

Design of Pile-Guide Mooring System for Offshore LNG Bunkering Terminal: A Case Study for Singapore Port

Seong-yeob Lee* and Daejun Chang*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

해상 LNG 병커링 터미널용 파일 가이드 계류 시스템 설계: 싱가포르 항의 사례 연구

이성엽* · 장대준*

*한국과학기술원 기계공학과

KEY WORDS: LNG fuelled ship 액화천연가스 추진 선박, LNG bunkering terminal 액화천연가스 병커링 터미널, Pile-guide mooring System 파일가이드식 무어링 시스템, Early design 초기 설계

ABSTRACT: In this study, a pile-guide mooring system (PGMS) was designed for an offshore liquefied natural gas bunkering terminal (LNG-BT), which is an essential infrastructure for large LNG-fuelled ships. The PGMS consisted of guide piles to restrict five motions of the floater, except for heave, as well as a seabed truss structure to support the guide piles and foundation piles to fix the system to the seabed. Singapore port was considered for a case study because it is a highly probable ports for LNG bunkering projects. The wave height, current speed, and wind speed in Singapore port were investigated to calculate the environmental loads acting on the hull and PGMS. A load and resistance factor approach was used for the structural design, and a finite element analysis was performed for design verification. The steel usage of the PGMS was analyzed and compared with the material usage of a gravity-based structure under similar LNG capacity and water depth criteria. This paper also describes the water depth limit and wave conditions of the PGMS based on estimation of the initial investment and the present value profit difference. It suggests a suitable LNG-BT support system for various design conditions.

Abbreviation

	IMO
	International maritime organization
BOG	LNG
Boil off gas	Liquefied natural gas
EEDI	LNG-BS
Energy efficiency design index	LNG bunkering shuttle
FEA	LNG-BT
Finite element analysis	LNG bunkering terminal
GBS	LNGC
Gravity-based structure	LNG carrier
HFO	LNG-FS
Heavy fuel oil	LNG Fuelled ship
HLV	LRFD
Heavy lift vessel	Load and resistance factor design

Received 1 September 2017, revised 7 September 2017, accepted 20 November 2017

Corresponding author Daejun Chang: +82-42-350-1510, djchang@kaist.ac.kr

© 2017, 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.

LWT
Light weight tonnage
MEPC
Marine environment protection committee
MUSD
Million united states dollars
PGMS
Pile-guide mooring system
PTS
Port-to-ship
PTT
Portable tank transfer
PVPD
Present value profit difference
STS
Ship-to-ship
SWH
Significant wave height
TTS
Truck-to-ship
USD
United states dollars

1. 서 론

글로벌 화물운송 시장에서 선박이 차지하는 비율은 절대적이다. 선박은 효율적이며 친환경적인 수송수단이지만, 오늘날 더 개선된 지구환경을 위해 선박으로부터 오염물질 방출이 큰 폭으로 저감되어야 한다. 2016년 10월 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC) 70차 회의에서, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 전 해역에서 선박배출가스의 황 함유량을 0.5%로 제한하는 글로벌 해상환경 규제 강화 적용 시기를 2020년으로 확정하였다. 또한 에너지효율설계지수(Energy efficiency design index, EEDI)의 도입으로 새롭게 설계되는 선박은 이산화탄소 방출량을 단계적으로 줄여야 한다(MEPC, 2016). 그러나 현재 선박에 사용되는 중유계열의 bunker유(Bunker fuel oil)는 온실가스를 포함한 공해물질 배출량이 많기 때문에 강화된 환경 규제를 만족시키기 힘들다.

이러한 문제에 대한 해결방안으로 조선 및 해운업계에서는 선박의 추진 연료로써 액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)를 고려하고 있으며 연료탱크, bunker링 터미널 등의 인프라에 관한 연구들이 수행되고 있다. 단일 성능과 압축 성능을 동시에 지닌 단일계 연구, 기화천연가스(Boil off gas, BOG)를 줄일 수 있는 단일 구조 연구, 탱크의 공간 효율을 높이기 위한 각형 압력용기 설계 등이 LNG 연료탱크 및 bunker링용 저장탱크의 내조설계를 보다 경제적으로 하기 위해 수행되었다(Jung et al., 2016; Yun, 2015; Ahn et al., 2017). LNG bunker링 사업에 대해, Kim(2016)은 LNG 도입 이후 비용을 최소화하기 위한 위치 선정과 차별화된 bunker링 방식 및 사업구조의 필요성을 강조하고, 부산항의 경쟁력 확보 방안을 연구하였다.

LNG bunker링 터미널(LNG bunkering terminal, LNG-BT)은 크게 4가지 방식으로 분류된다: (1) 탱크로리(Tank lorry)에서 선박으로 충전하는 방식(Truck-to-ship, TTS) (2) 미리 충전해 놓은 LNG 연료탱크를 직접 교체하는 방식(Portable tank transfer, PTT) (3) 육상 LNG-BT에서 선박으로 충전하는 방식(Port-to-ship, PTS) (4) 해상 LNG-BT에서 LNG bunker링 셔틀(LNG bunkering shuttle, LNG-BS)을 이용하여 선박으로 충전하는 방식(Ship-to-ship, STS). 이 중 STS 방식의 해상 LNG-BT가 대형 선박 bunker링의 유일한 대안이다. 이에 관련하여 국내 울산항, 부산항을 대상으로 입출항 선박수, 선종별 연료 소모량, 안정성, 경제성, 주요기능 등을 고려하여 해상 LNG bunker링 터미널 사업 추진 가능성과 개념설계에 대한 연구가 수행되었다(Kim et al., 2017a; Yun et al., 2015). 또한, 부유식 LNG-BT에 작용하는 풍하중 및 조류하중을 LNG-BS 배치와 차폐효과를 고려하여 계산한 연구(Park et al., 2017), 터미널을 지지할 수 있는 파일가이드식 무어링 구조물 설계와 최적 목표신뢰도(Target reliability) 선정에 관한 연구 등이 수행되었다(Lee et al., 2016).

