

초대형 부유식 해양구조물 탑재 플로팅 도크 계류안전성 연구

양승호[†] · 조진욱 · 김현조 · 김부기
삼성중공업

Study on the Mooring Stability of Floating Dock with Ultra Large Offshore Structure

Seungho Yang[†] · Jinwoog Cho · Hyunjo Kim · Booki Kim
Samsung Heavy Industries

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.

Mooring stability of floating dock for construction of Ichthys CPF (central processing facilities), an ultra large offshore structure, was studied. Normal and typhoon conditions were considered for mooring analysis. There have been changes in construction stages of the CPF as project progresses. These changes were reflected on the mooring stability analysis for both conditions. In order to secure the mooring stability of the floating dock for Ichthys CPF under typhoon, maximum loads of mooring chains and maximum offset of the floating dock with Ichthys CPF were examined. Also the shapes of the catenary mooring were investigated to check interferences among mooring chains. As it was confirmed that the mooring loads were within SWL (safe working load) of mooring chains and underwater sinkers, the mooring stability of the floating dock for construction of Ichthys CPF was secured. By achieving security of mooring stability of the floating dock, it is assured that Ichthys project is on its way to success.

Keywords : Ichthys CPF(이치스 CPF), Floating dock(플로팅 도크), Mooring stability(계류안전성)

1. 서론

최근 세계 3대 에너지 자원의 하나인 천연가스가 세계 에너지 시장에서 차지하는 비중이 꾸준히 증가하고 있다. 특히, 아시아 지역을 중심으로 수요가 지속적으로 확대되고 있는 가운데, 향후에도 에너지 소비량이 높아지는 추세를 보일 것으로 예상하고 있다 (BP, 2013).

이러한 에너지 소비 추세와 맞물려 국제 천연가스 시장의 규모가 확대되고 있으며, 세계 천연가스 수요 증가는 각국 주요 석유회사들의 해양가스전 개발에 대한 투자로 이어지고 있다 (Chun, 2014).

이치스 CPF(Central Processing Facility) 프로젝트는 오스트레일리아 다윈의 남서쪽 약 800 km, 브룸의 북쪽 약 440 km에 위치해 있는 이치스 필드(field)를 개발하기 위해 시작되었다. 이치스 필드는 두 개의 유전(hydrocarbon reservoirs)을 가지고 있으며, 12조 입방피트 이상의 천연가스와 약 5억 배럴의 콘덴세이

트(condensate)를 가지고 있는 것으로 평가된다 (Inpex Corporation, 2013a).

이치스 필드에 투입될 해상설비로는 Fig. 1에 보이는 바와 같이, CPF와 FPSO, 그리고 수많은 URF(Umbilical, Riser, Flowline) 및 관련 설비들이 있으며 CPF에서 생산, 처리된 가스는 885 km 길이의 해저 파이프라인을 통해 육상 LNG 플랜트(호주 다윈시 소재)로 운송된다. 인펙스(inpex)사는 1일 10만 배럴의 콘덴세이트와 연간 천연가스 800만 톤, LPG 160만 톤을 생산해 일본과 대만 등지에 공급할 계획인 것으로 알려져 있다.

이치스 CPF는 반잠수식 해양구조물(semi-submersible unit)로 상부구조물(topside)은 여러 개의 모듈들로 구성되며 계획된 무게는 총 12만 톤을 넘을 것으로 예측된다. 또한, 이치스 CPF는 4개의 계류식(mooring line) 그룹으로 구성된 28개 (7EA*4)의 계류식을 이용하여 이치스 필드에 설치될 계획이다 (Inpex Corporation, 2013b).

한편, 이치스 CPF가 건조되는 삼성중공업 거제조선소는 태풍의 내습이 예상되는 지역에 위치해 있다. 따라서, 이러한 환경조

건에 대한 이치스 CPF 건조 중 계류안전성 검토가 요구된다. 실제 2003년도에 태풍 매미로 인해 국내조선소의 자항능력을 갖추지 못한 선박들이 계류 중 유실되는 사고를 당하여 큰 손실을 입은 바 있다 (Na, et al., 2004).

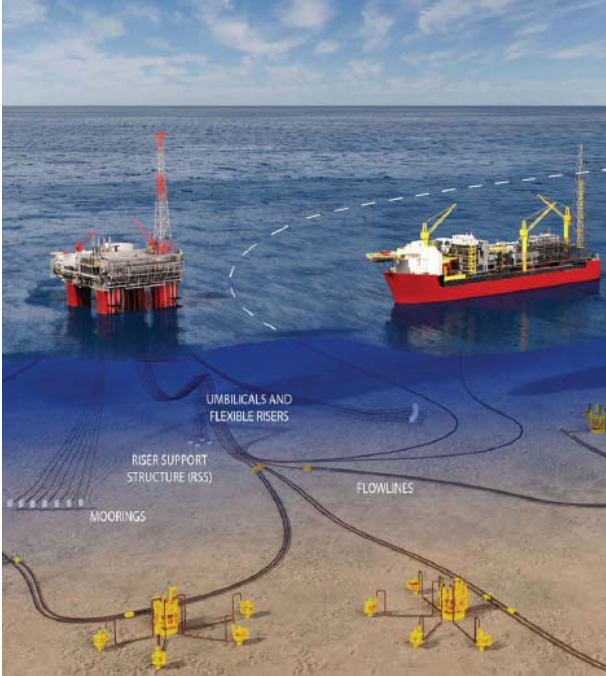


Fig. 1 Ichthys field associated offshore facilities and underwater URF infrastructure (courtesy of Inpex Co.)

Park, et al. (2011)은 시추선의 태풍 시 야드 안벽접안 조건에 대한 계류해석을 수행하여 태풍조건에서의 시추선 계류안전성을 확인한 바 있다. Oh (2013)은 연안환경 조건에서 규칙파 중 플로팅 도크의 계류력과 운동특성에 관한 연구를 수행하여 실운용의 기초연구 자료로 활용할 수 있도록 하였다. 이상과 같이, 선행연구들이 항내 조건에서 다양한 환경외력에 대한 해석을 통해 계류안전성에 대한 의미 있는 연구결과들을 내어 놓았다. 그러나, 기존의 선행연구들은 시추선, 플로팅 도크와 같이 해양부유체 자체에 대한 계류해석과 운동성능 및 개별 특성파악에 국한하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 이치스 CPF가 초대형 부유식 해양구조물임과 동시에 플로팅 도크에서 건조되는 점을 고려하여, CPF 탑재 플로팅 도크의 계류안전성에 대한 면밀한 연구검토를 수행한다.

