 가시광 수중통신을 적용한다면 수중로봇을 인양하지 않고도 취득 데이터를 내려받거나 운용 프로그램 입력 등의 필요한 작업이 가능해지게 되며 특히 운용 인력과 모선이 불필요해지므로 수중로봇 운용 비용을 크게 절감할 수 있다. 또한 무선 수상선(Unmand surface vehicle, USV) 또는 수중 노드를 활용한다면 지역에 제한을 받지 않고 더욱 효과적인 운용이 가능할 것이다.

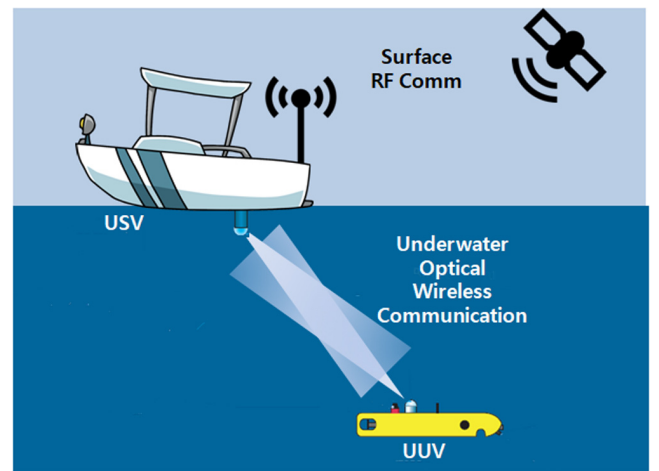


Fig. 9 USV and AUV optical underwater communication concept design

4.2 다이버 통신 분야

레이저활동나 수중작업 등 다이버들의 수중 활동 증가로 이들에 대한 안전과 원활한 작업수행을 위하여 다이버와 통신이 필연적으로 늘어나면서 다양한 수중 통신장비들이 개발되고 있는

추세이다. 현재는 수중 다이버간의 의사소통은 미리 약속된 수신호를 활용하거나, 음향파를 이용한 전통적인 통신수단 밖에 존재하지 않기 때문에 양질의 음성, 영상이미지 등의 대용량 데이터를 전송하기 어렵고, 작업선이나 육상으로 전달할 수 있는 무선 통신 수단이 없는 실정이다.

이에 대응하여 수중 가시광 통신을 활용한다면 수중에서 다이버-다이버간 의사소통 뿐만 아니라 수중 촬영 영상등을 선상이나 육상으로 실시간 전송하여 해상 크레인과 같은 중장비와 연계한 작업수행에도 활용할 수 있을 것이다. 또한 다이버들의 안전사고를 방지하기 위하여 작업선에서도 다이버의 상태를 확인할 수 있는 안전장치로도 활용 가능할 것이다. Fig. 10은 일본 다이오 요텐사와 Nakagawa Labs Inc.에서 개발 중인 수중 다이버 가시광 통신장치이다.

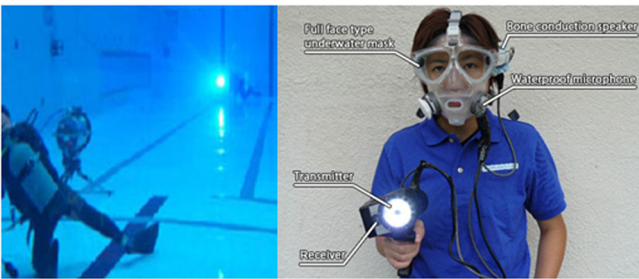


Fig. 10 Japanese company's diver underwater optical communication device

4.3 해양방위산업 분야

기동중인 군사용 잠수함과의 통신을 위하여 기존에는 RF(Radio Frequency)통신이나 수중음향통신 기법이 적용되었으나 이는 적에게 노출되기 쉬워 가로채기(Interception)나 재밍(Jamming) 기회를 제공하게 될 수도 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 고지향성을 가지면서 해수 투과율이 높은 청록 레이저를 이용한 방위산업 목적의 가시광 수중통신이 연구되고 있다. 가시광 수중통신을 활용할 경우, 소스신호 가로채기나 재밍 등의 해킹시도가 매우 어려울 뿐만 아니라 많은 데이터를 고속으로 짧은 시간에 상호교환이 가능하므로 통신 노출시간을 다른 통신수단에 비하여 크게 단축시킬 수 있는 점은 저피탐(Low probability of interception, LPI)을 달성하기 쉽게 되므로 결과적으로 기동중인 잠수함이 노출될 확률이 감