STS 방식의 해상 LNG-BT는 많은 장점이 있다고 알려져 있으나, 아직까지 안정성에 대한 우려가 크고 지지구조물에 대해 지배적인 해결책이 나오지 않은 상태이다. 현재 해상구조물에 가장 많이 사용되는 계류 시스템 또는 지지방식으로는 자켓 구조물(Jacket structure), 중력식 구조물(Gravity-based structure, GBS), 터렛(Turret) 등이다. 자켓 구조물은 지지 가능한 플랫폼의 한계 자중이 약 3~5만톤이기 때문에 15만톤 이상의 LNG를 저장해야 하는 LNG bunker링 터미널에 적합하지 않다. GBS의 경우 무거운 플랫폼 지지가 가능하지만 자켓 구조물에 비해 경제성이 낮고 해저면 상태에 따라 설치해역이 제한되는 단점이 있다. GBS 방식은 천해(수심 20m 이하)에서 큰 장점이 있을 것으로 보인다. 터렛 무어링 방식은 수심이 깊은 해역에서 경제성이 있을 것으로 판단되나, 선박간 bunker링에 대한 안전성 검토가 필요하다. 따라서, 육상에서 멀지 않은 해역(수심 20m~100m)에서 LNG-BT와 같이 자중이 15만톤 이상이고 선박간 LNG bunker링을 빈번하게 수행해야 하는 초대형 부유체를 지지할 수 있는 적절한 계류 시스템 연구가 필요하다.

본 연구에서는 해상 LNG-BT를 효율적으로 지지할 수 있는 파일가이드식 무어링 구조물(Pile-guide mooring system, PGMS)을 제안하며 싱가포르 항을 대상으로 설계를 수행한다. 설계안에 대해 유한요소해석을 통한 검증은 수행하고, 경제성 평가를 통해 제안된 무어링 구조물의 적용 범위를 연구한다.

2. 시스템 설명(System Description)

2.1 STS LNG bunker링 과정(STS LNG Bunkering Procedure)

Fig. 1은 STS 방식 LNG bunker링 절차이다. LNG선(LNG carrier, LNGC)은 LNG 생산설비로부터 LNG-BT로 LNG를 공급한다. Yun 등의 연구(Yun et al., 2015)에서, LNG-BT는 5개의 대기압 탱크와 1개의 압력 탱크를 가지고 있으며, 약 300,000m³ 용량의 LNG를 저장할 수 있다. LNG-BT는 LNG-BS에게 LNG를 공급하고, 최종적으로 LNG-BS가 LNG를 연료로 사용하는 선박(LNG-fuelled ship, LNG-FS)에게 STS 방식으로 공급한다.

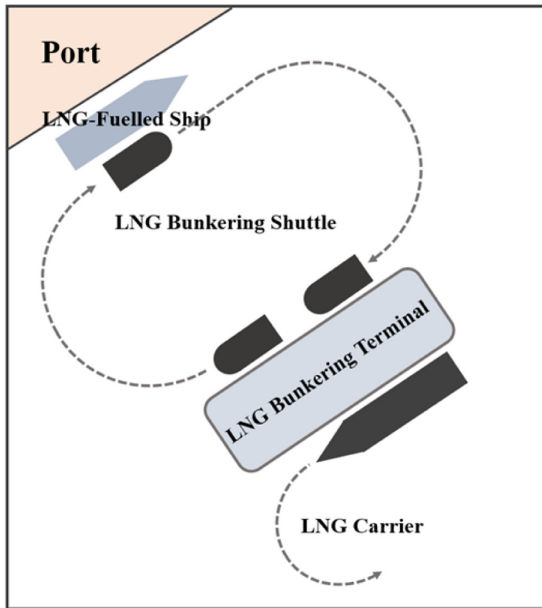


Fig. 1 Ship-To-Ship LNG Bunkering Procedure (Yun et al., 2015)

2.2 해상 LNG bunkering 터미널을 위한 파일 가이드 무어링 시스템

Fig. 2는 해상 LNG bunkering 터미널을 위한 가이드 파일을 이용한 무어링 구조물(PGMS)이다. 6개의 가이드파일(Guide-pile)이 부유체를 지지하도록 설계되었으며, 이들은 해저면에 고정되어 있는 트러스 구조물(Seabed truss structure)에 삽입된다. 최적 파일 개수는 목표해역의 환경조건에 따라 달라지며, 길이는 수심, 조수간만의 차, 부유체의 흘수가 고려되어 설계된다. 트러스 구조물은 말뚝 파일(Foundation pile)에 의해 해저면에 고정된다. LNG-BT는 자체적으로 부유체 기능을 할 수 있으며, 해수면 또는 흘수(Draft)가 변할 때 가이드파일을 따라 상하동요(Heave)를 자유롭게 할 수 있다. 나머지 5 자유도 운동(Surge, sway, roll, pitch, and yaw)은 가이드파일에 의해 구속된다. 따라서 부유체의 큰 자중과 부력의 변화가 무어링 구조물에 가해지지 않는다. 가이드파일과 트러스 구조물은 부유체에 작용하는 횡 방향 파력(Wave excitation force), 해류력(Current force), 풍력(Wind force)을

고려하여 설계된다(Lee et al., 2016).

3. A Case Study: 싱가포르 항

3.1 배경

3.1.1 싱가포르 항의 LNG bunkering 사업 계획

싱가포르는 말라카해협을 지리적 이점이 있어 석유 bunkering 시장에서 가장 높은 점유율을 가진 국가 중 하나이다. LNG bunkering 사업에 있어서도 아시아에서 가장 적극적이며 높은 경쟁력이 기대된다. 싱가포르 항은 2020년부터 선박에 LNG bunkering 서비스 제공을 목표로 2013년부터 관련 계획을 수립·진행해왔고, 2018년부터 시범사업이 추진될 예정이다. 최근 싱가포르 정부는 LNG bunkering 표준화 사업을 수행 중이며, LNG 추진선박 확대를 위해 6척의 신조선박에 대해 적당 200만 싱가포르달러(S\$)를 지원하는 정책을 발표하였다. 또한, 항만 내 LNG 추진선박에 대한 입항료를 5년간 면제하는 인센티브제 도입을 고려하고 있다(Kim et al., 2017b).