본 연구의 목적은 이치스 프로젝트의 성공적인 수행을 위한 이치스 CPF 건조 중, CPF 탑재 플로팅 도크의 계류안전성에 대한 확인이다. 뿐만 아니라, 연구결과의 실 프로젝트 적용사례(case study)를 구체적으로 보여줌으로써 향후 유사 공사에 대한 참고자료로 활용될 수 있도록 하고자 하였다.

본 논문에서는 작업조건(normal condition)과 태풍조건(typhoon condition)에 대한 계류해석을 통해, 각 해석조건에서의 계류체인들의 최대 계류력과 CPF 탑재 플로팅 도크의 최대

오프셋(offset), 계류체인들 간의 간섭여부를 검토하고자 하였다. 아울러, CPF 탑재 플로팅 도크의 계류안전성 확인작업의 일환으로 수중조사(underwater inspection)를 수행하였으며, 그 결과를 본문에 요약하였다.

2. 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크

2.1 부유식 해양구조물 건조 전용 플로팅 도크

선박 및 부유식 해양구조물 건조를 위해 드라이 도크를 이용하는 방법, 플로팅 도크를 이용하는 방법이 있다. 두 가지 방법은 각각 장단점이 있으며, 드라이 도크를 이용할 경우, 도크 내 해양구조물 건조 후 곧장 진수 할 수 있는 장점이 있다 (Oh, 2013). 반면, 플로팅 도크를 이용할 경우, 플로팅 도크 위에서 건조 후 플로트오프(float-off) 방식을 이용하여 진수하게 된다. 이때 플로트 오프 중, 상부 건조구조물과 하부 플로팅 도크 상호 간의 상대운동에 대한 평가 등 여러 가지 기술적 평가항목들이 필요하다. 뿐만 아니라, 플로팅 도크 자체가 하나의 부유식 해양구조물이기 때문에 건조 중 환경외력에 의한 플로팅 도크 자체의 운동으로 인한 운영상의 어려움과 건조구조물의 하중에 의한 플로팅 도크의 구조변형 등의 위험이 존재한다.

이치스 CPF의 경우에는 폭이 약 110 m 로 효율적인 건조와 비용절감을 위해 삼성중공업에서 보유하고 있는 해양구조물 전용 플로팅 도크(offshore floating dock, 이하 OFD)에서 건조를 하고 있다.

Fig. 2는 플로팅 도크의 타워 데크(tower deck) 위에서 메인 데크(main deck)를 바라본 실물 모습을 보여준다.



Fig. 2 Actual offshore floating dock of SHI

Table 1은 플로팅 도크의 주요제원을 나타낸다. 플로팅 도크는 길이와 폭이 각각 150 m로 정사각형 외형을 가진다. 플로팅 도크의 데크(deck) 위에는 선수미 방향으로 양쪽에 사각 기둥(square column) 형태의 타워 데크가 있다.

Table 1 Main dimensions of offshore floating dock

Item	Dimension
LBP	153.6 m
Breadth	149.7 m
Depth	8.0 m
Height of Tower Deck	23.5 m
Operating Draft	7.0 m

2.2 초대형 부유식 해양구조물 이치스 CPF

부유식 해양구조물의 크기와 무게가 급격히 커지는 추세에 있다 (Korea maritime institute, 2015). 이치스 CPF는 자체 중량 12만 톤을 넘을 것으로 예상되는 초대형 부유식 해양구조물로서 4개의 폰툰(pontoon)과 4개의 칼럼(column)을 가지는 반잠수식 해양구조물이다. Table 2는 이치스 CPF의 주요제원을 나타내준다.

Table 2 Main dimensions of Ichthys CPF

Item	Dimension
LBP	110.3 m
Breadth	110.3 m
Height of Column	36.1 m
Height of Pontoon	11.9 m
Operating Draft	26.0 m

Fig. 3은 삼성중공업 거제조선소 내에 전시중인 이치스 CPF 모형을 보여준다.



Fig. 3 CPF model on display in Samsung Geoje shipyard

2.3 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크

Fig. 4는 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 해석모델을 나타낸다.

이치스 CPF는 플로팅 도크 위의 중앙부를 기준으로 하여 건조 순서에 따라 각 모듈별로 탑재된다. 건조 중, 플로팅 도크의 흘수는 7.0 m와 7.5 m를 기준흘수로 하여 밸러스트(ballast)량을 조절하여 흘수를 맞추게 된다.

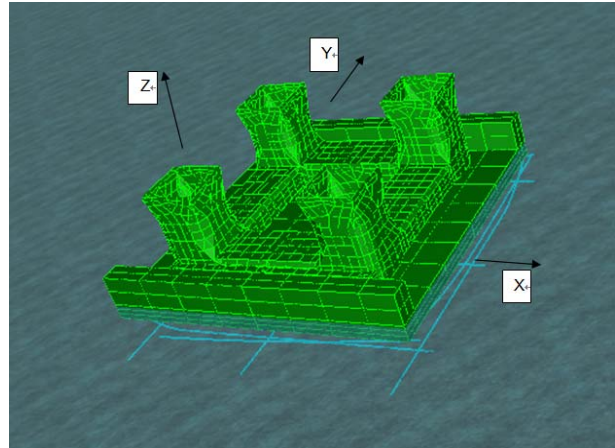


Fig. 4 Hydrodynamic model of Ichthys CPF on floating dock

3. 계류장치 및 계류시스템

일반적인 부유식 해양구조물의 작업해역 계류의 경우에는 계류삭을 구조물의 외측 방향으로 펼쳐서 설치하는 스프레드 계류(spread mooring)를 하게 된다. 그러나, 야드 내 플로팅 도크 계류의 경우에는 야드 내 빈번한 호선 이동 등을 고려하여 구조물 내측으로 체인을 설치하게 된다. 삼성중공업이 보유중인 해양구조물 건조 전용 플로팅 도크의 계류시스템은 12개의 자체 계류 체인을 가지고 있으며 플로팅 도크의 내측으로 설치되어 있다. 태풍조건에서 플로팅 도크의 비상상황에서의 안전성 확보를 위해 추가적으로 계류로프를 이용하였다. Table 3은 계류체인과 계류로프의 사양을 나타낸다.

