

## 지지조건에 따른 FPSO 상부 모듈의 구조적 거동에 관한 연구

장범선<sup>1</sup>, 고대은<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>해양시스템공학연구소, 서울대학교 조선해양공학과

<sup>2</sup>동의대학교 조선해양공학과

### A Study on the Structural Behavior of FPSO Topside Module by Support Condition

Beom-Seon Jang<sup>1</sup>, Dae-Eun Ko<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>RIMSE, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

**요약** FPSO는 원유의 생산을 위한 플랜트가 기능별로 모듈화 되어있는 상부구조(topside)와 생산된 원유의 저장 및 상부구조의 지지 기능을 하는 하부구조(hullside)로 구성된다. FPSO 상부 모듈과 이를 지지하는 선체의 구조적 거동은 이들을 연결하는 인터페이스 구조에 따라 달라지며, 인터페이스 구조의 형식은 MSS(Module Support Seat)라고 하는 개별 단위 지지구조들의 조합으로 구성된다. 인터페이스 구조의 형식이 다양하고 이에 따라 FPSO 상부 모듈 구조의 기본 설계가 크게 영향 받으므로 초기 설계 단계부터 다양한 설계 방안을 검토해야 한다. FPSO 상부 모듈의 구조 설계 시에는 선체와의 상호 작용을 고려하여 MSS의 개수, 연결 형식을 결정해야 하고, 구조 강도 검증에 위한 유한요소 모델의 범위, 하중 조건, 경계 조건 등 구조 해석 옵션을 신중히 고려해야 한다. 본 연구에서는 상기 고려 사항들에 대한 비교 조합 Case들을 도출하고 강도 평가를 수행하였으며, 해석 결과의 상세한 고찰을 통해 상부 모듈의 구조적 거동 특성을 비교 분석하였다. 본 연구 결과는 보다 신뢰성 있는 상부 모듈 구조 설계를 위한 좋은 참고 자료가 될 것으로 판단된다.

**Abstract** FPSO consists of topside modularized plants for production of crude oil, and hullside structures that serve as support for the topside and storage of produced crude oil. The structural behavior of the FPSO topside module and its supporting hull depends on the interface structure that connects them, and the interface structure consists of a combination of individual unit support structures called Module Support Seat (MSS). Types of interface structures are various and, accordingly, the basic design of the FPSO topside module structure is greatly influenced, so various design methods should be considered from the initial design phase. Structural design of FPSO topside module requires consideration of the number of MSSs, connection type, and structural analysis options such as the range of finite element models, load conditions, and boundary conditions for verification of structural strength. In this study, the comparison combination cases for the above considerations were derived and the strength evaluation was performed, and the structural behavior characteristics of the topside module were compared and analyzed through a detailed review of the analysis results. The results of this study are considered to be a good reference for designing a more reliable topside module structure.

**Keywords** : FPSO Topside Module, Module Support Seat, Strength Assessment, Structural Behavior, Support Condition

본 연구는 산업통상자원부의 조선해양산업 핵심기술개발사업 “FPSO의 제작기간 단축 및 건조비 절감을 위한 Topside 시스템 신개념 배치 설계 원천 기술 개발” 과제(10080634)의 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Dae-Eun Ko(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr

Received August 13, 2018

Revised (1st September 4, 2018, 2nd September 5, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

## 1. 서론

FPSO(Floating Production Storage & Offloading unit)는 원유의 시추, 생산 등을 위한 플랜트가 기능별로 모듈화 되어있는 상부구조(topside)와 생산된 원유의 저장 및 상부구조의 지지 기능을 하는 하부구조(hullside)로 구성된다. 상부구조를 지지하기 위한 구조의 형식은 대부분 MSS(Module Support Seat)라고 하는 개별 단위의 지지구조 형식이고, 화재 및 폭발시의 안전성을 고려하여 MSS 간에 방폭 프레임 구조를 추가하기도 한다. FPSO 상부 모듈과 이를 지지하는 선체의 구조적 거동은 이들을 연결하는 MSS의 개수 및 연결 구조 형식(베어링 타입 또는 고정 타입)에 따라 달라지므로, 이에 따라 FPSO 상부 모듈의 구조설계를 위한 다양한 설계 방안이 있을 수 있다.