3.1.2 싱가포르 항의 LNG bunkering 기대 수요량

싱가포르 항에는 연간 약 128,000척의 선박이 지나가고 있으며(Table 1), 이중 40%가 싱가포르 항에서 중유 계열의 bunker유(Heavy fuel oil, HFO)를 공급받고 있다(MPA, 2012b). DNV-GL (2012)은 향후 bunkering을 위해 싱가포르 항으로 들어오는 선박의 약 15%가 LNG를 연료로 공급받을 것이라고 예상했다. LNG와 HFO의 에너지 밀도 차이(저위 발열량 기준 1,000m³의 HFO는 약 1,654m³의 LNG)를 고려하고 LNG를 연료로 사용하게 될 다섯 종류의 선박을 가정하여 예상 LNG bunkering 양을 Table 2와 같이 계산하였다(Yun et al., 2015). LNG-FS은 LNG가 약 10% 남았을 때 bunkering을 받게 되고, 주유시 85%까지 연료탱크를 채운다고 가정하였을 때(IMO, 2006) 하루 약 35,000m³의 LNG bunkering이 이루어질 것으로 예상된다. LNG 수입 가격과 bunkering용 예상 가격 차이를 2.5\$/MMBTU(58.5\$/m³)로 가정했을 때(Sund and Whitefield, 2014), 매년 12.6×10⁶m³의 LNG bunkering이 예상되는 싱가포르 항의 기대 수입은 737.1 MUSD/yr로 계산되었다.

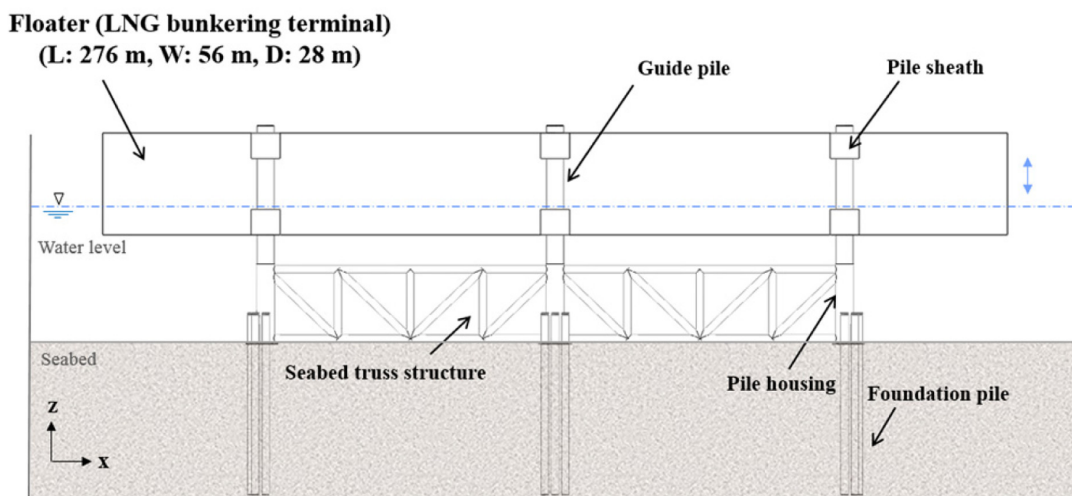


Fig. 2 Concept of pile-guide mooring system

Table 1 Ship statistics in Singapore port in 2011 (MPA 2012b)

Ship types	Ships/year	Ships serving for transoceanic transport		
		Ships/day	GT/year	Fraction [%]
Container	19,290	52.8	657,025,000	15.1
Freighters	4,623	12.7	41,483,000	3.6
Coasters	3,907	10.7	1,739,000	3.1
Bulk carriers	13,093	35.9	604,740,000	10.2
Oil & chemical tanker	20,449	56.0	585,906,000	16.0
LNG & LPG	1,831	5.0	66,776,000	1.4
Passengers	411	1.1	19,968,000	0.3
Regional ferries	33,452	91.6	7,178,000	26.1
Barges	10,637	29.1	17,255,000	8.3
Tugs	11,065	30.3	2,557,000	8.6
Miscellaneous	9,240	25.3	115,655,000	7.2
Total	127,998	350.7	2,120,282,000	100.0

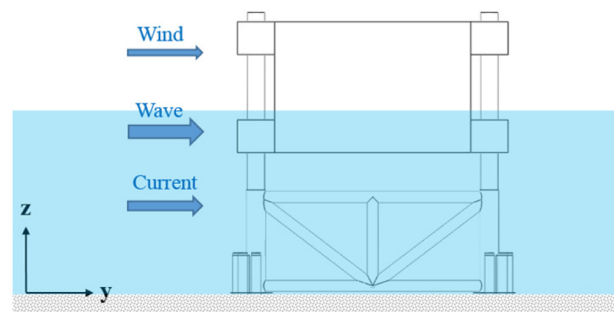
Table 2 Target ships for LNG bunkering and expected LNG demand

Target ships	LNG bunker ships (40% * 15%)		Fuel tank size for HFO	LNG demand (75% filling)	
	Ships/year	Ships/day	10 ³ [m ³]	10 ⁶ m ³ /year	10 ³ m ³ /day
Container	1,157	3	4.0	5.4	14.9
Bulk carrier	786	2	2.4	2.2	6.0
Oil & chemical tanker	1,227	3	1.9	2.6	7.1
LNG & LPG carrier	110	1	3.5	1.6	4.3
Passenger ship	25	1	2.2	1.0	2.7
Total	3,304	10	-	12.6	35.0

3.2 파일가이드식 계류 시스템(Pile-Guide Mooring System) 설계

3.2.1 환경하중 계산

Fig. 3은 부유체와 PGMS에 작용하는 환경하중(풍력, 해류력, 파력)이다. 싱가포르 항의 환경조건은 상대적으로 유순하며 무어링 구조물 설계에 사용된 풍속(Wind velocity), 해류 속도(Current speed), 유의파고(Significant wave height, SWH)는 Table 3과 같다(NEA, 2009; MPA, 2012a; Zhang, 2004). 환경하중 중에 부유체에 가해지는 가장 지배적인 힘은 파력(Wave excitation force)이며, 부유체에 LNG가 가득 채워져 있을 때 가장 커진다.

