



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

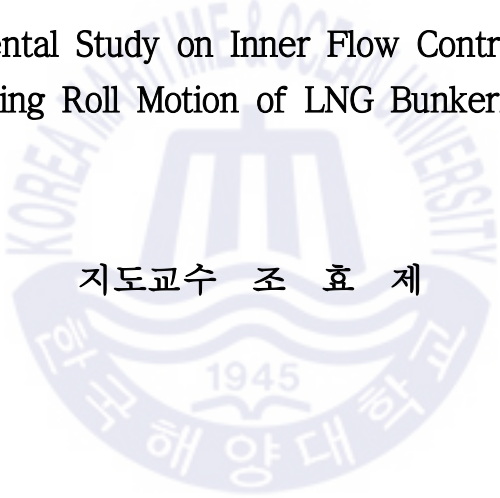
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# LNG병커링선 횡동요 저감을 위한 탱크 유동제어에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on Inner Flow Control of Tanks  
for Reducing Roll Motion of LNG Bunkering Vessel



지도교수 조 효 제

2020년 8월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

이 태 경

본 논문을 이태경의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 성 욱 (인)

위 원 조 효 제 (인)

위 원 이 승 재 (인)

2020년 7월

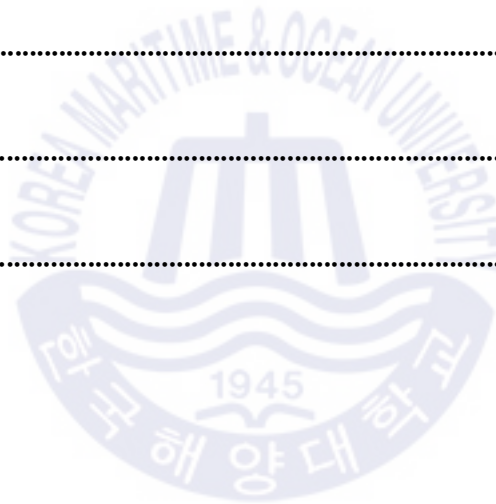
한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	viii
<b>1. 서 론</b>	
1.1 연구필요성 .....	1
1.2 연구현황 .....	5
1.3 연구내용 .....	7
<b>2. 이론 해석</b>	
2.1 주과수영역 응답해석 .....	8
2.1.1 자유표면 경계조건 .....	9
2.1.2 물체표면 경계조건 .....	11
2.1.3 경계치 문제와 유체력 .....	15
2.1.4 과강제력과 전달함수 .....	17
2.2 횡동요 운동방정식의 유체력 계수 .....	22
<b>3. 모형 실험</b>	
3.1 실험장비 .....	25
3.2 실험모형 .....	27
3.3 실험조건 .....	34

#### 4. 결과 및 고찰

4.1 자유횡동요시험 .....	39
4.2 규칙과 중 횡동요 응답 .....	43
4.2.1 탱크 내 액체적재율에 따른 횡동요 응답 비교 .....	44
4.2.2 탱크형식에 따른 횡동요 응답 비교 .....	49
4.3 불규칙과 중 횡동요 응답 .....	59
4.3.1 불규칙과 및 횡동요 응답비교의 시간이력 .....	60
4.3.2 횡동요 응답의 스펙트럼 비교 .....	62
4.3.3 횡동요 응답의 유의치 비교 .....	73
5. 결론 .....	75
감사의 글 .....	76
참고문헌 .....	77



## List of Tables

<b>Table 1</b> List of LNG bunkering vessels .....	3
<b>Table 2</b> Characteristic of wave probe .....	25
<b>Table 3</b> Measurement ranges .....	26
<b>Table 4</b> Capacity of displacement sensor .....	27
<b>Table 5</b> Main principles of LNG bunkering vessel .....	27
<b>Table 6</b> Principal particulars of LNG bunkering vessel .....	30
<b>Table 7</b> 1:100 Main principles of developed tanks .....	32
<b>Table 8</b> Test matrix .....	38
<b>Table 9</b> Natural periods of LNG bunkering vessel with different tanks ·	41
<b>Table 10</b> Natural frequencies of LNG bunkering vessel and sloshing tank with different filling ratios .....	42
<b>Table 11</b> Comparison of significant roll motions for IMO type C tank and Developed 3.77 tank with different filling ratios .....	73

# List of Figures

<b>Fig. 1</b> Forecast of LNG fueled ship market, Condition of LNG fueled shipbuilding .....	1
<b>Fig. 2</b> Ship To Ship(STS) LNG Bunkering .....	2
<b>Fig. 3</b> LNG bunkering vessel (Kairos) .....	2
<b>Fig. 4</b> Types of LNG tanks .....	4
<b>Fig. 5</b> Coordinate System .....	8
<b>Fig. 6</b> Transformation of Coordinations .....	12
<b>Fig. 7</b> Relationship between $S$ and $S_m$ .....	16
<b>Fig. 8</b> Schematic of 2D wave basin .....	25
<b>Fig. 9</b> 4-Degree of freedom measuring instrument .....	26
<b>Fig. 10</b> Model of LNG bunkering vessel (a) front view; (b) 3D view; (c) side view; (d) top view .....	28
<b>Fig. 11</b> Space for weights of the vessel .....	28
<b>Fig. 12</b> 1:100 Model of 5.1k LNG bunkering vessel (a) front view; (b) side view .....	29
<b>Fig. 13</b> 1:100 Schematic of IMO type C tank depths with different filling ratios .....	30
<b>Fig. 14</b> Model of developed tank (a) front view; (b) 3D view; (c) side view; (d) top view .....	31
<b>Fig. 15</b> 1:100 Schematic of developed tanks on side view .....	33
<b>Fig. 16</b> Significant wave height and average wave period of Korea oceans .....	35

<b>Fig. 17</b> Scale model test set up to measure LNG bunkering roll motion	36
<b>Fig. 18</b> Scale model test set up to research inner flow	37
<b>Fig. 19</b> Roll free decay test of LNG bunkering vessel	38
<b>Fig. 20</b> Roll free decay test of LNG bunkering vessel with 40% filled tank	39
<b>Fig. 21</b> Comparison of roll motion RAO for empty(0%) between numerical simulation and experiment	43
<b>Fig. 22</b> Comparison of roll motion responses for 20% filled with different tanks	45
<b>Fig. 23</b> Comparison of roll motion responses for 40% filled with different tanks	46
<b>Fig. 24</b> Comparison of roll motion responses for 60% filled with different tanks	47
<b>Fig. 25</b> Comparison of roll motion responses for 80% filled with different tanks	48
<b>Fig. 26</b> Comparison of roll motion responses for IMO type C tank with different filling ratios	49
<b>Fig. 27</b> Comparison of phase lags for 40%, 80% of IMO type C tank at resonance points	50
<b>Fig. 28</b> Comparison of roll motion responses for Block tank with different filling ratios	51
<b>Fig. 29</b> Comparison of roll motion responses for Developed 1.35 tank with different filling ratios	52
<b>Fig. 30</b> Comparison of roll motion responses for Developed 2.41 tank with different filling ratios	53
<b>Fig. 31</b> Comparison of roll motion responses for Developed 3.77 tank with different filling ratios	54
<b>Fig. 32</b> Comparison of roll motion responses for Developed 5.43 tank with different filling ratios	55



**Fig. 33** Comparison of roll motion responses for Developed 8.12 tank with different filling ratios ..... 56

**Fig. 34** Comparison of inner flow between IMO type C tank and Developed 3.77 tank, filling ratio=40%, Incident wave period=1.2sec (IMO type c tank capture: 25.05sec, 25.35sec, 25.66sec, 26.94sec, Developed 3.77 tank capture: 24.6sec, 24.92sec, 25.23sec, 25.54sec) ..... 57

**Fig. 35** Comparison of inner flow between IMO type C tank and Developed 3.77 tank, filling ratio=60%, Incident wave period=1.25sec (IMO type c tank capture: 26.25sec, 26.56sec, 26.88sec, 27.2sec, Developed 3.77 tank capture: 25.8sec, 26.12sec, 26.43sec, 26.74sec) ..... 58

**Fig. 36** Moment direction of vessel and inner flow in tank ..... 58

**Fig. 37** 1:100 Irregular wave spectral density ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ ,  $11.5\text{sec}$ ) ..... 59

**Fig. 38** Time history of irregular wave ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ ) ..... 60

**Fig. 39** Time history of irregular wave ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ ) ..... 60

**Fig. 40** Comparison of LNG bunkering motion time history of roll motion for 20% filled IMO type C tank and Developed 3.77 tank ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ ) ..... 61

**Fig. 41** Comparison of LNG bunkering motion time history of roll motion for 60% filled IMO type C tank and Developed 3.77 tank ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ ) ..... 62

**Fig. 42** Comparison of roll motion response spectra for IMO type C tank with different filling ratios ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ ) ..... 63

**Fig. 43** Comparison of roll motion response spectra for IMO type C tank with different filling ratios ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ ) ..... 64

**Fig. 44** Comparison of roll motion response spectra for Developed 3.77 tank with different filling ratios ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ ) ..... 66

**Fig. 45** Comparison of roll motion response spectra for Developed 3.77 tank with different filling ratios ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ ) ..... 67

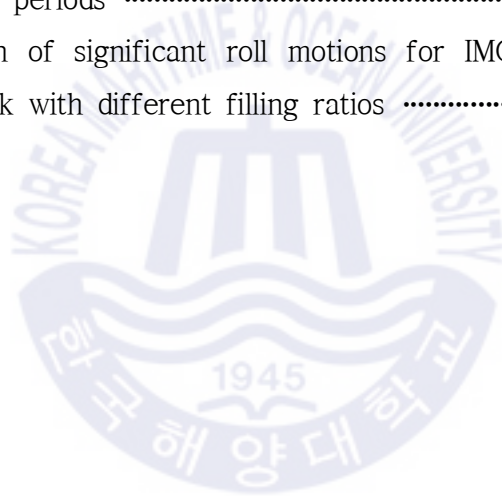
**Fig. 46** Comparison of roll motion spectra response for 20% filled with different tanks and periods ..... 69

**Fig. 47** Comparison of roll motion spectra response for 40% filled with different tanks and periods ..... 70

**Fig. 48** Comparison of roll motion spectra response for 60% filled with different tanks and periods ..... 71

**Fig. 49** Comparison of roll motion spectra response for 80% filled with different tanks and periods ..... 72

**Fig. 50** Comparison of significant roll motions for IMO type C tank and Developed 3.77 tank with different filling ratios ..... 74



# A Experimental Study on Inner Flow Control of Tanks for Reducing Roll Motion of LNG Bunkering Vessel

Lee Taekyung

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

To reduce a roll motion of the 5.1k LNG bunkering vessel with IMO type C tanks, a new cylindrical tank is developed. The coupling effect between the roll motion of vessel and inner-tank flow is investigated by a series 1:100 scale model tests in two-dimensional basin.

The vessel fitted with two cylindrical tanks was designed and built. The series of model tests with the vessel in five different load conditions are conducted, namely Empty(0%), 20%, 40%, 60%, 80% of volume loaded conditions in regular waves and irregular waves.

Due to the developed tanks with a swash bulkhead and a swash hole, a roll resonance frequency of the vessel is shifted and roll motion of the vessel with developed tanks is reduced comparing with IMO type C tanks in both regular waves and irregular waves.

**KEY WORDS:** Roll motion 횡동요; Coupling effect 연성 효과; LNG bunkering Vessel LNG병커링선; Cylindrical tank 실린더형태 탱크; Resonance frequency 공진 주파수;

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구필요성

전 세계적으로 공학에 친환경을 중요하게 고려하는 추세이며, 현재 조선 해양 시장은 환경과 안전을 동반한 효율성을 중시한다. 2020년도부터 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)가 규정한 모든 선박을 대상으로 연료에서 배출되는 황산화물(SOx)을 3.5%에서 0.5% 이하로 제한하는 규제가 발효되었다. 이러한 규제에 대응할 수 있는 방안은 고유황유를 대신해 LNG(Liquefied Natural Gas)를 사용하거나, 스크리블(Scurbber)를 설치하거나, MDO(Marine Diesel Oil)/MGO(Marine Gas Oil) 등 Very Low Sulfur Oil로 불리는 초저유황유로 대체하는 방법을 선택해야 한다. 이 중 LNG연료 사용이 대세다. LNG는 미세먼지 및 황산화물의 배출은 거의 없고, 이산화질소가 40~70%, 이산화탄소는 약 25%가 적게 배출되는 것으로 조사 됐기 때문이다. 이로 인해 전 세계 LNG추진선(LNG Fueled Ship)은 2014년 68척, 2015년 101척, 2016년 186척, 2017년 228척, 2018년 254척으로 급증하고 있다. 2019년에도 LNG연료 전용선 150척이 운항되고 신규로 57척이 발주될 것으로 예상되고 있으며, LNG연료 선으로 쉽게 전환될 수 있는 레디(Ready) 선박 112척이 전망되고 있다. 이에 따라 LNG추진선에 연료를 주입하기 위한 LNG병커링(LNG bunkering) 산업도 전 세계적으로 활기를 띠고 있다.

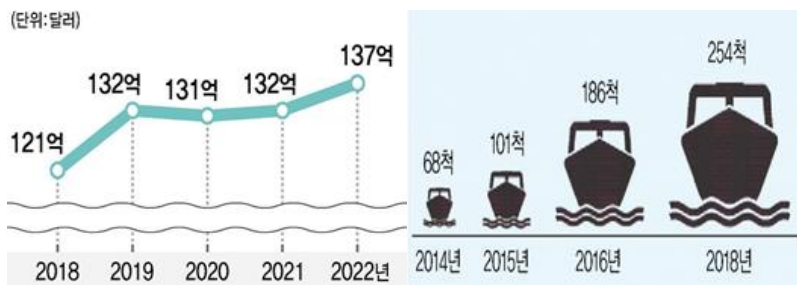


Fig. 1 Forecast of LNG fueled ship market <source: DNV-GL>, Condition of LNG fueled shipbuilding <source: Clarkson research>

LNG병커링은 LNG추진선에 LNG를 공급하는 서비스, 기술 및 설비 등 LNG 충전과 관련한 모든 분야를 말한다. 2017년 벨기에 지브르그(Zeebrugge) 항구에서 5100CBM LNG병커링선인 Engie Zeebrugge가 최초로 STS(Ship-To-Ship) 병커링을 성공하였다.

STS방식은 기존에 사용된 병커링 방식인TTS(Truck-To-Ship), PTT(Portable Transfer Tank), PTS(Pipe To Ship, Terminal to Ship) 방식보다 안정성, 신속성, 경제성 측면에서 더 효율적이기 때문에 LNG병커링선의 발주량이 증가하고 있는 추세이다.



Fig. 2 Ship To Ship(STS) LNG Bunkering



Fig. 3 LNG bunkering vessel (Kairos)

현재 LNG병커링이 가장 활발한 북유럽뿐만 아니라 북미, 아시아등 전 세계적으로 LNG병커링선을 중·소형선으로 운용하고 있다. LNG병커링선에 주로 설치되는 탱크는 Independent IMO type C(이하 IMO type C) 탱크로 주로 중·소형선에 적합하고 간단한 구조의 연료공급시스템, 다른 형태의 탱크에 비해 상대적으로 짧은 제작기간 등 여러 가지 장점이 있다. LNG추진선 중 대형 컨테이너선은 화물의 적재와 하역의 특성상 IMO type C 탱크의 배치가 쉽지 않기 때문에 멤브레인(Membrane)탱크가 적용 가능한 LNG추진선의 개발도 활발히 진행 중이다.

Table 1 List of LNG bunkering vessels

Name(or owner)	Delivery Year	Tank Capacity(m <sup>3</sup> )	Tank type
Engie Zeebrugge	2016	5,000	IMO Type C
Cardissa	2017	6,500	IMO Type C
Coralius	2017	5,800	IMO Type C
Coral Methane	2018	7,500	IMO Type C
Kairos	2018	7,500	IMO Type C
Clean Jacksonville	2018	2,200	IMO Type C
Stolt-Nielsen Gas	2019	7,500	IMO Type C
KOGAS	2019	7,500	Membrane (KC-1)
Victrol/CFT	2019	3,000	IMO Type C
Total/MOL	2021	18,600	Membrane (Mark III)



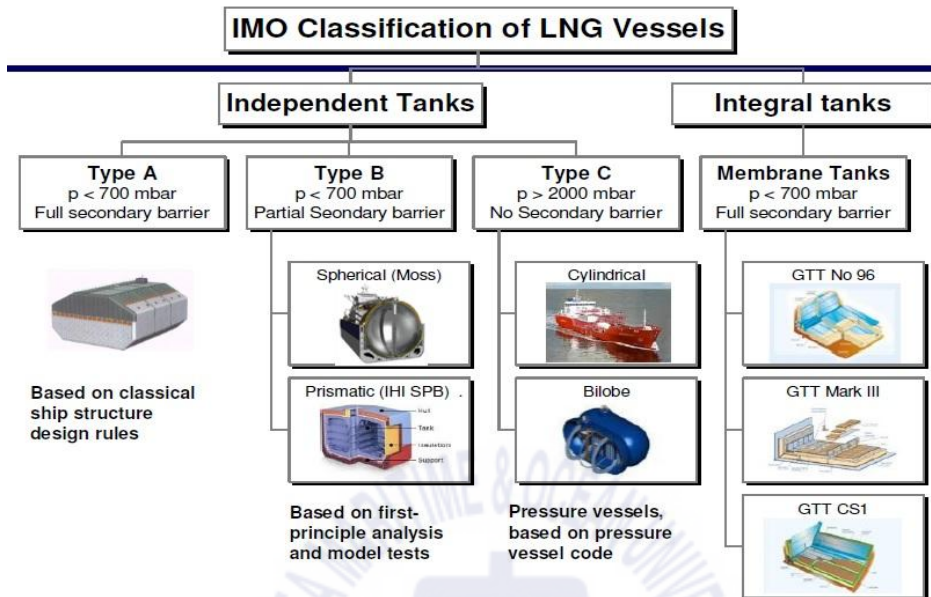


Fig. 4 Types of LNG tanks <source: Liquefied Gas carrier>

STS LNG병커링 작업 시, 선박은 파랑 중 장시간 동안 위치유지를 해야 하며 이에 따라 작업 성능과 안전을 저해하는 상황을 고려해야 한다. LNG운반선과 추진선등 LNG선박과 화물창에 관련된 연구는 다양한 주제로 연구자들에 의해 다수 수행되어 왔다. 그러나 LNG병커링선에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 특히 LNG병커링선의 특성상 탱크 내부의 화물이 액체화물이기 때문에 탱크 내부 유동과 선체운동의 연성효과에 의한 영향을 파악하는 것은 기초적이지만 개념설계 측면에서는 핵심적인 연구과제로 사료된다.

## 1.2 연구현황

LNG탱크가 설치된 선박과 탱크의 내부유동 연성 연구는 점성의 영향이 작용하는 동적 응답의 관찰을 해야 하므로 주로 모형실험, CFD(Computational Fluid Dynamics)을 통한 연구가 진행되어왔다.

Alberto, F. and Giorgio, C. (1994)은 파랑 중 슬로싱(Sloshing)과 선체의 횡동요(Roll motion), 좌우동요(Sway motin), 상하동요(Heave motion) 상호관계에 관한 모형실험을 수행하였다. 화물탱크에 액체를 4가지 다른 수위로 적재 하였으며, 횡파(Beam sea)에서의 선체 운동을 RAO(Response Amplitude Operation)로 비교분석하였다. 탱크 내부에 액체수위가 높아지면서 횡동요의 공진주파수는 저주파수 영역으로 이동하였고 슬로싱에 의한 공진주파수도 관측 되었다.

Rognebakke, O. and Faltinsen, O. (2003)은 2차원 조파수조에서 수행한 모형 실험을 통하여 사각박스 형태의 선체 운동과 내부 액체 슬로싱의 연성에 의한 영향 중 좌우동요(Sway)의 응답을 탱크 내부의 액체 적재량에 따라 비교분석 하였다. 액체가 일부 적재 되어 있는 경우(Partially filled tanks)는 경우는 그렇지 않은 경우(Empty tank)에 비해 탱크 내부의 슬로싱과 입사파의 위상차에 의해서 공진주파수에서의 값이 작게 측정 되었다. Nasar, T. (2010)와 Zhao, W. (2014) 등도 조파수조에서 바지선의 운동과 사각형 탱크내부 유동의 연성에 관한 연구를 수행하였고 Rognebakke가 수행했던 연구와 비슷한 경향의 결과를 도출하였다.

Nam and Kim (2007)은 2개의 prismatic tanks가 설치된 LNG-FPSO의 상하동요, 횡동요와 탱크 내 슬로싱의 연성효과를 연구하였다. 탱크 내부에 액체가 적재 되어 있는 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 탱크 내부의 슬로싱 영향 때문에 선체의 공진주파수가 저주파수 구간으로 이동하였고, LNG-FPSO의 횡동요 응답 값이 감소한 것을 RAO그래프를 통해 확인 할 수 있었다. 반면에 상하동요 응답은 액체의 적재유무와 관계없이 거의 같았다. 이 결과를 통해 슬로싱이 선체운동에 영향을 크게 미치지 않는 경우도 있는 것을 확인 할 수 있다.



기존연구는 대부분 사각형 탱크와 LNG운반선에 대한 연구가 이루어졌지만 Zhao, W. and McPhail, F. (2016)은 모스(Moss) 탱크를 설치한 LNG운반선에 대한 연구를 수행하였다. 탱크 내부 액체적재를 5가지 경우로 나누었고, 3차원 수조에서 선체의 90도, 180도, 270도 방향으로 파를 생성하여 실험하였다. 횡파의 횡동요 RAO는 기존연구들과 같이 탱크 내 액체적재율이 높을수록 탱크의 횡동요 응답 공진주파수에서의 피크치가 낮아지고 공진주파수가 저주파수 영역으로 이동하는 경향을 확인 할 수 있다.