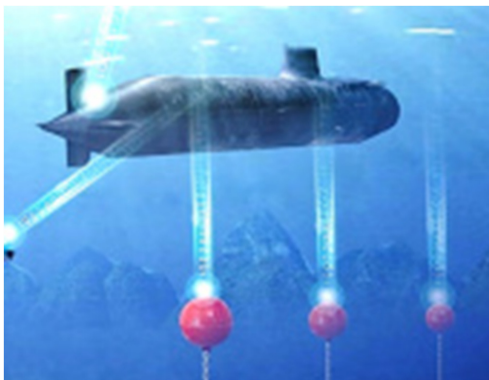


Fig. 11 Underwater optical communication application of military submarine and UUV

소하는 효과가 있다.

또한 공격형 잠수함 탑재 무인잠수정(Unmanned underwater vehicle, UUV)의 다양한 군사적 활용도가 증가하고 있어 여기에 수중 가시광 통신기술을 적용한다면 UUV의 정밀 사출 및 도킹, 실시간 화상데이터 및 대용량 수집데이터를 짧은 시간 내에 전송 등을 실현할 수 있어 UUV의 보다 효과적인 군사적 응용이 가능해질 것이다.

4.4 광역 수중통신 네트워크망 분야

광역 수중통신 네트워크는 넓은 범위의 수중에 걸쳐서 각종 수중 정보를 수집하고 이를 수중 기지국을 통해 지상으로 전송하는 형태로, 수중 센서를 통해 수집된 정보가 해양 기후 관측 및 생태 환경 분석 등의 분야와 선박의 항로 정보 등 해운산업 분야, 영해 방위를 위한 국방 분야 등 다양한 영역에서 활용이 가능하다. 또한, 수중에서의 탐지 기능을 통해 해수의 온도와 흐름뿐만 아니라 해저 지진과 등의 감지를 통해 해양 기후의 관측과 해저에서 시작되는 자연 재해에 대해 보다 정확한 예측을 하는 것은 물론 선박 사고 등에 대해서도 신속한 대처가 가능하기 때문에 우리나라를 포함한 각국에서 광역 수중통신 네트워크에 관심과 투자개발이 활발하게 진행되고 있다.

주목할 만한 사례로는 유럽연합의 유·무선 방식을 혼용한 ‘썬라이즈 프로젝트’와 캐나다 비영리단체 오션 네트워크에서 운영하고 있는 유선망 기반 센서 수집 및 수집데이터 실시간 원격 관측시스템이 있다. 특히 해양의 물리적, 화학적, 생물학적, 지질학적 수중 데이터가 200기가바이트 이상이 매일 수집되고 있다. 이 방대한 데이터를 전송 및 처리하기 할 수 있는 통신수단은 수중 가시광 통신 기술이 매우 유력하다. 수중광 통신 노드는 통신거리가 짧은 단점이 있지만 광섬유로 이들을 길게 연결하면 초고속 광역 통신망이 구성될 것이다. 이러한 시스템을 구성하면 수중 광통신 관련 제품들의 시장이 크게 확장될 것으로 사료된다. Fig. 12는 Salish Sea 수역에 구축된 광역 수중통신 네트워크 시스템을 나타낸 것이다.