최근 국내에서도 MSS 구조 설계에 관한 연구가 조금씩 진행되어 왔고[1,2], 프로세스 및 장비배치에 관한 연구가 시작되고 있다[3]. 그러나 현재까지 FPSO 상부 모듈의 구조설계 자체에 관한 국내의 연구는 찾아보기 어려운 실정이며, 국외의 경우에도 실적선 데이터 바탕의 설계 가이드에 해당하는 선급의 기술 자료 정도를 찾아볼 수 있다[4].

근래 탑재를 위한 리프팅 크레인의 용량이 증가함에 따라 분리되었던 소형 모듈들을 병합하는 방식으로 모듈이 대형화되고 있으며, 상부 모듈의 탑재를 용이하게 하고 선체 구조와의 인터페이스 작업을 최소화하기 위해 MSS의 개수를 최소화하려는 경향이 있다. 상부 모듈과 선체의 연결 구조에 있어서, FPSO의 경우에는 일반적으로 팻 베어링(pot bearing) 또는 일레스토메릭 베어링(elastomeric bearing)이 적용되고 있다. 한편, 국내 주요 조선소들은 해양구조물의 건조기술 축적을 통해 상부 모듈 지지 기둥의 수직 정렬(vertical alignment) 및 MSS의 수평 수준(horizontal level)에 대한 공차 제어 기술을 크게 향상시켰으며, 이에 따라 드릴쉽(drillship)의 경우에는 베어링 타입을 적용하지 않고 용접을 통해 직접 연결하는 다지점 지지시스템(multi-supporting system)을 적용하고 있다.

상부 모듈 구조의 강도 평가 방법에 있어서는 해석의 편의를 위해 선체 구조와 별도로 취급하고 다만, 지지 기둥의 끝단에 강제변위를 부과하는 방식으로 선체 거더 굽힘(hull-girder bending)의 영향을 반영하는 것이 일반

적이다. 그러나 보다 엄밀한 강도 평가를 위해서는 선체 구조와 통합된 구조해석 모델을 이용하여 해석하는 것이 바람직하다. 특히, 다지점 지지시스템을 적용하는 경우에는 MSS 구조의 회전 강성과 선체 강성이 상부 모듈의 평가 정확도에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 LNG FPSO의 상부 모듈을 대상으로 MSS의 개수, 연결 형식 및 구조해석 옵션을 대상으로 다양한 비교 조합 Case들을 도출하고 이들에 대한 강도 평가를 통해 상부 모듈의 구조적 거동 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 구조해석 모델 및 경계 조건

본 연구에서는 상부 모듈의 구조적 거동 특성을 비교 분석하기 위해 비교 조합 Case들을 도출하였다. MSS의 개수(4 또는 21), 연결 형식(Bearing 또는 Welding), 구조해석 옵션('T/S+Hull' 또는 'T/S only') 및 용접에 대한 구속 조건(fixed 또는 spring)으로부터 총 7가지의 평가 Case를 도출하였으며 Table 1에 정리하여 보였다.

Table 1. Definitions of comparison cases

Case ID	No. of Supports	Connection Type	Model Range	FE model
1	4	Bearing	T/S+Hull	Fig.1(a)
2	4	Bearing	T/S only	Fig.1(b)
3	21	Bearing	T/S+Hull	Fig.1(c)
4	21	Bearing	T/S only	Fig.1(d)
5	21	Welding	T/S+Hull	Fig.1(c)
6	21	Welding (fixed B.C.)	T/S only	Fig.1(d)
7	21	Welding (spring B.C.)	T/S only	Fig.1(d)

또한, 비교 평가 Case들의 구조 해석을 위한 유한요소 모델을 Fig. 1(a)~(d)에 보였다. 본 연구의 대상 선박은 멤브레인 타입의 화물 절연 시스템을 탑재한 LNG FPSO로서 일반적인 Oil FPSO의 구조와 비교하여 센터 종격벽(center longitudinal bulkhead)이 없는 것이 특징이다. 선체 구조상 강력한 구조부재인 센터 종격벽이 없기 때문에 선체의 센터라인(centerline) 또는 그 부근에서 큰 하중을 받아주는 MSS의 설치는 불가능하며, 따라서 전체 선폭을 가로지르는 대형 상부 모듈의 지지를 위해서는 양쪽 선측의 두 지점씩 총 4개 지점에 MSS를 설

치하든지 또는 여러 개의 소형 MSS를 설치하여 지지 하중을 분산시키는 다지점 지지시스템을 적용해야 한다.

