기술보고

해양구조물 설계를 위한 수치해석 및 모형시험에 대한 고찰

나정헌 (현대중공업)

1. 서 론

전 세계적으로 석유나 천연가스 등의 화석 에너지에 대한 수요가 계속 늘어나고 있고, 고유가 현상도 지속될 것으로 전망됨에 따라 심해 유전 개발이 더욱 활발해질 것이다. 이에 따라 해양구조물의 개발은 더욱 확대될 전망으로 FPSO, FLNG, FSRU, Semi-submersible, Drillship등이 개발되어 현재 국내 조선소에서 건조 중에 있다. 이러한 해양구조물에 대한 설계기술은 일반상선 설계와는 다르게 특정 해상에서 25년 동안의 wind, wave, current에 견디도록 설계되어야 한다.

1.1 FLNG

본 기술보고에서는 FLNG FEED 프로젝트 진행 시 운동성능, 터렛계류 및 하역 관련 해양구조물 설계 시 고려해야 하는 수치해석 및 모형시험 기술에 대하여 정리하였다. 이러한 수치해석 및 모형시험법 정립을 통하여 FEED 업무 초기 단계에서부터 대 선주 기술대응을 지원하고 또한 모형시험을 위한 시험조건 결정 및 설계인자 결정에 적용될 수 있다. 이러한 결과들은 해양구조물 설계 시 반영되어 효율적인 해양구조물 설계업무 진행을 가능하게 해준다.

1.2 Drillship

심해 유전 개발을 위해서는 초기 탐사 및 시추를 위한 광구 개발을 위하여 각종 시추 장비들이 사용된다. 과거에는 반잠수식 시추선이 많이 이용되었으나, 심해로 가면서 점차 보다 많은 장비를 탑재할 수 있는 드릴쉽의 사용이 늘어가고 있는 추세이다. 드릴쉽은 특정 위치에서의 시추작업을 위하여 안정된 위치유지 성능을 필요로 하며 이를 위해 여러 개의 추진기를 장착하는 것이 보통이다. 위치유지 성능은 드릴쉽의 작업성을 결정짓는 중요한 요소이며 평가하는 기술은 매우 중요하다. 본 기술보고에서는 심해 드릴쉽의 동적위치유지(Dynamic Positioning, 이하 DP) 성능 평가방법에 대해 기술하였다.

2. FLNG

2.1 Wind tunnel test

일반적으로 FLNG와 Drillship과 같은 해양구조물은 일반 상선에 비해 상부구조물이 커 풍하중의 영향을 많이 받게 된다.

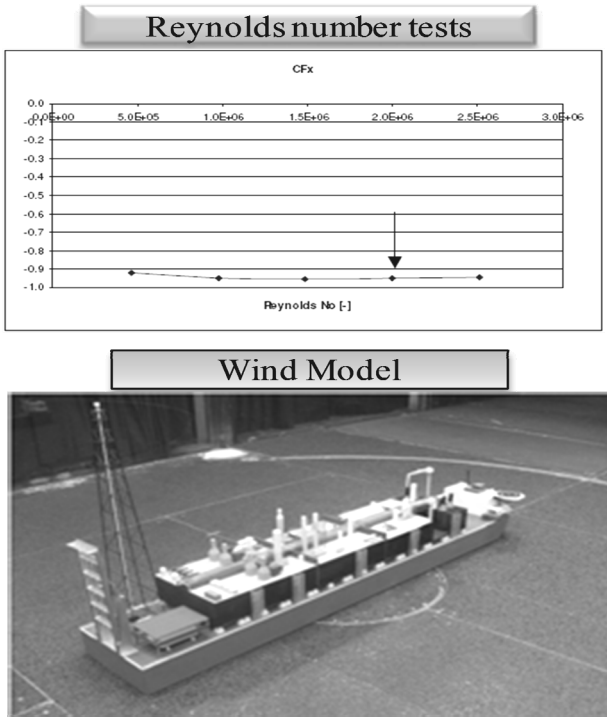

그림 1. Reynolds number & wind tunnel test

따라서 그림 1, 2에서와 같이 해양구조물에 대한 wind tunnel test와 CFD를 이용한 수치해석은 거의 필수적으로 수행되어져야 한다. 최근에는 CFD와 같은 수치해석 기술의 개발로 인하여 수치적으로 계산이 가능하나 대부분 실험으로 수치해석 결과 값을 검증하고 있다. 풍동실험 시 고려해야 할 사항으로 아래와 같다.

