

FPSO DPM 시스템 소개 및 초기 설계 시 고려사항

이충열[†] · 전광현 · 이희성 · 권용락
삼성중공업(주) 서울설계센터

Introduction of FPSO DPM System and Design Consideration Factor at the Early Design Phase

Choong Yeol Lee[†] · Kwang-Heon Jeon · Hee Sung Lee · Youngrag Kwon
Seoul Engineering Center (E&I Planning) / Samsung Heavy Industries co., LTD.

Abstract

As the offshore oil and gas upstream industry moves into deeper water, the FPSOs are the cost-effective solution. In the harsh environment such as in North Sea, station keeping and heading control capability obtained through the DP and Position Mooring (DPM) system of FPSOs play important roles to keep the safety. This paper introduces the concept, function and sub-system of the DPM systems which has been applied for the North Sea FPSOs since the late 1980s. The requirements and guidelines of some internationally recognized standards are also described, which are important to build the design basis at the early phases of the project.

Keywords : DP and Position Mooring, Thruster-Assisted Mooring, POSMOOR

1. 서론

급성장하는 신흥국의 에너지 수요 증가, 에너지부족 및 고유가 현상이 지속되면서 심해유전 개발이 활성화 되고 있다. 2006년 유가가 1배럴당 60달러이었으나 향후에는 1배럴당 100달러 이상 지속될 전망이므로 심해유전 개발은 더욱 활발해질 전망이다[1].

심해 개발 중 특히 부유식 생산 설비(Floating Production System) 시장의 경우, Oil & Gas 시장 전문 조사기관인 Infield System(UK)에서 발간한 조사 보고서에 따르면, 조사기간인 2011~2015년까지는 해양 개발 투자가 지속 상승세를 보일 것으로 예상했다. 설비투자 가운데 62%는 FPSO에 집중될 것이고 Semi-sub, TLP가 18, 11%로 뒤를 이을 것으로 예상했다. 지역별 설비투자액 비율은 브라질을 필두로 한 중남미(26%), 아프리카(22%), 북미(16%), 호주(12%), 아시아(11%), 유럽(11%)로 예상했다. Fig. 1은 구조물 유형 및 지역별 투자 비율을 보여준다[2].

IMA(국제 해운 협회)의 통계에 따르면, 전 세계에 256기의 해양구조물(기동률 96%)이 있고, 그 중 FPSO는 62%이고 Semi-Sub가 17%이다. 지난 5년간(2008~2012년) 114개의 부유식 생산 설비 프로젝트가 있었고 향후 5년간(2013~2017년) 최대 190개의 프로젝트가 있을 것으로 예상했다[3].

유럽 지역에 투입되는 FPSO는 북해(North Sea)라는 혹독한 환경(Harsh Environment)에서 원유 생산, 저장, 하역 작업을 해야 한다.

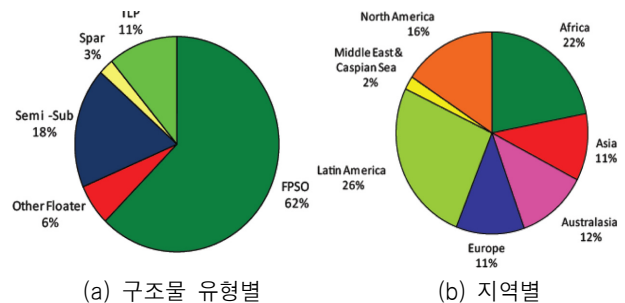


Fig. 1 '11~15년 Floating Unit투자 비율

이에 따라 대부분의 북해 FPSO는 Thruster가 적용되어 있고 Thruster를 Station Keeping Assist 및 Active Heading Control에 이용하고 있다[5].

Thruster가 FPSO에 적용됨에 따라 여러 운용이 가능해지고 이를 감시 및 제어하는 시스템이 필요한데, 이 제어 시스템을 PM, POSMOOR(Position Mooring), TAM(Thruster-Assisted Mooring), DPM(Dynamic Positioning & Position Mooring)으로 지칭한다. 모두 동일한 의미이다.

본 논문에서의 용어는 당사 실적 North Sea FPSO에서 사용했던 DPM으로 통일한다.