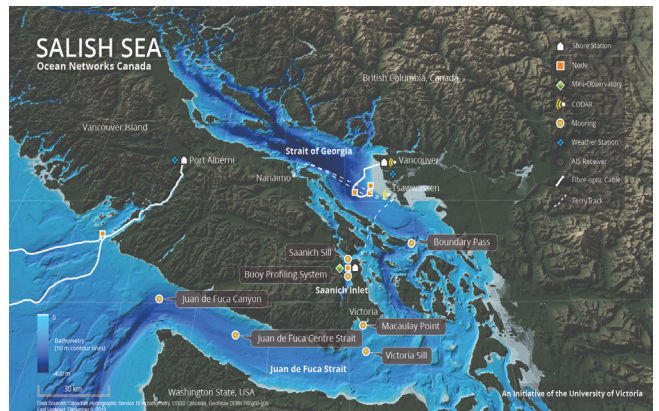


Fig. 12 Wide-area underwater communication network system built in Salish Sea

5. 수중 광 통신 시스템 설계

앞에서 서술한 국외 연구동향과 같이 수중드론의 개발 및 활

용이 증가하면서 함께 이들의 임무도 점차 다양해지고 있다. 그리고 이를 보다 저비용, 효율적으로 운용하기 위해 다양한 운용 시스템에 대한 아이디어가 제안되고 있다. 이 아이디어를 실현하기 위한 핵심수단으로 수중에서 대량의 정보를 빠르게 전송하는 통신기술이 점점 중요한 이슈가 되고 있다.

본 논문에서는 이러한 동향에 발맞춰 수중에서 동화상데이터와 같은 대량의 데이터를 짧은시간에 전송할 수 있는 통신기술을 확보하고자 LED와 광 검출센서로 구성된 수중 양방향 LED 통신 시스템을 설계, 제작하였다.

5.1 송신-수신 일체형 수중 광 통신모뎀 설계 및 제작

단일 실린더 통신모뎀으로 수중 양방향 광 통신을 구현하기 위해 송신파트와 수신파트가 통합된 형태로 하드웨어 구조를 설계하였다. 송신파트는 전송하고자 하는 데이터를 LED 광 에너지로 변환해 전송하기 위한 것으로 크게 광학장치, LED, LED 드라이버, 컨트롤러로 구성되어 있으며 수신파트는 LED 송신기에서 방출된 광을 검출하고 적절한 신호처리를 통해 원래의 데이터를 복원하는 장치로 크게 집광장치, 포토센서, 전단증폭기, 2차 증폭기 및 신호처리기로 구성되어 있다. 이를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

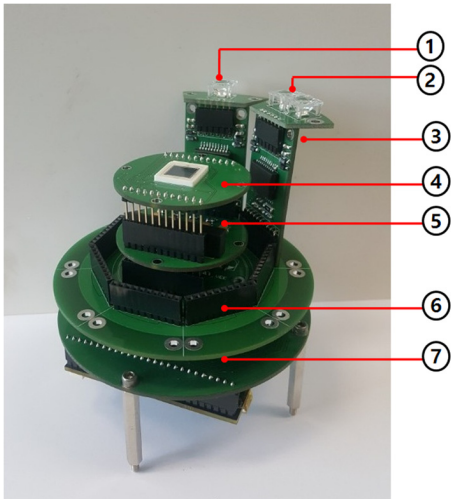


Fig. 13 Integrated optical modem H/W structure

- ① : LED 광의 직진성을 향상시킬 수 있는 콜리메이트 렌즈 등의 광학 장치로 구성하였다.
- ② : 수중에서 투과율이 좋은 450nm 청색파장의 LED로서 고효율이며 고속 응답이 가능한 Low Capacitance LED를 선정하였다.
- ③ : 전송하고자 하는 데이터를 LED 구동 전류로 변환하며 특히 매우 빠른 속도로 LED를 On-off를 하여야 하므로 고속의 LED 드라이버를 구성하였다.
- ④ : 광수신기는 고이득 포토다이오드를 사용하여 저에너지 광 신호를 효과적으로 검출하고 주변 광 잡음을 필터링하고 통신 데이터를 디코딩 할 수 있도록 구성하였다.
- ⑤ : 포토다이오드의 출력 전류를 입력으로 받아 비례전압을 출력하는 전단 증폭기 및 전단증폭기로부터 얻어진 신호에 노이즈 제거, 구형파 복원등의 신호처리 과정을 거

쳐 원신호 복원을 하는 신호처리 시스템을 단일 기판에 집적하였다.