1. Loading condition:
   - Full loaded condition
   - Ballast condition
2. Environmental condition
   - Reynolds number check
   - 0°~360°, step: 10°

상기의 wind tunnel test 및 CFD 해석을 통하여 다음의 6가지 항목을 계측하고 계산한다.

1. Wind load measurement
2. Current load measurement
3. Wind heeling moment
4. Wind tunnel tests focussing on the tandem offloading operation(shielding effects)
5. Flow visualization
6. Flow field around helideck for helicopter operations

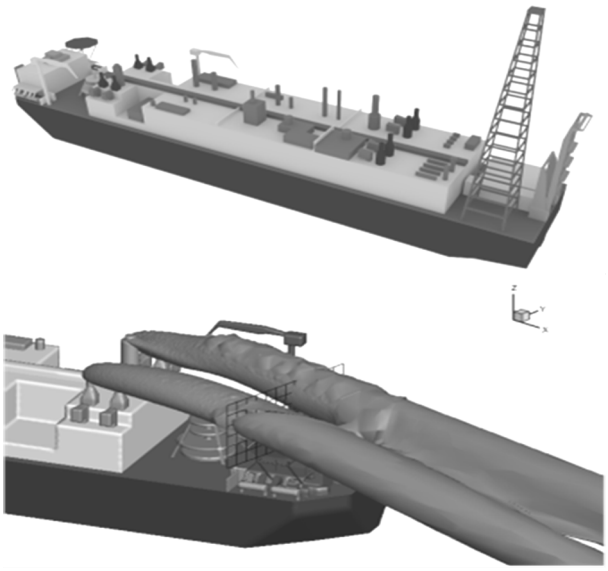

그림 2. CFD simulation

풍동시험을 통하여 계측된 wind force와 current force에 대한 계수 추정은 OCIMF에 나와 있는 다음의 식을 이용하여 무차원화 시키며 이때 x, y 방향으로의 projected area인 A_L, A_T는 일반적으로 Yard에서 계산하여 제공한다.

$F_x = \frac{1}{2}\rho C_x A_T V^2$[kN], surge wind force

$F_y = \frac{1}{2}\rho C_y A_L V^2$[kN], sway wind force

$M_{xy} = \frac{1}{2}\rho C_{xy} A_L L_{BP} V^2$[kNm], yaw wind moment

ρ= Air density[1.025 kg/m^3]

A_T= Transverse projected area[m^2]

A_L= Longitudinal projected area[m^2]

V= Wind speed[m/s]

2.2 Sea-keeping analysis and test

통상적으로 속도를 가지는 선박에 대해서는 그 선박이 어느 정도의 속도를 낼 수 있는지에 대한 저항, 자항 모형시험이 중요하지만 한 해역에서 25년 이상 바람, 조류, 파와 같은 환경하중을 견뎌야 하는 해양구조물에 대해서는 운동성능 평가가 필수적이다. 해양구조물의 운동성능 평가는 일반적으로 그림 3, 4 와 같이 수치해석과 모형시험을 모두 수행하며, 일반적으로 수치해석을 수행하여 그 구조물의 응답특성을 파악한 후 모형시험을 통하여 검증을 한다.