본 논문은 당사가 North Sea FPSO의 초기설계, FEED(Front End Engineering and Design)를 수행하면서 취득한 DPM 개념을 소개하고 기본 설계자, 특히 전계장(Electrical and Instrumentation) 설계자가 고려해야 할 사항에 대해서 정리하였다.

[†] 교신저자 : cy0905.lee@samsung.com

2. DPM 시스템 일반

2.1 정의 및 기능

DPM시스템은 DP 시스템 보다 10년 늦은 80년대 말에서야 실제 해양 설비에 적용이 되었다[10].

ISO 문서(ISO TC 67/SC7/MG5)에서는 DP(Dynamic Positioning)과 DPM 시스템을 구분하여 정의하고 있다.

DP는 Free Floating Vessel에서의 Automatic Station keeping System을 뜻하고, DPM은 Mooring line으로 고정된 Floating Vessel에서 Thruster를 보조(complementary) 장치로 이용하여 1) Mooring Tension 저감, 2) Position 보정 및 3) Heading Control 하는 시스템을 의미한다[7].

Fig. 2는 DPM 시스템의 이 주요 기능을 도식화하였고, Fig. 3은 DPM 시스템의 개념도를 도식화 하였다. Mooring 시스템과 Thruster시스템의 연동을 확인할 수 있다.

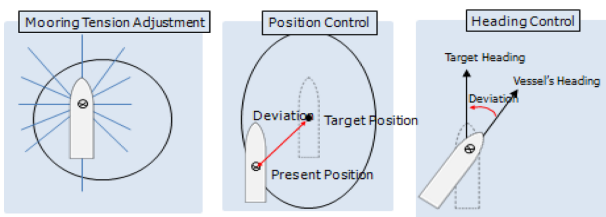


Fig. 2 DPM Main Function

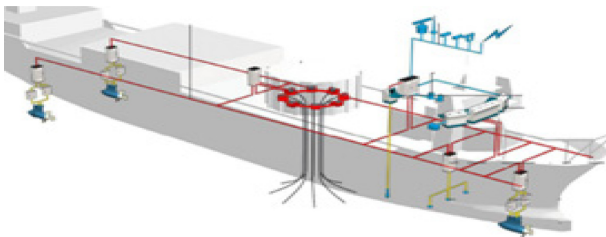


Fig. 3 DPM Schematic

2.2 Case Study

시스템 초기 설계에 있어 사례 조사는 중요하다. North Sea FPSO에 적용되었던 DPM시스템의 최근 사고사례는 다음과 같다.

1) 2011년 2월, UK Aberdeen 연안에 있던 Maersk사의 Gryphon Alpha FPSO(54만 배럴)의 DPM 시스템 오작동, 사고 발생[8], Fig. 4에 도식화하였다.

- Stormy Condition에서 원유 생산 작업 중 Mooring Line1개가 Fail되었으나 이를 DPM 시스템에서 Detection 실패, Position, Heading 오류, 그 과정에서 3개의 Mooring Line이 추가 Fail 및 Thruster 과동작으로 Blackout 발생. 정위치에서 180m Offset
- 인명피해는 없으나, Umbilical Line 손상 등 Sub-sea infrastructure 피해 금액 약10억불

Mooring Assistance 및 Heading Control이 함께 Fail된 사례로 Mooring Monitoring과 Thruster Control의 원활한 연동의 중요성을 대변한다.

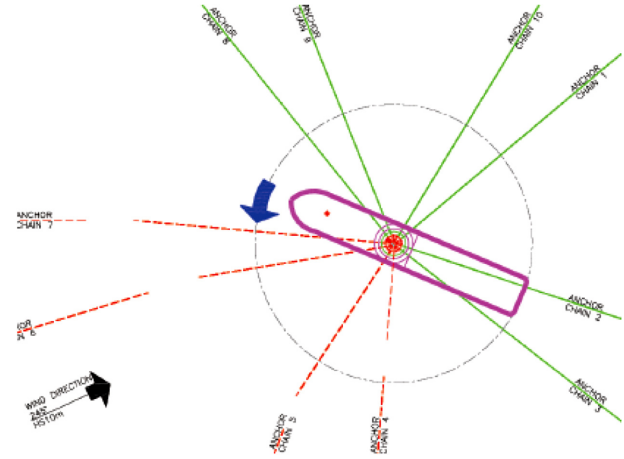


Fig. 4 Gryphon FPSO Case Study

2) 이 사고로 같은 해 UK field에 투입 예정으로 개조 중이던 BW Athena FPSO도 Power System 및 Heading Control system에 Redundancy 추가하는 설계 변경 건으로 납기가 지연되었다 [9].