**Fig. 3** Environmental load acting on pile-guide mooring system**Table 3** Weather conditions of Singapore port

Item	Unit	Value	Description	Remarks
Wind velocity	m/s	28	for 100 years	NEA 2009
Tidal level	m	3.1	Mean high water springs	MPA 2012a
		2.5	Mean high water neaps	
		0.5	Mean low water springs	
		1.2	Mean low water neaps	
Current speed	m/s	1.5~2.0	Narrow channels	Zhang 2004
		< 0.5	Eastern parts of straits	
SWH	m	1.5	Higher than the maximum wave height recorded	Zhang 2004

Table 4 Dead weight condition (98% filling condition)

DWT estimation	Unit	Value
Weight (LWT + LNG 98%)	ton	164,446
Draft	m	11
Center of gravity (x, y, z)	m	(16.58, 0, 3.94)
Moment of inertia, I_{xx}	ton · m ²	165,469,017
Moment of inertia, I_{yy}	ton · m ²	4,011,71,164
Moment of inertia, I_{zz}	ton · m ²	4,099,984,257

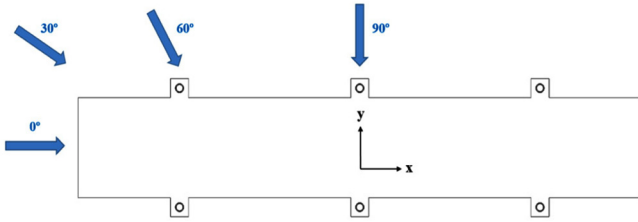


Fig. 4 Direction of wave excitation forces

부유체에 작용하는 파력은 ANSYS-AQWA를 사용하여 계산하였다. Table 4는 탱크에 LNG가 98% 채워졌다는 가정 아래 계산된 무게중심과 2차 관성 모멘트 값이다. 여기서 부유체의 경하중량(Light weight tonnage, LWT)은 Hull (22,475ton), LNG탱크 (17,677ton), 평형수 탱크(10,404ton), Accommodation (800ton), 상부설비 (2,200ton), Flare stack (800ton), Cargo systems (500ton), Cargo loading arms (300ton), 기타 기계 장치(500ton) 에 15% 마진을 더하여 약 64,000ton으로 추산된다. 부유체 정보(Table 4)와 포텐셜 이론을 기반으로 부유체에 가해지는 파력(Froude-Krylov 힘과 Diffraction 힘)을 계산할 수 있다(ANSYS, 2013). Pierson-Moskowitz spectra를 사용하여 8초 이상 12초 미만의 평균 유의 파주기를 가지는 불규칙파(Irregular wave)를 표현하였고, Fig. 4와 같이 4개의 파향(0°, 30°, 60°, 90°)을 고려하여 부유체에 작용하는 최대 파력을 Table 5와 같이 계산하였다. 힘과 모멘트를 동시에 고려했을 때 60°로 접근하는 파도가 주요했다. 부유체는 가이드파일을 따라 상하동요(Heave)를 자유롭게 할 수 있기 때문에 무어링 구조물에 Z 방향 힘이 작용하지 않는다고 가정하였다. 해류력은 부유체와 무어링 구조물 모두에 작용하며 Y 방향일 때 가장 크다. 부유체에 약 8.7MN, 트러스 구조물에 약 3.9MN의 해류력이 가해진다. 풍력은 부유체에만 작용하며 Y 방향일 때 약 2.2MN이다.

Table 5 Wave excitation forces and moments acting on LNG-BT

Direction/ Rotation	Unit	Wave direction			
		0°	30°	60°	90°
X	MN	9	10	13	Negligible
Y	MN	Negligible	14	39	57
RX	MN · m	Negligible	379	966	1,426
RY	MN · m	5,581	5,855	5,474	Negligible
RZ	MN · m	Negligible	1,444	2,459	Negligible

3.2.2 파일가이드식 계류 시스템 설계

하중 내력 계수 설계법(Load and resistance factor design, LRFD)과 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)을 사용하여 무어링 구조물의 형상과 치수를 결정하였다. LRFD설계란 기준 이상의 안전 수준을 보장하기 위해 식 (1)-(2)와 같이 하중에는 가중계수 (Load factor, γ_f), 부재의 저항력에는 감쇠계수(Material factor, γ_m)를 곱하여 구조물을 설계하는 방법이다. S_k 는 구조물에 가해지는 하중이고, R_k 는 부재의 저항력이다. 본 연구에서는 항복강도 (Yield strength)를 부재의 저항력이라고 가정하였다. 자중과 환경 하중에 대해 1.3의 가중계수를 적용하였고, 부재(ASTM A36 steel)의 저항력에 대해서는 1.15의 강도감쇠계수를 사용하였다 (DNV-GL, 2011). A36 강재의 물성은 Table 6과 같다.

$$S_d = \sum_{i=1}^n (\gamma_f \cdot S_{ki}) \tag{1}$$

$$R_d = (1/\gamma_m) R_k \tag{2}$$

Table 6 Material properties of ASTM A36 Steel

Property	Unit	Value
Density	kg/m ³	7,800
Young's modulus	GPa	200
Poisson's ratio	-	0.26
Yield strength	MPa	250

모델링 및 구조해석은 범용 FEA 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 굽힘응력이 크게 작용하고 상대적으로 변형률이 큰 가이드파일과 말뚝 파일에는 8절점 감차 적분 고체 요소(8-node linear brick, reduced integration, hourglass control, C3D8R)를, 압축력이 주로 작용하는 트러스 구조물에는 4절점 감차 적분 Shell 요소(4-node doubly curved thin shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains, S4R)를 사용하였다. 부유체와 무어링 구조물에 자중과 환경하중을 가하고, 말뚝 파일이 해저면에 고정되었다고 가정하여 FEA를 수행하였다. 가이드 파일과 부유체, 트러스구조물이 만나는 지점과 말뚝 파일 상부에서 환경 하중에 의한 최대 굽힘응력이 나타하며, 8면체 전단 응력 항복 조건(Octahedral shear stress yield criterion)을 사용하여 허용응력 설계의 만족 여부를 확인하였다. Fig. 5는 LRFD로 설계된 PGMS 모든 구성 요소들의 응력 해석 결과(von Mises Stress, MPa)이다. 본 연구에서 부유체(Hull)의 변형은 고려되지 않았으며 토질은 Table 7과 같이 사질점토(Sandy Clay)로 가정하였으나, 목표해역 안에서도 구체적인 설치 위치에 따라 조성이 바뀔 수 있다. 토질 모델에 대해서는 Mohr-Coulomb 파괴 기준에 의거한 탄 · 소성 구성 모델을 적용하였다.