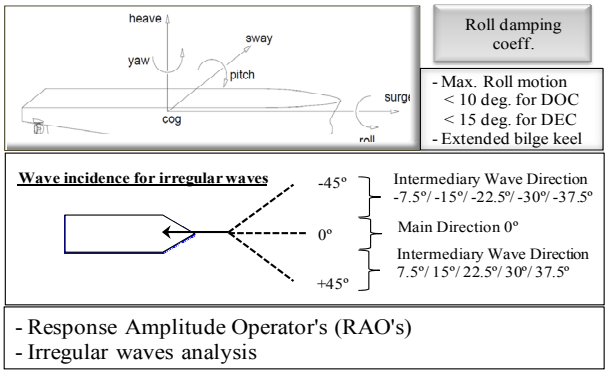

그림 3. Sea-keeping analysis

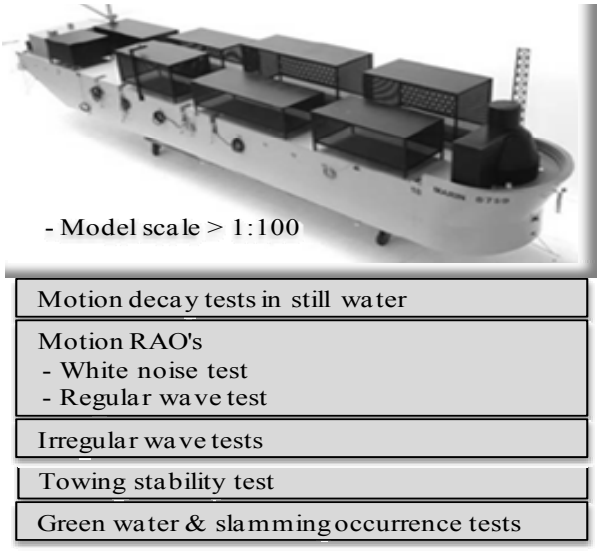

그림 4. Sea-keeping test

운동해석 시 일반적으로 사용되는 loading condition은 fully loaded condition, ballast condition, towing condition 이며 선주의 특별한 요구사항이 있을 시 그에 따른 loading condition을 추가하여 수치해석을 수행한다. 환경하중의 경우 해양구조물이 운용되는 해역에서의 metocean data를 이용하여 그 입력값을 결정한다.

일반적으로 해양구조물 중 floater인 경우는 20초 이상의

횡동요 주기를 가지도록 설계를 하여야 하며 횡동요 주기를 계산하는 간단한 식을 아래와 같이 나타내었다.

$$T = 2\pi \frac{k_{xx}}{\sqrt{g \cdot GM}}$$

k_{xx} = Radius of gyration[m], g = 9.81[m/s^2]

GM = Metacentric height[m]

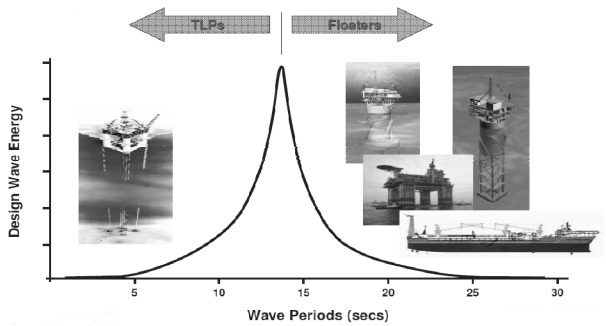

그림 5. Response characteristics

해양구조물의 초기설계 시 그림 5에서 보는 바와 같이 특정 해상상태에서의 파주기를 벗어나게 해야 한다. 즉 해양구조물의 주기가 파주기가 일치하지 않게 설계해야 된다.

해양구조물 설계 시 일반적인 유의사항에 대해 다음과 같이 간략히 정리하였으며 해양구조물의 특성에 따라 달라질 수 있다.

- 선폭이 작을수록 횡동요는 작아짐
- 길이가 길고 폭이 작을수록 상하동요는 작아짐
- Turret의 위치가 중심에서 멀어질수록 상하동요는 증가
- 파장과 선박의 길이가 같은 경우 max. drift force가 증가
- 길이가 길수록 전후 동요는 작아짐.

2.3 Turret mooring analysis and test

해양구조물의 계류시스템은 크게 single point mooring, spread mooring으로 구분할 수 있으며 표 1과 같다.

표 1. Mooring system for offshore structures

SPM, (Single Point Mooring)	Fixed Tower	
	CALM(Catenary Anchor Leg Mooring	
	Turret	External
		Internal
		Disconnectable
	SALM(Single Anchor Leg Mooring	
Spread Mooring		