Table 3 Specification of mooring chains

Category	Specification	SWL* (Intact/ Redundancy)	MBL**
Chain	132 mm, R3 grade	662.8/ 926.9 ton	1326 ton
Rope	112 mm, Nylon	102.7/ 159.4 ton	228 ton

SWL* : Safe Working Load

MBL** : Max. Breaking Load

계류체인이 연결되는 양끝단에는 체인 멈추개(stopper)와 해저 싱커 sinker)들이 연결된다. Fig. 5은 말발굽 형태의 해저 싱커 모습을 보여준다. 해저 싱커는 중력식 싱커로 해저에 묘박

(anchoring) 된 상태에서 충분한 지지력을 가질 수 있도록 말발굽 형태로 특수 제작되었다.



Fig. 5 Horseshoe shape of underwater sinker

Fig. 6은 태풍조건 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 계류배치도를 나타낸다. 아드 작업장 내 간섭물 등 여러 가지 제반여건을 고려하여 계류삭 배치가 이루어졌다. 계류체인은 배치는 임의방향 환경외력에 견딜 수 있도록 상호 교차되도록 구성되어 있으며 동서방향과 남북방향으로 체인 멈추개와 해저 싱커가 연결되어 있다. 평상 시 작업조건은 Fig. 6의 계류배치도에서 계류로프가 없는 상태가 플로팅 도크의 작업조건 계류상태가 된다.

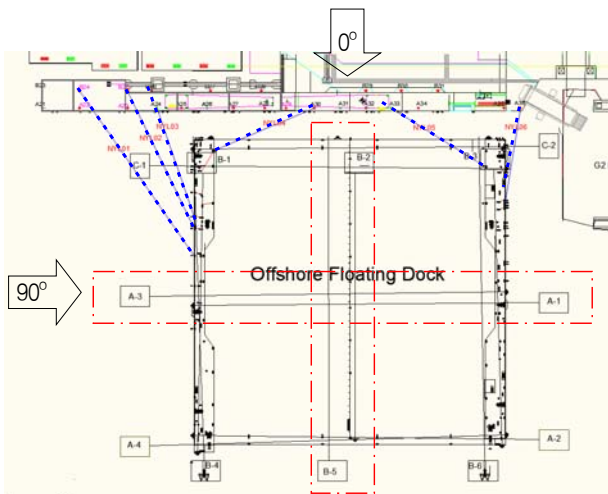


Fig. 6 Mooring arrangement for typhoon condition (top view, blue dotted lines – mooring ropes, black lines – mooring chains)

4. 수치해석

본 연구에서는 해석도구로 MOSES(Multi-Operational Structural Engineering Simulator) 프로그램을 이용하였다.

MOSES 프로그램은 해양구조물의 엔지니어링과 설치분야에서 전 세계적으로 가장 광범위하게 사용되는 프로그램이다. 특히,

부유식 해양구조물의 안벽계류해석 분야에서는 Optimoor와 함께 가장 빈번하게 사용되고 있다. MOSES 프로그램은 운동해석(global motion analysis)을 위한 3차원 산란/방사(diffraction/radiation) 문제에 대한 해석모듈을 가지고 있으며, WAMIT 등의 유체동역학 해석(hydrodynamic analysis) 전문도구와의 비교검증을 통해 그 정확도가 잘 입증되어 있다 (J. Ray McDermott engineering, 2000).

한편, 계류 부유체의 주파수영역 해석을 수행할 때 일반적인 경우, 비선형 대진폭 표류운동에 대한 고려를 해야 한다. 이러한 고려를 위해 해양구조물 계류 적용지침(GL Noble Denton, 2013)에서는 해석유형별 해석방법에 따른 안전계수(safety factor)에 대한 지침을 제시하고 이를 엄수하도록 하고 있다. 본 연구에서는 계류가 항내에서 이루어지는 점을 고려하여 안벽계류 해석에서 선호되는 준정적(quasi-static) 해석을 적용하되 안전계수를 정상상태(intact condition) 2.0, 여분 점검(redundancy check) 1.43을 각각 적용 하였다.

4.1 운동방정식

MOSES 프로그램에서 적용하는 운동방정식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\ddot{I}q + \dot{C}q + Kq = s \tag{1}$$

여기서,

I : mass matrix of the body

C : damping matrix

K : stiffness matrix

q : displacement vector

s : generalized force vector

MOSES 프로그램에서는 부유식 해양구조물에 작용하는 환경외력(generalized force)과 각 개별 모델요소들의 강성(stiffness), 감쇠(damping) 등을 이용하여 운동방정식 (1)의 해를 구하게 된다. 이때, 주파수영역 해석과 시간영역 해석이 가능하며, 여기서는 주파수영역 해석법을 적용하였다. 부유체와 계류삭에 대해서는 비연성 해석을 수행하였고, 계류삭들에 대해서는 준정적해석을 수행하였다.

4.2 좌표계

Fig. 4에 해석에 사용된 좌표계를 도시하였다. 좌표계는 우수 좌표계가 사용되었고, 좌표계의 원점은 플로팅 도크의 선미부 바닥면(baseline)에 위치하고 있다.

환경외력의 방향은 0도 방향이 양의 x방향에서 음의 x방향으로 진행되는 것으로 표현된다.

4.3 환경조건

환경외력으로 바람, 파랑, 조류가 고려되었다. 환경외력은 360도 전 방향 입사조건에 대해 고려하였고, 바람, 파랑, 조류 입사방향의 조합은 동시에 동일방향으로 입사하는 조건(collinear)으로 고려하였다. 환경조건은 야드 실 계측 데이터를 토대로 충분한 설계안전율을 가지도록 설계풍속을 산정하였으며, 100년 재현기간에 해당되는 환경조건(KIMM, 1998)을 해석에 적용하였다(Table 4). 불규칙파 모델은 ISSC 스펙트럼을 사용하였다. 풍속은 10분 평균풍속을 해석입력조건으로 하였다.

Table 4 Environmental conditions

Condition	Wave		Wind	Current
	Hs	0.84 m		
Normal Condition	Ts*	3.40 s	30 m/s	1 knot
	Hs	1.26 m		
Typhoon Condition	Ts*	4.04 s	50 m/s	1 knot
	Hs	1.26 m		

Ts*: significant wave period

조석간만의 차를 고려하기 위해 수심을 17 m ~ 19 m를 0.5 m 간격으로 하여 해석을 수행하였다.