- ⑥ : 전단증폭기 게인, 노이즈 차단주파수 설정, 구형파 복원 기준점 등의 광 수신에 관련된 파라미터를 원격으로 제어할 수 있도록 구성하였으며 자율 알고리즘에 의해 최적화된 광 수신 파라미터를 스스로 조정하도록 프로그래밍하였다.
- ⑦ : RS422, RS485, Ethernet의 통신 인터페이스를 지원하기 위한 보드로 통신모뎀 제어를 위한 별도의 통신처리 회선을 포함하도록 구성하였다.

개발한 광 통신모뎀의 설계목표 사양을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Optical modem design specification

Light source	450 nm BLUE LED Array
Optical Power	6 Watts (Radiated light)
Optical Beam	7° Half angle emitter beam
Sensor	PIN, APD
Comm Range	20 metres maximum
Bit Rate	0.1 ~ 5 Mbps
Comm Interface	RS422, RS485, Ethernet

5.2 제작한 광 통신모뎀 통신성능 검증

제작한 광 통신모뎀의 수중통신 성능을 평가하기 위해 가로 3M 크기의 실험수조에서 수중통신 실험을 수행하였다(Fig. 14). 송수신부 거리를 실험수조의 최대 길이인 3m로 고정하고 안정적으로 통신 가능한 최대 통신속도를 측정하였다. 측정 방법으로는 전송 데이터 0x00~0xFF 중에서 0xAA(0b01010101) 또는



Fig. 14 LED underwater communication performance test

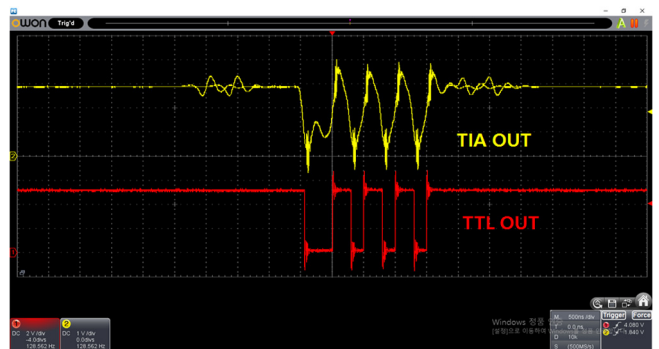


Fig. 15 Receive waveform of 0xAA data

0x55(0b10101010)가 비트변화율이 가장 높은 점(Fig. 15)을 이용하여 0xAA의 1Byte 데이터를 연속적으로 송신 및 수신하여 값이 일치하는지 검사하는 소프트웨어를 작성하여 반복시험을 10만 번 이상 수행하는 방법으로 통신성능을 측정하였다.

그 결과, 최대 4Mbps까지, 10만 번 테스트 중 13개 에러 발생율로 안정적인 수중통신이 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 개발한 통신모뎀은 최대 5Mbps까지 통신가능하도록 설계하였으나, 사용한 PC to RS485 통신 인터페이스 장비가 최대 4Mbps까지 지원되는 문제점이 있어 본 실험에서는 최대 4Mbps까지 실험을 수행하였다.

6. 수중 광 통신을 이용한 수중동영상 통신 시스템 설계 및 제작

6.1 수중 광 통신용 영상 통신 소프트웨어 설계

USB CAM(Universal serial bus camera)에서 촬영한 이미지 데이터를 수중 광통신을 통해 전송하는 영상 전송 소프트웨어의 개념설계도를 Fig. 16과 같이 나타내었다. 카메라 호환성을 높이기 위해 USB CAM 종류의 카메라를 호환할 수 있으며 사용자가 지정한 해상도로 이미지 캡처를 해서 얻은 비트맵 이미지 데이터를 JPEG로 압축하여 이미지 용량을 줄인다. 압축된 JPEG 이미지를 Byte 배열로 변환한 후 STX(Start of text), 전체데이터 길이, ETX(End of text) 등의 필요한 정보를 추가하여 프로토콜 패킷 매칭을 한 후 광 통신 모뎀의 송신측에 전송한다.