최근 Kwon, C.S., et al. (2018) 등이 LNG병커링선의 Independent Type B 탱크의 슬로싱 압력 측정 연구를 수행하였다. 탱크 높이에 비례하여 내부 액체량을 8가지 경우로 나누었고 탱크의 90도, 150도, 180도 방향에서 강제동요장치를 통해 실험을 수행하였다. 탱크의 90도(Beam sea)방향에서 파를 생성 하였을 때 슬로싱 압력이 가장 높고 180도(Head sea)로 갈수록 슬로싱에 의한 압력의 크기가 줄어드는 경향을 확인 할 수 있다. 탱크의 90도(Beam sea)방향의 경우 탱크 전체 높이의 25% 액체를 적재 하였을 때 슬로싱 압력이 가장 크게 측정 되었다.

### 1.3 연구내용

본 연구는 기존에 사용하는 탱크보다 내부유동을 제어하도록 고안한 탱크를 설치하였을 때 파랑 중 LNG병커링선의 횡동요 감소를 목표로 하였다.

LNG추진선 및 병커링 시장이 커지고 있지만, LNG병커링선의 연구가 미비하다. 아울러 팔각형태의 Membrane 탱크와 사각형태의 Type B 탱크의 슬로싱에 관한 연구와 두 탱크의 슬로싱과 선체운동의 연성효과 연구는 활발하게 진행됨에 반해 현재 LNG병커링선에 실질적으로 사용되는 실린더형태의 탱크 관련 연구는 부족한 실정이다.

실린더형태의 IMO type C 탱크는 내부 슬로싱에 의한 구조적 문제가 다른 형태의 탱크에 비해 작지만 존재하고, 내부유동이 선체 횡동요에 영향을 준다. 이처럼 IMO type C 탱크를 설치할시 내부유동에 의해 발생하는 선박의 횡동요를 줄이기 위해 새로운 실린더형태의 탱크를 고안하였다.

LNG병커링선은 다른 종류의 LNG선박보다 선체의 배수량 대비 탱크 용적이 커 탱크 내부유동이 선체 움직임에 영향을 크게 미친다. LNG병커링선 특성상 연료의 적재와 하역에 따라 탱크 내부 액체의 수위가 변화하고, 탱크 적재량에 따라 선체 운동에 다른 영향을 주기 때문에 여러 액체적재량에서의 선체운동경향을 파악 하는 것이 핵심이다. 따라서 본 연구에서는 탱크의 용적과 액체화물의 적재율이 다른 경우(20%, 40%, 60%, 80%)와 액체화물이 없는 경우(0%, Empty)를 포함한 총 5가지 경우에 대하여 실험하였다.

선행연구를 참고한 결과, LNG를 싣는 선체의 운동은 횡파(Beam sea)에서 횡동요 응답이 탱크 내부유동에 영향을 가장 많이 받는다. 파랑 중 장시간 작업하는 LNG병커링선의 안정성을 파악하고자 선체 방향 90도(Beam sea)로 파를 생성하여 나타나는 선체의 횡동요 응답을 중점으로 비교 분석하였다.

## 제 2 장 이론 해석

### 2.1 주파수영역 응답해석

불규칙파중에서 선체를 강체로 가정하여 선체에 작용하는 선형 파강제력을 추정하기 위해 포텐셜이론을 적용한다. 섭동법에 의한 전개식을 2차항까지 취하여 경계치 문제의 해를 구하는 것으로써 입사파의 주기와 동일한 선형 파강제력(1차 파강제력)을 추정한다. 먼저 이론의 정식화를 위하여 Fig.5과 같이 정수면상에 원점  $O$ 를 가지고,  $Z$ 축의 양의 방향이 상방으로 향하는 공간고정 좌표계  $O-XYZ$ , 물체와 함께 운동하는 물체고정 좌표계  $O-XYZ$  및 공간고정 좌표계와 평행한 물체고정 좌표계  $O'-X'Y'Z'$ 를 사용한다. 섭동법을 적용하기 위하여 유속, 파고, 압력, 유체력, 물체의 운동등을 미소 파라메타(parameter)  $\varepsilon$ 에 대해 전개할 수 있는 것으로 가정하면,  $O-XYZ$  좌표계로 표현되는 정수면상의 원점  $O$ 에서 평가된 부체의 병진 변위벡터  $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3\}^T$ 와 회전 변위벡터  $\{\Omega\} = \{\Omega_1 \ \Omega_2 \ \Omega_3\}^T$ 는 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있다.

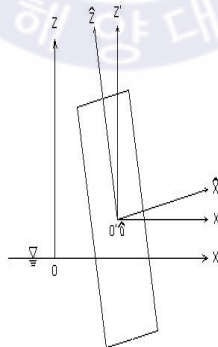


Fig. 5 Coordinate System

$$\begin{aligned}
\{\Xi\} &= \{\Xi_1 \ \Xi_2 \ \Xi_3\}^T \\
&= \varepsilon \{\Xi_1^{(1)} \ \Xi_2^{(1)} \ \Xi_3^{(1)}\}^T + \varepsilon^2 \{\Xi_1^{(2)} \ \Xi_2^{(2)} \ \Xi_3^{(2)}\}^T + O(\varepsilon^3) \\
&= \varepsilon \{\Xi^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{\Xi^{(2)}\} + O(\varepsilon^3)
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
\{\Omega\} &= \{\Omega_1 \ \Omega_2 \ \Omega_3\}^T \\
&= \varepsilon \{\Omega_1^{(1)} \ \Omega_2^{(1)} \ \Omega_3^{(1)}\}^T + \varepsilon^2 \{\Omega_1^{(2)} \ \Omega_2^{(2)} \ \Omega_3^{(2)}\}^T + O(\varepsilon^3) \\
&= \varepsilon \{\Omega^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{\Omega^{(2)}\} + O(\varepsilon^3)
\end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $\{\Xi^{(1)}\}$  와  $\{\Omega^{(1)}\}$  는 각각 부체의 1차 병진 운동벡터와 회전 운동벡터이고,  $\{\Xi^{(2)}\}$  와  $\{\Omega^{(2)}\}$  는 각각 부체의 2차 병진 운동벡터와 회전 운동벡터이다. 또,  $\Phi$  가 선형 편미분 방정식인 Laplace 방정식을 만족하므로, 각각  $\Phi^{(1)}$ ,  $\Phi^{(2)}$  등도 Laplace 방정식 식(3)을 만족한다.

$$\begin{aligned}
\nabla^2 \Phi &= 0 \\
\nabla^2(\varepsilon \Phi^{(1)} + \varepsilon^2 \Phi^{(2)} + \dots) &= 0 \\
\nabla^2 \Phi^{(1)} = 0, \quad \nabla^2 \Phi^{(2)} = 0, \quad \dots
\end{aligned} \tag{3}$$

### 2.1.1 자유표면 경계조건

Bernoulli의 방정식은 식(4)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\rho} P = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - gZ \tag{4}$$

여기서,  $\rho$  는 유체의 밀도이고, 자유표면의 방정식을  $Z = \zeta(X, Y, t)$  로 두면, 자유표면에서 식(5)이 성립한다.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - gZ = \frac{1}{\rho} P_0 = 0$$

$$gZ + \Phi_t + \frac{1}{2}(\Phi_X^2 + \Phi_Y^2 + \Phi_Z^2) = 0 \quad \text{on } Z = \zeta(X, Y, t) \quad (5)$$

여기서,  $P_0$ 는 대기압으로서 자유표면의 유체입자에 항상 일정하게 작용하므로 0으로 둘 수 있으며, 자유표면에서의 자유표면의 법선방향 속도와 그 표면에서의 유체입자의 법선방향 속도가 같다는 운동학적 조건과 자유표면의 압력이 일정하다는 동역학적 조건을 만족해야 한다. 이 조건들은 자유표면에서의 압력의 전미분이 0이 되어야 한다는 다음의 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho} \frac{DP}{Dt} &= \left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial X} \frac{\partial}{\partial X} + \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \frac{\partial}{\partial Y} + \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \frac{\partial}{\partial Z} \right) \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi + gZ \right) \\ &= \Phi_{tt} + g\Phi_Z + 2[\Phi_X \Phi_{Xt} + \Phi_Y \Phi_{Yt} + \Phi_Z \Phi_{Zt}] \\ &\quad + \Phi_X^2 \Phi_{XX} + \Phi_Y^2 \Phi_{YY} + \Phi_Z^2 \Phi_{ZZ} + 2(\Phi_X \Phi_Y \Phi_{XY} + \Phi_Y \Phi_Z \Phi_{YZ} + \Phi_Z \Phi_X \Phi_{ZX}) \\ &= \Phi_{tt} + g\Phi_Z + \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi] + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \\ &= 0 \quad \text{on } Z = \zeta(X, Y, t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\Phi(X, Y, Z, t)$ 는 입사파, 방사파, 산란파 및 이들의 상호간섭에 의한 속도포텐셜이고,  $\zeta(X, Y, t)$ 는 자유표면의 수면변위이며,  $g$ 는 중력가속도이다. 속도포텐셜과 수면변위를 미소 파라미터  $\varepsilon$ 에 대해 섭동전개하면 식(7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Phi(X, Y, Z, t) &= \varepsilon \Phi^{(1)}(X, Y, Z, t) + \varepsilon^2 \Phi^{(2)} + \varepsilon^3 \Phi^{(3)} + \dots \\ \zeta(X, Y, t) &= \varepsilon \zeta^{(1)}(X, Y, Z, t) + \varepsilon^2 \zeta^{(2)} + \varepsilon^3 \zeta^{(3)} + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

식(5)을  $Z=0$ 에서 Taylor전개하고, 식(1)를 대입하여 정리하면, 식(8)과 같이 1차 수면변위가 얻어진다.

$$\text{1st order : } \zeta^{(1)} = -\frac{1}{g} \Phi_t^{(1)} \quad \text{on } Z=0 \quad (8)$$

또, 식(6)을  $Z=0$ 에서 Taylor전개하고 식(7)에 대입하여 정리하면, 식(9)과 같이 1차 자유표면 경계조건이 얻어진다.

$$\text{1st order : } \Phi_H^{(1)} + g\Phi_Z^{(1)} = 0 \quad \text{on } Z = 0 \quad (9)$$

### 2.1.2 물체표면 경계조건

물체표면의 방정식을  $S_H(X, Y, Z, t) = 0$  으로 두고, 물체표면에서의 단위 법선 벡터를  $\{n\} = \{n_1 \ n_2 \ n_3\}^T$  라 하면, 물체표면에서의 유체의 법선방향 속도와 물체의 법선방향 속도가 같다는 물체표면 경계조건은 식(10)과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial n} \Phi = \{n\} \cdot \nabla \Phi = V_n = \{n\} \cdot \{V\} \quad \text{on } S_H \quad (10)$$

여기서,  $V_n$  과  $\{V\}$  는 각각 물체표면에서의 물체의 법선방향 속도 및 물체의 속도벡터이다. 공간고정 좌표계  $O-XYZ$ , 물체고정 좌표계  $O-X'Y'Z'$  및 공간고정 좌표계와 평행한 물체고정 좌표계  $O'-X'Y'Z'$  로 표현되는 임의점의 위치벡터를 각각  $\{X\} = \{X \ Y \ Z\}^T$ ,  $\{\mathcal{X}\} = \{\mathcal{X} \ \mathcal{Y} \ \mathcal{Z}\}^T$  및  $\{X'\} = \{X' \ Y' \ Z'\}^T$  라 하면, 식 (11) 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \{X\} &= [R](\{\mathcal{X}\} - \{\varepsilon\}) = [R]\{X'\} \\ \{\mathcal{X}\} &= [R]^T\{X\} + \{\varepsilon\} \\ \{X'\} &= [R]^T\{\mathcal{X}\} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $[R]^T$  는  $[R]$  의 전치행렬이고,  $[R]$  은 좌표 변환행렬로서 직교행렬의 특성을 가지므로 식(12)의 관계가 성립한다.

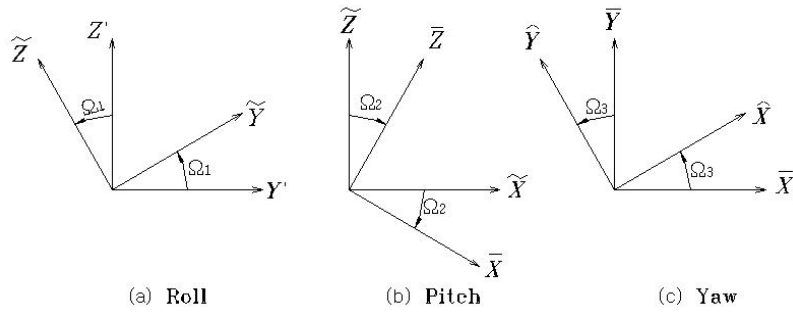


Fig. 6 Transformation of Coordinations

$$[R][R]^T = [R][R]^{-1} = [I] \quad (12)$$

변환행렬  $[R]$  은  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  의 순으로 Fig.2.2와 같이 회전하는 것으로 하면, 식(13)과 같이 얻어진다.

$$\{X\} = [A]\{X'\}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Omega_1 & \sin \Omega_1 \\ 0 & -\sin \Omega_1 & \cos \Omega_1 \end{bmatrix}$$

$$\{\bar{X}\} = [B]\{X\}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \cos \Omega_2 & 0 & -\sin \Omega_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Omega_2 & 0 & \cos \Omega_2 \end{bmatrix}$$

$$\{X\} = [C]\{\bar{X}\}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos \Omega_3 & \sin \Omega_3 & 0 \\ -\sin \Omega_3 & \cos \Omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R] = [C][B][A]$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} \cos\Omega_3 & \sin\Omega_3 & 0 \\ -\sin\Omega_3 & \cos\Omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega_2 & 0 & -\sin\Omega_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Omega_2 & 0 & \cos\Omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Omega_1 & \sin\Omega_1 \\ 0 & -\sin\Omega_1 & \cos\Omega_1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\Omega_2\cos\Omega_3 & \cos\Omega_1\sin\Omega_3 + \sin\Omega_1\sin\Omega_2\cos\Omega_3 & \sin\Omega_1\sin\Omega_3 - \cos\Omega_1\sin\Omega_2\cos\Omega_3 \\ -\cos\Omega_2\sin\Omega_3 & \cos\Omega_1\cos\Omega_3 - \sin\Omega_1\sin\Omega_2\sin\Omega_3 & \sin\Omega_1\cos\Omega_3 + \cos\Omega_1\sin\Omega_2\sin\Omega_3 \\ \sin\Omega_2 & -\sin\Omega_1\cos\Omega_2 & \cos\Omega_1\cos\Omega_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{13}$$

또,  $\{\Omega\}$  는 미소량이므로  $\sin\Omega_1$  과  $\cos\Omega_1$  을 Maclaurin 급수전개하여, 식(2)를 고려하면, 식(14)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
\sin\Omega_1 &= \Omega_1 - \frac{\Omega_1^3}{3!} + \frac{\Omega_1^5}{5!} - \dots = \varepsilon\Omega_1^{(1)} + \varepsilon^2\Omega_1^{(2)} + O(\varepsilon^3) \\
\cos\Omega_1 &= 1 - \frac{\Omega_1^2}{2!} + \frac{\Omega_1^4}{4!} - \dots = 1 - \frac{\varepsilon^2\Omega_1^{(1)2}}{2} + O(\varepsilon^3)
\end{aligned} \tag{14}$$

식(14)을 식(13)에 대입하여 변환행렬  $[R]$  을  $\varepsilon$  에 대해 정리하면, 식(15)과 같다.

$$[R] = [R^{(0)}] + \varepsilon[R^{(1)}] + \varepsilon^2[R_1^{(2)}] + \varepsilon^2[R_2^{(2)}] + O(\varepsilon^3) \tag{15}$$

따라서 식(11)의 두 번째 식(16), 세 번째 식(17)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
\{X\} &= [R]^T\{\mathbf{X}\} + \{\Xi\} \\
&= ([R^{(0)}]^T + \varepsilon[R^{(1)}]^T + \varepsilon^2[R_1^{(2)}]^T + \varepsilon^2[R_2^{(2)}]^T)\{\mathbf{X}\} \\
&\quad + \varepsilon\{\Xi^{(1)}\} + \varepsilon^2\{\Xi^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \\
&= \{\mathbf{X}\} + \varepsilon(\{\Xi^{(1)}\} + \{\Omega^{(1)}\} \times \{\mathbf{X}\}) \\
&\quad + \varepsilon^2(\{\Xi^{(2)}\} + \{\Omega^{(2)}\} \times \{\mathbf{X}\} + [H]\{\mathbf{X}\}) + O(\varepsilon^3)
\end{aligned}$$



$$= \{X^{(0)}\} + \varepsilon\{X^{(1)}\} + \varepsilon^2\{X^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \{X'\} &= [R]^T\{\mathbf{X}\} \\ &= \{\mathbf{X}\} + \varepsilon(\{\Omega^{(1)}\} \times \{\mathbf{X}\}) + \varepsilon^2(\{\Omega^{(2)}\} \times \{\mathbf{X}\} + [H]\{\mathbf{X}\}) + O(\varepsilon^3) \\ &= \{X'^{(0)}\} + \varepsilon\{X'^{(1)}\} + \varepsilon^2\{X'^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (17)$$

식(16)을 이용하여 물체표면 상에서의 물체의 속도벡터를 식(18)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \{V\} &= \{X\} \\ &= \varepsilon(\{\dot{\mathbf{X}}^{(1)}\} + \{\Omega^{(1)}\} \times \{\mathbf{X}\}) \\ &\quad + \varepsilon^2(\{\dot{\mathbf{X}}^{(2)}\} + \{\Omega^{(2)}\} \times \{\mathbf{X}\} + [H]\{\mathbf{X}\}) + O(\varepsilon^3) \\ &= \varepsilon\{V^{(1)}\} + \varepsilon^2\{V^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (18)$$

또,  $O'-X'Y'Z'$  좌표계에 대한 물체표면상의 법선벡터  $\{n\}$  과  $O-XYZ$  좌표계에 대한 법선벡터  $\{\hat{n}\}$  의 관계도 변환행렬  $[R]$  을 이용하여 식(19)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{n\} &= ([R^{(0)}]^T + \varepsilon[R^{(1)}]^T + \varepsilon^2[R_1^{(2)}]^T + \varepsilon^2[R_2^{(2)}]^T)\{\hat{n}\} + O(\varepsilon^3) \\ &= \{\hat{n}\} + \varepsilon(\{\Omega^{(1)}\} \times \{\hat{n}\}) + \varepsilon^2(\{\Omega^{(2)}\} \times \{\hat{n}\} + [H]\{\hat{n}\}) + O(\varepsilon^3) \\ &= \{n^{(0)}\} + \varepsilon\{n^{(1)}\} + \varepsilon^2\{n^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (19)$$

또, 회전운동에 대한 법선벡터  $\{X'\} \times \{n\} = \{n_4 \ n_5 \ n_6\}^T$  는 식(20)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \{X'\} \times \{n\} &= \{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\} + \varepsilon[\{\Omega^{(1)}\} \times (\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\})] \\ &\quad + \varepsilon^2[\{\Omega^{(2)}\} \times (\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\}) + [H](\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\})] + O(\varepsilon^3) \\ &= \{N^{(0)}\} + \varepsilon\{N^{(1)}\} + \varepsilon^2\{N^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (20)$$

물체표면  $S_H$ 상의 경계조건도 자유표면 경계조건과 마찬가지로 평균위치에서의 물체의 침수표면  $S_m$ 상의 경계조건으로 변환할 수 있으며, Taylor 전개에 의해  $\nabla\Phi$ 를 식(21)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\nabla\Phi(X, Y, Z, t)|_{S_H} &= \nabla\Phi|_{S_m} + [(\{X\} - \{\mathcal{X}\}) \cdot \nabla] \nabla\Phi|_{S_m} + \dots \\ &= \varepsilon \nabla\Phi^{(1)}|_{S_m} + \varepsilon^2 \nabla\Phi^{(2)}|_{S_m}\end{aligned}$$

$$+ [\varepsilon(\{\Xi^{(1)}\} + \{\Omega^{(1)}\} \times \{\mathcal{X}\}) \cdot \nabla] (\varepsilon \nabla\Phi^{(1)}|_{S_m}) + O(\varepsilon^3)$$

$$\begin{aligned}\nabla\Phi(X, Y, Z, t) &= \varepsilon \nabla\Phi^{(1)} + \varepsilon^2 \{ \nabla\Phi^{(2)} + [(\{\Xi^{(1)}\} + \{\Omega^{(1)}\} \times \{\mathcal{X}\}) \cdot \nabla] \nabla\Phi^{(1)} \} \\ &\quad + O(\varepsilon^3)\end{aligned}\tag{21}$$

식(18), 식(19) 및 식(21)를 식(10)에 대입하여 정리하면, 식(22)과 같이 1차 물체표면 경계조건이 얻어진다.

$$\begin{aligned}\text{1st order: } \{\hat{n}\} \cdot \nabla\Phi^{(1)} &= \{\hat{n}\} \cdot [ \{\Xi^{(1)}\} + \{\Omega^{(1)}\} \times \{\mathcal{X}\} ] = \{\hat{n}\} \cdot \{V^{(1)}\} \\ \text{on } S_m &\end{aligned}\tag{22}$$

### 2.1.3 경계치 문제와 유체력

자유표면 경계조건과 물체표면 경계조건 이외에 해저 경계조건 및 무한원방 경계조건을 만족하도록 지배방정식인 Laplace 방정식의 해를 구하는 것에 의해 1차 속도포텐셜을 구할 수 있다. 이상의 결과를 1차 경계치 문제로 분리할 수 있다. 식(23)~(32)

[1차 radiation 경계치 문제]

$$\nabla^2 \phi_{jk}^{(1)} = 0 \quad \text{in } \Omega \tag{23}$$

$$-\omega^2 \phi_{jk}^{(1)} + g(\phi_{jk}^{(1)})_Z = 0 \quad \text{on } Z=0 \tag{24}$$

$$(\phi_{jk}^{(1)})_n = \widehat{n}_j \quad \text{on } S_m \quad (25)$$

$$(\phi_{jk}^{(1)})_n = (\phi_{jk}^{(1)})_{z=0} \quad \text{on } S_B \quad (26)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial \phi_{jk}^{(1)}}{\partial R} - ik\phi_{jk}^{(1)} \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (27)$$

[1차 diffraction 경계치 문제]

$$\nabla^2 \phi_{Dk}^{(1)} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (28)$$

$$-\omega^2 \phi_{Dk}^{(1)} + g(\phi_{Dk}^{(1)})_{z=0} \quad \text{on } Z=0 \quad (29)$$

$$(\phi_{Dk}^{(1)})_n = -(\phi_{lk}^{(1)})_n \quad \text{on } S_m \quad (30)$$

$$(\phi_{Dk}^{(1)})_n = (\phi_{Dk}^{(1)})_{z=0} \quad \text{on } S_B \quad (31)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial \phi_{Dk}^{(1)}}{\partial R} - ik\phi_{Dk}^{(1)} \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (32)$$

1차 경계치문제는 3차원 특이점분포법을 이용함으로써 선체에 대해 신뢰성 있는 해가 구해지고 있다.