4.4 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 풍하중 계수와 풍하중 산정

이치스 CPF에 작용하는 풍하중 산정을 위해 풍동시험(wind tunnel test)을 해외전문기관에서 수행하였다. 흘수 26 m의 작업 흘수(operation draft) 뿐만 아니라, 흘수 15 m에 해당하는 플로트오프 이후의 안벽접안 흘수(quayside draft)에 대한 풍동시험도 수행되었다. Fig. 7은 이치스 CPF 풍동테스트 모델을 보여준다.

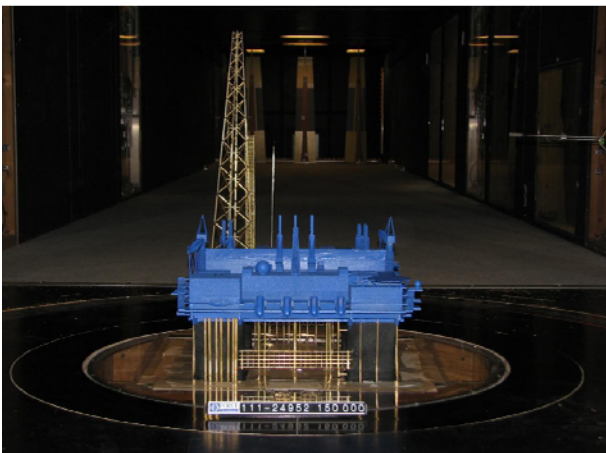


Fig. 7 Wind tunnel test for quayside mooring draft = 15.0 m (courtesy of Force Technology)

일반적으로 풍동시험 결과로부터 얻은 풍하중 계수를 풍하중 산정에 직접 사용하는 것이 가장 정도 높은 해석결과를 준다. 그러나, 본 연구에서와 같이 이치스 CPF의 건조가 플로팅 도크 위에서 이루어지고 플로팅 도크의 형상이 Fig. 2와 Fig. 4에서 보는 바와 같이 도크 상부 양측면에 길이방향으로 타워 도크가 있는 경우, 풍동시험으로부터 얻은 풍하중 계수를 직접 해석의 입력으로 사용할 수 없는 어려움이 있다. 따라서, 여기서는 보다 실질적인 풍하중 계수를 산정하기 위해 NAPA 프로그램을 통한 NAPA 풍동모델(wind model)을 이용하였다. NAPA 프로그램은 선박 및 해양구조물의 초기 기본설계를 위한 응용프로그램으로 구조물의 형상, 배치 등의 모델링을 통해 안전성과 복원성 등을 평가할 수 있는 프로그램이다. NAPA 풍동모델에서는 플로팅 도크의 타워 도크 형상을 고려하여 방향별 풍하중을 보다 정확하게 고려할 수 있다. 한편, 선급규약에서는 정확한 풍하중 계산을 위해 구조부재의 형상계수, 구조부재가 위치한 지점의 높이계수, 방향별 투영면적 등을 고려하여 모델링하도록 제시하고 있으며(DNV, 2013), NAPA에서는 선급규약에서 제시한 방법과 동일한 방법으로 풍동모델링이 이루어진다. Fig. 8은 본 연구에 적용된 NAPA 풍동모델을 나타낸다.

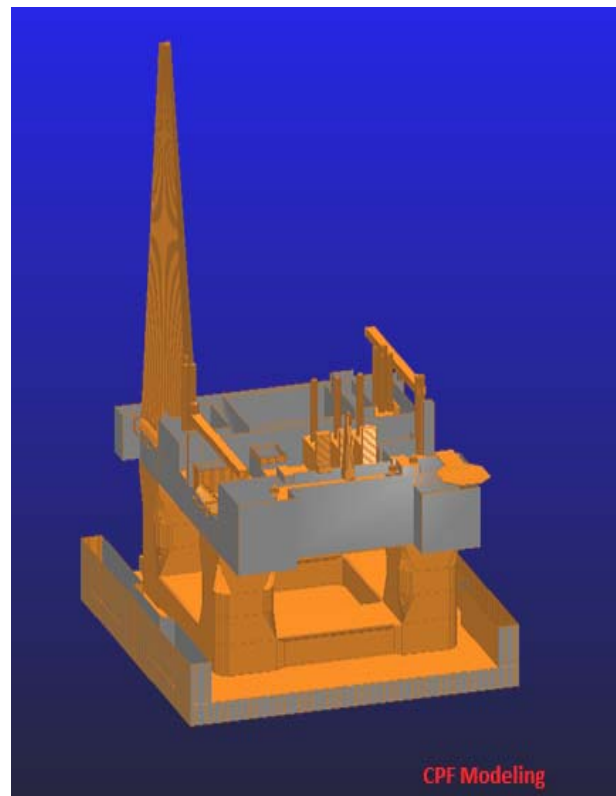


Fig. 8 NAPA model for the prediction of wind load

Fig. 9은 풍동테스트를 통해 얻은 풍하중 계수와 NAPA 풍동 모델에서 구한 풍하중 계수를 비교하여 나타내었다. 이치스 CPF 자체모델과 CPF 탑재 플로팅 도크 모델에 있어 방향별 풍하중 계수 차이를 볼 수 있다.