3. DPM 시스템 구성

3.1 Topology

DPM시스템 설계의 Topology는 Fig. 5와 같다. 센서부, 제어부, 구동부는 아래와 같다.

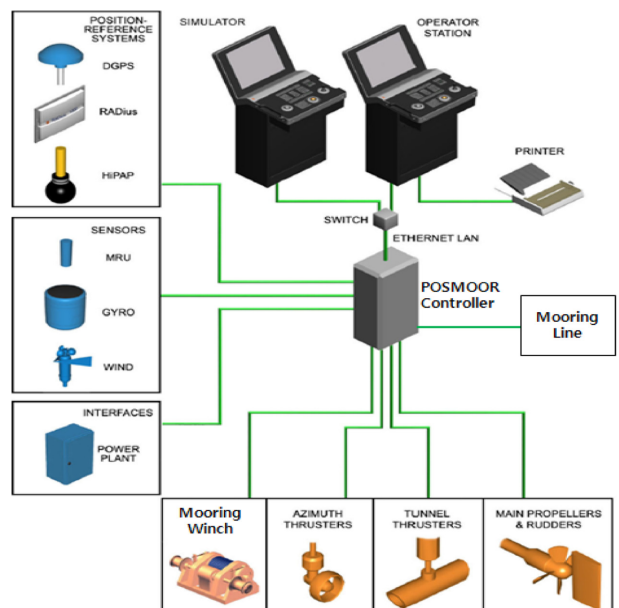


Fig. 5 DPM System Topology

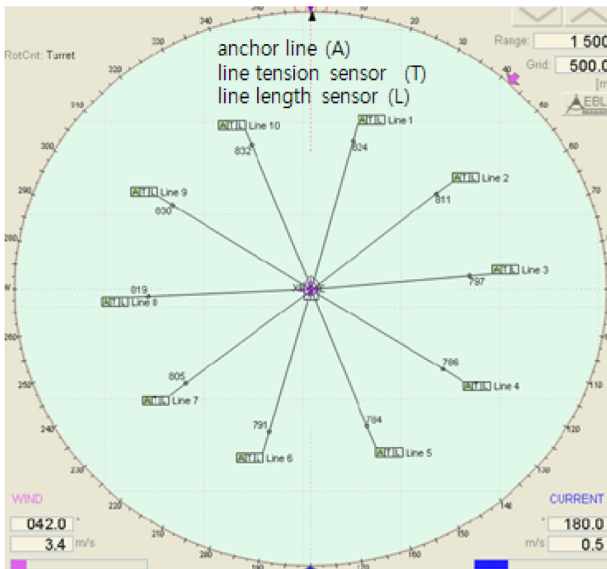
3.2 센서부

DPM시스템 기능에 필요한 Parameter 측정

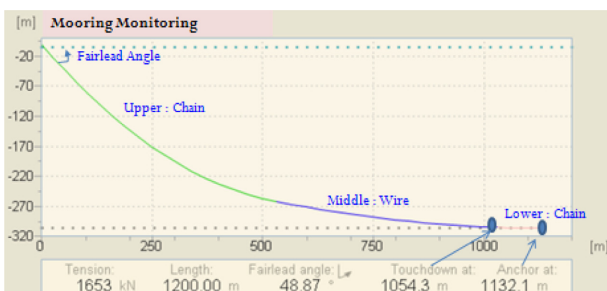
3.2.1 Mooring Monitoring

DPM첫 번째 기능 중 Mooring Tension 저감 기능을 위해서 Mooring Tension Parameter를 얻어야 한다. Mooring Winch/Windlass, Fairlead/Chain Stopper에서 Tension을 측정한다. Tension 값이 Setting point 이상, 이하의 경우 High/Low Alarming을 하고 급격히 떨어지는 경우 Line Break로 간주한다.