LED 송신기와 광수신기가 한 쌍으로 구성된 통신모듈을 수면과 수중에 각각 설치한다. 그리고 이 통신모듈들은 서로 광

통신 모뎀에서 수신된 이미지 데이터를 파싱, 디코딩하여 영상 출력하는 영상 수신 소프트웨어의 개념설계도를 Fig. 17과 같이 나타내었다. 광 통신 모뎀에서 수신된 데이터는 상시 수신버퍼에 저장되며 소프트웨어의 쓰레드 프로그램은 수신 버퍼에 저장된 데이터를 파싱하여 STX, 이미지 데이터길이, ETX를 분리한다. 분리된 이미지 데이터는 JPEG 디코딩을 통해 이미지를 복원하며 복원된 이미지에 이미지 확대 축소 등과 같은 필요한 이미지 보정 작업을 한 후 최종적으로 사용자의 모니터에 이미지를 출력한다.

위 Fig. 16과 Fig. 17의 이미지 송신-수신 절차 한번에 1프레임의 영상 전송이 이루어지며 보레이트, 소프트웨어 처리시간 등에 따라 초당 전송, 수신 가능한 최대 프레임 수가 결정된다.

6.2 수중 광 통신용 영상 통신 시험 및 결과

5.2절에서 기술한 바와 같이 구성된 실험수조 환경에서 수중 광 통신모뎀을 설치하고 영상 통신 시험을 수행하였다(Fig. 18). 영상 전송 시험 결과를 Table 6에 나타내었다.

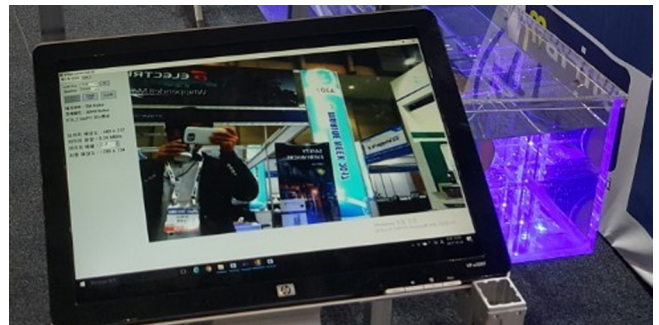


Fig. 18 Video transmission / reception software UI & Video communication experiment environment

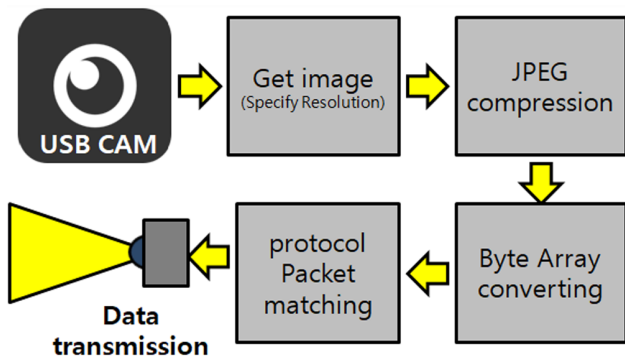


Fig. 16 Schematic of underwater video data transmission

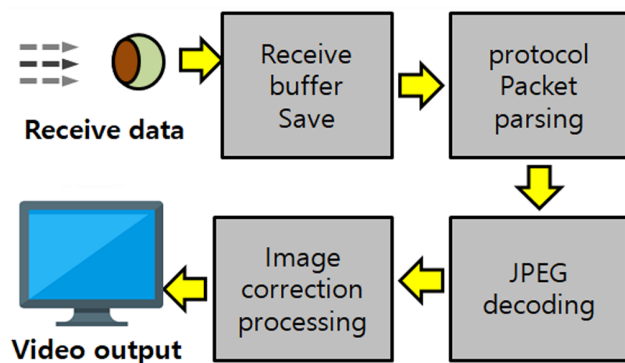


Fig. 17 Schematic of receiving underwater video data

Table 6 Video transmission test result

Bit Rate	4 Mbps
Image Resolution	480×272
Image Data Size	Average 0.2 Mbit
Received image frame	20 FPS
Error rate	no error in 10 hour continuous test

광 통신모뎀의 보레이트는 4Mbps로 하였으며 480×272 해상도의 이미지 데이터를 전송하고자 했을 때 평균 이미지 데이터의 크기는 0.2Mbit 전후로 측정이 되었다. 실제로 영상전송을 했을때 20FPS 정도의 프레임이 측정되었으며 광 통신모뎀의 광을 차단하지 않는 이상 이미지 수신에 에러가 발견되지 않았다.