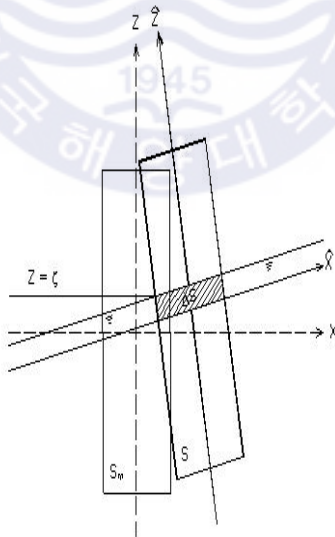


Fig. 7 Relationship between S and  $S_m$

압력에 의한 유체력을 계산하기 위해 압력  $P$ 를 평균위치에 대하여 Taylor 전개하고, 식(16)을 이용하면 식(33)과 같이 된다.

$$P = P_m^{(0)} + \varepsilon P_m^{(1)} + \varepsilon^2 [P_m^{(2)} + \{X^{(1)}\} \cdot \nabla P_m^{(1)}] + O(\varepsilon^3) \quad (33)$$

여기서,  $P$ 는 Fig.2.3에서의 순간 침수표면  $S_H$ 에 대한 압력이고,  $P_m$ 은 평균위치에서의 침수표면  $S_m$ 에 대한 압력을 나타낸다.

식(17)을  $\{X\}$ 의 성분  $Z$ 로 나타내고 경계치문제에서 얻어지는 속도포텐셜을 고려해서 정리하면 식(34)과 식(35) 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P(X, Y, Z, t) &= -\rho g Z - \varepsilon \rho [\Phi_t^{(1)} + g Z^{(1)}] \\ &- \varepsilon^2 [\rho \Phi_t^{(2)} + \frac{\rho}{2} |\nabla \Phi^{(1)}|^2 + \rho \{X^{(1)}\} \cdot \nabla \Phi_t^{(1)} + \rho g Z^{(2)}] + O(\varepsilon^3) \\ &= P^{(0)} + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (34)$$

여기서,

$$\begin{aligned} P^{(0)} &= -\rho g Z \\ P^{(1)} &= -\rho \Phi_t^{(1)} - \rho g Z^{(1)} \\ P^{(2)} &= -\rho \Phi_t^{(2)} - \frac{\rho}{2} |\nabla \Phi^{(1)}|^2 - \rho \{X^{(1)}\} \cdot \nabla \Phi_t^{(1)} - \rho g Z^{(2)} \end{aligned} \quad (35)$$

이 압력에 의한 유체력은 식(36)의 식에 의해 구해진다.

$$\{F_k(t)\} = - \int \int_{S_H} P(X, Y, Z, t) \{n_k\} dS, \quad (k = 1 \sim 6) \quad (36)$$

## 2.1.4 파강제력과 전달함수

선체에 작용하는 파강제력과 모멘트는 섭동전개에 의해 얻어지는 1차 및 2차 항을 취하여 1차 파강제력과 모멘트를 구할 수 있다. 파랑 중 물체에 작용하는 유체력과 모멘트는  $O' - X'Y'Z'$  좌표계에 대하여, 식(37)과 식(38)으로 표현할

수 있다.

$$\{F\} = - \int \int_{S_H} P\{n\} dS \quad (37)$$

$$\{M\} = - \int \int_{S_H} P(\{X'\} \times \{n\}) dS \quad (38)$$

여기서,  $S_H$ 는 물체의 순간 침수표면이고,  $\{n\}$ 은 물체의 표면요소  $dS$ 의 단위 법선벡터이다. 또, 침수표면  $S_H$ 는 Fig. 7에서와 같이 정수면 이하의 부분  $S_m$ 과 물체 표면상의 파면과 정수면 사이에 발생하는 변동부분  $\Delta S$ 로 나눌 수 있으며, 식(34)와 식(19)을 식(37)에 대입하고,  $\Delta S$ 상에서는  $P^{(0)}$ 가 0임을 고려하면, 식(37)의 유체력은 식(39)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{F\} &= - \int \int_{S_m} [P^{(0)} + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3)] [\{n^{(0)}\} + \varepsilon \{n^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{n^{(2)}\} + O(\varepsilon^3)] dS \\ &\quad - \int \int_{\Delta S} [\varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3)] [\{n^{(0)}\} + \varepsilon \{n^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{n^{(2)}\} + O(\varepsilon^3)] dS \\ &= \{F^{(0)}\} + \varepsilon \{F^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{F^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (39)$$

또, 식(34)와 식(30)를 식(38)에 대입하면, 유체력에 의한 모멘트는 식(40)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{M\} &= - \int \int_{S_m} [P^{(0)} + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3)] [\{N^{(0)}\} + \varepsilon \{N^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{N^{(2)}\} + O(\varepsilon^3)] dS \\ &\quad - \int \int_{\Delta S} [\varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3)] [\{N^{(0)}\} + \varepsilon \{N^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{N^{(2)}\} + O(\varepsilon^3)] dS \\ &= \{M^{(0)}\} + \varepsilon \{M^{(1)}\} + \varepsilon^2 \{M^{(2)}\} + O(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (40)$$

$\{F^{(0)}\}, \{M^{(0)}\}$ 는 평균 침수표면  $S_m$ 에 작용하는 정수압에 의한 정적 부력과 모멘트이고,  $\{F^{(1)}\}, \{M^{(1)}\}$ 은 파와 같은 주기로 작용하는 1차 유체력 및 모멘트를 나타낸다. 먼저,  $\{F^{(0)}\}, \{M^{(0)}\}$ 는 평균위치에서의 부체의 수선면적  $A_w$ 에

서  $Z=0$  이므로 Gauss 정리를 적용하여 식(41)과 식(42) 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned}\{F^{(0)}\} &= - \int \int_{S_m} P^{(0)} \{n^{(0)}\} dS = \rho g \int \int_{S_m} Z \{\hat{n}\} dS \\ &= \rho g \int \int \int_V \nabla Z dV = \rho g V \{k\} = \{0 \ 0 \ \rho g V\}^T\end{aligned}\quad (41)$$

$$\begin{aligned}\{M^{(0)}\} &= - \int \int_{S_m} P^{(0)} \{N^{(0)}\} dS = \rho g \int \int_{S_m} Z (\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\}) dS \\ &= -\rho g \int \int \int_V \nabla \times [Z \{\mathbf{X}\}] dV = \rho g \int \int \int_V (\mathbf{Y}\{i\} - \mathbf{X}\{j\}) dV \\ &= \rho g V (\mathbf{Y}_B\{i\} - \mathbf{X}_B\{j\}) = \{\mathbf{X}_B\} \times \{0 \ 0 \ \rho g V\}^T\end{aligned}\quad (42)$$

여기서,  $\nabla = \{i\} \frac{\partial}{\partial X} + \{j\} \frac{\partial}{\partial Y} + \{k\} \frac{\partial}{\partial Z}$ ,  $V$ 는 평균 침수체적이며,  $\{\mathbf{X}_B\}$ 는 부체의 부심벡터로서 식(43)과 같다.

$$\{\mathbf{X}_B\} = \frac{1}{V} \int \int \int_V \{\mathbf{X}\} dV \quad (43)$$

$\{F^{(1)}\}$  과  $\{M^{(1)}\}$  은 평균 침수 폐곡면  $S_m + A_w$  에 대한 적분을 Gauss 정리를 이용하여 식(44)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\{F^{(1)}\} &= \rho \int \int_{S_m} \Phi_i^{(1)} \{\hat{n}\} dS - \rho g \int \int_{A_w} (\Xi_3^{(1)} + \Omega_1^{(1)} \mathbf{Y} - \Omega_2^{(1)} \mathbf{X}) \{k\} d\mathbf{X} d\mathbf{Y} \\ &= \rho \int \int_{S_m} \Phi_i^{(1)} \{\hat{n}\} dS - \rho g A_w (\Xi_3^{(1)} + \Omega_1^{(1)} \mathbf{Y}_f - \Omega_2^{(1)} \mathbf{X}_f) \{k\} \\ &= \{F_I^{(1)}\} + \{F_D^{(1)}\} + \{F_R^{(1)}\} + \{F_{HS}^{(1)}\}\end{aligned}\quad (44)$$

여기서,  $(\mathbf{X}_f, \mathbf{Y}_f)$ 는 물체고정 좌표계에 있어서의 평형위치의 부면심으로  
서 식(45)과 식(46) 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_f &= \frac{1}{A_w} \iint_{A_w} \mathbf{X} d\mathbf{X} d\mathbf{Y} \\
 \mathbf{Y}_f &= \frac{1}{A_w} \iint_{A_w} \mathbf{Y} d\mathbf{X} d\mathbf{Y} \\
 \{M^{(1)}\} &= - \int \int_{S_m} (P^{(1)}\{N^{(0)}\} + P^{(0)}\{N^{(1)}\}) dS \\
 &= - \int \int_{S_m} P^{(1)}\{\mathbf{N}\} dS + \{\Omega^{(1)}\} \times \{M^{(0)}\} \\
 &= \rho \int \int_{S_m} \Phi_i^{(1)}(\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\}) dS \\
 &\quad - \rho g \left\{ \begin{array}{l} A_w \mathbf{Y}_f \Xi_3^{(1)} + (\mathbf{Z}_B V + S_{22})_{\Omega_1^{(1)}} - S_{12\Omega_2^{(1)}} - \mathbf{X}_B V \Omega_3^{(1)} \\ - A_w \mathbf{X}_f \Xi_3^{(1)} - S_{12\Omega_1^{(1)}} + (\mathbf{Z}_B V + S_{11})_{\Omega_2^{(1)}} - \mathbf{Y}_B V \Omega_3^{(1)} \\ 0 \end{array} \right\} \\
 &= \{M_I^{(1)}\} + \{M_D^{(1)}\} + \{M_R^{(1)}\} + \{M_{HS}^{(1)}\}
 \end{aligned} \tag{46}$$

여기서,  $S_{kl}$ 은 수선면 2차 모멘트로서 식(47)과 같이 정의된다.

$$S_{kl} = \int \int_{A_w} \mathbf{X}_k \mathbf{X}_l d\mathbf{X} d\mathbf{Y} \tag{47}$$

여기서,  $\{\mathbf{X}_1 \ \mathbf{X}_2 \ \mathbf{X}_3\}^T = \{\mathbf{X} \ \mathbf{Y} \ \mathbf{Z}\}^T$

식(44) 및 식(45)은 각각 파강제력, 동유체력 및 정적 유체반력을 모두 포함하  
는 1차 유체력 및 모멘트이고, 1차 파강제력  $\{F_{ex}^{(1)}\}$  과 모멘트  $\{M_{ex}^{(1)}\}$  는 각각 식  
(48)과 식(49) 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
\{F_{ex}^{(1)}\} &= \{F_I^{(1)}\} + \{F_D^{(1)}\} \\
&= \rho \int \int_{S_m} (\Phi_{It}^{(1)} + \Phi_{Dt}^{(1)}) \{\hat{n}\} dS
\end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
\{M_{ex}^{(1)}\} &= \{M_I^{(1)}\} + \{M_D^{(1)}\} \\
&= \rho \int \int_{S_m} (\Phi_{It}^{(1)} + \Phi_{Dt}^{(1)}) (\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\}) dS
\end{aligned} \tag{49}$$

식(48)과 (49)의 1차 파강제력과 모멘트를 2성분 입사파에 대한 1차 전달함수로 표현하기 위해,  $\Phi_{It}^{(1)}$  과  $\Phi_{Dt}^{(1)}$ 는 식(50)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
\Phi_{It}^{(1)} &= Re \sum_{k=1}^2 [ a_k^{(1)} (-i\omega_k) \Phi_{Ik}^{(1)} e^{-i\omega_k t} ] \\
\Phi_{Dt}^{(1)} &= Re \sum_{k=1}^2 [ a_k^{(1)} (-i\omega_k) \Phi_{Dk}^{(1)} e^{-i\omega_k t} ]
\end{aligned} \tag{50}$$

식(50)를 식(48)와 식(49)에 대입하면 식(51)과 (52) 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
\{F_{ex}^{(1)}\} &= Re \sum_{k=1}^2 [ a_k^{(1)} \left( \rho \int \int_{S_m} -i\omega_k (\Phi_{Ik}^{(1)} + \Phi_{Dk}^{(1)}) \{\hat{n}\} dS \right) e^{-i\omega_k t} ] \\
&= Re \sum_{k=1}^2 [ a_k^{(1)} \{f_{Fk}^{(1)}\} e^{-i\omega_k t} ]
\end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned}
\{M_{ex}^{(1)}\} &= Re \sum_{k=1}^2 [ a_k^{(1)} \left( \rho \int \int_{S_m} -i\omega_k (\Phi_{Ik}^{(1)} + \Phi_{Dk}^{(1)}) (\{\mathbf{X}\} \times \{\hat{n}\}) dS \right) e^{-i\omega_k t} ] \\
&= Re \sum_{k=1}^2 [ a_k^{(1)} \{f_{Mk}^{(1)}\} e^{-i\omega_k t} ]
\end{aligned} \tag{52}$$

여기서,  $\{f_{Fk}^{(1)}\}$  와  $\{f_{Mk}^{(1)}\}$  는 각각 파 주파수  $\omega_k$ 인 1차 파강제력과 파강제모멘트의 전달함수로서 식(53)과 식(54)같다.



$$\{f_{Fk}^{(1)}\} = -i\rho\omega_k \iint_{S_m} (\phi_{Ik}^{(1)} + \phi_{Dk}^{(1)}) \{\hat{n}\} dS \quad (53)$$

$$\{f_{Mk}^{(1)}\} = -i\rho\omega_k \iint_{S_m} (\phi_{Ik}^{(1)} + \phi_{Dk}^{(1)}) (\{\mathcal{X}\} \times \{\hat{n}\}) dS \quad (54)$$

## 2.2 횡동요 운동방정식의 유체력 계수

2차원 규칙과 중에서 부유체의 횡동요 운동방정식은 횡동요 각 변위  $\phi$ 를 변수로 하여 식(55)과 같이 표시된다.

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_0 \cos(\omega_e t - \epsilon_1) \quad (55)$$

여기서 a,b,c는 횡동요의 유체력 계수를,  $M_0$ 는 횡동요 파랑강제모멘트의 진폭을 나타낸다.  $\epsilon_1$ 은 부유체에 고정된 좌표계의 원점에서의 입사파 파형을 기준위상으로 취했을 때 파도에 대한 횡동요 파랑강제모멘트의 위상지연을 나타낸다.

선박의  $x$ 축에 관한 겉보기관성모멘트는 식(56)와 같다.

$$a = I_{xx}' = I_{xx} + J_{xx} = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + J_{xx} \quad (56)$$

여기서  $I_{xx}$ 는 선박의  $x$ 축에 관한 관성모멘트,  $k_{xx}$ 는  $x$ 축에 관한 관성반경,  $J_{xx}$ 는  $x$ 축에 관한 부가관성모멘트를 나타낸다.

식(56)은 식(57)과 같이 정리하여 나타 낼 수 있다.

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + \frac{\Delta}{g} k_{xx}^{\prime 2} = \frac{\Delta}{g} (k_{xx}^2 + k_{xx}^{\prime 2}) = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^{\prime\prime 2} \quad (57)$$

여기서  $k_{xx}^{\prime\prime}$ 는 겉보기관성반경으로서 선폭의 0.33~0.45배 정도의 값을 취한다. 임의의 선박의 겉보기관성반경은 대표적으로 다음 3가지 방법을 이용하여 추정할 수 있다.

Kato의 식은 식 (58)과 같다. (Kato, 1956)

$$\left(\frac{k_{xx}''}{B}\right)^2 = f[C_B C_u + 1.10 C_u (1 - C_B) \left(\frac{H_s}{d} - 2.20\right) + \left(\frac{H_s}{B}\right)^2] \quad (58)$$

식(58) 우변  $f = 0.133$ (원유운반선),  $f = 0.177$ (포경선),  $f = 0.20$ (어선)의 값을 취하는 것으로 한다. 그리고  $B$ 는 선폭,  $C_B$ 는 방형계수,  $C_u$ 는 상갑판의 면적계수를 나타내며,  $H_s$ 는 상부구조물을 고려한 유효깊이로서 식(59)으로 계산된다.

$$H_s = D + (1/L_{pp}) \times (\text{선루와 갑판실의 측면적의 합계}) \quad (59)$$

여기서  $D$  : 상갑판까지의 깊이,  $d$  : 평균흘수,  $L_{pp}$  : 수선간길이

IMO A.562(횡풍, 횡파 중에서의 복원성 기준, 1985)과 IMO MSC Circular1228(추사파 중에서의 운항지침, 2007)에서는 식(60)에 의해  $k_{xx}''$ 를 구한다.

$$(k_{xx}''/B) = 0.373 + 0.023(B/T) - 0.043(L/100) \quad (60)$$

여기서  $L$  : 수선길이(waterline length),  $B$  : 선폭,  $T$  : 평균흘수

횡동요 고유주기  $T_\phi$ 와 그때의 메타센터높이  $GM$ 을 알게 되면 식(61)에 의해  $k_{xx}''$ 를 구할 수 있다.

$$k_{xx}'' = T_\phi \sqrt{gGM} / (2\pi) = T_\phi \sqrt{GM} / 2.01 \quad (61)$$

여기서  $g$  : 중력가속도

횡동요를 하고 있는 선박에 작용하는 감쇠모멘트는 조파(wave making) 조와(eddy making) 마찰(skin friction) 부가물(appendage) 양력성분, 기타성분(공기의 저항, 표면장력)와 같은 성분들로 구성되어 있다. (Ikeda, 1984)

상하동요와 종동요 감쇠력에서는 조파 감쇠력 성분만을 고려하면 충분했으나, 횡동요 운동에서는 조파 감쇠력 성분만으로는 횡동요 감쇠모멘트를 정확하게 추정할 수 없다. 특히 횡동요 감쇠계수는 그 값이 대단히 작기 때문에 감쇠계수 값을 정확히 산출하는 것이 중요하다.

횡동요의 유체력 계수 중 복원모멘트는 식(62)으로 표시된다.

$$c\phi = \Delta GZ \approx \Delta GM \sin\phi \approx \Delta GM\phi \quad (62)$$

여기서  $GZ$ 는 정복원암,  $GM$ 은 메타센터높이이다. 따라서 복원모멘트계수는 식(63)과 같다.

$$c = \Delta GM = \rho g \nabla GM \quad (63)$$

여기서  $\Delta$ :배수량,  $\nabla$ :배수용적,  $\rho$ :유체밀도



## 제 3 장 모형실험

### 3.1 실험장비

모형실험은 한국해양대학교에서 보유하고 있는 2차원 조파수조에서 실시하였다. 피스톤 형식의 조파기가 설비된 조파수조는 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이  $1\text{m} \times 1.1\text{m} \times 25\text{m}$ ( $L \times B \times D$ )이고 최대파고 0.2m까지 생성 가능하다.

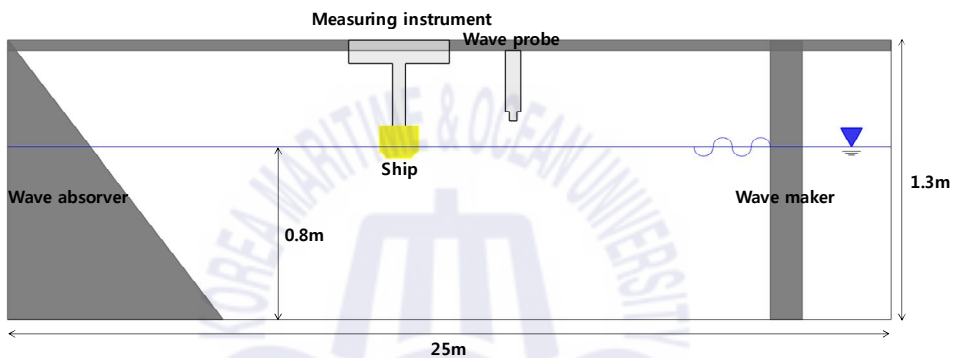


Fig. 8 Schematic of 2D wave basin

실험 중 파의 높이(Wave height)를 측정하기 위해 사용한 파고계의 사양은 Table 2과 같다.

Table 2 Characteristic of wave probe

항 목	사 양
Blind area	200mm
Working range	1300mm
Frequency	200kHz
Techn. resolution	0.18mm
Reproduceability	$\pm 0.15\%$
Output update	50Hz
Analogue output	0 - 10V
Protection class	IP 65

선체의 횡동요는 4자유도(4 degrees of freedom) 측정 장비를 통해 20Hz의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 측정하였고 측정기의 측정 범위 및 사양은 Table 3, Table 4와 같다.



Fig. 9 4-Degree of freedom measuring instrument

Table 3 Measurement ranges

항 목	사 양
Surge Motion	Approx. $\pm 500\text{mm}$
Heave Motion	Approx. $\pm 200\text{mm}$
Pitch Motion	Approx. $\pm 30\text{deg}$
Roll Motion	Approx. $\pm 45\text{deg}$
Yaw Motion	Fix
Sway Motion	

**Table 4** Capacity of displacement sensor

항 목	사 양
Effective electrical Angle	345 or 355 deg
Linearity	±0.1% of F.S
Resolution	Less Than 0.05%
Mechanical Rotational Angle	360deg continuous
Ambient Temperature	55~+85℃

### 3.2 실험모형

실험에서 사용한 선체 모형은 LNG병커링선(5.0k CBM)을 1:100축소하여 제작하였다. 선체의 실물과 모형의 주요제원은 Table 5와 같으며 모식도는 Fig. 10와 같다.