Fig. 6은 Mooring Line이 Monitoring된 상태이다. Anchor Position, Line Length, Tension, Angle 등의 정보를 표시한다.



(a) Vertical Axis



(b) Horizontal Axis

Fig. 6 Mooring Monitoring System

3.2.2 Position Reference System

Position Control을 위한 Position Parameter는 하기 시스템에서 측정된다.

- Satellite (GPS)
- Differential Absolute and Relative Positioning Sensor

(DARPS)

- Microwave Positioning (Artemis)
- Relative Positioning (Radius)
- Hydro Acoustic Sensor, etc

3.2.3 Motion Reference Unit

FPSO의 Motion(Yaw, Rolling)으로 인해 Position 값이 달라지게 되는 데 이를 보상하기 위해 MRU를 적용한다.

3.2.4 Heading Sensor

Heading Control을 위한 Vessel Heading Parameter는 Gyro Compass로 측정된다.

3.2.5 Wind Speed, Direction Sensor

외력을 측정하기 위해 Wind Sensor가 사용된다.

3.2.6 Electrical Power Monitoring

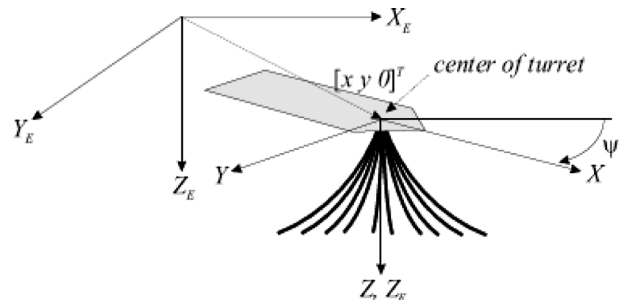
FPSO 전력 계통에서 가용한 전력을 계속하여 Thruster Power의 Limit value로 사용한다. 배전반 상태도 계속한다.

3.3 제어부

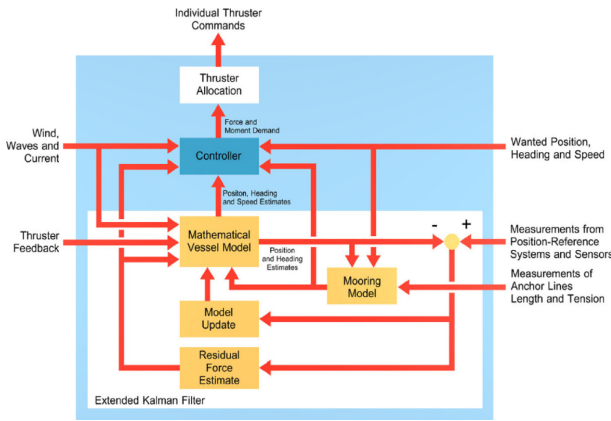
제어부는 DP 시스템과의 주요 차이점만 명시한다. 외력(Wind, Wave, Current), 시스템 Observer인 Extended Kalman Filter 및 Thruster allocation에서 Electrical Power Limit (PMS) 고려 방식 등은 유사하다.

DPM Vessel 제어를 위한 Modeling 및 Control Block Diagram은 Fig. 7 (a), (b)과 같이 기존 DP Vessel의 Modeling에서 Mooring equation을 추가 Constraint 로 고려한다[10].

초기에는 Mooring Tension을 Winch의 Load Cell 등에서 측정되는 실시간 Data를 DPM 제어기에 이용했으나, 오차가 커서 어려움이 많았다. 최근 개선된 방법으로는 Mooring Line 양단의 거리(Vessel Position과 Anchor Position 사이) 및 Mooring Line이



(a) Coordination



(b) Control Block Diagram

Fig. 7 Simplified Modeling

늘어지는 패턴 및 하중을 이용하여 Mooring Tension 을 계산하는 방식을 사용하여 제어기에 사용한다[7].

3.4 구동부

Thruster는 DPM 제어기의 output command를 받아 Vessel의 2차원 평면운동(Surge, Sway, Yaw)을 통해 FPSO의 Position 및 Heading을 변화시키는 구동 장치이다.