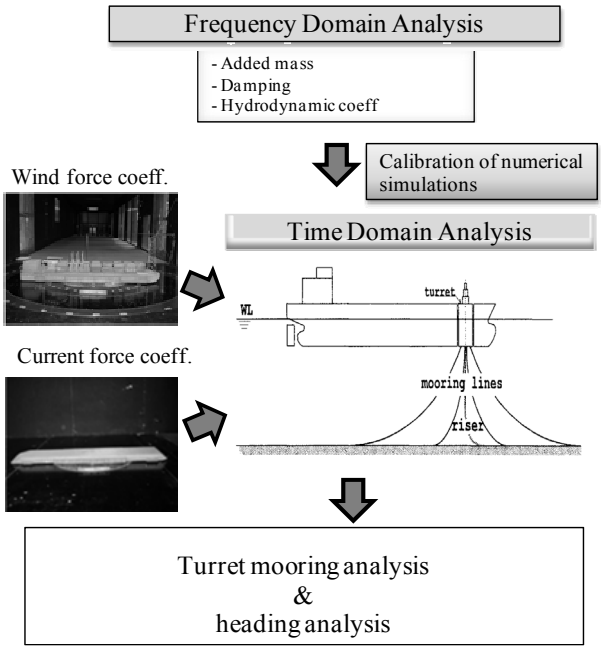

그림 6. Turret mooring analysis

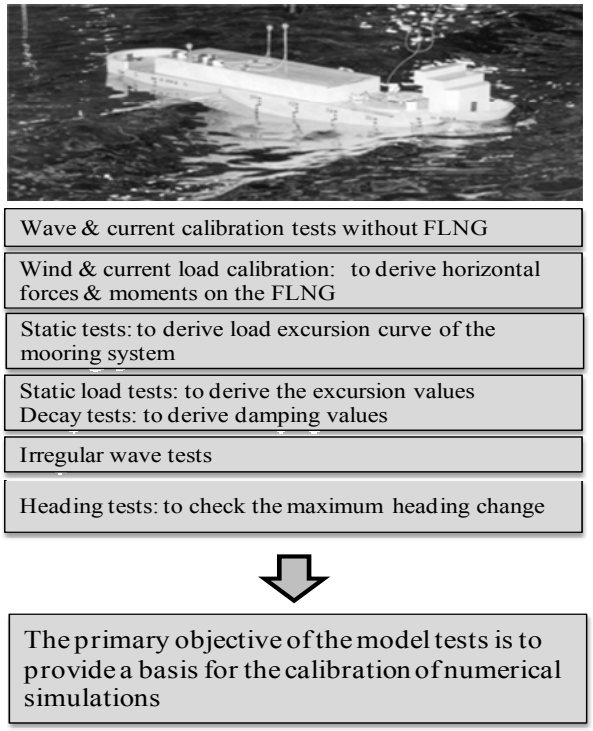

그림 7. Turret mooring test

Turret mooring system은 일반적으로 해상상태가 harsh하고 wind, current, wave의 방향이 일정하지 않은 경우에 주로 사용되며 환경하중이 가장 적게 적용될 수 있도록 weather-

vane 하게 한다. 반면에 서아프리카 주변에 설치되는 FPSO의 경우는 wind driven sea와 swell의 방향이 일정하여 spread mooring이 일반적으로 적용된다.

Turret mooing에 대한 실험을 통하여 수치해석 결과를 검증하고 보정하게 된다. 테스트 시 계류라인에 대한 intact, damaged condition인 경우 아래와 같은 max. allowable excursion limit는 일반적으로 아래와 같다.

- ✓ Intact condition: 7%~8% of water depth
- ✓ Damaged condition: 9%~10% of water depth

2.4 Offloading analysis and test

FLNG는 일반적으로 LNG, LPG의 경우 side-by-side를 이용하고 CONDENSATE의 경우 tandem 방식으로 offloading을 수행한다. 일반적으로 offloading시 downtime analysis를 통하여 계산한 결과는 93% 이상의 offloading이 가능해야 한다.

Offloading 관련 수치해석은 그림 8에서와 같이 주파수영역 해석으로는 정확한 결과를 얻기 힘들기 때문에 시간영역 해석에서 수치해석이 수행하게 된다. 수치해석 시 LNGC가 FLNG에 offloading을 위하여 접근 또는 offloading시의 환경조건은 일반적으로 아래와 같다.

1. Approach 시 : Hs 〈 4.5 m w/ wind and current
2. Offloading 시: Hs 〈 5.5 m w/ wind and current

Offloading test는 그림 9에서와 같이 offshore basin에서 일반적으로 수행되어지며 대표적인 연구기관으로는 네덜란드의 MARIN, 노르웨이의 MARINTEK이 있다. 현재 대부분의 해양구조물에 대한 모형시험은 위의 2곳에서 수행되어진다.