**Table 5** Main principles of LNG bunkering vessel

Designation	Prototype	Model
Length between perpendiculars [m]	99	0.99
Breadth [m]	18	0.18
Draft [m]	5.2	0.052

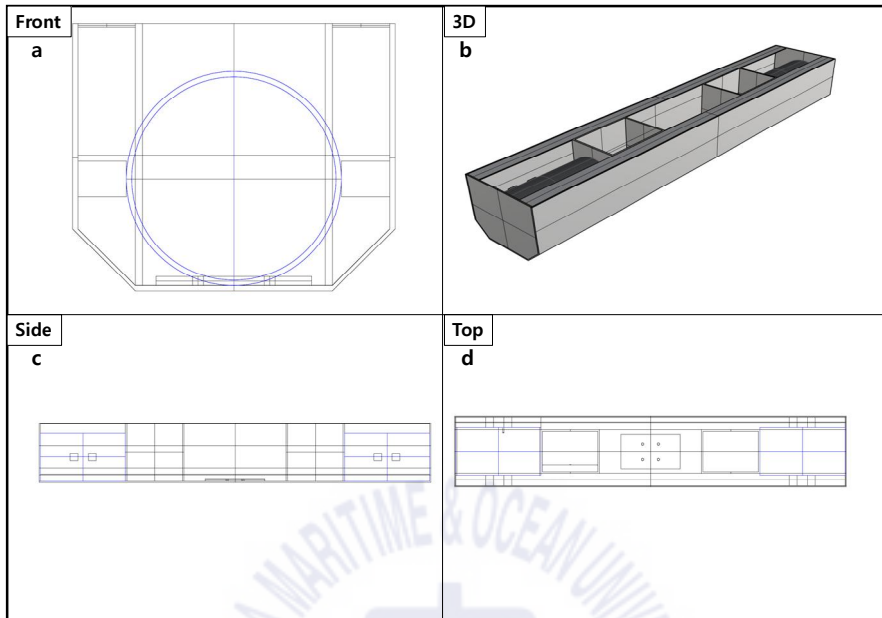


Fig. 10 Model of LNG bunkering vessel (a) front view; (b) 3D view; (c) side view; (d) top view

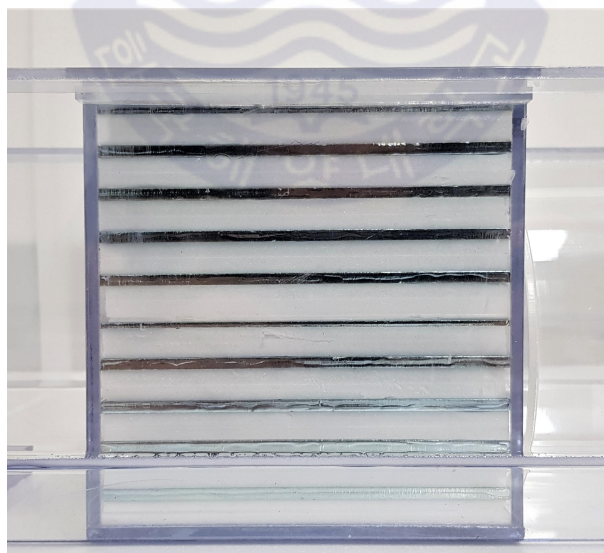
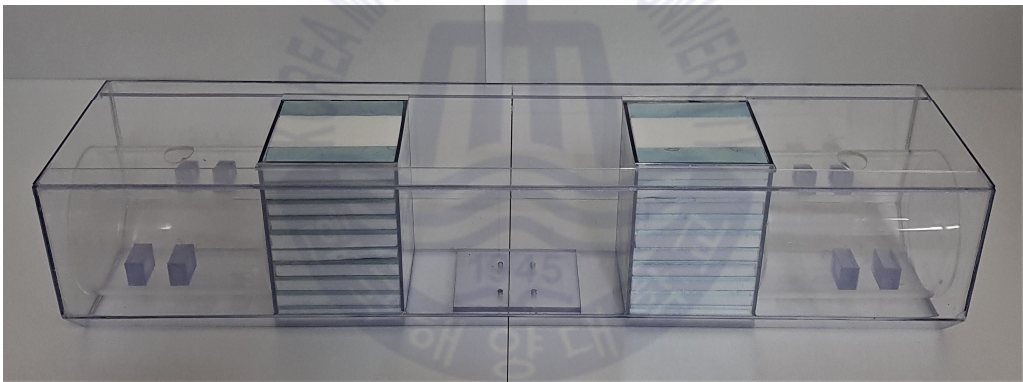


Fig. 11 Space for weights of the vessel





(a)



(b)

Fig. 12 1:100 Model of 5.1k LNG bunkering vessel (a) front view; (b) side view

연구의 핵심인 탱크 내부 유동이 선체의 횡동요에 미치는 영향을 확인하기 위해 액체화물의 적재를 5가지 경우로 구분하였다. 탱크 용적대비 액체적재율이 낮아 점성의 영향이 지배적일 때와 액체적재율이 높아 관성의 영향이 지배적일 때의 연성효과를 관찰하기 위해 Empty(0%), 20%, 40%, 60%, 80%로 나누어 실험하였다. 액체적재율에 따른 선체의 특성은 Table 6과 같다.



Table 6 Principal particulars of LNG bunkering vessel

	0%	20%	40%	60%	80%
Displacement weight [ton]	8,254				
Liquid weight [kg]	-	82.8	165.7	248.6	331.5
Equivalent solid weight [kg]	438.8	352.5	270.3	196.9	116.2
Draft [m]	5.2				
KB [m]	2.81				
BM [m]	5.97				
KG [m]	7.28	7.287	7.298	7.296	7.29
GM [m]	1.501	1.502	1.491	1.493	1.499
$k_{xx}$ [m]	6.646	6.474	6.46	6.651	6.854

탱크 내부의 액체적재율 변화에 따른 선체운동의 비교 실험이기 때문에 무게 추를 이용하여 선체 횡동요에 영향을 주는 주요 특성들은 최대한 같게 하였다. 실험에 사용한 탱크에 액체 적재 시 수위는 Fig. 13과 같다.

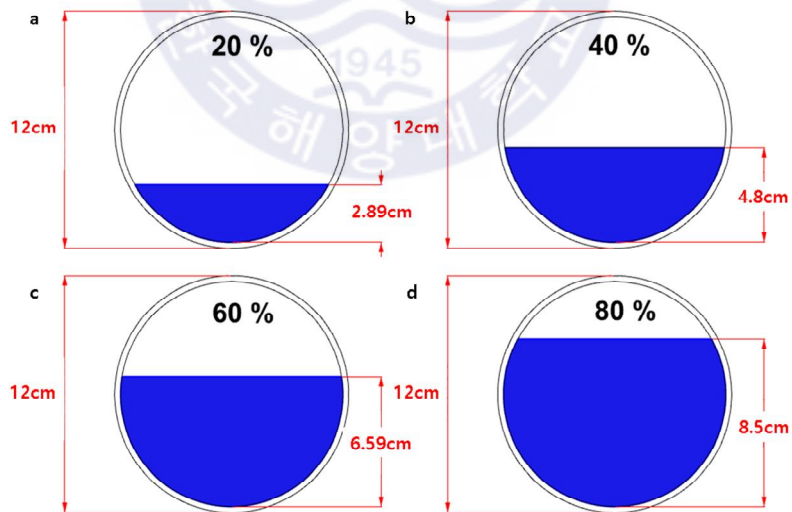


Fig. 13 1:100 Schematic of IMO type C tank depths with different filling ratios

본 연구에서는 기존의 IMO Type C 탱크를 설치함으로써 발생하는 선체의 횡동요를 저감하고자 새로운 실린더형태 탱크를 고안하였다. 멤브레인형태 LNG 탱크의 슬로싱을 줄여주기 위해 사용하는 베플(baffle)과 탱크의 내부유동 제어를 발생하는 위상차로 선체 횡동요를 감소하는 안티-롤링탱크(Anti-rolling tank)에서 설계 아이디어를 착안 하였다. 실린더형태 탱크는 멤브레인형태 탱크보다 슬로싱 주기가 더 짧기 때문에 내부유동을 더 많이 제어해야할 필요성이 있다.

탱크 중앙부에 길이 방향으로 제수격벽(Swash bulkhead)을 설치하여 내부유동을 억제시킴과 동시에, 액체가 격벽 좌우로 통과 할 수 있게 제수홀(Swash Hole)을 만들어 내부유동에 의해 선체와 입사파의 위상차를 나게 하였다. 제수홀의 크기에 따라 유동의 양상이 달라지므로 제수홀의 면적이 다른 탱크를 제작하여 변화하는 유동의 양상을 관찰하였다.



Fig. 14 Model of developed tank (a) front view; (b) 3D view; (c) side view; (d) top view

제수격벽이 없는 경우, 제수격벽에 제수홀이 없는 경우, 제수격벽에 제수홀의 면적이 다른 경우로 차이를 두어 총 7가지 다른 탱크로 실험하였다. 각 탱크 모형별 명칭을 제수격벽이 없는 경우는 IMO type C, 제수격벽에 제수홀이 없는 경우는 Block, 제수격벽에 제수홀의 면적이 다른 경우는 제수격벽의 제수홀 면적/제수격벽 횡단면적의 비율로(Developed 비율) Developed 1.35, Developed 2.41, Developed 3.77, Developed 5.43, Developed 8.12로 표시하였다. Table 7은 실험에 사용한 탱크를 1:100 축소시켜 나타낸 주요 제원이다.

Table 7 1:100 Main principles of developed tanks

Case name	Tank diameter [cm]	Tank length [cm]	Length of swash hole [cm]	Swash hole area [cm <sup>2</sup> ]	Swash hole area / Cross section area [%]
IMO type C	12	20.9	No swash bulkhead		
Block			0		
Developed 1.35			1.8	3.24	1.35
Developed 2.41			2.4	5.76	2.41
Developed 3.77			3.0	9	3.77
Developed 5.43			3.6	12.96	5.43
Developed 8.12			4.4	19.36	8.12

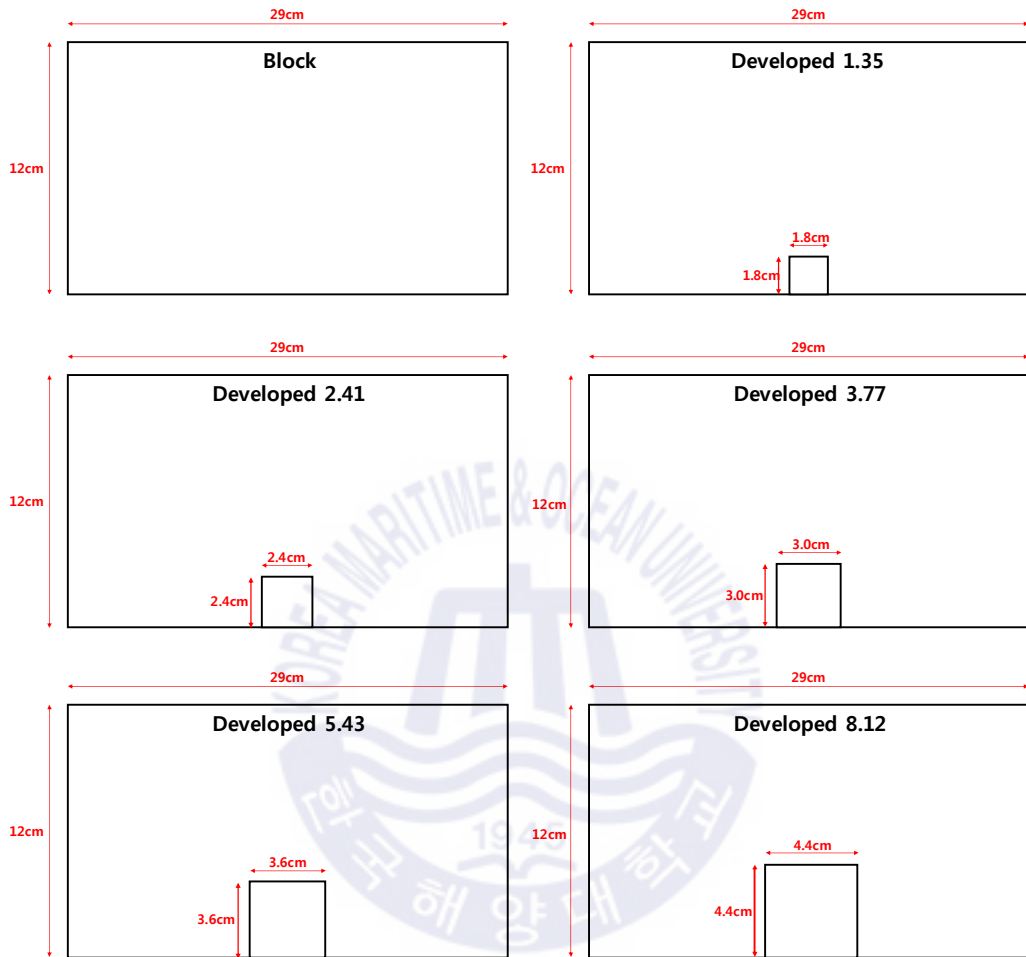


Fig. 15 1:100 Schematic of developed tanks on side view

### 3.3 실험조건

본 연구는 규칙파(Regular wave), 불규칙파(Irregular wave) 두 가지 조건에서 실시하였다. 규칙파의 원주파수 범위는 0.418 ~ 0.785rad/s이며 파고( $H$ )와 파장( $\lambda$ ) 비(wave steepness)가 1/50 내 범위에 있는 선형파이다. 불규칙파는 대한민국에 LNG병커링 터미널을 운용 예정인 해역의 계측데이터를 근거하였고 일별 평균유의파고(Average significant wave height), 최고유의파고(Maximum significant wave height) 및 평균주기(Period)의 5년 데이터 분포도는 Fig. 16와 같다. 연구의 목적인 선체 동적 안정성을 평가하기 위해 유의파고와 평균주기는 데이터개체를 크기순으로 정렬하여 큰 쪽에서 1/10 그룹에 속하는 값의 평균값을 취하였다. 일평균 유의파고는 분포가 밀집된 데이터보다 험한 조건인  $H_{1/3}$ : 4.5m을 대상으로 하였고, 내항을 가정하여 평균주기 9.5초, 외항은 11.5초를 기반으로 ITTC1984(JOHNSWAP) 스펙트럼 식(64)에 적용하였다.

$$S(\omega) = 155 \frac{H_{1/3}^2}{T_1^4 \omega^5} \exp\left\{\frac{-944}{T_1^4 \omega^4}\right\} 3.3 \exp\left\{-\frac{0.191 \omega T_1 - 1}{\sqrt{2\sigma^2}}\right\}^2 \quad (64)$$

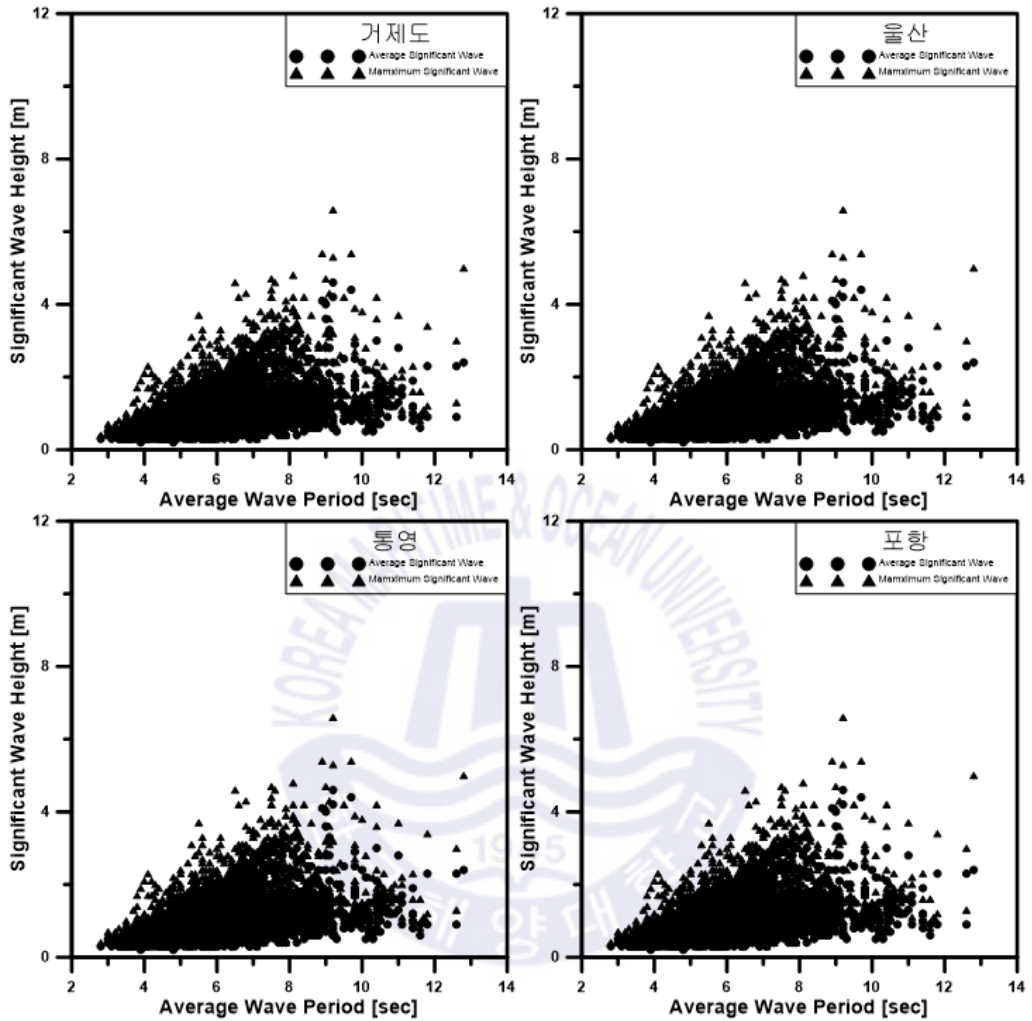


Fig. 16 Significant wave height and average wave period of Korea oceans  
 <source: Korea Meteorological Administration>

보다 정확한 측정을 위해 선체모형을 수조 중앙부에 설치하고 소파제의 하부에는 스펀지, 상부에는 그물형 소파제를 사용함으로써 반사파의 영향을 최소화하였다. 수조의 폭(1m)와 모형의 길이(0.99m)를 거의 같게 함으로써 실험 중 발생하는 수조 벽면효과 역시 최소화하였다.

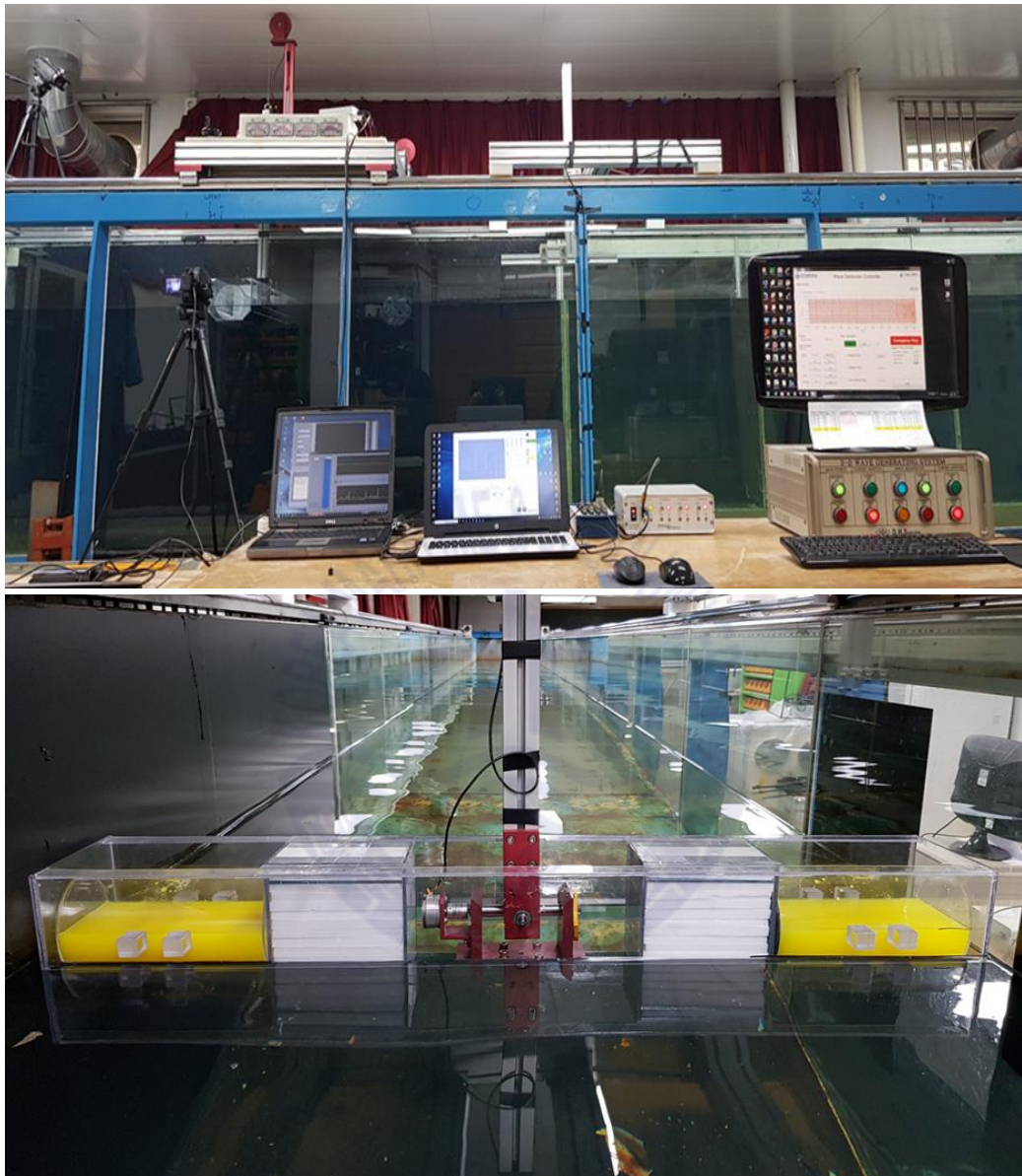


Fig. 17 Scale model test set up to measure LNG bunkering roll motion






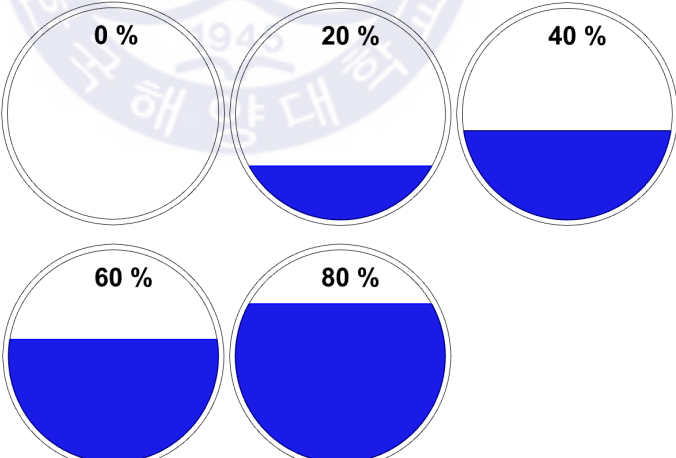
Fig. 18 Scale model test set up to research inner flow

규칙과 중 횡동요 응답 특성을 비교분석하기 위한 입사파의 주파수 범위는 자유횡동요시험을 통하여 얻어진 모든 탱크별 선체의 고유주파수를 기준으로 각각 산정하였다.