3.2.3 파일가이드식 계류 시스템의 경제성

목표해역에서 LNG 벙커링 터미널을 위한 적정 계류 시스템을 결정하기 위해서는 구조물의 초기 투자비용(C_{bst})과 가용도 차이(Availability difference)로 발생할 수 있는 이익 차이(Present

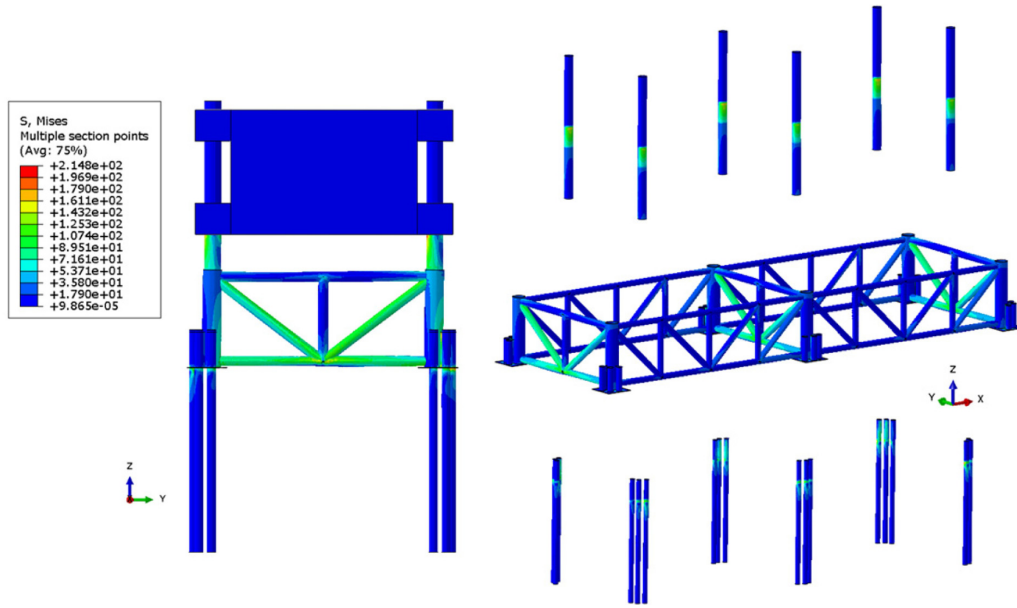


Fig. 5 Finite element analysis of pile-guide mooring system

Table 7 Material properties of sandy clay

Property	Unit	Value
Young's modulus	MPa	150
Cohesion yield strength	kPa	50
Poisson's ratio	-	0.3
Friction angle	degree	32
Dilation angle	degree	0

value profit difference, PVPD)를 비교분석해야 한다. 구조물의 초기투자비용은 제작비(C_m), 운송비(C_t), 설치비(C_i)의 합으로 계산된다. 제작비는 재료비(Material cost), 기술비(Engineering cost), 장비비(Equipment cost), 인건비(Labor cost)를 포함하고, 운송비는 제작 완료된 구조물을 바지선 등으로 옮길 때 사용되는 비용을 의미한다. 설치비는 구조물을 목표해역에 위치시키는데 사용되는 비용을 의미하며 구조물의 특성 및 형태에 따라 크게 달라진다. 예를 들어, GBS 구조물을 설치할 때에는 바지선과 Heavy Lift Vessel (HLV)만 필요한 반면, PGMS와 같은 자켓 형식의 구조물을 설치할 때에는 말뚝파일 파일링(Piling) 작업을 위한 Hydraulic hammer와 Grouting 장비 등이 추가로 필요하다. Van

Wijngaarden(2013)은 해상 풍력 발전기를 지지하는 자켓 또는 삼각대(Tripod) 형식 구조물의 경제성 평가를 수행하였으며 HLV, Hydraulic hammer 등이 고려된 운송비와 설치비는 전체 비용의 약 30%로 평가되었다. 유사구조물인 PGMS의 초기투자비용(Cost)은 식 (3)과 같이 제작비에 β 값을 곱하여 계산할 수 있으며, PGMS의 β 값은 1.43이다(Lee et al., 2016). 강구조물의 제작비는 복잡하지 않은 구조물(파일)에 대해 톤당 2495USD, 복잡한 구조물(트러스구조물)에 대해 톤당 4990USD로 추산하였다(De Vries, 2007).

$$Cost = C_m + C_t + C_i = C_m \times \beta \tag{3}$$

Table 8 Dimension, steel and concrete usage of pile-guide mooring system

Component	Guide pile	Seabed truss structure		Foundation pile
		X-direction	Y-direction	
Diameter [m]	3.70	1.20	2.30	2.00
Steel usage [ton]	1,790	1,829		1,065