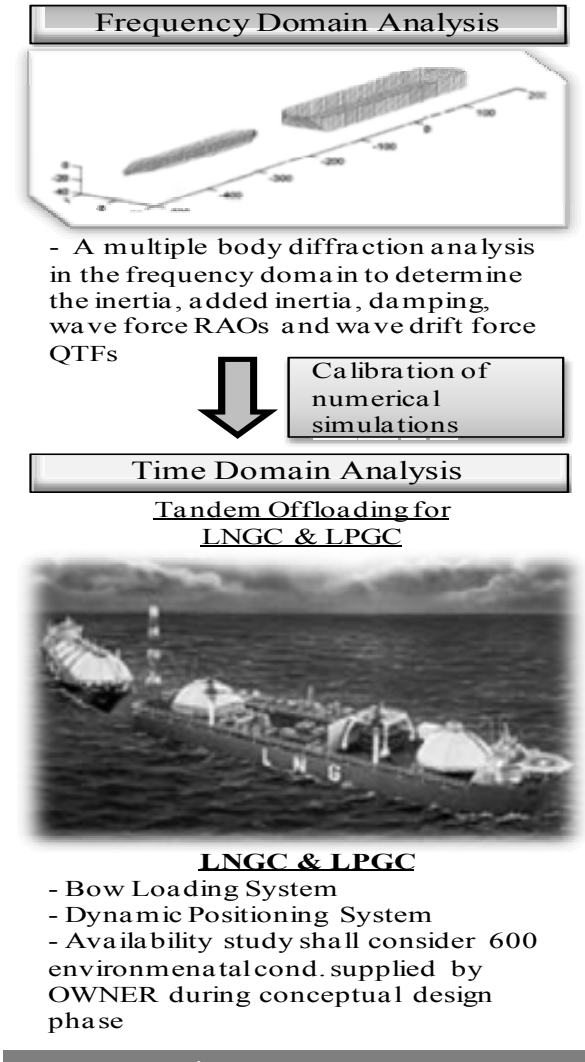

그림 8. Offloading analysis

그림 9. Offloading test

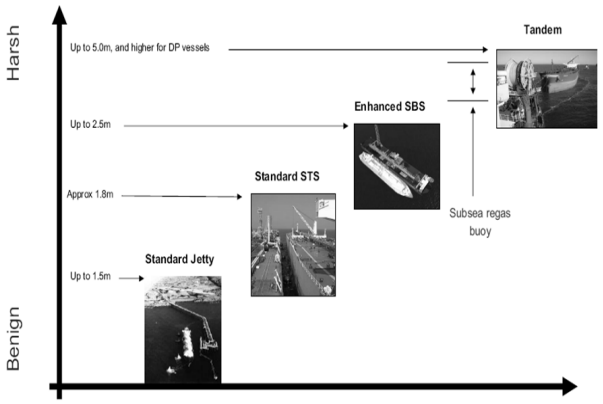

그림 10. Offloading Criteria

일반적으로 그림 10에서 보는바와 같이 side-by-side인 경우 criteria는 Hs가 2.5m, tandem인 경우 3.5m 이내에 가능하며 tandem offloading인 경우 LPGC 또는 LNGC가 DP2 시스템을 가질 경우 5m까지 가능한 것으로 알려져 있다.

3. Drillship

DP 시스템의 성능은 주어진 추진기들을 이용하여 임의의

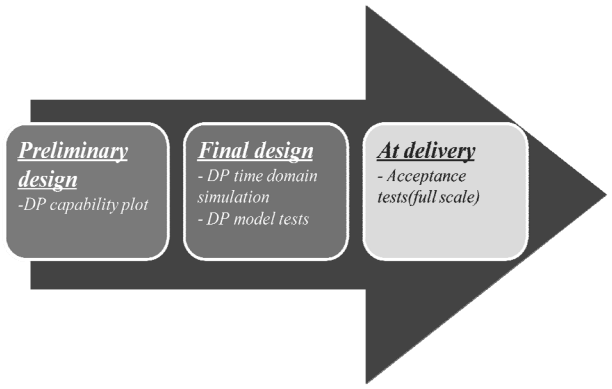

그림 11. Design of DP system

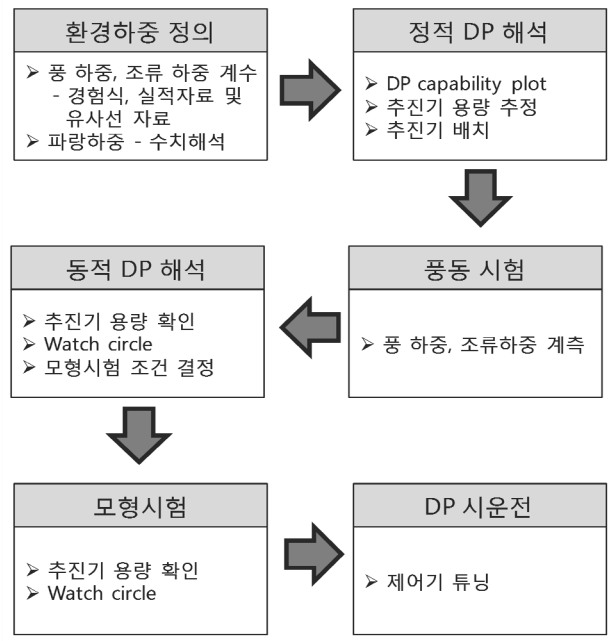

그림 12. Procedure of DP system design

해상 환경 조건하에서 얼마나 원하는 위치나 방향을 잘 유지할 수 있느냐로 평가할 수 있다. 작업해역의 바람, 조류, 파도 등에 의한 설계 환경조건이 미치는 환경하중에 대응하는 충분한 추력을 낼 수 있는 DP 시스템이 구성되면 위치유지가 가능하나 모자라게 되면 표류할 위험이 크다. DP 시스템의 성능 평가는 정적 DP 해석, 동적 DP 해석 및 DP 모형시험을 통해 수행하며 설계단계에 따라 아래의 그림 11, 12와 같은 순서를 따르게 된다.