불규칙파 중 선체의 횡동요 응답의 특성을 파악하기 위해서는 실험역 기준으로 입사파가 1000개의 파랑에 대한 응답이 필요하다. 이를 토대로 해석조건을 본 연구의 상사비(1:100)를 적용시키면 약 15분 동안 실험이 수행되어야 하지만 본 연구에서 사용한 조파수조 길이가 제한적이라 반사파의 영향이 커지기전 300초(6분)동안 실험을 실시하였다.



Table 8 Test matrix

<p><b>Wave</b></p>  <p><b>Heading 90°</b></p>	<p>Regular wave</p>	<p>Frequency range: 0.418 ~ 0.785 [rad/s]  <math>H/\lambda &lt; 1/50</math></p>		
	<p>Irregular wave</p>	<p><math>H_{1/3}</math>: 4.5m  T: 9.5s (inner port), 11.5s (out port)  <math>\gamma</math> of JONSWAP spectrum: 3.3</p>		
<p><b>Tank types</b></p>	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 50%;"> <p><b>IMO type C</b></p> <p><b>No bulkhead</b></p> <p>1.35%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>3.77%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>8.12%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> </td> <td style="text-align: center; width: 50%;"> <p><b>Block</b></p> <p><b>No swash hole</b></p> <p>2.41%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>5.43%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> </td> </tr> </table>		<p><b>IMO type C</b></p> <p><b>No bulkhead</b></p> <p>1.35%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>3.77%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>8.12%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p>	<p><b>Block</b></p> <p><b>No swash hole</b></p> <p>2.41%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>5.43%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p>
<p><b>IMO type C</b></p> <p><b>No bulkhead</b></p> <p>1.35%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>3.77%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>8.12%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p>	<p><b>Block</b></p> <p><b>No swash hole</b></p> <p>2.41%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p> <p>5.43%</p> <p>Swash hole/ bulkhead [%]</p>			
<p><b>Filling ratios</b></p>				

## 제 4 장 결과 및 고찰

### 4.1 자유횡동요시험

실험에서 사용하는 모든 유형의 탱크를 설치한 선체의 기본적인 거동특성을 파악하기 위하여 수조 내에서 자유횡동요시험을 수행하였다.

Fig. 19는 Empty(0%)와 IMO type C, Block 탱크 액체적재율 40%일 때 선체의 자유횡동요시험을 나타낸 그래프이다. Empty(0%)의 경우 25초에 선체가 거의 정지하는 반면 다른 두 형식의 탱크는 15초에서 선체가 거의 정지한다. 이는 탱크 내부유동의 영향이며, IMO type C 탱크와 Block 탱크의 경우는 선체 횡동요의 감쇠 폭이 유사한 경향을 보였다.

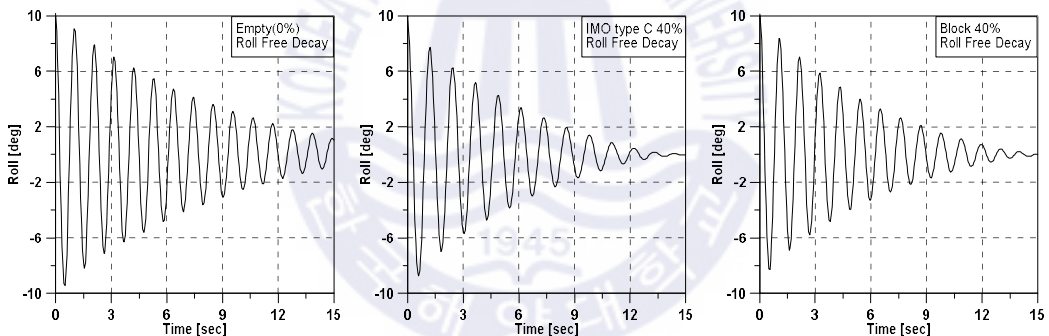


Fig. 19 Roll free decay test of LNG bunkering vessel

본 연구에서 개발한 탱크의 액체적재율이 40%일 때, 선체의 자유횡동요시험의 결과를 Fig. 20에 나타내었다. 제수홀 없이 제수격벽만 존재하는 Block 탱크의 경우보다 제수격벽에 제수홀이 설치된 탱크로 인한 선체 횡동요 감쇠가 빠른 것을 확인 할 수 있고, Developed 3.77 탱크가 제수홀의 면적을 달리하는 5개 형식의 탱크 중 내부유동에 의해 선체 정지상태가 가장 빠르게 되는 것을 확인 할 수 있다.

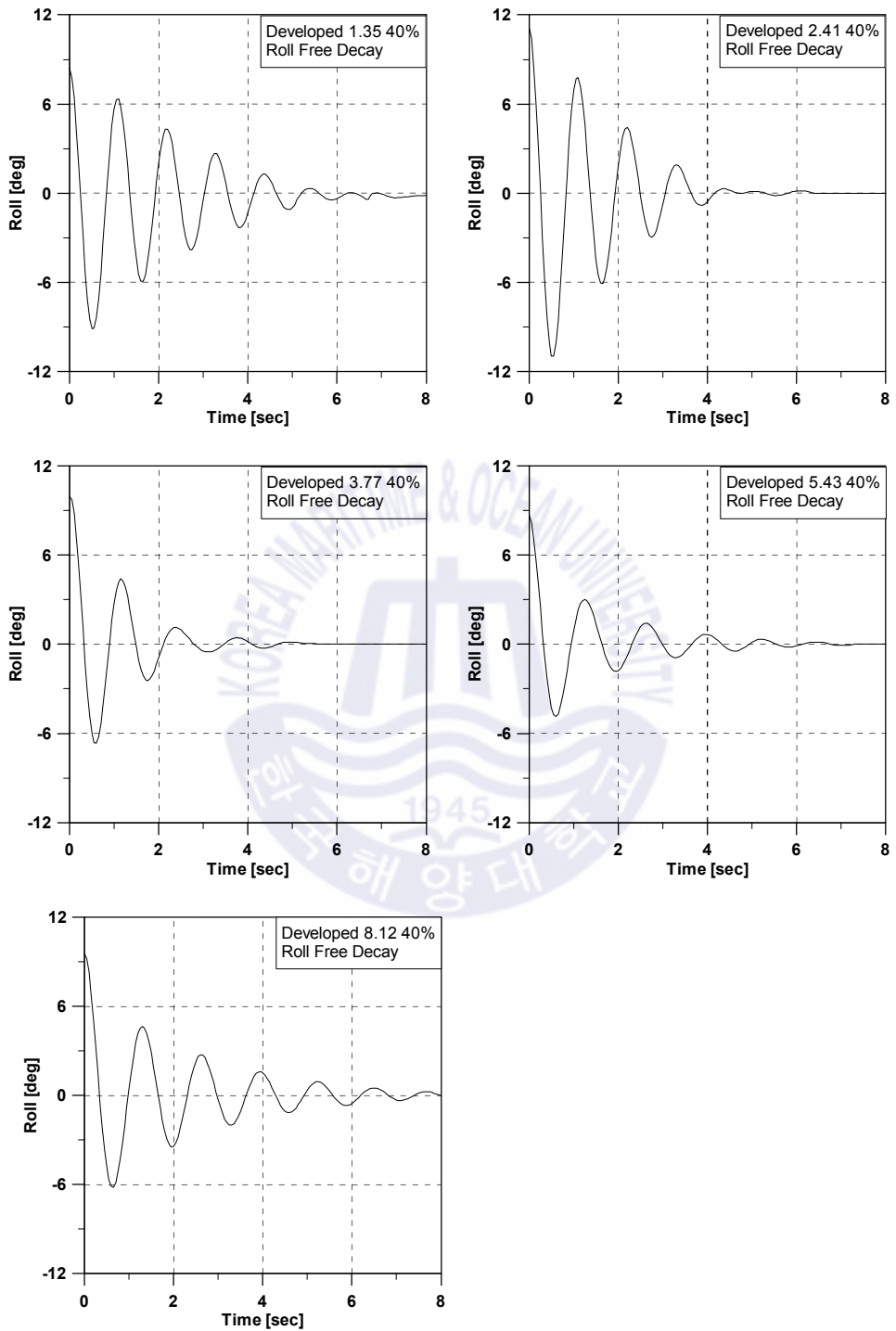


Fig. 20 Roll free decay test of LNG bunkering vessel with 40% filled tank

Table 9은 탱크 종류와 액체적재율에 따른 선체의 횡동요 고유주기를 나타내었다. Empty(0%)에 비해 탱크 내 액체가 있는 모든 경우에서 고유주기가 길어졌다.

**Table 9** Natural periods of LNG bunkering vessel with different tanks [sec]

Filling ratios [%]	Tank types	IMO type C	Block	Developed				
				1.35	2.41	3.77	5.43	8.12
Empty(0%)				10.5				
20%		11.5	10.7	10.6	10.7	10.6	10.6	11.4
40%		11.9	10.7	10.8	11.1	11.5	12.1	12.7
60%		12.7	11.2	11.4	11.4	11.9	12.5	12.9
80%		11.7	11.3	11.3	11.6	11.5	12.1	12.1

실린더형태 탱크의 슬로싱 고유주파수는 아래 식(65)을 이용하여 산출 할 수 있다. 실린더 형태 탱크의 횡방향에 대한 슬로싱 유동을 해석적으로 풀어 얻은 결과이다. (OR Jaiswal, 2008) 여기서  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 내부 탱크의 수위,  $D$ 는 실린더의 지름을 의미한다.

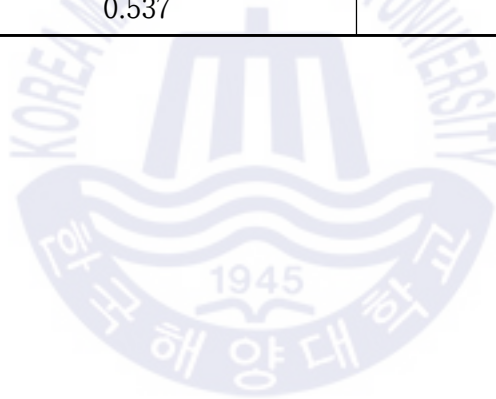
$$w_{n,slashing} = \sqrt{\frac{3.68g}{D} \times \tanh\left(3.68\frac{h}{D}\right)} \quad (65)$$

식(65)을 통해 산술적으로 얻은 IMO type C 탱크의 슬로싱 고유주파수와 자유 횡동요 시험을 통하여 얻은 선체의 횡동요 고유주파수는 Table 10 에 나타내었다. 탱크의 내부유동에 의해 액체적재율이 증가할수록 선체의 고유주파수의 구간이 변화하는 것을 확인 할 수 있다.

실험에 사용한 2차원 조파수조는 파주기 0.3~0.4초를 정확하게 구현하지 못하여 실험적인 한계로 슬로싱 고유주파수를 확인하지 못하였다.

**Table 10** Natural frequencies of LNG bunkering vessel and sloshing tank with different filling ratios

Filling ratio [%]	IMO type C roll motion natural frequency [rad/s]	IMO type C sloshing natural frequency [rad/s]
20%	0.546	1.523
40%	0.527	1.701
60%	0.494	1.754
80%	0.537	1.772



## 4.2 규칙파 중 횡동요 응답

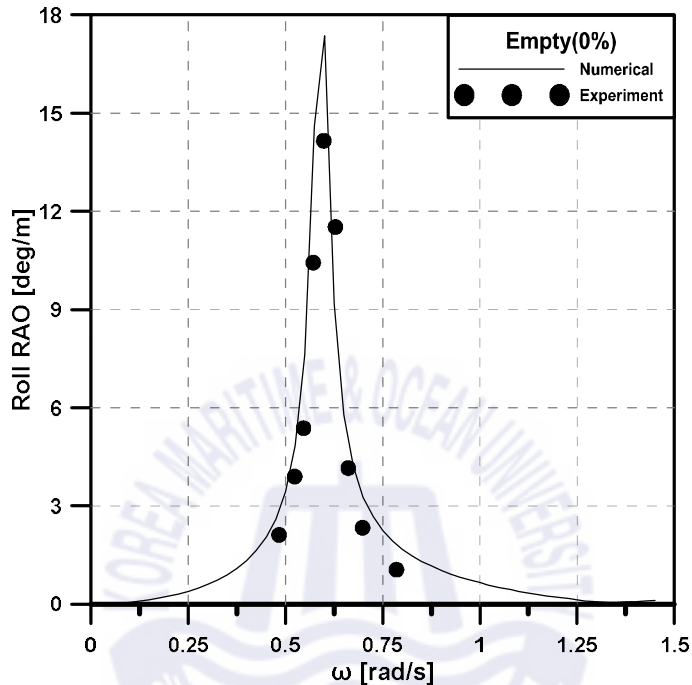


Fig. 21 Comparison of roll motion RAO for empty(0%) between numerical and experiment

趙孝濟 (1991)는 계류시스템을 갖는 부유식 해양구조물의 동적 응답 특성을 그린함수(Gree function)를 이용해 주파수영역의 해석 결과를 도출하는 프로그램을 개발하였다. 탱크 내부유동이 없는 Empty(0%) 경우일 때, 선체 횡동요 응답 실험결과와 주파수영역 해석 프로그램의 결과를 Fig. 21에 비교하여 나타내었다. 실험을 통한 횡동요 응답 그래프와 프로그램 해석을 통한 횡동요 응답 그래프를 비교한 것을 보아 수행된 자유횡동요 시험은 해석적인 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4.2.1 탱크 내 액체적재율에 따른 횡동요 응답 비교

Fig. 22~ Fig. 25는 실험에서 사용한 모든 유형의 탱크를 액체적재율에 따라 규칙과 중 선체 횡동요 응답을 나타낸 그래프이다.

자유수면 효과만을 보기위해 제작된 Block 탱크는 내부에 제수격벽을 설치하여 유동을 둘로 나누었다. IMO type C 탱크와 비교하면 규칙과 중 선체 횡동요 응답의 차이가 크지 않음을 확인 할 수 있다. 이는 탱크 내부 액체의 자유수면 유동의 영향만으로는 선체 횡동요 감소에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 탱크를 설치한 선체가 IMO type C 탱크를 설치하였을 때 비해 모든 액체적재율에 대한 규칙과 중 선체 횡동요 응답이 감소되었음을 확인 할 수 있다. 이는 탱크 내 제수격벽과 제수홀이 유동을 제어하면서 탱크 내부유동의 위상차 때문에 나타난 결과로 사료된다.

비교적 제수홀의 면적이 큰 Developed 3.77, Developed 5.43, Developed 8.12 탱크 내 액체적재율이 증가 할수록 공진점이 저주파수 구간으로 이동하며, 80% 일 때는 IMO type C 탱크와 공진점이 비슷한 주파수 구간에서 형성되었다.

다양한 액체적재율에서 고려했을 때, 본 연구에서 개발한 탱크 중 Developed 3.77 탱크가 선체의 횡동요 저감에 가장 효율적임을 확인 할 수 있다. LNG병커링선은 선박의 특성상 탱크 내 적재율이 수시로 변화하고, 탱크 내부유동의 모멘트에 의해 선체 횡동요에 영향을 주기 때문에 여러 액체적재율에서 횡동요가 저감되는 것이 중요하다.