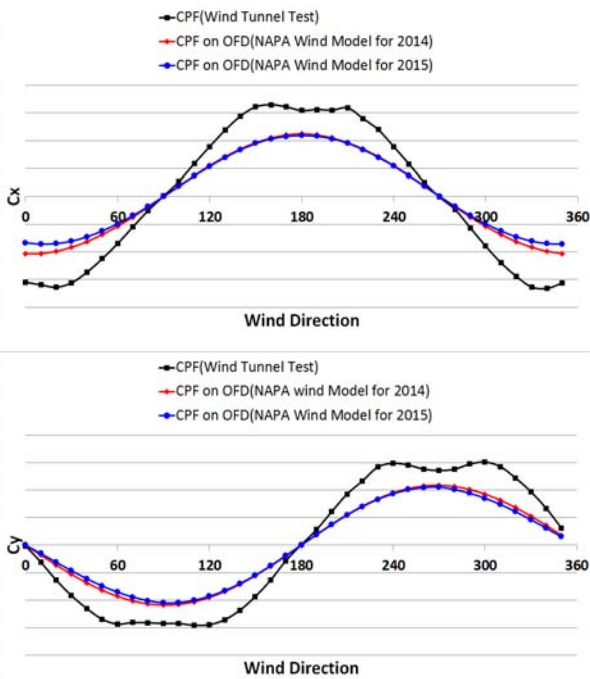


Fig. 9 Comparison of wind coefficients between wind tunnel test and NAPA wind model (upper: Cx, lower: Cy)

해석에 적용된 풍하중 면적을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Projected area for wind loads

Direction	Projected Area		
	Normal Condition Projected Area	2014 Projected Area	2015 Projected Area
Longitudinal (Ax)	7852 m ²	6279 m ²	7852 m ²
Lateral (Ay)	7919 m ²	6604 m ²	7852 m ²

풍하중은 식 (2), (3)을 이용하여 산정된다.

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_A C_x A_x V_W^2 \quad (2)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_A C_y A_y V_W^2 \quad (3)$$

여기서,

ρ : 공기 밀도 (kg/m³)

C_x, C_y : 풍하중 계수 (길이방향, 횡방향)

A_x, A_y : 투영면적 (A_x =길이방향 (m²), A_y =횡방향 (m²))

V_W : 풍속 (m/s)

F_x, F_y : 풍하중 (N)

4.5 초기인장력

계류체인 초기인장력은 실제측값을 해석의 입력으로 사용하였다. Table 6은 계류체인들의 초기인장력을 나타낸다. 계류체인 연결 시 기준이 되는 초기인장력은 20 ton으로 연결작업이 이루어지는 시점에 따라 연결위치별로 예측하중이 조금씩 달라진다.

Table 6 Pretensions of mooring chains

Chain*	Pretension
A1	22 ton
A2	22 ton
A3	22 ton
A4	22 ton
B1	20 ton
B2	20 ton
B3	20 ton
B4	18 ton
B5	18 ton
B6	18 ton
C1	20 ton
C2	18 ton

chain*: 연결위치는 Fig. 6 참조.



Fig. 10 Connections between floating dock and mooring chains (upper: starboard, lower: port)

계류체인의 개별 초기인장력을 얼마로 하느냐에 따라 전체 계류 시스템 내의 개별 계류체인의 계류력과 계류된 해양구조물의 오프셋이 영향을 받게 되기 때문에 계류시스템 해석에 있어서 초기 인장력이 중요한 입력요소가 된다.

Fig. 10은 플로팅 도크의 계류체인 연결상태를 보여준다. 우현과 좌현 각각 세 부분의 연결상태를 확인할 수 있다.

5. 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 계류안전성 평가

이치스 CPF 탑재 플로팅 도크에 대한 계류안전성 평가가 수행되었다. 평상 시 건조 중 작업조건에 대한 계류해석과 태풍 시의 극한 환경조건에 대한 계류해석이 수행되었다. 불규칙파 중 응답의 최대값은 3시간 해상상태에 대한 통계적 최대값을 나타내었다. 5.1 ~ 5.4 절에 각 조건별 해석결과를 그래프와 테이블로 요약하였다.

5.1 작업조건

작업조건인 경우, 계류체인만으로 플로팅 도크를 계류하게 된다. Fig. 11은 선수파 (입사각 0°)에 대한 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 상하동요와 종동요 RAO를 나타낸다. 해석 환경조건인 항내 파랑조건 $T_s=3.40$ s와 $T_s=4.04$ s에서는 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 운동이 거의 없음을 알 수 있다. Table 7은 선수파 입사조건에서 계류체인들의 하중을 나타낸다. 선수파 입사로 인해 B1, B2, B3 계류체인의 하중이 상대적으로 큰 값을 나타낼 수 있다.

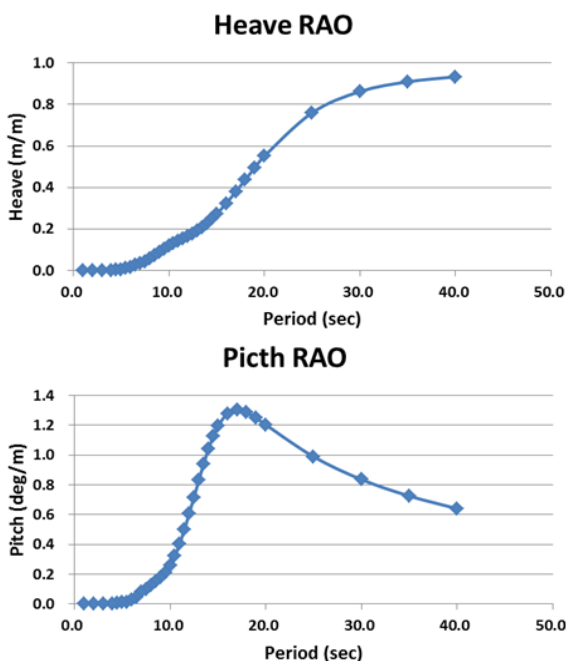


Fig. 11 Motion RAOs of floating dock with Ichthys CPF (heading=0°)

Table 7 Maximum tensions of mooring chains (heading=0°)

Mooring Chain	Tension
A1	22.9 ton
A2	22.6 ton
A3	22.3 ton
A4	22.2 ton
B1	186.9 ton
B2	183.4 ton
B3	177.9 ton
B4	10.3 ton
B5	10.3 ton
B6	10.3 ton
C1	20.5 ton
C2	19.5 ton

Fig. 12는 작업조건에 대한 CPF 탑재 플로팅 도크 연결 체인의 최대 인장력을 나타낸다. 360도 전 입사방향에 대한 체인 인장력의 최대값들을 작업안전하중에 대한 비율(maximum tension/SWL)로 나타내었다. 12개 연결체인 모두 계류 인장력이 체인 작업안전하중의 35% 미만으로 나타났다.