DP 시스템이 장착된 해양구조물의 안전한 작업을 위하여 해양구조물이 원하는 위치에서 벗어난 정도를 통상 그림 13과 같이 Green, Yellow, Red zone으로 구분한다.

- Green (Normal Operational Status):
  시추 가능 영역
- Yellow (Degraded Operational Status):
  시추 장비 철수 준비 및 경계
- Red (Emergency Status):
  긴급사태에 따른 시추 장비 분리 및 대피

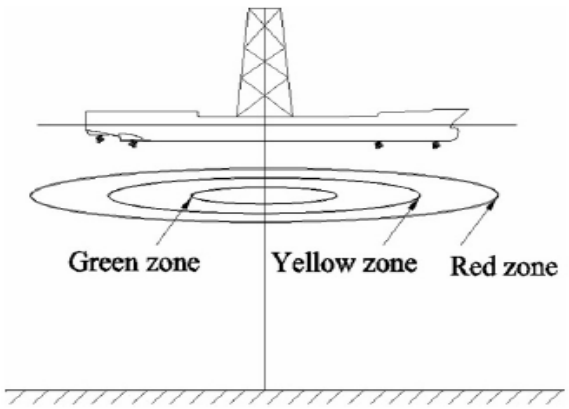

그림 13. DP alert system

이때 green zone의 반경을 통상 watch circle이라고 부르며 일반적으로 작업 수심의 3%~5% 값을 사용한다.

3.1 정적 DP 해석

초기 설계단계에서는 환경외력과 추진기 추력의 정적인 평형상태를 조사하여 간단하고 빠르게 추진기의 용량을 평가한다. 정적 DP 해석에서는 주어진 환경조건에 대한 환경 외력의 정적 성분을 추정하고 그 하중을 견디면서 구조물이 원하는 위치와 방향을 유지하기 위해서 필요한 추진기의 총 추력과 이를 각 추진기에 적절히 배분한 값을 계산하여 각 추진기에 필요한 추진기의 용량을 계산할 수 있다. 초기 설계단계에서는 다음과 같은 조건에서 정적 DP 해석을 수행한다.

1. Quasi static approach
- No dynamic environmental loads

- No varying wave loads
- No wind spectrum

2. No vessel dynamics

- No thruster response
- No heading variation(yawing)

3. Fixed current speed

해석결과는 통상 DP Capability Plot이라고 부르는 그림 14와 같이 표현되어 주어진 환경조건에서 어느 정도의 추력이 필요하게 되는지 쉽게 판단할 수 있도록 해준다.

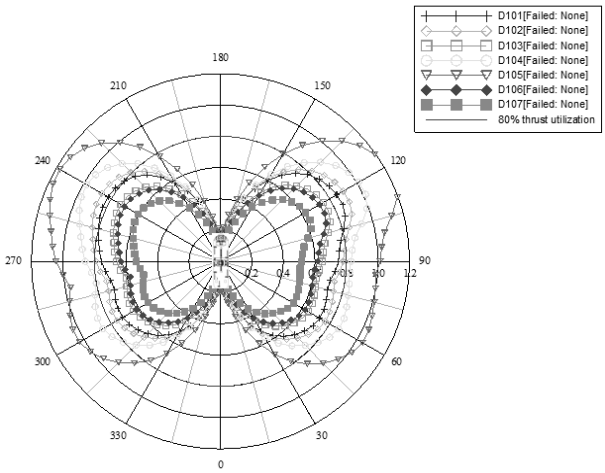

그림 14. DP capability plot

정적 DP 해석에서는 여러 동적 효과들을 고려할 수 없기 때문에 통상 20%~30%의 여유를 두는 경우가 많다. 따라서 필요한 추력이 최대추력의 0.7~0.8 정도를 넘어서면 추진기 용량이 부족하다고 판단할 수 있다. 필요한 추진기의 용량이 최대 추진기 용량에 비해서 작은 영역, 즉 DP가 가능한 환경외력의 방향이 얼마나 되느냐를 확인할 수 있는데 이렇게 DP가 가능한 환경외력의 방향을 heading window 또는 weather window라고 표현한다. Heading window가 크면 클수록 해양드릴쉽의 작업가능 영역이 넓어지는 것이다.