Fig. 1(a)와 (b)는 각각 Case 1과 Case 2에 대한 유한요소 모델을 보여 준다.

Fig. 1(c)의 유한요소 모델은 Case 3과 Case 5에 사용되며, 두 Case 간의 연결 형식의 차이는 모델링에 사용된 강체요소(rigid body element)의 자유도(degree of freedom) 설정에 의해 구현된다. 베어링 연결 형식(Case 3)의 경우, 선체 횡방향으로 설치된 3열의 MSS 중 첫 번째 열의 강체요소들에 대해 자유도 ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ )를 상부 모듈 지지 기둥 끝단 노드의 자유도에 구속시키고, 나머지 열들의 강체요소에 대해서는 배 길이 방향의 자유도 구속을 해제하여 선체 거더 굽힘의 영향이 상부 모듈 구조로 전달되는 것을 방지하였다. 한편, 용접 연결 형식(Case 5)의 경우에는 모든 열의 강체요소들에 대해 자유도 ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ )를 상부 모듈 지지 기둥 끝단 노드의 자유도에 구속시켰다.

Case 4, Case 6 및 Case 7은 Fig. 1(d)의 동일한 유한요소 모델을 사용한다. 단, Case 4와 Case 6은 서로 다른 경계 조건을 적용하였으며, Case 7에서는 MSS의 회전 강성 효과를 반영하기 위해 스프링 요소를 사용하였다. 이때, 각 MSS의 회전 강성은 Fig. 2에 보인 바와 같이 단위 회전 변위 ( $R_x$ ,  $R_y$ )를 작용시켜 계산하였다. 베어링 연결 형식(Case 4)의 경우, 3개의 자유도 ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ )에 고정 조건을 적용하였고, 용접 연결 형식(Case 6, Case 7)의 경우에는 2개의 자유도 ( $U_y$ ,  $U_z$ )에만 고정 조건을 적용하였다.

Fig. 1(a)의 4개 MSS는 Fig. 1(d)의 21개 MSS와 비교하여 훨씬 큰 하중을 받으므로 이를 감당 할 수 있도록 큰 구조로 모델링하였다.

유한요소 모델의 작성 및 구조 해석에는 MSC/Patran (2004r2)과 MSC/Nastran (2005)를 각각 사용하였다.

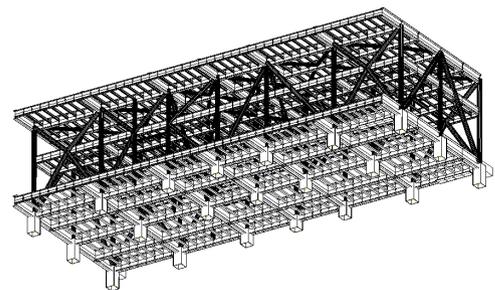
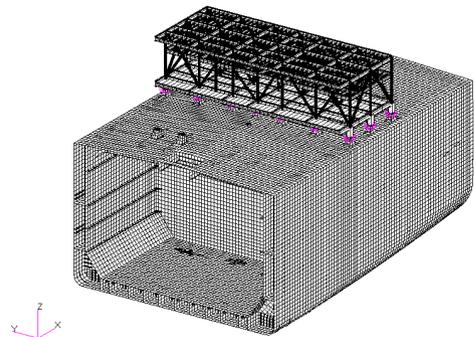
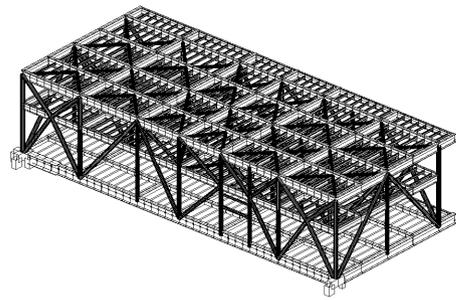
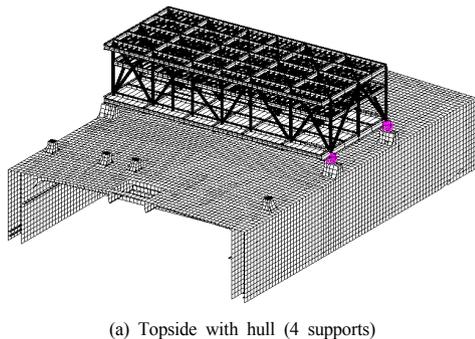