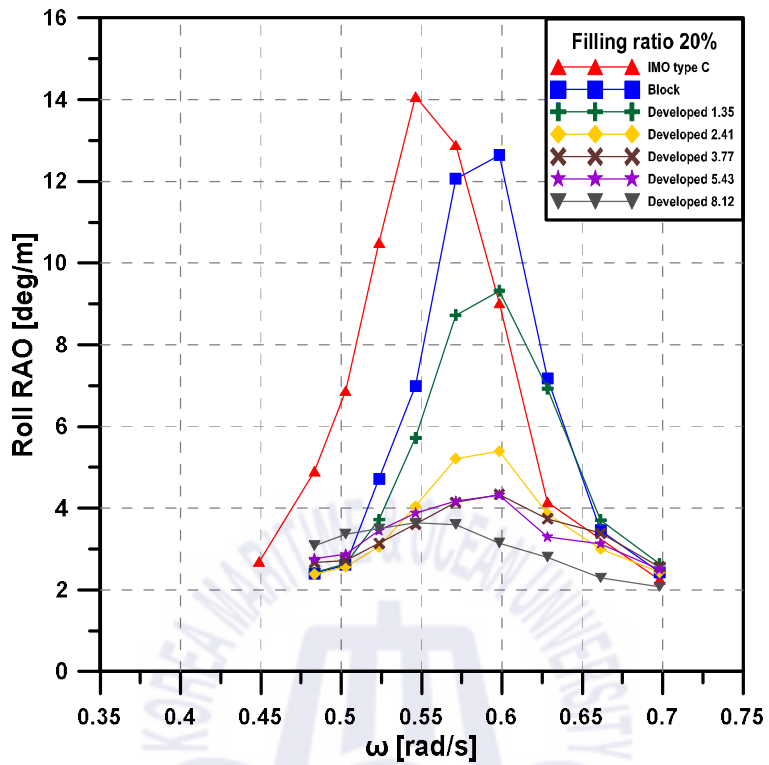


Fig. 22 Comparison of roll motion responses for 20% filled with different tanks



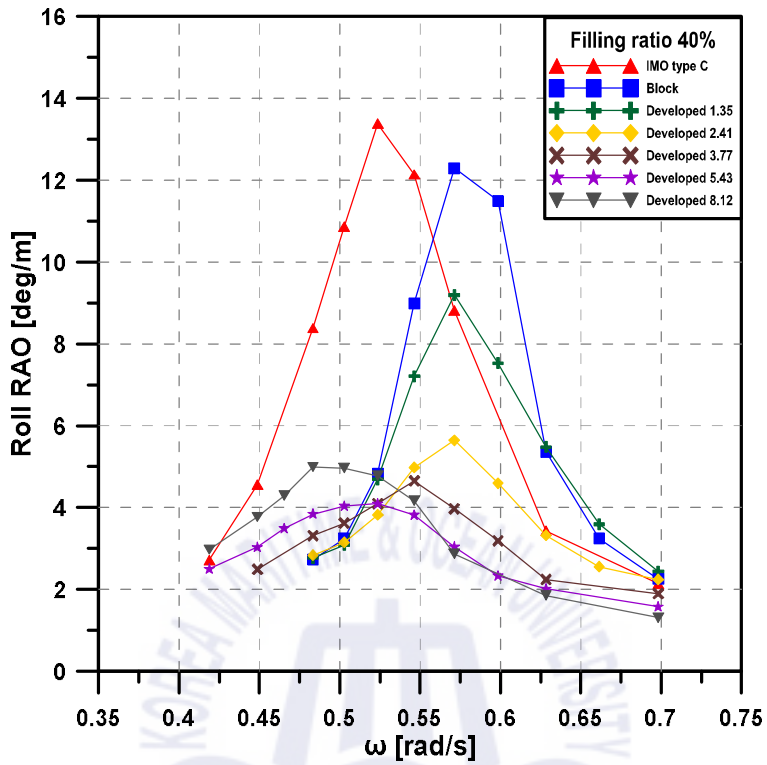


Fig. 23 Comparison of roll motion responses for 40% filled with different tanks

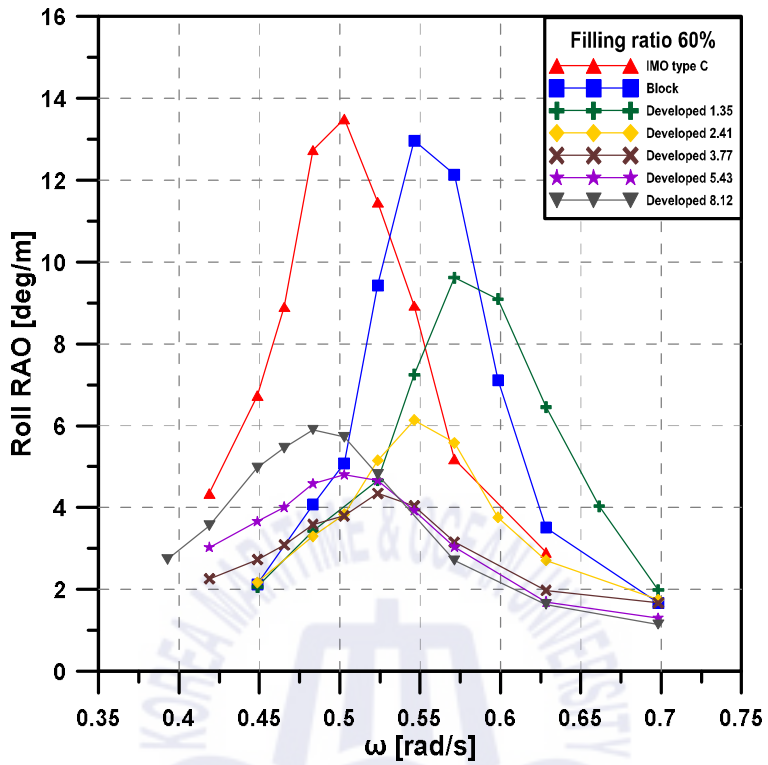


Fig. 24 Comparison of roll motion responses for 60% filled with different tanks

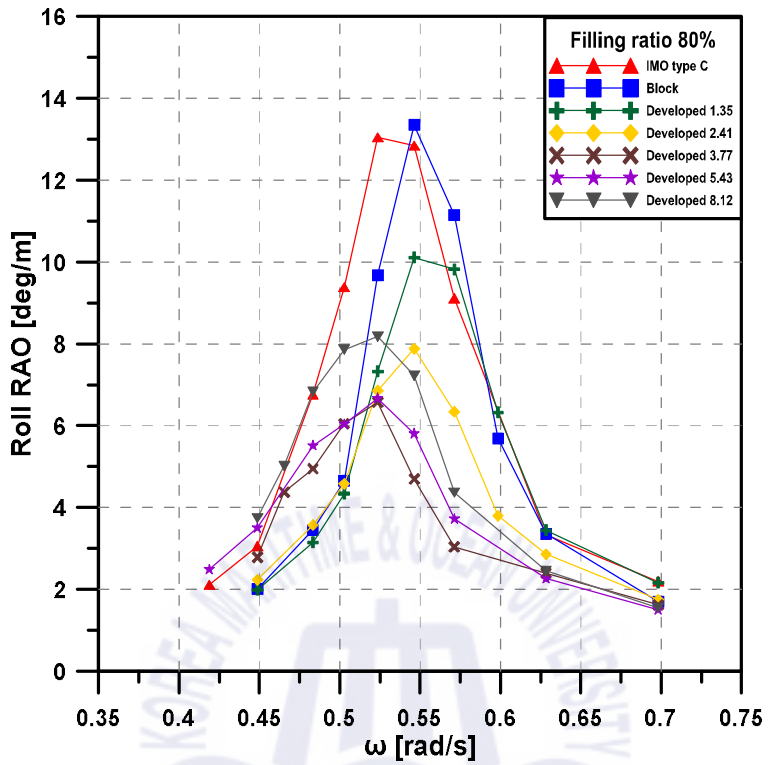


Fig. 25 Comparison of roll motion responses for 80% filled with different tanks

#### 4.2.2 탱크형식에 따른 횡동요 응답 비교

Fig. 26은 IMO type C 탱크의 액체적재율에 따른 규칙파 중 횡동요 응답을 비교하여 나타내었다. 탱크 내 액체적재율이 증가하면서 Empty(0%)에 비해 20%, 40%, 60%의 경우 횡동요 응답 그래프의 공진점이 저주파수 구간으로 이동하였다가 80%일 때는 공진점이 다시 고주파수 구간으로 이동하였다. 액체적재율 40%와 80%가 비슷한 주파수 구간에서 횡동요의 응답을 확인 할 수 있는데, 이는 내부유동에 의해 발생하는 입사파와 선체의 위상차가 거의 같아 나타나는 현상이다. Fig. 27은 40%와 80%의 공진점에서의 입사파와 선체횡동요의 위상차를 시계열로 나타내었다. 40%일때는 입사파와 선체횡동요의 피크(peak) to peak가 0.21초, 80%일때는 0.18초 간격으로 위상차가 비슷한것을 확인 할 수 있다.

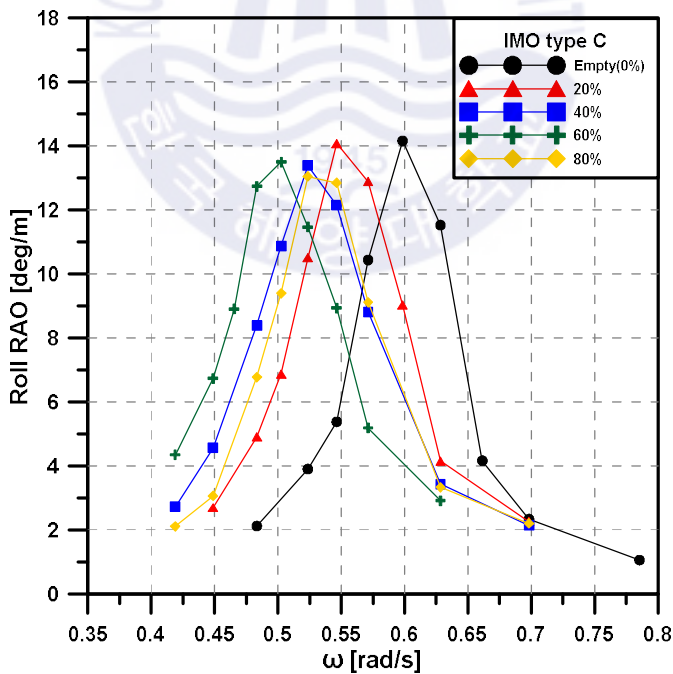


Fig. 26 Comparison of roll motion responses for IMO type C tank with different filling ratios

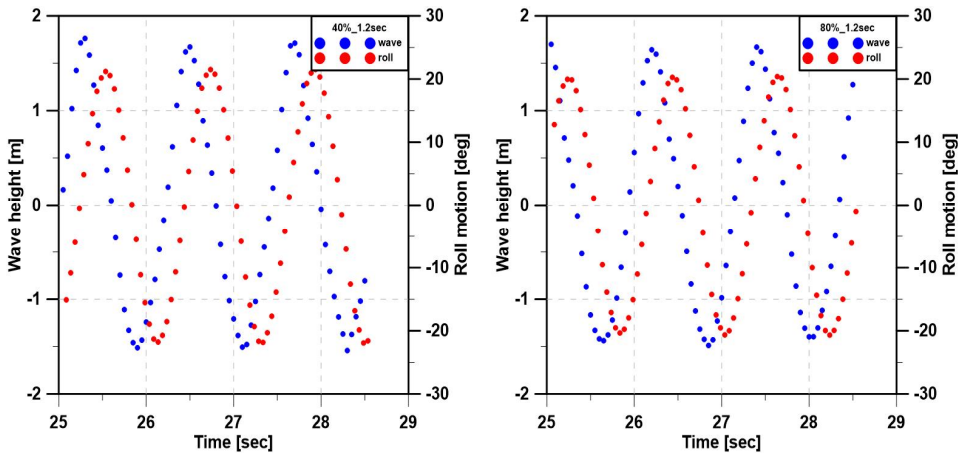


Fig. 27 Comparison of phase lag for 40%, 80% of IMO type C tank at resonance points

Empty(0%)를 포함한 모든 액체적재율 경우에 대해 공진주파수에서의 횡동요 응답 크기가 비슷하다. 이는 IMO type C 탱크가 내부유동에 의해 선체의 횡동요 고유주파수의 구간이동에 영향을 미치지만 선체의 횡동요 크기에는 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Developed 1.35 탱크가 설치된 선체의 규칙파 중 횡동요 응답 그래프를 Fig. 29에 나타내었다. 이 탱크는 개발한 탱크 중 제수홀의 면적이 가장 작다. 제수격벽의 제수홀이 유동을 제어하여 내부유동이 없는 Empty(0%) 경우 보다는 선체의 횡동요가 작아졌다. 개발된 다른 형식의 탱크에 비해 횡동요의 감소정도가 적은데, 이는 선체가 횡동요 시 제수홀의 면적이 작아 통과 할 수 있는 액체량이 한정적이기 때문이다.

Developed 3.77 탱크 설치 시 선체의 규칙파 중 횡동요 응답 그래프를 Fig. 31에 나타내었다. 탱크 내 액체적재율이 커지면서 공진점이 저주파수 구간으로 이동 하는 것을 확인 할 수 있다.

Developed 5.43, Developed 8.12 탱크는 제수격벽과 제수홀에 의해 내부유동이 영향 받으면서 Empty(0%)에 비해 선체 횡동요가 감소하였지만 탱크 내 액체적재율이 커지면서 선체 횡동요의 감소정도가 작아진 것을 Fig. 32와 Fig. 33에서 확인 할 수 있다.

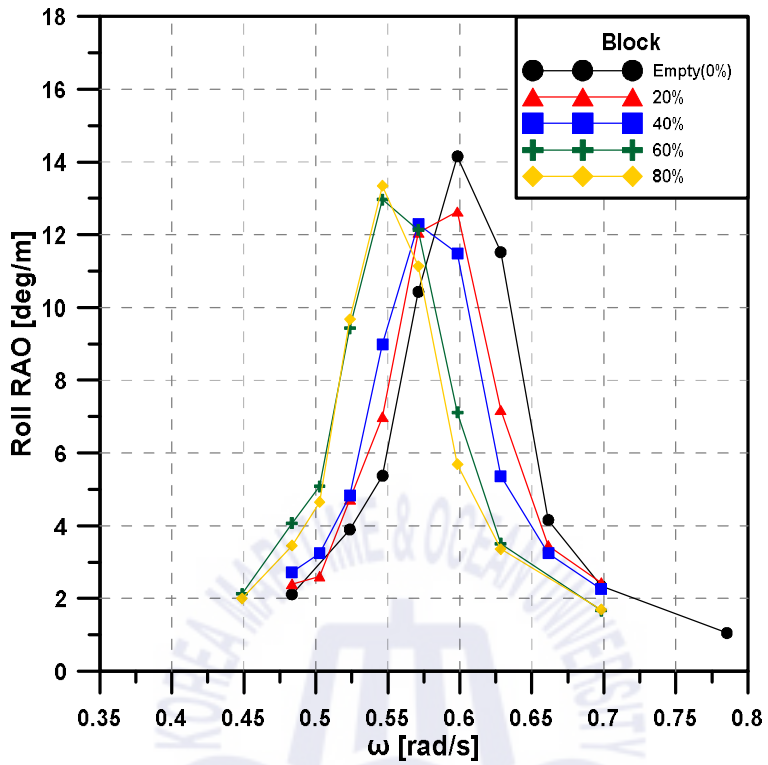


Fig. 28 Comparison of roll motion responses for Block tank with different filling ratios

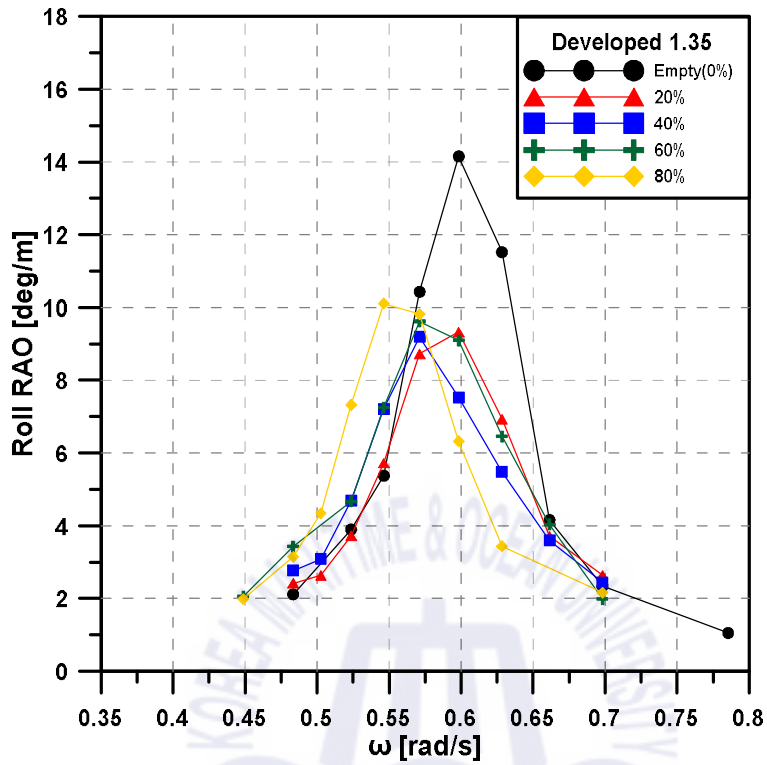


Fig. 29 Comparison of roll motion responses for Developed 1.35 tank with different filling ratios

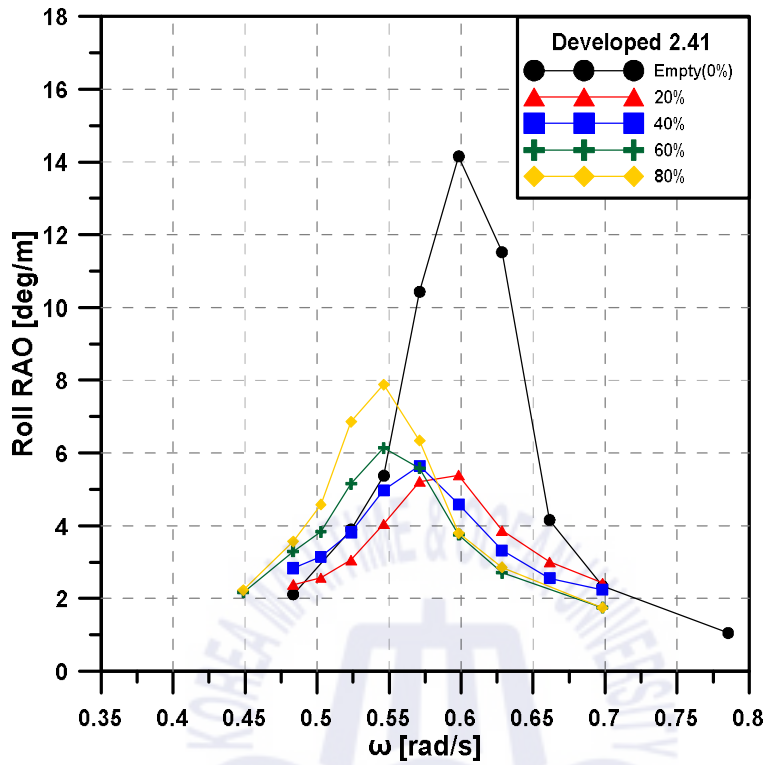


Fig. 30 Comparison of roll motion responses for Developed 2.41 tank with different filling ratios



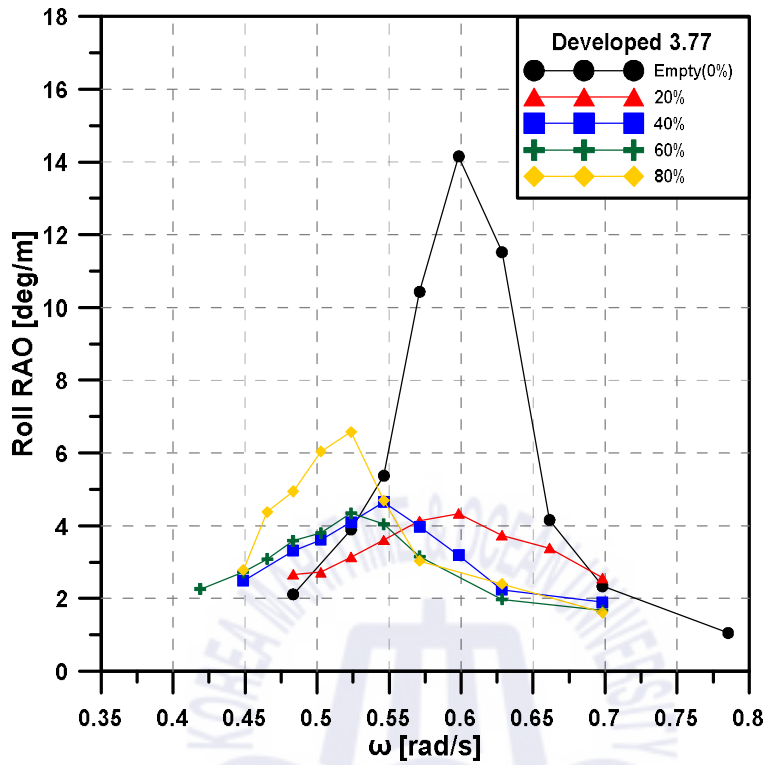


Fig. 31 Comparison of roll motion responses for Developed 3.77 tank with different filling ratios

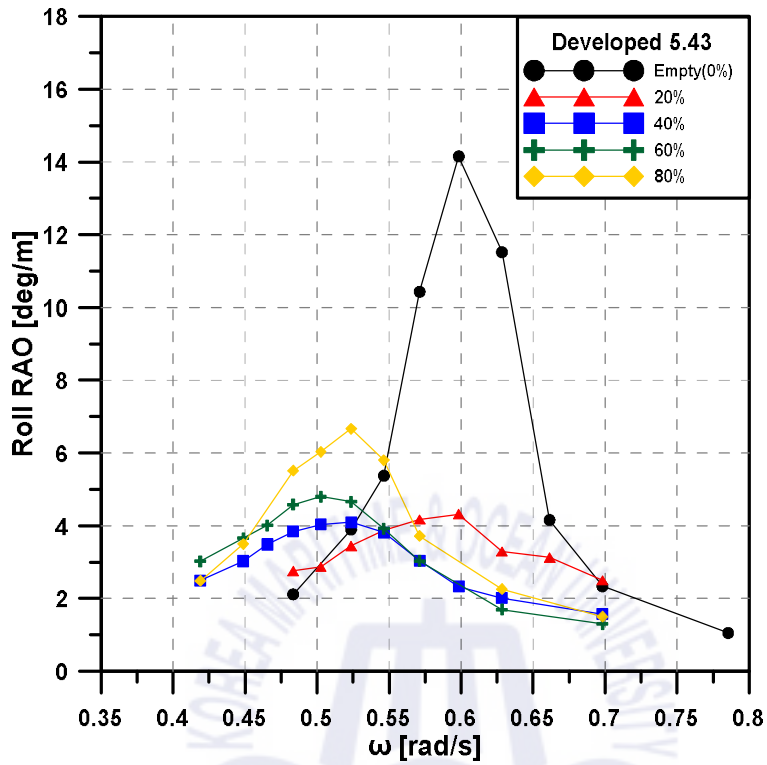


Fig. 32 Comparison of roll motion responses for Developed 5.43 tank with different filling ratios

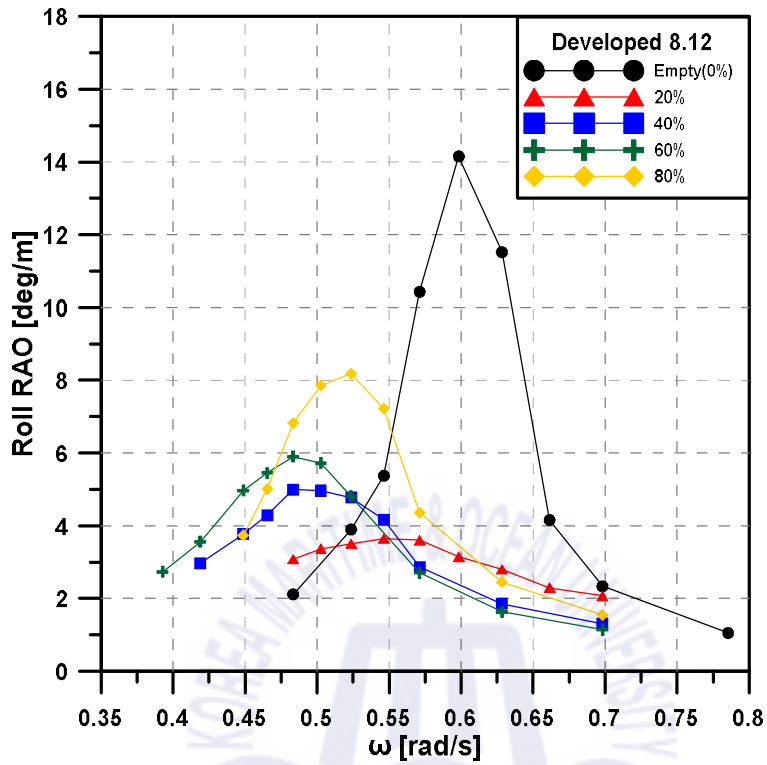
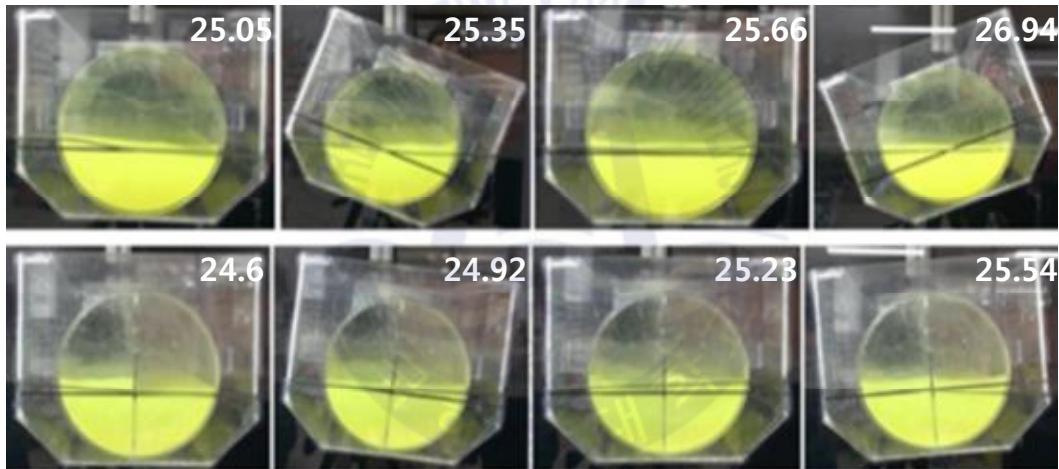


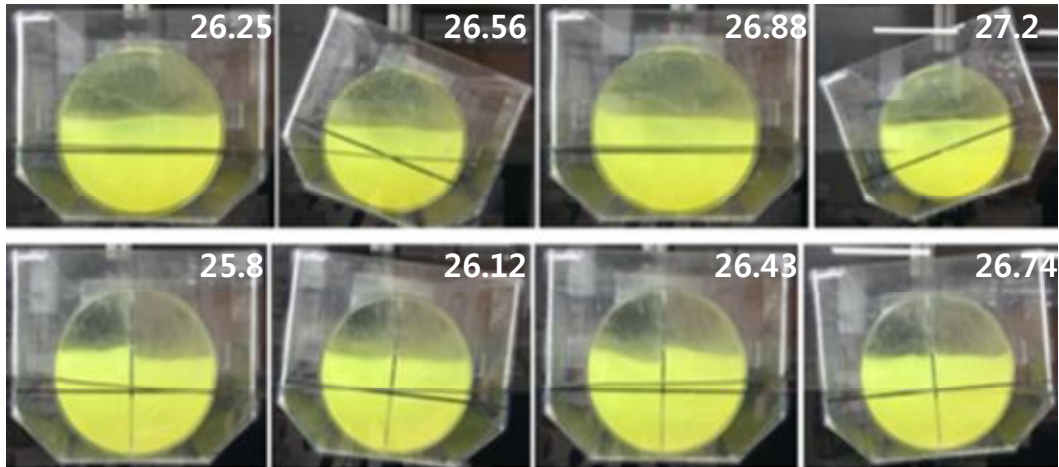
Fig. 33 Comparison of roll motion responses for Developed 8.12 tank with different filling ratios

Fig. 34과 Fig. 35은 IMO type C 탱크와 Developed 3.77 탱크를 설치한 선체의 횡동요 중 탱크 내부유동을 비교하여 나타내었다. 선체가 우현 최대경사로 운동한 후 수면과 평행한 상태로 돌아온 사진(Fig. 34 IMO type C 탱크 25.66초, Developed 3.77 탱크 25.23초/ Fig. 35 IMO type C 탱크 26.88초, Developed 3.77 탱크 26.43초)을 참고하면 Developed 3.77 탱크의 액체는 IMO type C 액체와 다르게 모멘트로 인해 선체운동에 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다.