3.2 동적 DP 해석

정적 DP 해석에서는 단순히 힘의 평형만을 살피기 때문에 추진기의 용량에 대한 평가는 할 수 있으나 구조물의 거동에 대해서는 자세히 알 수 없다. 주어진 환경조건에서 실제 구조물이 어떻게 거동하고 위치유지를 위한 추진기 별 추력의 변화를 알아보기 위해서는 시간영역에서의 DP 해석을 수행해야 하는데 이를 동적 DP 해석이라고 부른다.

동적 DP 해석에서는 수평운동을 고려하게 되고, 실제 시스템과 유사하게 제어기도 포함하여 해석을 수행한다. DP 시스템은 정적인 표류와 저주파수 운동을 제어하기 때문에 시간영역에서 발생하는 파 주파수 성분이나 고주파수 잡음 성분들은 제어기에서 고려하지 않도록 설계를 해야 한다. 구조물의 운동 중 저주파수 성분만을 걸러내기 위해서 저주파수 필터나 칼만 필터(Kalman filter)를 이용한다. 칼만 필터를 이용하여 저주파수 성분만 걸러진 위치와 방향정보는 목표위치와 방향과 비교하여 그 오차에 되먹임 제어이득을 곱하는 형태로 제어기 구성을 하여 필요한 추력을 계산하게 된다. 제어기의 종류에는 여러 가지가 있지만 PID 제어기가 DP에서 가장 많이 사용되고 있다. 계산된 추력은 각 추진기에 적절히 배분해 주어 구조물이 원하는 위치와 방향을 유지할 수 있도록 한다. 이때 추력을 어떻게 배분하느냐에 따라서 전체 소요마력이나 시스템 성능에 차이가 나므로 최적의 추력 배분이 되도록 알고리듬을 잘 선택해야한다. 그림 15에는 이러한 DP feedback control loop를 나타내고 있다.

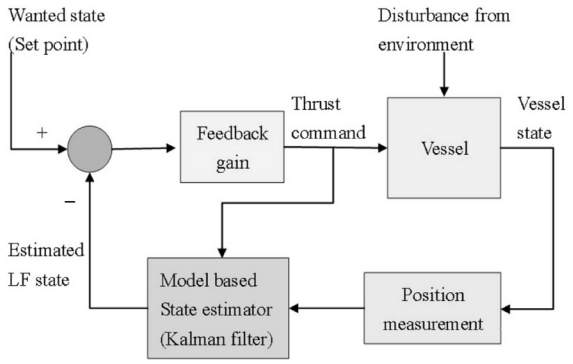

그림 15. DP feedback control loop

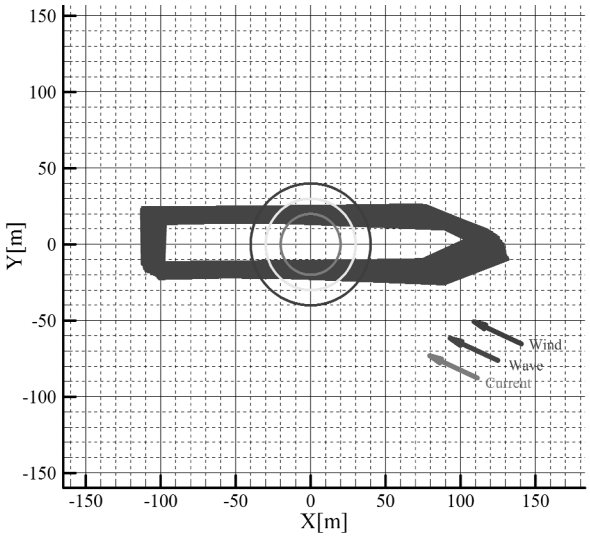

그림 16. Cumulative trajectory of Drillship

대상 드릴쉽에 대하여 동적 DP 해석을 수행한 결과의 한 예를 그림 16, 17에 나타내었다. 이 결과를 보면 시간에 따른 수평면 상의 위치와 방향 및 명령 추력을 확인할 수 있다.