Fig. 1. Finite element models

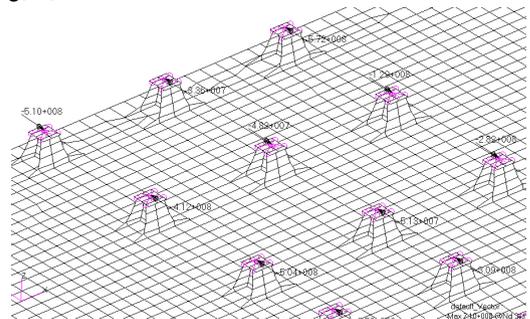


Fig. 2. Calculation of rotational stiffness of MSS

### 3. 하중 조건

강도 평가를 위한 구조 해석에는 Table 2에 정리한 바와 같이 바람과 파도의 작용 방향에 따른 8개의 극한 한계 상태(Ultimate Limit State, ULS) 하중 조건을 고려하였다. 이때 바람 방향과 파도 방향은 보수적으로 같은 방향으로 가정하였다. 하중 조건의 수는 영구 하중(permanent load)과 환경 하중(environmental load)을 DNV-OS-C101[5]에 의거한 하중 계수(load factor)로 조합하여 두 배로 증가하게 된다. 구조 해석은 AISC LRFD[6]와 API RP2A LRFD[7] 요건에 따라 수행하였다.

선체 종굽힘 모멘트는 DNV Rules for Ships[8]에 따라 정수 및 파랑 굽힘모멘트를 더하여 결정하였다.

Table 2. Load cases for in-place analysis

Load Case	Wind Direction (°)	Accelerations (g)		
		$a_x$	$a_y$	$a_z$
ULS 1	0	0.064	0	0.216
ULS 2	45	0.046	0.211	0.216
ULS 3	90	0	0.300	0.216
ULS 4	135	-0.046	0.211	0.216
ULS 5	180	-0.064	0	0.216
ULS 6	225	-0.046	-0.211	0.216
ULS 7	270	0	-0.300	0.216
ULS 8	315	-0.046	-0.211	0.216

### 4. 해석결과 및 고찰

해석 결과로서 7가지 평가 Case(Table 1 참조)에 대한 최대 응력을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Summary of maximum stresses

Case ID	ULS		Hull-Girder	
	Topside*	Hull**	Topside*	Hull**
1	340	307	-	-
2	341	-	-	-
3	214	390	47	344
4	153	-	19	-
5	210	391	90	382
6	153	-	217	-
7	153	-	127	-

\* max. combined or min. combined beam stress (MPa)

\*\* von-Mises stress (MPa)

해석 결과 고찰 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) Case 1과 Case 2에 대한 상부 모듈 구조의 응력 분포는 거의 같게 나타났다. 이로부터 4개의 MSS로 지시되는 상부 모듈 구조의 경우에는 선체 구조의 통합 효과를 무시할 수 있음을 알 수 있으며, 이는 MSS 구조의 강성이 충분히 크고 또한 강력한 선체 종강도 부재들이라 할 수 있는 선측판(side shell)과 선측 종격벽(side longitudinal bulkhead) 위에 위치하기 때문에 마치 상부 모듈 구조의 지지점에 고정된 경계 조건이 적용된 것과 유사하기 때문으로 판단된다.

2) 21개의 MSS를 갖는 Case 3과 Case 4의 경우에는 상부 모듈 구조에 포함된 수평 부재의 응력이 현저하게 감소한다. 이는 4개의 MSS를 갖는 경우에 비해서 수평 부재의 스패 길이(span length)가 짧아지기 때문이다.

3) Case 3과 Case 4를 비교해 보면, 선체 구조와 통합된 Case 3의 경우가 상부 모듈 단독 모델을 이용한 Case 4보다 더 큰 응력 분포를 나타낸다. 그 이유는 MSS들이 유연성이 있는 선체 구조 위에 위치하기 때문에 상부 모듈의 수평 구조 부재에 추가적인 z방향 변위가 부과되기 때문이다. Fig. 3은 Case 3에서 더 큰 응력을 나타낸 부재들에 대하여 Case 4와의 응력 차이를 보여준다. 수평 부재의 응력 차이는 약 20~30MPa이며 일부 대각선 부재는 최대 110MPa의 응력 차이를 보였다.