7. 결 론

수중드론의 개발 및 활용이 증가하면서 함께 이들의 임무도 점차 다양해지고 있다. 그리고 이를 보다 저비용, 효율적으로 운용하기 위해 다양한 운용 시스템에 대한 아이디어가 제안되고 있다. 이 아이디어를 실현하기 위한 핵심수단으로 수중에서 대량의 정보를 빠르게 전송하는 통신기술이 점점 중요한 이슈

가 되고 있지만 음향과 통신은 수중에서 장거리 전파가 가능하지만 낮은 대역폭 문제점에 의해 수중에서 많은 용량의 데이터를 고속으로 전송하기 어렵기 때문에 이런 문제점을 해결할 필요가 있다.

본 논문에서는 음향과 수중통신과 가시광 수중통신 기술을 비교분석하고, 수중 광 무선통신에 대한 국내외 연구동향과 가시광 수중통신의 활용분야를 소개하였다. 또한 소개한 수중 광 무선통신을 활용한 다양한 수중드론 운용 시스템 아이디어를 실현하기 위한 수단으로 수중에서 화상데이터와 같이 대량의 데이터를 빠른 속도로 전송할 수 있는 통신기술을 확보하고자 LED와 광 검출센서로 구성된 수중 양방향 LED 통신 시스템을 연구 개발하였다. 그리고 개발한 통신 시스템을 길이 3미터 수조에서 4Mbps 통신 속도로 480×272 해상도의 이미지를 초당 20 프레임의 속도로 수조에서 동화상데이터 전송 실험을 성공적으로 수행하였다.

본 논문에서 개발한 양방향 LED 통신 시스템은 수중에서 대량의 데이터 고속전송이 필요한 다양한 수중드론에 적용할 수 있을 것으로 기대되며 향후 수중 광 통신모뎀의 활용범위를 높이기 위해 멀티빔 소나 등의 대용량 계측 데이터 무선 통신 실험 등을 실험실에서 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원이 지원하는 2017년도 민군겸용기술개발사업인 다중센서를 이용한 무인잠수정의 중단 유도 및 도킹 기술 개발 과제로 수행된 연구결과임.

References

- Bowen, A.D., Jakuba, M.V., Farr, N.E., Ware, J., Taylor, C., Gomez-Ibanez, D., Machado, C.R., Pontbriand, C., 2013. An Un-tethered ROV for Routine Access and Intervention in the Deep Sea. In *Oceans-San Diego 2013*, IEEE., 1-7.
- Donic, M., Detweiler, C., Vasilescu, I., Rus, D., 2010. Using Optical Communication for Remote Underwater Robot Operation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 4017-4022.
- Farr, N., Chave, A., Freitag, L., Preisig, J., White, S., Yoerger, D., Titterton, P., 2005. Optical Modem Technology for Seafloor Observatories. In *OCEANS 2005, Proceedings of MTS/IEEE*, 928-934.
- Farr, N.E., Ware, J.D., Pontbriand, C.T., Tivey, M.A., 2013. Demonstration of Wireless Data Harvesting from a Subsea Node using a "Ship of Opportunity". In *Oceans-San Diego 2013*, IEEE, 1-5.
- Kaushal, H., Kaddoum, G., 2016. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 4, 1518-1547.
- Pontbriand, C., Farr, N., Ware, J., Preisig, J., Popenoe, H., 2008. Diffuse High-bandwidth Optical Communications. In *OCEANS 2008*, IEEE, 1-4.
- Pontbriand, C., Farr, N., Hansen, J., Kinsey, J.C., Pelletier, L.P., Ware, J., Fourie, D., 2015. Wireless Data Harvesting using the AUV Sentry and WHOI Optical Modem. In *OCEANS'15 MTS/IEEE Washington*, IEEE, 1-4.
- Simpson, J.A., Hughes, B. L., Muth, J.F., 2012. Smart Transmitters and Receivers for Underwater Free-space Optical Communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(5), 964-974.