FPSO가 Weathervaning을 할 수 있는 경우 Thruster는 Normal Operation Condition에서는 작동 하지 않고, Extreme Condition에서 Mooring Tension을 저감을 위해 반력을 생성하거나, Offloading 및 Helicopter Landing 시와 같이 Heading이 고정되어야 하는 경우 사용한다[11].

4. International Standard

FEED 설계에 있어 Reference Document는 시스템 설계의 Basis가 되기 때문에 초기에 선정을 해야 한다. 본 논문에서는 DPM 시스템 설계에 대한 세부 요구사항이 명시된 아래 문서를 소개한다.

- DNV OS E-301, Position Mooring [11]
- OGUK Guideline for Tandem Loading [6]
- IMO MSC Circular 645, Guideline for vessels with DP system [12]

4.1 DNV OS E-301

DNV OS (Offshore Standard) E-301은 Mooring 시스템에 대한 Classification규정이다.

Mooring 설계에 대한 아래 세 가지 상황을 고려하도록 명시되어 있다.

- Ultimate Limit State : Extreme 환경 고려
- Accidental Limit State : Line Failure, Blackout 고려

- Fatigue Limit State : Cyclic Load 고려
- 또한 Mooring이 Thruster-Assistance를 받는 방법에 따라 Notation을 아래 Table 1과 같이 나눈다.

Table 1 DNV POSMOOR Notation

Notation	설명
POSMOOR	Passive position mooring system
POSMOOR-TA	Thruster assisted mooring system dependent on manual remote thrust control system
POSMOOR-ATA	Thruster assisted mooring system dependent on automatic remote thrust control system

Passive Mooring은 Thruster없이 Station Keeping을 하는 시스템이다. 만약 Mooring설계 시 Thrust의 Assistance가 있어야 Station Keeping이 가능하다면 Thruster Power, Control system은 반드시 Redundancy를 확보해야 하고, 이에 대한 FMEA report도 필요하다.

반대로 Passive Mooring 혹은 Blackout을Worst single failure로 정하고 Mooring를 설계한 경우에는 Thruster system의 redundancy 확보가 의무 사항이 아니다. 또한 Single Failure의 결과로 Position 변경 및 Mooring Line Tension 증가를 관찰하는 FMEA Report도 필요 없다[11].

4.1.1 DNV POSMOOR 적용의 경우

Passive Mooring 장비(Anchor, Mooring Chain, Steel Wire Rope, Windlass, Winch, Tension Measurement 등) 만이 DNV의 검증 범위이다.

전계장 연관 사항은 아래와 같다.

- Winch, Windlass에 2개의 Load Cell 설치하여 Continuous Monitoring
- Logging Sampling은 1초 / 24시간 Record

4.1.2 DNV POSMOOR-TA 적용의 경우

Manual Remote Thruster Control에 관련된 장비가 DNV의 검증 범위이다.

- Mooring Line 설계 관련, Thrust의 70%만 고려하도록 명시. (Manual Control일 경우 Thruster 기능을 100% 사용 못 한다는 가정) Thruster Single Failure도 고려하여 Mooring line 설계
- Thruster에 전력 공급 시스템 필요(Auto PMS, Power Distribution, Generator Capacity, UPS, PMS 등)
- 각 Thruster의 Manual Remote Control 필요(Start, Stop, Azimuth Pitch, Speed), Emergency Stop 필요
- Mooring Line Tension, Length가 함께 Display 되어 함

- Joystick System 필요. 모든 Thruster를 Control 할 수 있어야 함. 1개의 Gyro 센서와 interface 통해 Auto Heading 가능해야 함.

4.1.3 DNV POSMOOR-ATA 적용의 경우

Automatic Remote Thruster Control에 관련된 장비가 DNV의 검증 범위이다. 위의 4.1.2 사항은 기본적으로 적용되고 아래 사항 추가된다.