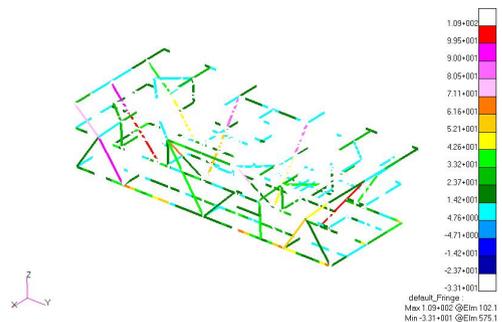


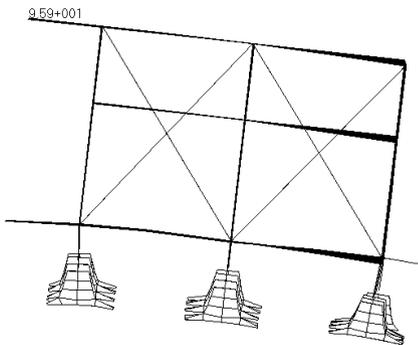
Fig. 3. Stress difference for elements of which stresses in Case 3 are larger than Case 4

4) 선체 구조와 통합된 Case 3의 경우, MSS 하부 선체 갑판에 붙어있는 종방향 보강재들의 응력 수준은 ULS 하중 조건 하에서 약 30~40MPa 정도로 크게 나타나지 않은 반면 MSS 하부 선측 종격벽에서는 거의 항복 응력 수준의 국부 응력이 발생했다. 이는 종격벽의 수직

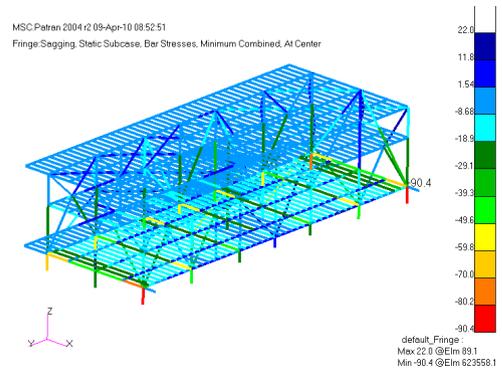
방향 강성이 종방향 보강재보다 훨씬 크므로 MSS의 설계 하중에 대한 수직 반력이 크게 발생하기 때문이다.

5) 선체 구조가 포함된 Case 5의 경우에는 선체 거더 굽힘의 영향이 자연스럽게 고려되며, 상부 모듈 단독 모델을 이용하는 Case 6과 Case 7의 경우에도 선체 거더 굽힘의 영향을 고려하기 위한 강체변위를 모듈 지지 기둥의 끝단에 적용하였다. 용접 연결 형식(Case 5, Case 6, Case 7)의 경우, 선체 거더 굽힘의 영향으로 인해 상부 모듈 지지 기둥 및 기둥들 사이의 수평 부재에 높은 응력이 발생한다(Fig. 4, Fig. 5 참조). 그러나 ULS 하중 조건 하에서는 연결 형식에 관계없이 응력 수준은 낮게 나타났다. 즉, Case 3과 Case 5의 응력 수준이 서로 유사하며, Case 4와 Case 6의 응력 수준도 서로 유사하다.

6) 용접 연결 형식에 선체 거더 굽힘이 작용하는 경우, MSS 회전 강성의 영향을 무시할 수 없다. 선체 구조가 포함된 경우(Case 5), MSS의 회전 강성은 자연스럽게 고려되며 최대 응력은 약 90MPa로 나타났다(Fig. 4 참조). 반면, 상부 모듈 단독 모델에 고정의 경계 조건을 적용한 경우(Case 6), MSS의 회전 강성이 전혀 고려되지 않음으로 인해 최대 응력은 217MPa로 크게 증가하였다(Fig. 5 참조). 단, Case 7과 같이 스프링 요소를 지지 기둥의 끝에 추가하여 MSS 회전 강성을 적절히 반영하면 응력 수준이 낮아져 선체구조와 통합된 모델을 사용한 Case 5와 좀 더 유사하게 된다. 따라서 선체 거더 굽힘 하의 강도 평가 시에 용접 연결 형식의 상부 모듈 단독 모델을 사용할 경우에는 MSS의 회전 강성을 유한요소 모델에 적절히 반영해야 한다.