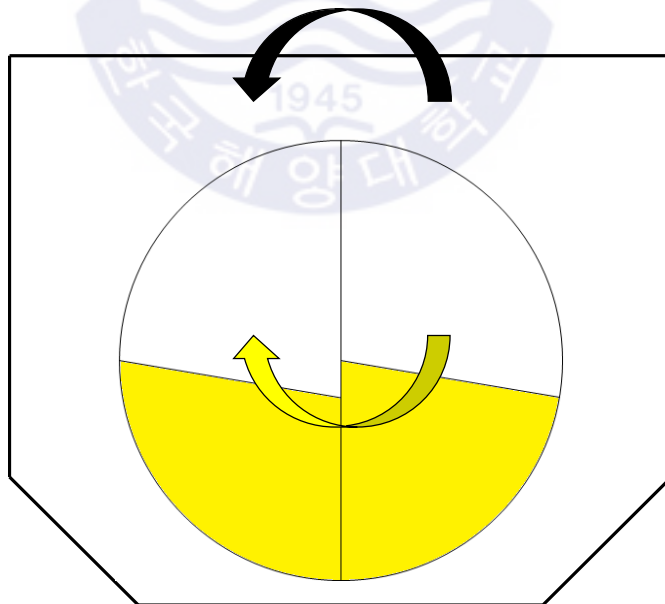
Fig. 36는 선체와 탱크 내부유동의 위상차로 인해 선체와 내부유동의 모멘트 방향이 달라 선체의 모멘트 크기가 감소할 때를 도식화 하였다.



**Fig. 34** Comparison of inner flow between IMO type C tank and Developed 3.77 tank, filling ratio=40%, Incident wave period=1.2sec  
 (IMO type c tank capture: 25.05sec, 25.35sec, 25.66sec, 26.94sec,  
 Developed 3.77 tank capture: 24.6sec, 24.92sec, 25.23sec, 25.54sec)



**Fig. 35** Comparison of inner flow between IMO type C tank and Developed 3.77 tank, filling ratio=60%, Incident wave period=1.25sec  
 (IMO type c tank capture: 26.25sec, 26.56sec, 26.88sec, 27.2sec,  
 Developed 3.77 tank capture: 25.8sec, 26.12sec, 26.43sec, 26.74sec)



**Fig. 36** Moment direction of vessel and inner flow of tank

### 4.3 불규칙파 중 횡동요 응답

본 연구에서 개발한 탱크의 성능을 검증하기 위해 대한민국 연안의 LNG병커링 터미널 운영예정 위치의 해양데이터를 기반으로 불규칙파 실험을 수행하였다. 기존에 사용 중인 IMO type C 탱크와 규칙파 중 횡동요 응답 실험 결과를 토대로 횡동요 저감이 가장 효율적인 Developed 3.77 탱크를 비교하였다.

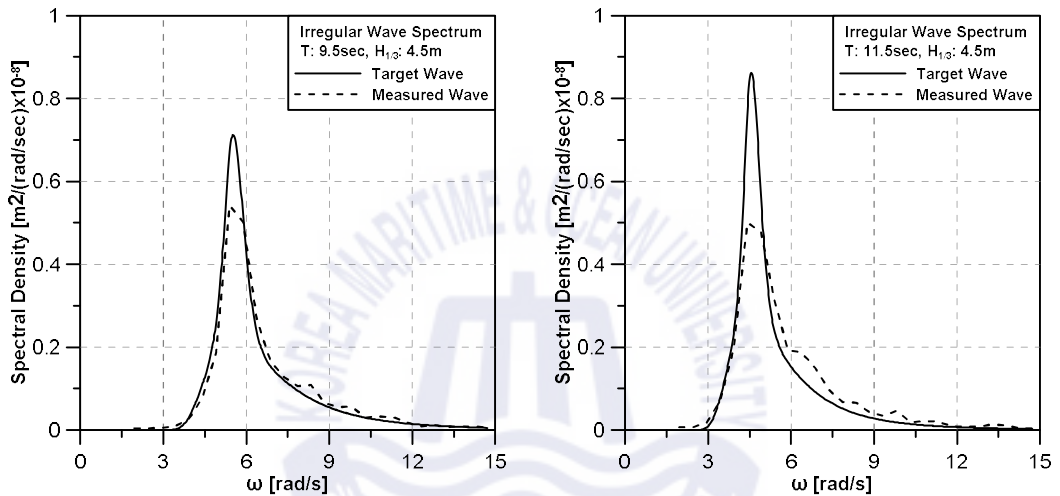


Fig. 37 1:100 Irregular wave spectral density ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ ,  $11.5\text{sec}$ )

Fig. 37은 실험을 위해 1:100 스케일로 생성한 불규칙파의 스펙트럼을 나타내었다. 입사파의 평균주기는 각 9.5초, 11.5초이며 유의파고는 각 4.39m, 4.4m로 불규칙파를 생성하였다. 스펙트럼의 피크치는 수조시설의 한계 상 반사파 때문에 작게 관측되었다.

### 4.3.1 불규칙파 및 횡동요 응답비교의 시간이력

Fig. 38와 Fig. 39은 실험에 사용한 불규칙파 유의파고 4.5m, 평균주기 9.5초, 11.5초의 시간이력이다.

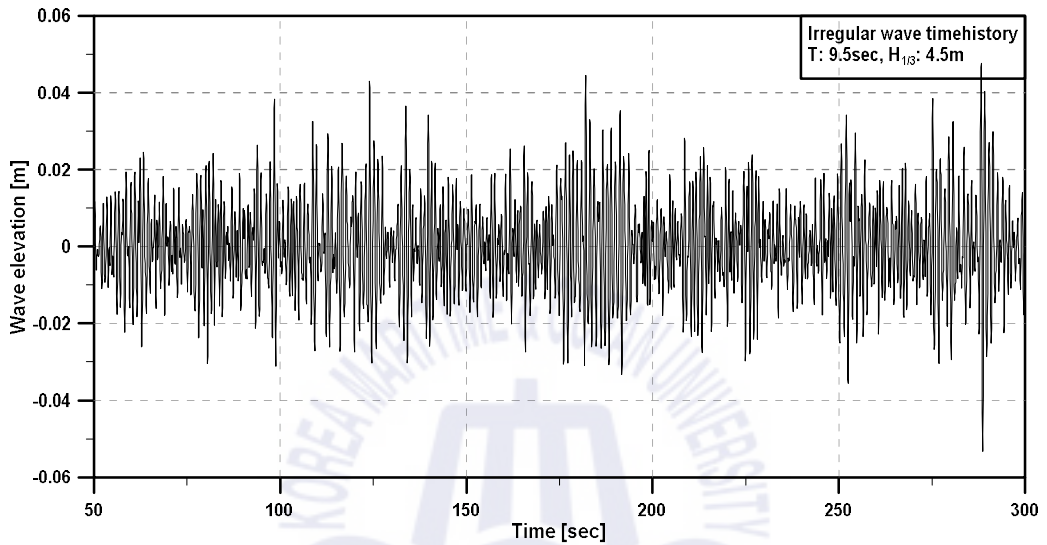


Fig. 38 Time history of irregular wave ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ )

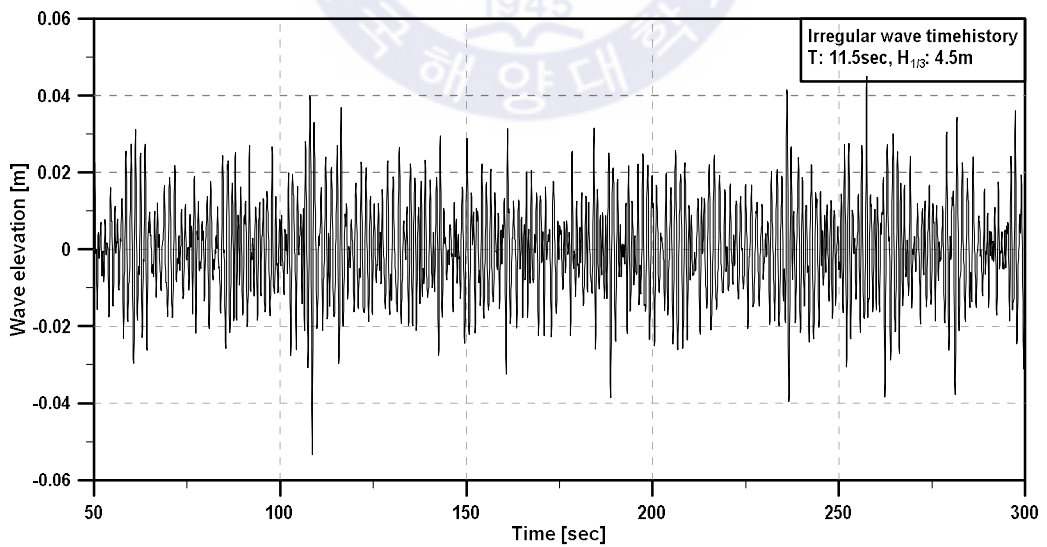


Fig. 39 Time history of irregular wave ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ )

Fig. 40와 Fig. 41은 불규칙파 실험 중 각 평균주기(9.5초, 11.5초)에서 Developed 3.77 탱크 설치 시 IMO type C 탱크에 비해 선체 횡동요 감소의 정도가 큰 부분의 시간이력을 비교한 그래프이다.

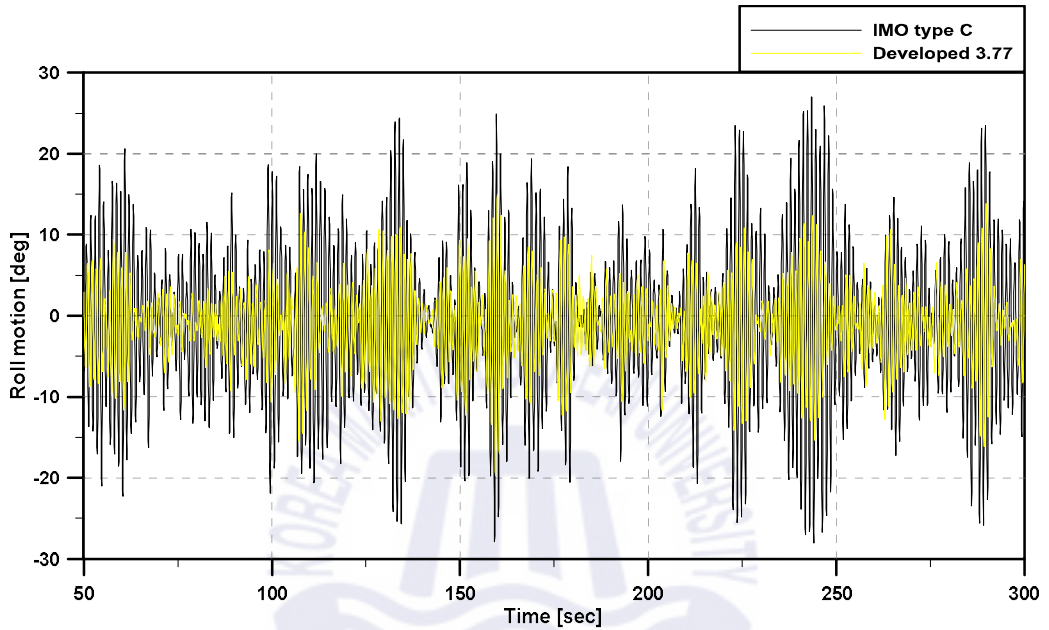


Fig. 40 Comparison of LNG bunkering motion time history of roll motion for 20% filled IMO type C tank and Developed 3.77 tank ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ )



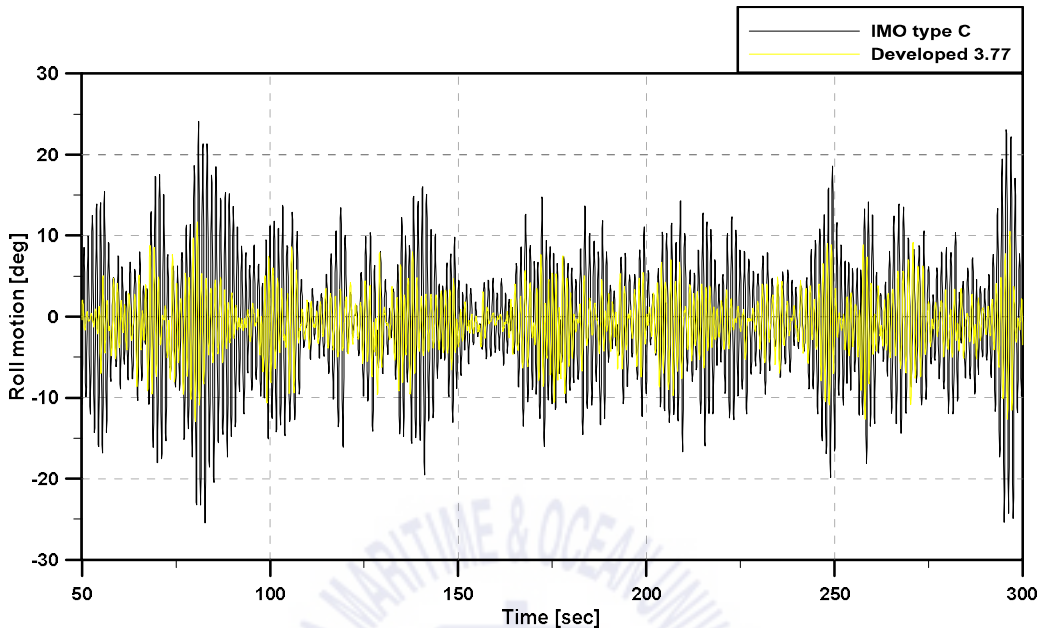


Fig. 41 Comparison of LNG bunkering motion time history of roll motion for 60% filled IMO type C tank and Developed 3.77 tank ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ )

#### 4.3.2 횡동요 응답의 스펙트럼 비교

Fig. 42와 Fig. 43는 유의파고 4.5m에서의 평균주기 9.5초, 11.5초인 2가지의 불규칙파 중 IMO type C 탱크를 설치한 선체의 횡동요 응답의 스펙트럼이다. 평균주기를 달리하는 두 개의 불규칙파 모두 탱크의 액체적재율에 관계없이 Empty(0%) 보다 횡동요 응답 스펙트럼의 피크치가 높게 나타나는 경향을 보여주고 있다.

평균주기가 9.5초인 불규칙파 중 선체의 횡동요 응답을 고찰해 보면 탱크 내부 적재율이 20%일 때는 Empty(0%)보다 피크치가 저주파수 구간으로 이동하였다. 탱크 내부 적재율이 40%, 60%, 80%일 때는 비슷한 주파수 구간에서 피크치가 나타나며 20%일 때 보다 저주파수 구간으로 이동하였다.

평균주기가 11.5초인 불규칙파 중 선체의 횡동요 응답을 보면 탱크 내부 적재율이 20%, 40%, 80% 일 때 비슷한 주파수 구간에서 피크치가 나타났고 Empty(0%)에 비해 저주파수 구간으로 이동하였다. 탱크 내부 적재율이 60% 일 때는 다른 적재 경우보다 피크치가 저주파수 구간으로 이동하고 가장 높게 측정되었다.

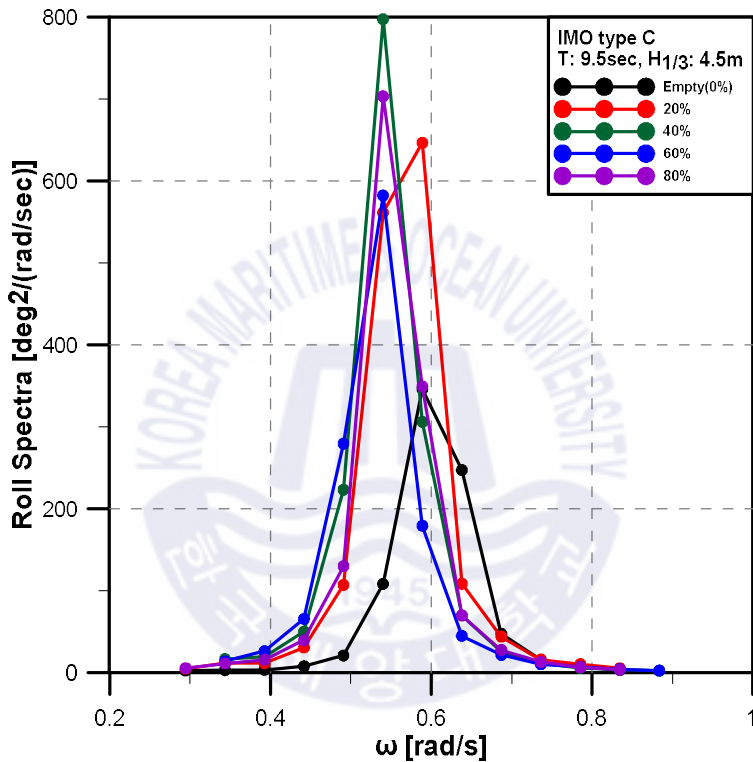


Fig. 42 Comparison of roll motion response spectra for IMO type C tank with different filling ratios ( $H_{1/3}$ =4.5m, T=9.5sec)

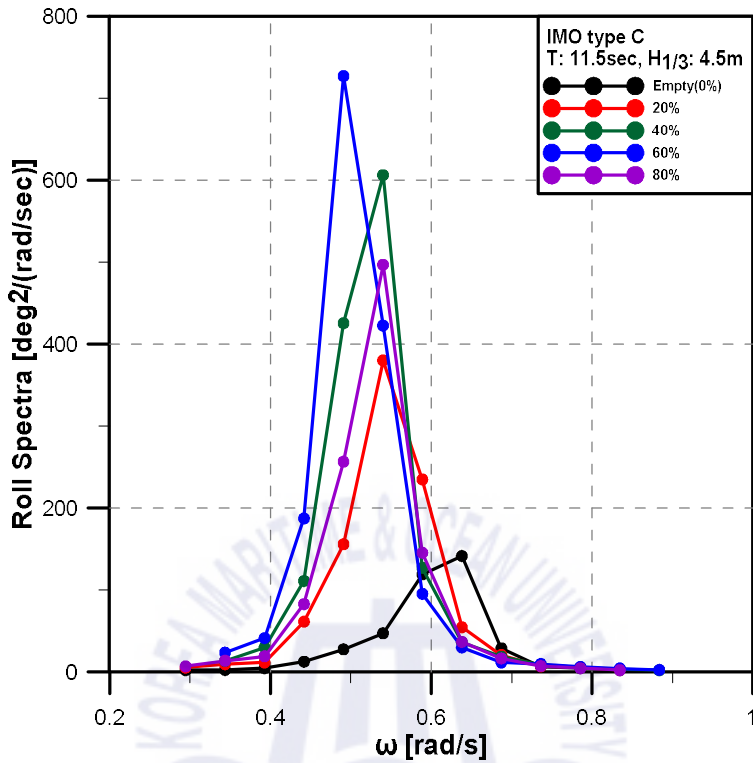


Fig. 43 Comparison of roll motion response spectra for IMO type C tank with different filling ratios ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=11.5\text{sec}$ )

Fig. 44와 Fig. 45은 유의파고 4.5m에서의 평균주기 9.5초, 11.5초인 2가지의 불규칙파 중 Developed 3.77 탱크를 설치한 선체의 횡동요 응답 스펙트럼이다.

주기를 달리한 두 불규칙파 모두 탱크 내부 유동이 있는 경우(20%, 40%, 60%, 80%) 비슷한 주파수 구간에서 피크치가 나타났고 Empty(0%)에 비해 저주파수 구간으로 이동하였다.

IMO type C 탱크는 내부 액체적재율에 따른 규칙파 중 횡동요 응답 크기가 비슷하지만 Developed 3.77 탱크는 내부 액체적재율이 80%의 경우가 다른 적재율들에 비해 규칙파 중 횡동요 응답이 크다. 실험에 사용된 두 개의 불규칙파 피크치 주파수가 Developed 3.77 탱크의 액체적재율 80% 일 때의 횡동요 응답 그래프 주파수 범위에 포함되므로 불규칙파 중 횡동요 응답도 다른 적재율에 비해 크게 나타난다.