- Mooring Line 설계 관련 Thrust의 100% 고려
- Automatic Thruster Control 추가
 - Mooring 시스템이 함께 고려되어 최적화된 Thrust 계산할 수 있는 Control Model 필요.
 - Position Monitoring 및 Alarm 필요
 - Mooring Line Tension Alarm 필요
 - Online Consequence Analysis S/W 필요(실시간 Control, Monitoring과 병행하여 Mooring Line 및 Thruster가 Single Fail되었을 시, 타 Mooring Line Tension 증가 수준 및 Position 변동을 계산)
 - Simulation 시스템 필요(임의로 Mooring Line, 외력, Failure 등을 변경했을 시 Motion, Line Tension의 변동 출력, 별도 컴퓨터 구성은 Option)
 - Auto Logging 필요(Mooring Line, Thruster, Position, Heading Deviation, Power Consumption, Failure 등)
 - Self-Monitoring 필요(Automatic Control system와 연관 시스템의 상태를 측정)
 - Control System에 UPS Power 공급 필요(Battery Duration 15분)

4.2 OGUK Tandem Loading Guideline

North Sea에서의 원유 하역 작업은 두 Vessel(FPSO 및 Shuttle Tanker)이 근접거리에서 작업을 하기 때문에 위험성(Risk)이 높은 작업으로 실제 이와 연관된 충돌, Heading fail, 또한 이로 인한 원유 유출 사고가 많다[4].

이에 영국 Offshore Oil & Gas 산업 협회(OGUK)에서는 Offloading 안정성을 높이기 위한 설계에 대한 Guideline을 제시했다. Fig. 8은 해상에서 원유 하역 작업시 Typical Heading Limit 및 Position limit를 보여 준다[6].

OGUK Guideline에는 FPSO와 Shuttle Tanker에 관련 사항을 정리했는데, 그 중 FPSO DPM 관련 사항은 아래와 같다.

- FPSO는 Active Heading Control 기능 필요
- 하기 장비에 IMO DP Class 2레벨 기준 적용
 - Power Generation, Distribution
 - Thruster
 - Control System(Duplex 시스템 필요)
 - Sensor System(3가지 종류의 Position 센서 필요하며 최대한 Stern에 설치, 3 Gyro 필요)

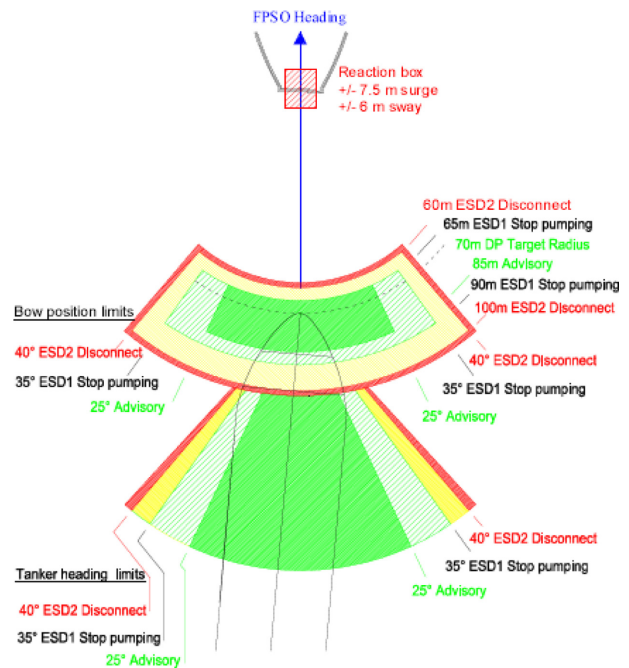


Fig. 8 Typical Offloading Operating Limit

4.3 IMO MSC Circular 645

FPSO에 IMO DP Class 2를 적용한다는 의미는 Heading Control 관련 장비의 Redundancy를 DP 2 수준으로 확보하는 것을 의미한다[6].