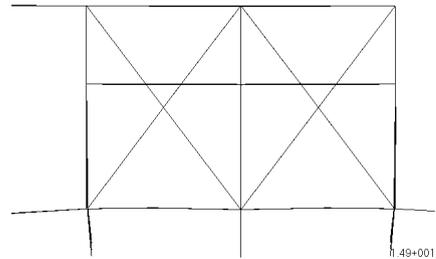


(a) Displacement

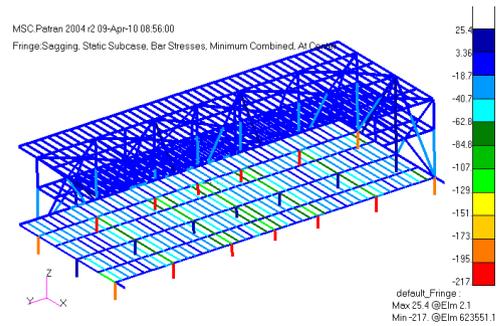


(b) Stress (min. combined bar stress = -90.4 MPa)

Fig. 4. Case 5 under hull-girder sagging moment



(a) Displacement



(b) Stress (min. combined bar stress = -217 MPa)

Fig. 5. Case 6 under hull-girder sagging moment

## 5. 결론

본 연구에서는 FPSO 상부 모듈의 구조 설계 시에 고려해야 할 MSS의 개수, 연결 형식, 유한요소 모델의 범위, 하중 조건, 경계 조건 등에 대하여 7가지 비교 조합 Case들을 도출하고 각각의 강도 평가를 수행하였으며, 해석 결과의 상세한 고찰을 통해 상부 모듈의 구조적 거

동 특성을 비교 분석하였다. 주요 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 4개의 MSS로 지지되는 상부 모듈 구조의 경우에는 선체 구조의 통합 효과를 무시할 수 있으며, 21개의 MSS를 갖는 경우에는 상부 모듈 구조에 포함된 수평 부재의 스펜 단축 효과로 응력이 현저하게 감소한다.
- 2) 선체 구조와 통합된 모델을 이용하는 경우 상부 모듈의 수평 구조 부재에 추가적인 z방향 변위가 부과되어, 상부 모듈 단독 모델을 이용한 경우보다 더 큰 응력 분포를 나타낸다.
- 3) 용접 연결 형식의 경우, 선체 거더 굽힘의 영향으로 상부 모듈 지지 기둥 및 기둥들 사이의 수평 부재에 높은 응력이 발생하지만, ULS 하중 조건 하에서는 연결 형식에 관계없이 응력 수준은 유사하게 나타난다.
- 4) 선체 거더 굽힘 하의 강도 평가 시에 용접 연결 형식의 상부 모듈 단독 모델을 사용할 경우에는 MSS의 회전 강성을 유한요소 모델에 적절히 반영해야 한다.

향후, 상부 모듈 구조, 인터페이스 구조 및 선체 보강 구조 전체의 중량 절감을 위한 설계 변수 결정 및 구조 최적화에 대한 추가 연구가 필요하다.

## References

- [1] T.M. Ha, S.S. Kim and M.K. Song, "Strength Analysis for PAU Seat of FPSO", Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp.90-96, June, 2005.
- [2] M.K. Song, B.S. Jang and D.E. Ko, "A Study on Design for the Topside Module Support Structure of Offshore Floater", Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(4), pp.53-58, 2010.
- [3] S.Y. Jeong, M.I. Roh and H.K. Shin, "Multi-floor Layout Model for Topsides of Floating Offshore Plant using the Optimization Technique", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 52(1), pp.77-87, 2015.
- [4] L.O. Henriksen, B.D. Williams, X. Wang, D. Liu, "Structural Design and Analysis of FPSO Topside Module Supports", ABS Technical Papers, 2008.
- [5] Det Norske Veritas, Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method), DNV-OS-C101, Høvik, Norway, 2004.
- [6] American Institute of Steel Construction (AISC), Load and Resistance Factor Design Specification for Structural

Steel Buildings, Chicago, IL., 1999.

- [7] American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API Recommended Practice 2A-LRFD (RP 2A-LRFD), 20th Edition, Washington, D.C., 1993.
- [8] Det Norske Veritas, PART 3 Chapter 1 of Rules for Classification of Ships, Hull Structural Design Ships with Length 100 meters and Above, Høvik, Norway, 2004.

## 장 범 선(Beom-Seon Jang) [정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2011년 8월 : 삼성중공업(주) 조선해양연구소, 해양기본설계팀
- 2011년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박해양구조역학, 피로파괴역학, 화재폭발충돌 해석

## 고 대 은(Dae-Eun Ko) [정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계