불규칙파 평균주기 9.5초 일 때, 탱크 내부 적재율이 80%의 경우는 Empty(0%)에 비해 피크치의 감소량이 적었고 불규칙파 평균주기 11.5초의 경우 80%의 스펙트럼이 Empty(0%)에 비해 저주파 구간으로 이동 하였지만, 스펙트럼의 피크값이나 면적의 차이가 크게 없음을 확인 할 수 있다.

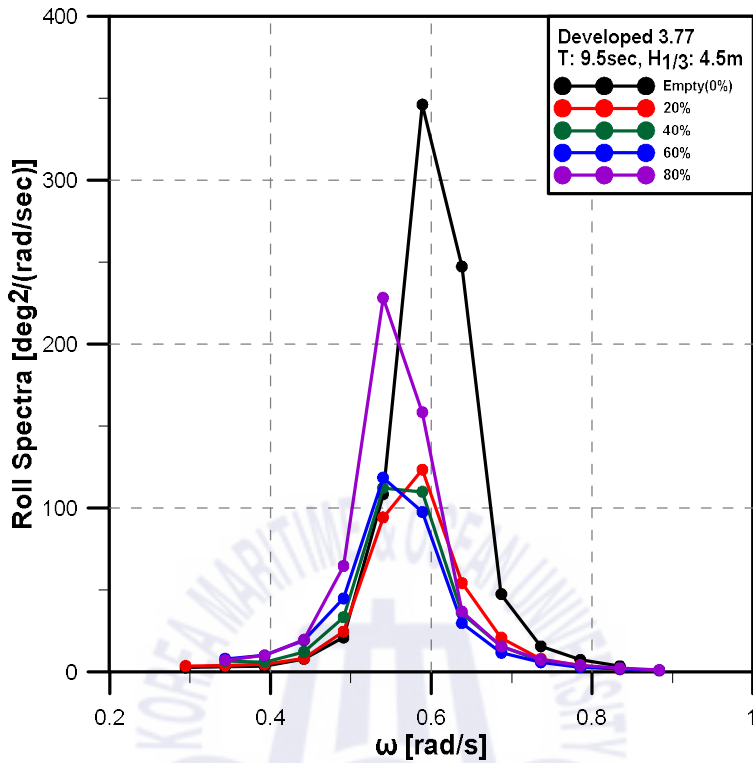


Fig. 44 Comparison of roll motion response spectra for Developed 3.77 tank with different filling ratios ( $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ,  $T=9.5\text{sec}$ )

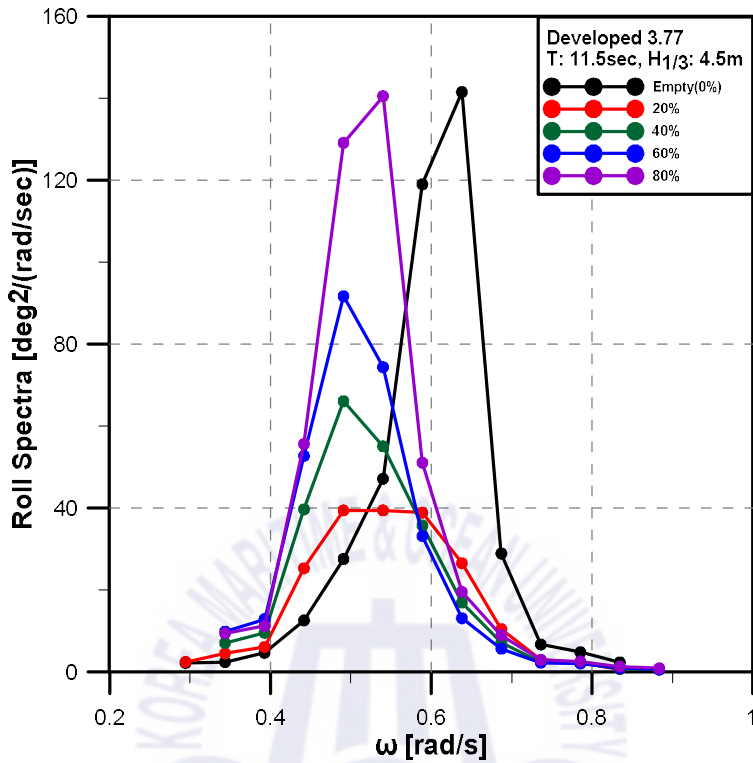


Fig. 45 Comparison of roll motion response spectra for Developed 3.77 tank with different filling ratios ( $H_{1/3}$ =4.5m, T=11.5sec)

Fig. 46 ~ Fig. 49에서는 유의파고 4.5m에서의 평균주기 9.5초, 11.5초인 2가지의 불규칙파 중 IMO type C와 Developed 3.77 탱크를 설치한 선체의 횡동요 응답을 탱크 내부 액체적재율에 따라 스펙트럼을 비교하였다.

IMO type C 탱크의 액체적재율 60% 일 때를 제외하고는, 모든 경우에서 불규칙파 평균주기 9.5초 일 때가 11.5초일 때 보다 스펙트럼 면적이 크고 피크치가 높게 측정 되었다.

탱크의 액체적재율 20%, 40%, 80%의 경우 선체 공진주파수는 0.54rad/s에 가까워 불규칙파 평균주기 9.5초일 때(스펙트럼 피크치 주파수 0.54rad/s)가 11.5초(스펙트럼 피크치 주파수 0.44rad/s) 보다 횡동요 응답이 크다. 탱크 액체적재율 60% 설치 시 선체의 공진주파수는 탱크의 내부유동으로 인해 저주파수 구간으로 이동하여 0.502rad/s이다. 액체적재율 60% 탱크를 설치한 선체의 스펙트럼 피크치 주파수는 0.49rad/s이며 60% 탱크 설치 시 선체의 공진주파수인 0.502rad/s 부근이다. 불규칙파 평균주기 11.5초는 9.5초에 비해 주파수가 0.49rad/s인 파의 밀도가 높다. 그러므로 탱크의 액체적재율 60% 일 때는 불규칙파 평균주기가 11.5초 일 때가 9.5초 일 때 보다 횡동요 응답이 더 크다.

내향, 외향으로 가정하여 주기를 두 가지로 나눈 불규칙파 중, 모든 탱크 액체적재율에 대해 Developed 3.77 탱크를 장착한 선체의 횡동요 응답이 IMO type C 탱크 보다 작게 측정 되었다. 이는 Developed 3.77 탱크를 설치하면 IMO type C 탱크보다 국내 LNG병커링 터미널 설치 운영예정인 해역의 내향, 외향에서의 파랑 중 LNG병커링선의 횡동요가 작음을 확인 할 수 있었다.

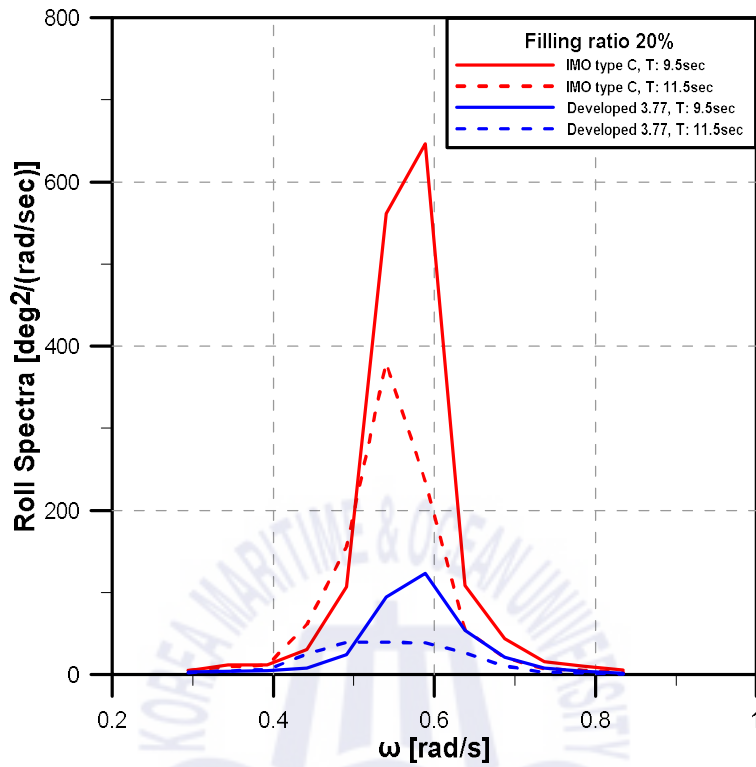


Fig. 46 Comparison of roll motion spectra response for 20% filled with different tanks and periods



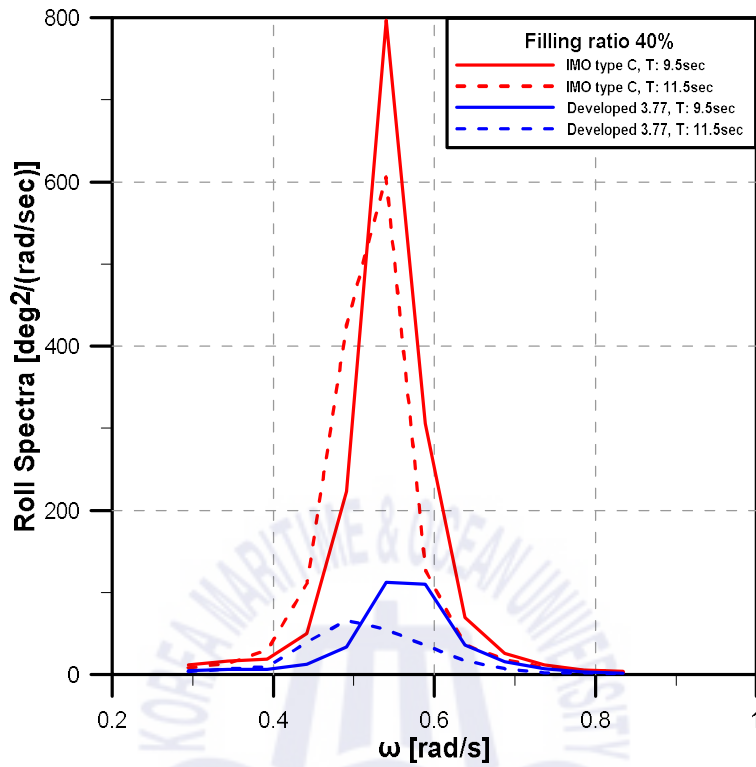


Fig. 47 Comparison of roll motion spectra response for 40% filled with different tanks and periods

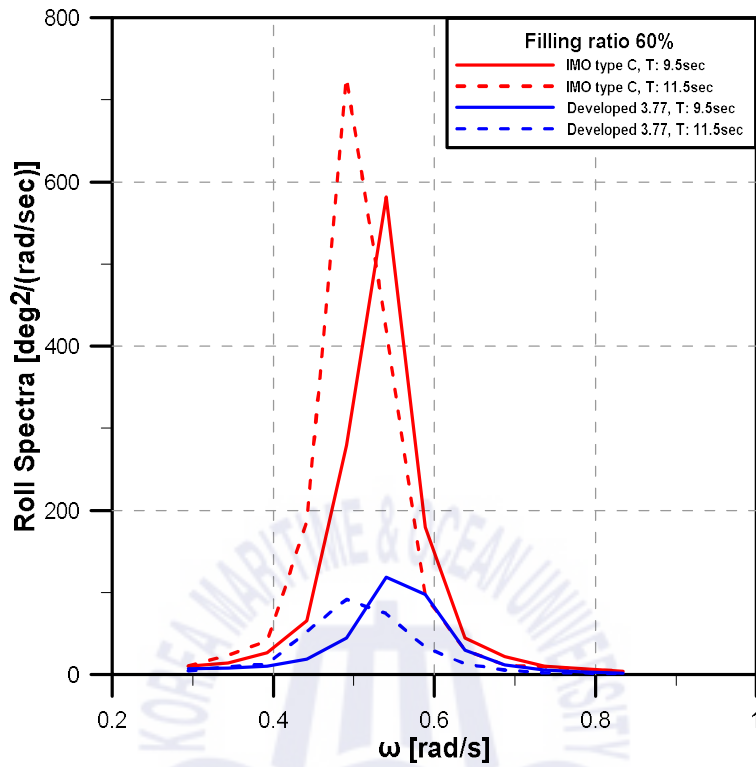


Fig. 48 Comparison of roll motion spectra response for 60% filled with different tanks and periods

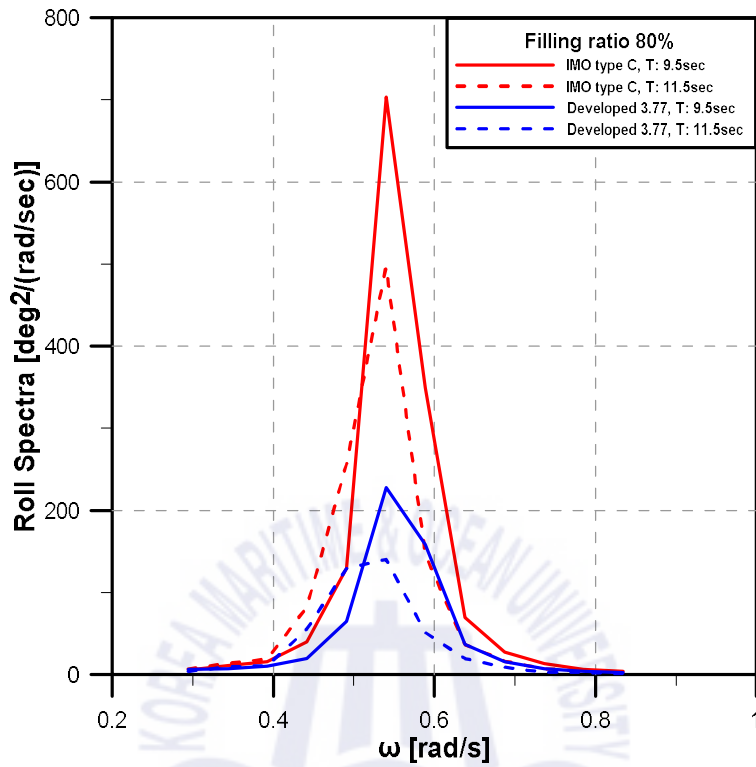


Fig. 49 Comparison of roll motion spectra response for 80% filled with different tanks and periods

### 4.3.3 횡동요 응답의 유의치 비교

Fig. 50과 Table 11는 앞에서 고찰한 불규칙파 중 횡동요 응답의 스펙트럼으로부터 IMO type C와 Developed 3.77 탱크를 설치하였을 시, 입사파의 평균주기(9.5초, 11.5초)에 대한 선체 횡동요의 유의치를 탱크 내 액체적재율별로 나타낸 표이다.

불규칙파 중의 스펙트럼 해석법을 통한 일반적인 횡동요 응답의 유의치는 식 (66)과 같이 규칙파의 운동의 주파수 전달함수와 파 스펙트럼을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\phi_{1/3} = 2.0\sqrt{m_0} = 2.0\sqrt{\int S_s(\omega)d\omega} = 2.0\sqrt{\int |H(\omega)|^2 S_\zeta(\omega)d\omega} \quad (66)$$

여기서,  $\phi_{1/3}$ 는 횡동요 응답의 유의치이고,  $m_0$ 는 분산(variance),  $S_s(\omega)$ 는 횡동요의 응답스펙트럼,  $S_\zeta(\omega)$ 는 입사파 스펙트럼,  $H(\omega)$ 는 횡동요의 주파수 전달함수이다. 여기서는 실험에서 얻어진 응답스펙트럼을 직접 적분하여 유의치를 산출하였다.

유의파고 4.5m에서의 평균주기 9.5초, 11.5초인 2가지의 불규칙파 중 Developed 3.77 탱크를 설치하였을 때 IMO Type C 탱크와 비교하여 탱크 내 적재율이 증가 할수록 선체 횡동요 유의치 감소율이 작아진다.

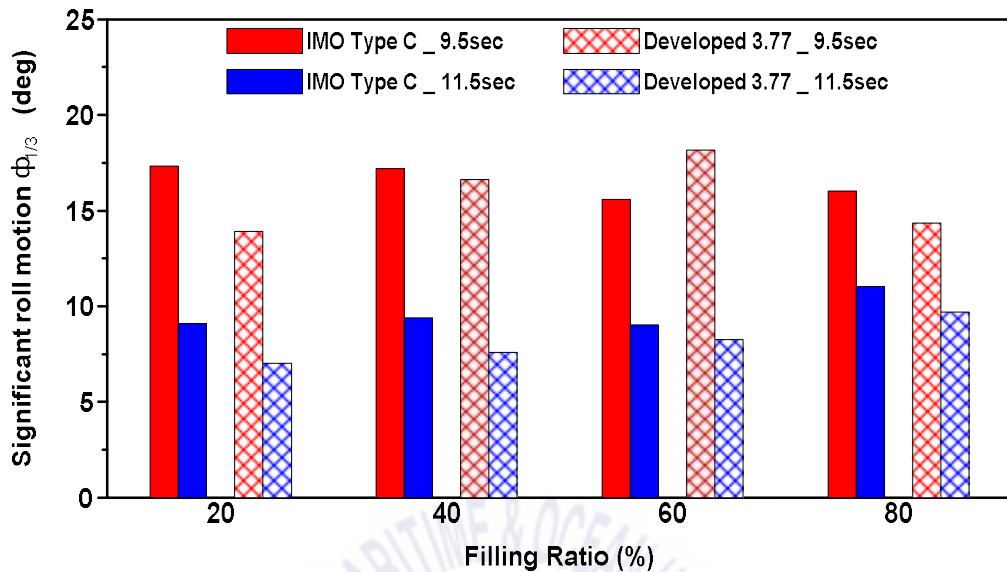


Fig. 50 Comparison of roll motion significant roll motions for IMO type c tank and Developed 3.77 tank with different filling ratios

Table 11 Comparison of significant roll motions for IMO type c tank and Developed 3.77 tank with different filling ratios

Tank type	IMO Type C		Developed 3.77		Decrement	
	9.5s	11.5s	9.5s	11.5s	9.5s	11.5s
Filling Ratio	$\phi_{1/3}$ (deg)				Percent (%)	
0%	13.13	9.05	13.13	9.05	-	-
20%	17.32	13.90	9.10	7.01	47.48	49.55
40%	17.19	16.63	9.41	7.58	45.27	54.42
60%	15.57	18.15	9.02	8.25	42.08	54.57
80%	16.03	14.34	11.02	9.70	31.26	32.40

## 5. 결 론

본 연구는 개발된 탱크에 의해 내부유동을 제어함으로써 파랑 중 LNG병커링 선의 횡동요 감소를 목표로 수행하였다. 2차원 조파수조에서 규칙파, 불규칙파 중 모형실험을 통해 개발된 탱크의 효과를 검증하였다.

결론은 다음과 같다.

(1) 내부유동을 제어하기 위해 제수격벽과 제수홀이 있는 탱크를 설치한 선체는 기존의 IMO type C 탱크를 설치하였을 때 보다 규칙파 중 횡동요 응답크기가 작다.

(2) 제수홀과 제수격벽의 면적 비율이 서로 다른 다섯 개의 탱크를 제작하여 실험하였는데, 그 중 비율이 3.77인 탱크를 설치하였을 때 탱크 내 액체적재율이 달라지면서 선체의 고유주파수가 이동하고 규칙파 중 횡동요 응답의 감소가 가장 효율적 이었다.

(3) 규칙파 실험을 통해 개발된 탱크 중 가장 효율적인 Developed 3.77 탱크와 IMO type C 탱크를 유의파고 4.5m에서의 평균주기 9.5초(내향), 11.5초(외향)의 불규칙파 중 횡동요 응답을 스펙트럼으로 비교 분석 하였다. Developed 3.77 탱크가 IMO type C 탱크 보다 내향에서는 최대 47%, 외향에서는 최대 54% 선체의 횡동요 응답이 작게 측정 되었다.

## 감사의 글

도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

2020년 6월

이 태 경



## 참고문헌

趙孝濟, (1991), “溪流式浮遊海洋構造物の応答特性に及ぼす多方向波の影響に関する研究”, 東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻博士課程.

Alberto, F., Giorgio, C., 1994. An Experimental Study of the Coupling Between Roll Motion and Sloshing in a Compartment. In: University of Trieste, *Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*.

Rognebakke, O., Faltinsen O., 2003. Coupling of Sloshing and Ship Motions. MARINTEK, SINTEF Group, *Journal of Ship Research*, Vol.47, No. 3, September 2003, pp. 208-221.

Nam, B.W., Kim, Y.H., 2007. Effects of Sloshing on the Motion Response of LNG-FPSO in Waves. Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI), *22nd IWWWFB 2007*.

Jaiswal, O.R., Kulkarni, S., & Pathak, P., 2008. A study on sloshing frequencies of fluid-tank system. Dept. of Applied Mechanics, Visvesvaraya National Institute of Technology, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China

Nasar, T., Sannasiraj, S.A. & Sundar, V., 2010. Motion responses of barge carrying liquid tank. Department of Ocean Engineering, Indian Institute of Technology Madras, *Ocean Engineering*, Ocean Engineering 37 (2010) 935-946

Kim, Y.H., Sung, H.G., Cho, S.K., & Choi, H.S., 2013. The Sloshing Effect on the Roll Motion and 2-DoF Motions of a 2D Rectangular Cylinder. Maritime & Ocean Engineering Research Institute, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 50, No.2, pp.69-78, April 2013

손경호, 2016. *부유체운동조종*. 다솜출판사.



Zhao, W., McPhail, F., 2016. Effect of Partially Filled Spherical Cargo Tanks on the Roll Response of a Bargelike Vessel. The University of Western Australia, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 2016

Kwon, C.S. et al., 2018. Experimental Investigation on Sloshing for Independent Types B Tank of 30K LNG Bunkering Vessel. Ship & Offshore Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd, *Proceedings of the Thirteenth (2018) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium*, Jeju, Korea, October 14-17, 2018

Energy Newspaper, 2019. LNG추진선박 · 병커링이 미래 경쟁력이다 [Online] (updated 20 May 2019) Available at: <http://www.energy-news.co.kr> [Accessed 17 December 2019]