MSC Circular 645 내용 중 Heading Control 관련 장비 내용을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 MSC Circular 645, DP 2 Class

	System	IMO DP 2
Power	Generator & Prime Mover	2 set
	SWBD (with bus-tie breaker)	1 set A/B
	Available Power for heading after worst case failure	Yes
	Power Management System	2 set
Thruster System	Thruster & Aux	2 set
	Thruster Drive, Motor, TR	2 set
	Thruster Control Electronics	2 set
DP-Control System	Automatic Control Station	2 set
	DP Controller	2 set
	Consequence Analysis, DP Alert	To be included
	Manual Thruster control, by individual joysticks	Each Thruster
	Manual Thruster control, by a common joystick,	1 set
	Data transfer arrangements	Redundancy
	UPS (for DP Controller)	2 set
	Position reference system	3 set
	Vessel Sensor	each
	-Wind / MRU / Gyro	2 set

4.4 IMCA Guidance

IMCA는 Thruster, Generator, PMS, Power Distribution, Position Controller, Position(3개지 독립적인 시스템), Vessel Sensor의 Redundancy 확보 필요성을 명시했다. 또한 Mooring Line failure, blackout, thruster failure, gyro compass drift, position reference fail 등 single failure에 대해서 Manageable 할 것을 추천한다[14].

4.5 Other Reference

노르웨이 Oil and Gas 협회(Norwegian Oil&Gas, 구 OLF)는 DPM관련 별도의 문서는 없이 FPSO Lessons Learned을 홈페이지에 공지[15].

- FPSO는 Thruster를 통한 Heading Control 필요
- 투입되는 Field의 Environment를 고려하여 FPSO의 Heading Capability가 충분하도록 적절할 Thruster 용량 및 Generator 결정
- Steel 구조물이 Position 센서를 막지 않도록 센서 배치 필요. Artemis, GPS, UHF는 signal 방해를 막기 위해 Stern에 설치
- Hydro Acoustic Sensor는 Maintenance 비용 큼. relative position 센서로 대체 필요

5. 결론

당사가 North Sea FPSO 초기 설계(FEED)를 수행하면서 취득한 DPM 시스템에 대한 지식을 소개하였다.

DPM는 Thruster 시스템, Mooring 시스템, Offloading 개념이 결합된 시스템으로 Internal, External Interface가 많은 시스템이기에 정확한 개념 파악이 있어야 설계 혼돈을 줄일 수 있다.

그를 위해 본 논문에서 DPM 시스템 정의와 주요 기능을 다루었고, 실제 타 프로젝트 사고 사례를 통해 설계 시 주의 사항도 소개하였다.

시스템 구성 요소를 센서부, 제어부, 구동부로 나누어 설명하였고, 설계의 Basis가 되는 Reference Document를 선정하여 문서에서 Guide하는 설계 고려사항도 설명하였다.

참고 문헌

배영일, “해양플랜트 산업의 변화와 기회” 삼성경제연구소 CEO 인포메이션 Dec 2012.

Infield System, “Floating Production Systems Market Report to 2015”, Aug 2011.

International Maritime Associates “Assessment of the outlook for FPSOs, Semis, TLPs, Spars, FLNGs, FSRUs and FSOs”, March 2013.

Kim Diederichsen, Remora Inc “Qualification of a DP-Based FPSO Offloading Vessel”, Offshore Technology Conference, May 2012.

Operational safety of FPSOs: Initial summary report, UK HSE Offshore Technology Report, 2000.

OGUK (UKOOA) Publish “Tandem Loading Guidelines” March 2011.

Chris Jenman, Global Maritime “Mixing Dynamic Positioning and Moorings” Dynamic Positioning Conference, Nov. 2005.

Angus Lugsdin “Real-Time Monitoring of FPSO Mooring Lines” Sea Technology, 2012.

“Athena FPSO delayed”, Upstream, Dec. 2011, <http://www.upstreamonline.com/live/article1229009.ece>.

Ole Morten Aamo “Controlling Line Tension in Thruster Assisted Mooring Systems”, Control Application, IEEE International Conference, Aug. 1999.

DNV Offshore Standard E-301.

IMO MSC Circular 645, Guideline for vessels with DP system.

Chris Jenman “FPSO and Shuttle Tanker Positioning”, Dynamic Positioning Conference, Oct. 2006.

IMCA M 159 “Guidance on thruster assisted station keeping by FPSOs” Dec, 2000.

Norsk olje & gass, “FPSO Lessons Overview” <http://www.norskoljeoggass.no/en/FPSO-Experience-Transfer/FPSO-Lessons-overview/>.



이충열

전광현

이희성

권용락