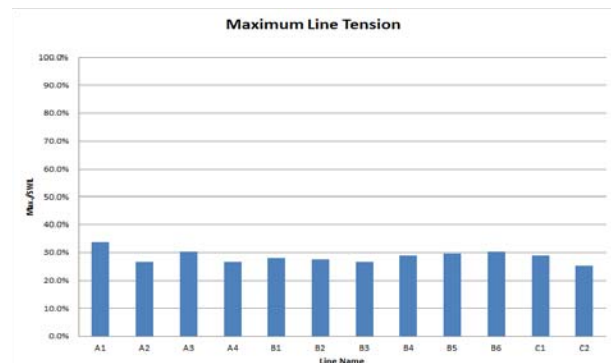


Fig. 12 Mooring line maximum tension for normal condition

5.2 태풍조건

태풍조건인 경우, 계류체인 외에 보조적으로 계류로프를 이용하여 계류시스템을 구성하였다. Fig. 13 ~ Fig. 14에서 태풍조건에 대한 계류해석 결과를 그림과 막대그래프로 나타내었다. Fig. 14에서 보는 바와 같이, 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 연결체인 12개 모두 계류인장력이 체인 작업안전하중의 65% 이상의 큰 값을 나타내었다. 특히, A1 해저 싱커와 연결된 계류체인 (Fig. 6)의 경우에는 작업안전하중의 90%에 육박하는 체인 인장력이 나타났다. 6개의 계류로프의 경우에는 연결위치별로 차이가 크게 나타났으며 작업안전하중의 최대 61.4%에서 최소 33.3%까지 계류로프의 하중이 나타났다. 계류로프의 경우에는 작업장 내의 기존 구조물과의 간섭 상황 등 여러 가지 현장상황을 고려하여 연결위치가 결정되었기 때문에 계류로프 개별 길이차이에 따른 계류로프 하중의 큰 차이가 나타난 것으로 보인다.

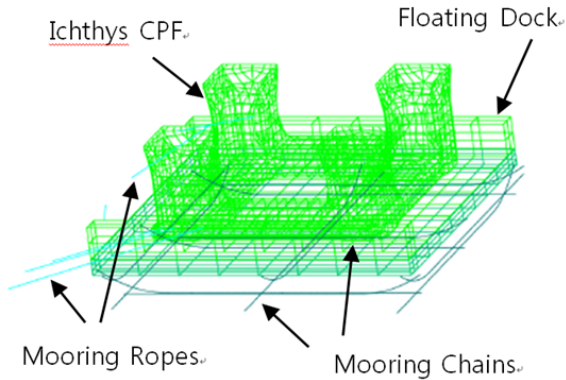


Fig. 13 Mooring analysis results for typhoon condition in 2015 (Vw=50 m/s, heading=270°)

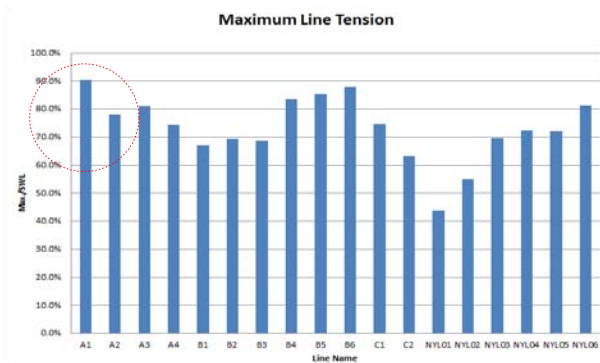


Fig. 14 Mooring line maximum tension for typhoon condition

Table 8에 CPF 탑재 플로팅 도크의 작업조건과 태풍조건에서의 계류해석 결과를 요약하여 나타내었다. 태풍조건은 2014년도 작업공정 단계의 풍하중 면적에 대한 해석결과와 2015년도 작업공정 단계의 풍하중 면적에 대한 해석결과를 구분하여 나타내었다.

Table 8 Summary of mooring analysis results for Ichthys CPF on OFD

Environmental Condition	Number of Mooring Lines		Max. Ten. (Intact)/SWL	Max. Ten. (Redundancy)/SWL	Env. Dir.
	Chain	Rope			
Normal Condition (Vw=30m/s)	Chain	12 EA	224.7/662.8 ton	293.1/926.9 ton	270°
	Rope	-	-	-	-
Typhoon Condition in 2014 (Vw=50m/s)	Chain	12 EA	528.2/662.8 ton	692.4/926.9 ton	270°
	Rope	5 EA	83.4/102.7 ton	86.3/159.4 ton	270°
Typhoon Condition in 2015 (Vw=50m/s)	Chain	12 EA	598.9/662.8 ton	822.9/926.9 ton	270°
	Rope	6 EA	83.4/102.7 ton	85.9/159.4 ton	270°

5.3 최악상황 (worst case)에 대한 고려

- 여분 점검 (redundancy check)

극한상황에서의 해양구조물의 안전성 확보를 위해 최악상황 시나리오에 대한 해석이 요구된다 (GL Noble Denton, 2013). 본 연구에서는 하나의 계류체인 파단상황 (one mooring chain failure case)을 최악상황으로 선정하였다. 태풍조건에 대한 해석 결과로부터 최대 하중이 걸리는 해저 싱커 A1에 연결된 계류체인 A1을 선택하였고, 최악상황 시나리오에 따라 선택된 A1 체인이 끊어진 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 15는 A1 계류체인이 파단된 최악상황에 대한 해석결과를 나타낸다. A1 체인이 파단 됨으로 인해 동일한 방향으로 하중을 지지하고 있는 A2와 C2 체인의 하중이 급격히 증가함을 알 수 있다. 작업안전하중에 대한 최대하중 비율값이 정상상태에 비해 상대적으로 작게 나타난 것은 최악상황 조건에서는 안전계수가 2.0에서 1.43으로 작아지게 되기 때문에 역으로 체인의 작업 안전하중이 커지게 된다. 전체 하중분포 측면에서 볼 때, 최악상황 조건에서 급격한 하중 불균형이 일어남을 예측해 볼 수 있다. 그러나, 계류안전성 평가에 있어서는 최악상황 조건에서도 90% 이하의 하중비율이 나타났기 때문에 안전한 것으로 평가할 수 있다.