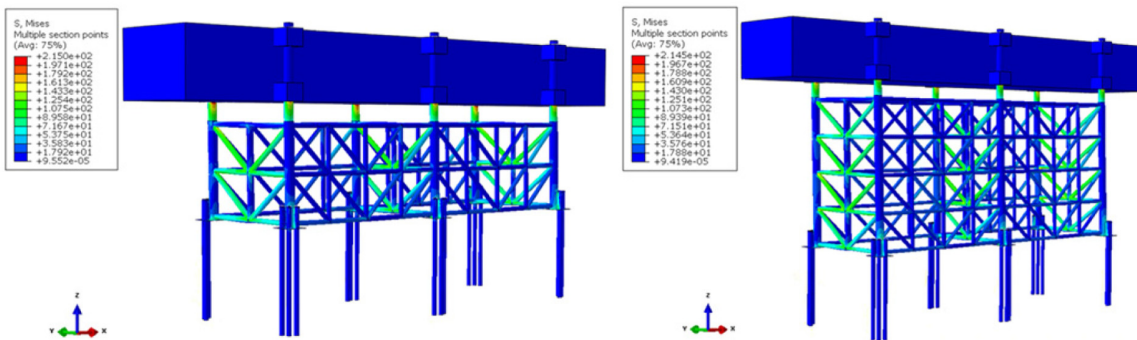


Fig. 6 Finite element analysis on different water depths

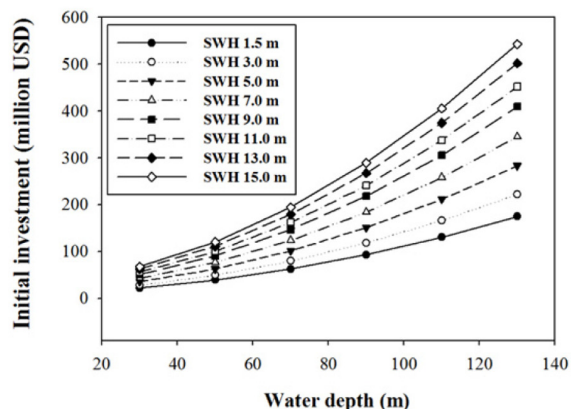
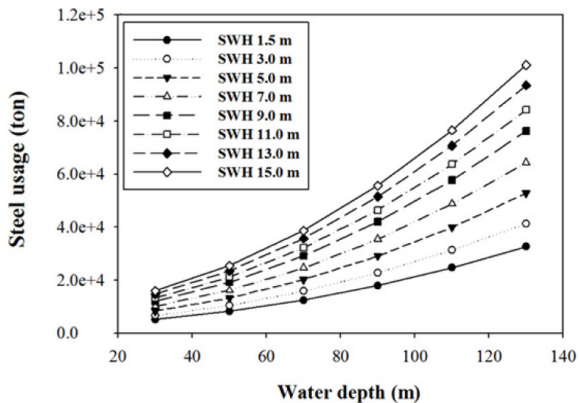


Fig. 7 Steel usage of pile-guide mooring system

싱가포르 항을 기준으로 설계된 PGMS의 주요 부재 치수와 강재(Steel) 사용량은 Table 8과 같다. 설계 유의파고 1.5m, 수심 30m 조건에서 벙커링 터미널(길이 276m, 폭 56m, 높이 28m)을 지지하기 위해 약 5,128ton의 강이 사용되고 초기 투자비용은 약 21.7MUSD로 계산되었다. PGMS의 초기 투자비용은 횡방향 파력과 수심에 민감하기 때문에, Fig. 6과 같이 다양한 수심과 설계 유의파고에 대해 PGMS를 설계하였다. 각 경우의 유한 요소 모델에서 강재 사용량을 계산하였고, 초기 투자비용은 식 (3)을 기반으로 Fig. 7과 같이 추산되었다.

계류 시스템 선정에 따른 이익 차이(PVPD)는 STS LNG 벙커링의 가용도 차이를 통해 고려될 수 있으며, 식 (4)와 같이 계산된다. P 는 싱가포르 항의 연간 벙커링 예상 수익(737.1MUSD/yr), ΔA 는 가용도 차이(Availability difference), n 은 구조물의 기대수명(Lifespan)을 의미한다. 미래에 발생하는 이익에 대해 할인율(Discount rate, d)을 적용하여 현재가치로 환산 후 PVPD를 계산하였다. 일반적인 산업 국가에서의 할인율은 약 2~8%이다(Thoftchristensen, 2012). 부유체간 LNG 벙커링은 병렬 계류 방식(Side By Side)으로 수행되고 상대 수직운동이 2m 이하로 제한되어야 한다(Naciri et al., 2007). 따라서 벙커링 가용도는 부유체간 상대 운동해석과 목표해역의 일단위 파고 분석을 바탕으로 평가되어야 하지만, 무어링 구조물 개념 설계를 다루는 본 연구에서는 초기 투자비용과 가용도 차이가 적정 계류시스템 선정에 얼마나 큰 영

향을 주는지를 먼저 분석하였다. 목표해역에서 부유체 운동해석을 통한 LNG 벙커링 가용도 차이를 분석하는 연구가 추후 필요하다.

$$PVPD = \sum_{i=1}^n P\Delta A(1+d)^{-i} \tag{4}$$

Fig. 8은 가용도 차이에 따른 PVPD를 보여준다. 왼쪽 그래프는 LNG-BT의 기대수명이 30년, 오른쪽 그래프는 기대수명이 50년인 경우이다. 가용도 차이에 따른 PVPD 변화는 그림과 같이 구조시스템의 기대수명과 할인율에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 아래 무어링 구조물 비교에 있어서 해상 LNG-BT의 기대 수명을 30년, 할인율을 5%로 가정하였다.

비슷한 수심(29m)에 대해 GBS 방식으로 설계된 최초 해상 LNG 인수 설비인 Adriatic LNG는 이탈리아 베니스와 매우 가까운 해역에 설치되었다. 이 해상 설비는 길이 180m, 폭 88m, 높이 47m이고, 좌우측 두개의 무어링 구조물(Mooring dolphins)이 있다. 이 중력식 지지 구조물을 위해 약 30,000톤의 강재와 90,000m³의 콘크리트가 사용되었다(Waters et al., 2007). 해양 구조물에 사용되는 콘크리트의 단가는 약 200USD/m³이며, 제작비 중 재료비가 약 40%를 차지하기 때문에 콘크리트 구조물의 제작비를 약 500USD/m³으로 가정하였다(Barker, 2017). 철근은 제작비를 톤당 2495USD로 계산하였다. GBS 구조물은 PGMS 방