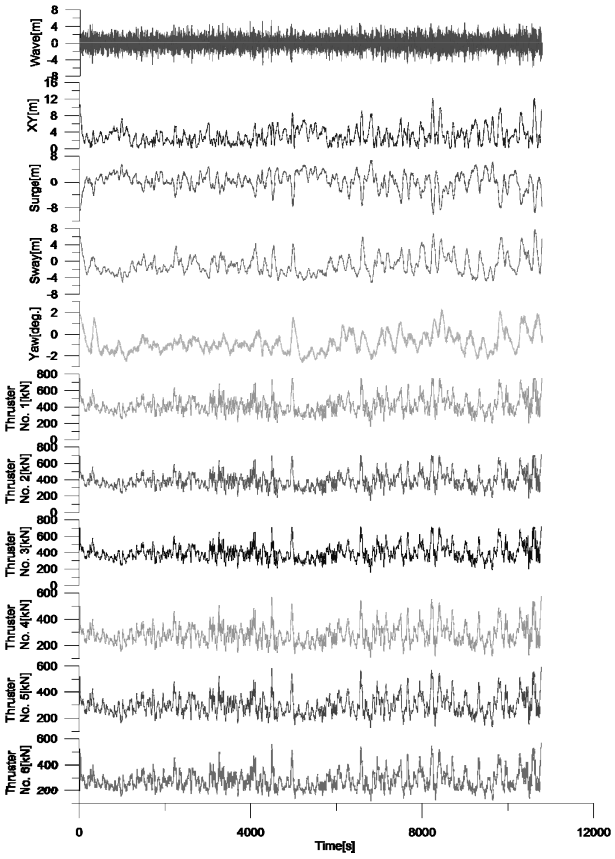

그림 17. DP time domain simulation

3.3 DP 모형시험 및 시운전

수치해석 모형의 오차와 여러 가지 가정에 따른 오차들로 인하여 아직까지 가장 신뢰할 수 있는 DP 성능 평가 방법은 DP 모형시험이라고 할 수 있다.

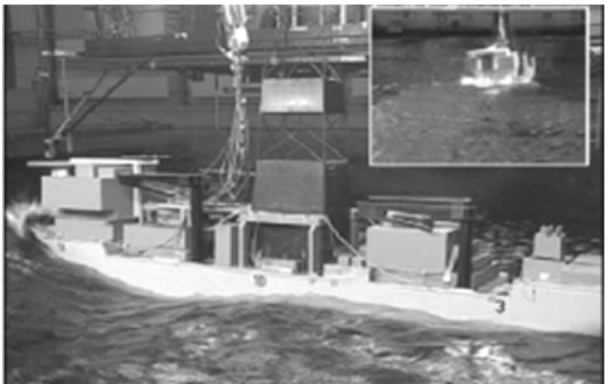

그림 18. DP model test

DP 모형시험을 위해서는 그림 18에서와 같이 해양공학 수조에서 바람, 조류, 파도 등의 환경을 재현하여 이에 따른 하중이 적절히 모사되어야 한다.

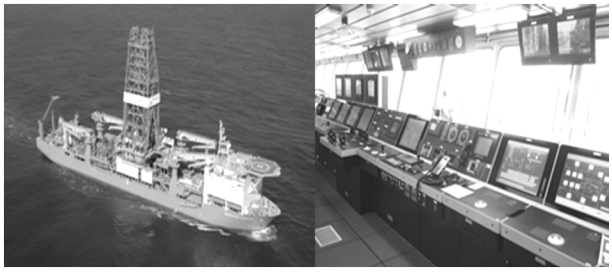

그림 19. DP acceptance test

실제적으로 DP관련 시운전은 설계 시 고려되었던 해상상태를 재현하기 어렵기 때문에 일반적으로 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 테스트를 통하여 DP 장비에 대한 시험과 DP system에 대한 보정작업을 수행한다.

4. 결 론

본 기술보고에서는 FLNG와 심해 드릴쉽의 핵심 설계기술 중 풍동하중 실험, 운동해석, 터렛 계류해석, Offloading 해석 및 DP 해석 기술에 대하여 소개를 하였으며, 향후 이러한 해석 및 실험 기술을 통하여 FLNG와 심해 드릴쉽에 대한 성능 평가를 보다 효율적으로 진행할 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

IMO, Guidelines for vessels with dynamic positioning systems, MSC/Circ. 645, 06. 06. 94, 1994.

INCA, International Guidelines for the Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels, March, 2006.

나 정 헌

■ 1973년생
■ 1997년 부산대학교 조선해양공학과 졸업
■ 현 재 : 현대중공업 조선사업본부 FLNG 전담팀/나정헌 차장
■ 관심분야 : FLNG, FPSO, FSRU, Drillship, Semi-submersible, TLP, Subsea
■ 연 락 처 : ***-****-****
■ E - mail : jhna@hhi.co.kr