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

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

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

극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동* · 김길동** · 이길동** ← (한글이름)

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

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

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

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

1. 서론

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

2. 극한조건의 상사

2.1 파랑조건의 상사

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

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

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

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

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

2.2 바람조건외의 상사

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

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

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

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

3. 표준형 등부표 모형시험

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

Table 1 Computed wind and current forces on buoy models

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

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

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

4. 모형시험 결과 및 해석

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

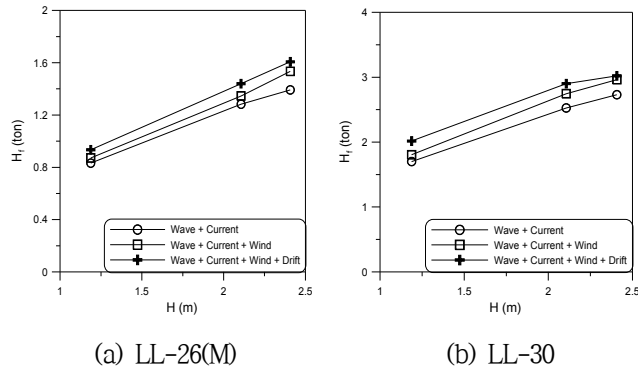


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (그림은 영문으로 작성)

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

5. 결 론

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

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

후 기

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

참 고 문 헌

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

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

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

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

(example for proceedings) ⇒

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

(example for journals) ⇒

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

(example for books) ⇒

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

(example for websites) ⇒

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

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

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

<주>

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

General Information for Authors

Requirement for Membership

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

Publication type

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

Manuscript submission

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

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

Submission checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Article structure

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

Abstract

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

Keywords

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

Unit

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

Equations

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

Tables

Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Each

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

Figures

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

Reference

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

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

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

Examples:

Reference to a journal publication:

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

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

Reference to a book:

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

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

Reference to a proceeding:

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

Reference to a website:

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

Journal abbreviations

Journal names should not be abbreviated.

Revised manuscripts

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

Proofs and reprints

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

Peer review

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

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

Page charge

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

Editing checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Transfer of copyright

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

Authors' Checklist

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

< Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

< **Submission checklist** >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Ethical Codes of Research

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

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

A. Foundational Spirit

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

B. Fundamental Canons

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

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

C. Practical Platforms

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

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

D. The Scope of Manuscript

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

E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research

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

F. Screening System, Processing Criteria and Procedure

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

contributor a chance to defend him/herself.

2. Processing Criteria

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

3. Processing Procedure

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

G. Ethical codes of Editing

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

Supplementary Provisions

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

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

Publishing Agreement

Article details

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

YOUR STATUS

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

ASSIGNMENT OF COPYRIGHT

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

SCHOLARLY COMMUNICATION RIGHTS

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

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

Corresponding author :

name

signature

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

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

USER RIGHTS

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

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

REVERSION OF RIGHTS

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

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

1. 본 학회지에 투고하고자 하는 사람은 한국해양공학회 회원임을 원칙으로 하며 공저인 경우에는 적어도 1인 이상이 회원이어야 한다. 단, 본 학회의 편집위원회가 특별히 인정한 사람은 예외로 한다.
2. 원고는 학술논문, 기술보고 및 자료를 포함하고, 학술논문의 경우 다른 학술지에 게재되지 않은 것이라야 한다. 학술지라 함은 투고 논문에 대한 적절한 심사체계와 주기적 발간이 이루어지는 저널(Journal) 등을 의미한다. 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구 보고서, 학위논문, 학술기사 등 모든 원고는 투고가 가능하다. 또한 본 학회지에 게재되면 본 학회 편집위원회의 서면승인 없이 타학술지에 전부 또는 일부가 동일형식으로 발표되어서는 안되며, 저작권은 학회에 귀속된다.
3. 투고논문 중 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구보고서, 학위논문, 학술기사 등의 경우는 각주를 통해서 아래 예와 같이 원고 전체 혹은 부분이 출판되었음을 명시하여야 한다.
예) 본 논문은 2008년 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

제32권 제2호(통권 제141호)

인 쇄 : 2018년 4월 26일

발 행 : 2018년 4월 30일

발행인 : 윤중성

편집인 : 김윤해

발 행 소 : 사단법인 한국해양공학회

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

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

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