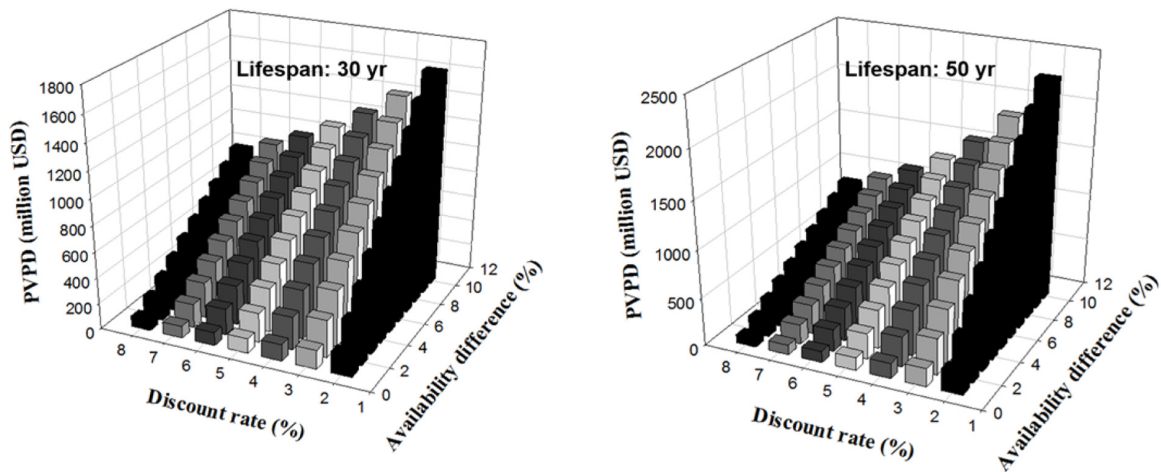


Fig. 8 Present value profit difference of LNG-BT in Singapore port

Table 9 Comparison of mooring solutions for offshore LNG-BT

Comparison item	GBS	Turret mooring system	PGMS
Supportable weight	No limit	No limit	No limit
Target water depth	< 20 [m]	No limit	< 110 [m] depending on design wave height
LNG-BT motion	Negligible	Need to check	Negligible
Ship accessibility	High	Limited	High
Applications	Shallow water with frequent LNG transfer, Harsh wave conditions	Deep sea and shallow water depending on availability of LNG STS transfer	Mid-depth with frequent LNG transfer, Relatively calm sea state

식과 비교했을 때 상대적으로 설치가 용이하다. 운송비와 설치비가 전체 비용의 약 10%라고 가정하였고, 이때 GBS의 β 값은 1.11이다. 그 결과 철근 30,000톤과 90,000m³의 콘크리트를 사용하여 GBS 방식으로 설계된 지지 구조물의 초기 투자 비용은 약 133MUSD로 추정되었다. 이 경제성 평가를 바탕으로 GBS 방식과 PGMS 방식을 비교해보았다. 부유체의 모든 자유도가 구속되는 GBS 방식과 상하동요를 제외한 5 자유도 운동이 구속되는 PGMS 방식의 벙커링 가용도는 비슷할 것으로 예상되기 때문에, 싱가포르 항(설계 유의파고 1.5m, 수심 30m)에서는 GBS 방식(133MUSD)보다 PGMS 방식(21.7MUSD)이 경제적으로 우수할 것으로 평가되었다. PGMS 방식은 부유체 일부가 잠겨있기 때문에 횡방향 파력에 큰 영향을 받는다. GBS의 설계에 따라 초기 투자비용이 달라질 수 있으나 Fig. 7과 Adriatic LNG를 비교했을 때 설계 유의파고가 15m 이내인 천해(< 50m)에서는 PGMS 방식(< 120MUSD)이 우수할 것으로 기대된다. 파고가 상대적으로 높은(설계 유의파고 > 15m) 천해(< 20m)에서는 GBS 방식이 PGMS 방식보다 효과적일 수 있다.

터렛 무어링 방식은 웨더베이닝(Weather vaning)이 가능하여 부유체에 작용하는 환경하중을 최소화 시킬 수 있으며 깊은 수심까지 적용 가능하다는 장점이 있으나 PGMS방식과 비교했을 때 부유체 움직임이 크기 때문에 선박간 LNG 벙커링 안정성과 가용도 검토가 필요하다. 싱가포르 항에서 터렛 무어링 방식을 사용할 경우 약 10~12MUSD의 초기 투자비용이 필요할 것으로 예상된다(England et al., 2001; Ryu et al., 2007). 따라서 수심 30m에서 터렛 무어링 방식은 PGMS 방식과의 가용도 차이가 0.1% 이하(PVPD < 11MUSD)일 때 유효할 것으로 보인다. 싱가포르 항의 환경조건은 상대적으로 유순하므로 PGMS 방식과 터렛 무어링 방식의 가용도 차이가 크지 않을 것(1~2% 미만, PVPD < 150MUSD)으로 예상된다. 이러한 해상 조건에서는 약 수심 110m까지 PGMS 방식(< 131MUSD)이 유리할 것으로 분석되었다.

적정 계류 시스템은 목표해역의 해상 조건, 수심, LNG 벙커링 규모 등에 따라 바뀔 수 있으며, 초기 투자비용과 가용도 분석을 통한 PVPD 비교를 통해 결정될 수 있다. Table 9는 위 경제성 평가를 근거로 요약한 무어링 시스템의 특징과 적용 가능 범위이다.

4. 결 론

본 연구에서는 해상 LNG 벙커링 터미널을 지지할 수 있는 파 일가이드식 계류 시스템(PGMS)을 하중 내력 계수 설계법과 유한요소해석으로 설계하였다. 또한 구조물의 초기 투자비용과

용도 차이로 발생될 수 있는 이익 차이를 비교분석하여 제안된 무어링 시스템의 적용 범위를 제시했다. 벙커링 가용도는 부유체간 상대 운동해석과 목표해역의 일단위 파고 분석을 바탕으로 평가되어야 하지만, 무어링 구조물 개념 설계를 다루는 본 연구에서는 초기 투자비용과 가용도 차이가 적정 계류시스템 선정에 주는 영향을 먼저 분석하였다. 추후 부유체 운동해석을 기반으로 하는 LNG 벙커링 가용도 분석에 대한 연구가 필요하다.

(1) 우선 아시아에서 LNG 벙커링 사업에 적극적이며 높은 경쟁력이 기대되는 싱가포르 항의 해상 조건에 맞게 PGMS를 설계하였다. 해상 LNG 벙커링 터미널(길이 276m, 폭 56m, 높이 28m)을 지지하기 위해 약 5,128ton의 강(Steel)이 사용될 것으로 계산되었고, 약 21.7MUSD의 초기 투자비용이 발생할 것으로 예상했다. PGMS 방식의 경제성은 설계 파고와 수심에 민감하기 때문에 다양한 환경 조건에 대해 구조물을 설계하고 초기 투자비용을 추산하였다.

(2) 부유체의 모든 자유도가 구속되는 GBS 방식과 상하동요를 제외한 5 자유도 운동이 구속되는 PGMS 방식의 벙커링 가용도는 비슷할 것으로 예상되기 때문에, 싱가포르 항(설계 유의파고 1.5m, 수심 30m)에서는 GBS 방식보다 PGMS 방식이 경제적으로 우수할 것으로 평가되었다. PGMS 방식은 부유체 일부가 잠겨있기 때문에 횡방향 파력에 큰 영향을 받는다. GBS 방식 또한 설계 파고에 따라 초기 투자비용이 달라질 수 있으나, 설계 유의파고 15m 이내인 천해(< 50m)에서는 PGMS 방식이 우수할 것으로 분석되었다. 파고가 상대적으로 높고(설계 유의파고 > 15m) 제작 단가를 줄일 수 있는 천해(< 20m)에서는 GBS 방식이 PGMS 방식보다 효과적일 수 있다.