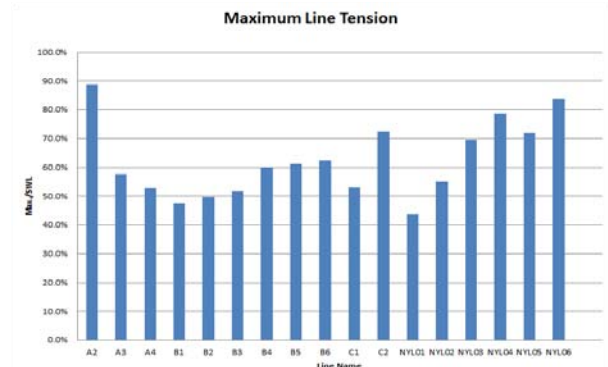


Fig. 15 Mooring line maximum tension for one line failure

5.4 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 최대 오프셋과 계류체인 현수선 형상

이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 계류의 경우에는 구조물 내측으로 체인이 설치되어 있다. 따라서, 체인간의 간섭이 있을 수 있으며, 체인 간섭 시 체인 간의 쓸림현상(clash)으로 인해 체인이 끊어지는 상황이 발생하지 않도록 사전조치를 해야 한다. Fig. 6에서 붉은색 일점쇄선은 상호 간섭으로 인해 쓸림현상이 발생될 수 있는 계류체인을 나타낸다.

계류체인간의 간섭여부를 확인하기 위해서는 외부환경조건으로 인한 플로팅 도크의 오프셋과 오프셋이 발생한 위치에서의 수면아래 계류체인들의 현수선 형상을 살펴봐야 한다.

Table 9는 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 최대 오프셋 값을 나타낸다. 통상의 야드 작업 최대 한계풍속 20 m/s에서 x방향 1.56 m, y방향으로 1.25 m 오프셋이 예상되고, 태풍 시에는 x방향 2.46 m, y방향 2.15 m의 오프셋이 예상되었다.

Table 9 Maximum offset of Ichthys CPF on OFD

Direction	Normal (Vw=10 m/s)	Normal (Vw=20 m/s)	Normal (Vw=30 m/s)	Typhoon (Vw=50m/s)	Env. Dir.
X	0.83 m	1.56 m	1.95 m	2.46 m	180°
Y	0.61 m	1.25 m	1.64 m	2.15 m	90°/270°

Fig. 16 ~ Fig. 17은 플로팅 도크의 최대 오프셋에서 계류체인 현수선 형상을 보여준다. Fig. 17은 계류체인의 초기 형상 대비 오프셋으로 인한 상대적인 변화 상태를 보여준다. 최대 오프셋에서의 변화상태 확인을 위해 초기인장력만 가해진 상태와 비교하여 나타내었다.

계류체인들의 현수선 형상으로 볼 때, 작업조건에서는 계류체인들간의 간섭이 발생되지 않는 것으로 나타났으나, 태풍조건에서는 최대 오프셋에서 간섭이 발생하는 것으로 나타났다. 체인 A1과 체인 B5가 과도하게 해저면으로부터 들려짐으로 인해 간섭이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 이 경우 체인들 간의 수직방향 하중차이는 50 ton 미만으로 체인의 작업안전하중 662.8 ton에 비하면 상대적으로 작은 값이기 때문에 장기간 지속적으로 간섭이 발생하지 않는다면 간섭으로 인한 파단은 발생하지 않을 것으로 판단하였다.

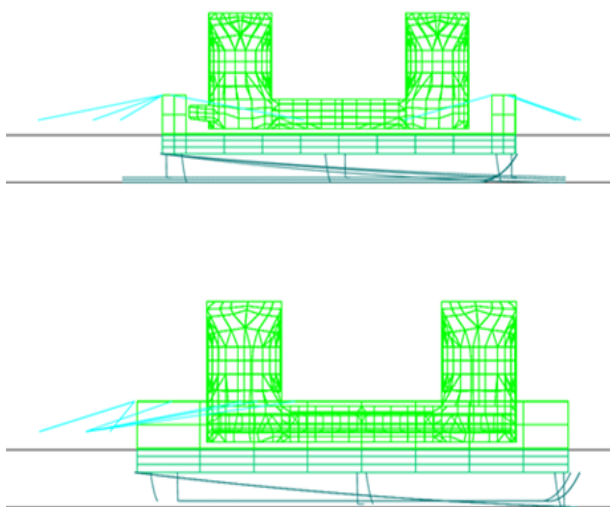


Fig. 16 Mooring chain configuration at maximum offset (upper: front view, lower: side view)