(3) 터렛 무어링 방식은 웨더베이닝(Weather vaning)이 가능하여 부유체에 작용하는 환경하중을 최소화 시킬 수 있으며 깊은 수심까지 적용 가능하다는 장점이 있으나 PGMS방식과 비교했을 때 부유체 움직임이 크기 때문에 선박간 LNG 벙커링 안정성과 가용도 검토가 필요할 것으로 보인다. 싱가포르 항과 같이 환경조건이 유순하고 수심이 110m 이내인 해역에서는 PGMS 방식이 더 우수할 것으로 분석되었다.

(4) 적정 계류 시스템은 목표해역의 해상 조건, 수심, LNG 벙커링 규모 등에 따라 바뀔 수 있다. 본 연구에서 조사한 싱가포르 항에 적합한 계류 시스템과 PGMS 적용범위가 다른 항에 바로 적용되기는 힘들지만(항구마다 LNG 벙커링 규모와 해상 조건이 다르기 때문), 본 연구에서의 초기 투자비용 추산 과정과 가용도 차이에 의한 이익 차이 분석 과정을 활용하여 다른 목표해역에서도 적합한 계류 시스템 형태가 결정될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 국토교통부 LNG 플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(한국연구재단-Global Ph.D. Fellowship program, No. 2016H1A2A1909008)입니다.

References

- Ahn, J.K., Choi, Y.S., Jo, C.H., Cho, Y.H., Chang, D.J., Chung, H., Bergan P., 2017. Design of a Prismatic Pressure Vessel with Internal X-beam Structures for Application in ships. *Ships and Offshore Structures*, 12(6), 781-792.
- ANSYS, 2013. AQWA Theory Manual Release 15.0. ANSYS Inc., USA.
- Barker, M., 2017. Bridge Economy and Life Cycle Costs of Steel & Concrete Bridges. NACE 2017 Short Span Steel Bridge Workshop, Cincinnati, Ohio.
- De Vries, W., 2007. Final Report WP 4.2 Support Structure Concepts for Deep Water Sites. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV-GL), 2011. DNV-OS-C101. Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method).
- Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV-GL), 2012. DNV Report; Shipping 2020.
- England, L.T., Duggal, A.S., Queen, L.A., 2001. A Comparison Between Turret and Spread Moored F(P)SOs for Deepwater Field Developments. *Deep Offshore Technology* 2001.
- International Maritime Organization (IMO), 2006. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. Chapter 15: Filling Limits for Cargo Tanks.
- Jung, W.D., Kim, T.W., Kim, J.H., Lee, D.Y., Chun, M.S., Lee, J.M., 2016. Measurement of Real Deformation Behavior in C-type Lng Mock-up Tank using Strain Gage. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(2), 117-124.
- Kim, K.D., Choi, K.S., Oh, Y.S., Cho, S.H., Kim, S.H., Shin, D.G., Jung, D.H., Kim, H.E., Shin, D.H., 2017a. A study of LNG Bunkering Demands on Ulsan Port for Demonstration of Floating LNG Bunkering Terminal. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 21(1), 65-71.
- Kim, G.S., 2016. A Study on Price Competitiveness for LNG Bunkering in the Busan Port. *Journal of Korea Port Economic Association*, 32(1), 123-133.
- Kim, G.S., Kim, E.S., Lee, K.Y., Park, S.J., 2017b. Weekly report of Korea Maritime Institute (KMI), 19.
- Lee, S.Y., Jo, C.H., Bergan, P., Pettersen, B., Chang, D.J., 2016. Life-cycle Cost-based Design Procedure to Determine the Optimal Environmental Design Load and Target Reliability in Offshore Installations. *Structural Safety*, 59, 96-107.
- Maritime and Port Authority of Singapore (MPA), 2012a. Singapore Tide Tables Year 2013. Hydrographic Department of MPA, Singapore.
- Maritime and Port Authority of Singapore (MPA), 2012b. Port Statistics. [Online] Available at : <<http://www.mpa.gov.sg/>> [Accessed October 2017].
- Marine Environment Protection Committee (MEPC), 2016. Report of the Marine Environment Protection Committee on Its 70th Session
- Naciri, M., Waals, O., de Wilde, J., 2007. Time Domain Simulations of Side-by-side Moored Vessels Lessons Learnt from a Benchmark Test. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: OMAE 2007-29756*.
- National Environment Agency (NEA), 2009. *Weatherwise Singapore*, Singapore.
- Park, B.W., Jung, J.H., Hwang, S.C., Cho, S.K., Jung, D.H., Sung, H.G., 2017. Wind Tunnel Test of Wind Loads and Current Loads Acting on FLBT and LNG Bunkering Shuttles in Side-by-side Configuration and Comparison with Empirical Formula. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(4), 266-273.
- Ryu, S., Duggal, A.S., Heyl, C.N., Geem, Z.W., 2007. Mooring Cost Optimization via Harmony Search. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: OMAE 2007-29334*.
- Sund, K., Whitefield, A., 2014. Gas Prices Today and Going Forward (Wholesale Prices and the Impact on Retail Prices for LNG as Bunkering Fuel). *MarTech LNG Value Chain Development Seminars*, SUND energy.
- Thoft-Christensen, P., 2012. Infrastructures and Life-Cycle Cost-Benefit Analysis. *Structure & Infrastructure Engineering*, 8(5), 507-516.
- Van Wijngaarden, M., 2013. Concept Design of Steel Bottom Founded Support Structures for Offshore Wind Turbines. Delft University of Technology, The Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Waters, L.B., Mueller, C.V., Hellen, P.C., Hurst, G.L., 2007. Design and Construction of Gravity Based Structure and Modularized LNG Tanks for the Adriatic LNG Terminal.
- Yun, S., Ryu, J., Seo, S., Lee, S., Chung, H., Seo, Y., Chang, D., 2015. Conceptual Design of an Offshore LNG Bunkering Terminal: a Case Study of Busan Port. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 226-237.
- Yun, S.K., 2015. Thermal Analysis of LNG Storage Tank for LNG Bunkering System. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 39(9), 876-880.
- Zhang, D., 2004. Numerical Simulation of Large-scale Waves and Currents. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.