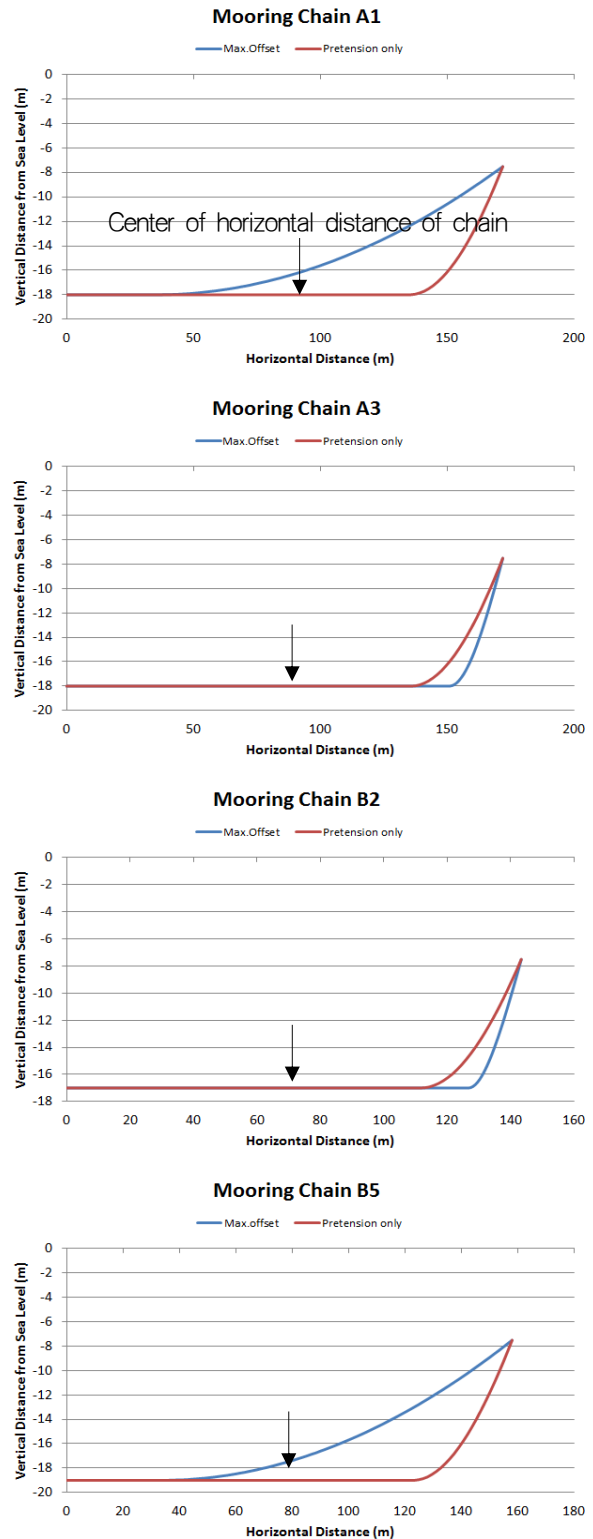


Fig. 17 Catenary shapes of mooring chains for typhoon condition

6. 수중조사

안전한 계류를 위해서는 계류사들이 상호간섭 없이 해저면상 설치경로에 정위치를 유지하고 있어야 한다. 수중조사는 계약자

(contractor)의 의무사항은 아니지만, 안전한 해상계류를 위한 필수불가결한 요소이다. 본 프로젝트에서는 수중조사가 제3 기관 (third party)을 통해 이루어졌다. 수중조사 시, 주요 조사부분은 플로팅 도크와 체인의 연결부, 체인 가이드 부분에서의 체인의 이탈여부, 그리고, 해저면을 따른 싱커 연결부까지의 체인상태 등이다.

Fig. 18에 보이는 바와 같이, 수중조사를 통해서 계류체인들이 잘 설치되어 안전한 상태를 유지하고 있음을 확인하였다.



Fig. 18 Underwater inspection of mooring chains (upper: contact part of chain guide, lower: center part of mooring chain catenary)

7. 결론

초대형 부유식 해양구조물인 이치스 CPF의 건조 중, 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 계류안전성에 관한 연구가 수행되었다. 작업조건과 태풍조건에 대한 계류해석이 수행되었으며, 각각의 조건에서 계류체인들의 최대 계류력과 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 최대 오프셋을 검토하였다. 계류체인들 간의 간섭여부를 확인하기 위해 계류체인의 현수선 형상을 확인하였다. 계류 구성 요소들의 연결상태 확인을 위해 수중조사를 실시하였다. Fig. 19는 삼성중공업 거제조선소에서 건조 중인 이치스 CPF의 실물을 보여준다.



Fig. 19 Ichthys CPF on floating dock under construction in Geoje Samsung Shipyard

해석결과 및 수중조사 결과를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 계류체인 계류력이 해석방법에 따른 안전계수 (GL Noble Denton, 2013)를 고려할 때 체인 멈추개, 계류체인 및 해저 싱커의 최대허용한계 하중 범위 내에 있다. 따라서, 기존 12개의 계류체인과 6개의 계류로프를 이용하여 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 안벽접안 계류 시, 태풍조건에서 계류안전성이 확보된다.
2. 해양구조물 계류 적용지침에 따른 계류체인 한 개 라인 파단에 대한 계류안전성 평가를 수행하였다. 전체 계류 시스템의 하중 불균형으로 인해 일부 계류체인에 급격한 하중증가가 발생함에도 불구하고 계류 구성요소들의 계류가능 한계하중을 넘지 않는다.
3. 초대형 해양구조물 탑재 플로팅 도크 계류해석에 있어 풍동시험 결과를 직접 계류해석의 입력으로 사용할 수 없는 경우에 대한 대안을 본 연구를 통해 제시하였다. 즉, NAPA 풍동모형을 이용한 계류안전성 평가가 가능함을 보였고, 이는 기존의 계류해석 방법 혹은 해석절차를 보완한다는 측면에서 긍정적인 연구성과로 볼 수 있다.
4. 수중조사 결과, 플로팅 도크와 체인들의 연결상태가 양호하고, 체인들과 해저 싱커들과의 연결상태가 양호하여 작업조건 및 태풍조건 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크 계류 시, 안전한 상태 유지가 가능하다.
5. 이치스 CPF 탑재 플로팅 도크의 계류안전성 확보를 통해 이치스 프로젝트의 성공적 수행을 위한 기본 토대가 마련되었으며, 초대형 해양구조물의 계류안전성 평가에 관한 실 프로젝트 적용사례를 구체적으로 보여줌으로써 향후 유사 공사에 대한 참고자료로 활용될 수 있도록 하였다.

References

- British Petroleum (BP), 2013. *Statistical Review of World Energy 2013*. BP Statistical Review of World Energy: BP.
- Chun, K.J., 2014. *2015 outlook report, ship/offshore*

recipe in 2015: reculer pour mieux sauter. KDB Daewoo Securities Research: KDB

DNV, 2013. *Stability and Watertight Integrity, Offshore Standard DNV-OS-C301*. DNV.

GL Noble Denton, 2013. *Technical policy board guidelines for moorings, GL noble denton 0032/ND*. GL Noble Denton.

Inpex Corporation, 2013a. *Annual report 2013, special report: Ichthys LNG project status*. Inpex Corporation.

Inpex Corporation, 2013b. *Ichthys Project Offshore Construction Activities*. Inpex Corporation.

J. Ray McDermott Engineering, 2000. *WAMIT-MOSES Hydrodynamic Analysis Comparison Study*. JRME.

Korea Institute of Machinery and Material(KIMM), 1998. *Development of system integration technology. KIMM report No 98-NQ-12-01-A-01-UCN2080-660.M*. KIMM. Dejeon: KIMM.

Korea Maritime Institute, 2015. *Trend and Counterplan of Offshore Platform Transportation Market. 2015 Offshore Business*, 20, pp.7-8.

Na, J.H. Sim, W.S. Lee, I.H. Moon, J.S. Kim, J.W. & Shin, H.S., 2004. FPSO quay mooring analysis in typhoon condition. *Proceedings of the Annual*

Autumn Meeting, Sancheong, Republic of Korea, 20-22 October 2004.

Oh, Y.C., 2013. Prediction on Mooring Tension & Motion Response Characteristics of a Floating Dock in Regular Waves. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(2), pp.200-206.

Park, M.K. Cho, J.W. & Chung, J.H., 2011. Quay Mooring Analysis for a Drillship in Typhoon Conditions. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Special Issue*, pp.70-74.

