

터렛 계류된 LNG-FSRU의 극한 계류 해석

이민경¹·정광호^{1,†}·박성부²·유병석³·정윤석⁴
부산대학교 조선해양공학과¹
성동조선해양²
한진중공업 티엠에스³
프랑스 선급⁴

Extreme Mooring Analysis of Turret Moored LNG-FSRU

Min-Kyeong Lee¹·Kwang-Hyo Jung^{1,†}·Sung-Boo Park²·Byeong-Seok Yu³·Yun-Suk Chung⁴
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea¹
Sungdong Shipbuilding and Marine Engineerings, Tongyoung, Korea²
Hanjin Heavy Industry R&D Center, Busan, Korea³
Bureau Veritas Korea, Busan, Korea⁴

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.

In this study, hydrodynamic and mooring analysis for LNG FSRU moored by an internal turret with 9 mooring lines are numerically performed using commercial softwares, Hydrostar and Ariane. Met-ocean combinations for screening method are taken from wave governed condition(BV Rule Note NR 493) with relative heading between wave and wind between -45° and $+45^\circ$ and relative heading between wind and current between -30° and $+30^\circ$. Extreme mooring analysis and sensitivity analysis are performed for intact and damaged (=one line missing) conditions and the parameters for sensitivity analysis are wave peak period, peak enhancement factor and line pretension. In the viewpoint of the design tension in mooring line, chain diameter is designed to satisfy safety factor for each conditions. As the chain diameter is increased from 152mm to 171mm, the designtension is reduced while the minimum breaking load is increased.

Keywords : LNG-FSRU(Liquefied Natural Gas-Floating Storage&Re-gasification Unit, 부유식 액화천연가스 저장·재기화 설비), Turret mooring system(터렛 계류시스템), Extreme mooring analysis(극한 계류해석), Sensitivity analysis(민감도 해석)

1. 서론

해양자원을 개발하는 영역이 천해역부터 심해역까지 다양해짐에 따라 각 해역의 해양환경을 극복하고 자원을 시추·생산하여 저장·운송·하역하는 다양한 부유식 해양구조물들의 적용이 확대되고 있다. 부유식 해양구조물이 해상에서의 작업성과 안전성을 확보하기 위해서는 운용 해역의 해양환경하중(파랑, 바람, 해류 등)에 대한 부유식 해양구조물의 운동특성을 파악하고 위치유지(station-keeping)성능을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구에서 사용된 LNG-FSRU(Liquefied Natural Gas-Floating Storage & Re-gasification Unit)는 해상에서 생산한 천연가스를 액화시켜 저장했다가 다시 기화시키는 목적의 부유식 해양구조물로, 내부 터렛(internal turret)과 현수선 계류시스템을 사용하여 위치를 유지한다.

터렛을 적용한 부유식 해양구조물은 계류선에 작용하는 하중의 크기를 최소화하기 위해 해양환경하중의 방향이 변함에 따라 터렛을 중심으로 회전(weather-vaning)한다. 최근에는 터렛 계류시스템을 적용한 부유식 해양구조물의 운동특성 및 위치유지성능을 파악하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. Cho, et al. (2013)은 해양환경하중의 방향이 변화함에 따라 회전하는 FSRU의 운동 특성을 파악하기 위한 실험적 연구를 수행한 바 있고, Lee, et al. (2015)은 터렛의 위치에 따른 FPSO의 운동 특성과 계류 성능을 모형실험과 수치해석을 통해 분석하였다.

계류선은 부유체의 과도한 운동과 반복적인 하중에 의한 손상이 발생할 수 있으며(Hong, et al., 2015), 페어리드(fairlead) 또는 앵커(anchor)와의 연결부위, 해저면과 마찰하는 부분이 손상이 발생하기 쉽다. 계류선에 파단이 발생하면 작업성과 안전성을 확보하기 힘들기 때문에 부유식 해양구조물의 안전성에 직결되어 있는 계류시스템을 보다 안전하게 설계하기 위한 해석 절차

를 제안하는 연구가 수행되고 있다. Lim, et al. (2009)은 서부 아프리카 해역에 설치된 FPSO의 다점 계류시스템에 대해 주파수 영역 준정적 해석법을 이용해 설계 제한 조건인 최대 장력, 오프셋, 최소 중량을 만족시키는 최적 설계 변수인 계류선의 길이와 지름을 도출하는 과정을 제시하고, 설계 변수의 변화에 따른 오프셋의 변동이 계류선의 피로 손상에 미치는 영향을 검토했다. Choung, et al. (2013)은 북대서양 해역에서 부유식 복합 재생에너지 플랫폼의 흡수와 인장각식 계류선의 인장 각도에 따른 계류선 배치를 결정하기 위한 설계 방법과 절차를 제시했으며, 결정된 계류선 배치에 대하여 단기 해상상태에 대한 계류선 장력을 설계 수명 동안의 계류선 장력으로 외삽해 피로 손상도 (fatigue damage)를 계산했다. Choung, et al. (2014)은 부유식 해상 풍력발전설비의 현수선 계류선의 길이와 체인지름을 결정하기 위해 Choung, et al. (2013)에서 제시한 설계 방법과 절차를 사용했고, 각각 100년 주기의 최대 장력과 50년 설계 수명의 누적 피로를 설계 기준으로 하여 극한한계상태(Ultimate limit state, ULS)와 피로한계상태(Fatigue limit state, FLS) 관점에서의 안전성 평가를 실시했다.

선행 연구에서는 모든 계류선이 온전한 조건(intact condition)에서 대상 해역의 해양환경자료의 장기 해석(long-term analysis) 결과에 대한 계류선의 최대 장력 및 오프셋을 계산하고 이를 피로 해석 관점에서 검토했다. 그러나 이와 같은 해석 절차를 통해서 대상 해역에서 발생할 수 있는 다양한 해양환경하중 조합을 고려하지 못할 뿐만 아니라, 파단 강도를 초과한 인장력이나 피로 하중에 의하여 계류선의 일부가 파단된 조건(damaged condition)에서 안전성에 대한 검토가 이루어지지 않는다.

본 연구에서는 보다 안전한 계류시스템을 설계하기 위해 대상 해역에서의 파랑, 바람, 해류 속도와 방향을 조합한 복합 해양환경조건을 적용해 해석을 수행한 뒤, 가장 큰 응답이 발생하는 해양환경하중 조합을 찾는 선별 방법(screening method)을 제시한다. 선별된 해양환경하중 조합에 대해서 모든 계류선이 온전 조건에서 뿐만 아니라 계류선의 일부가 파단 조건(1 line missing condition)에서의 안전성을 검토하고, 그 결과를 바탕으로 초기 설계를 수정하는 극한 계류 해석(extreme mooring analysis)을 수행한다. 그리고 해석 결과에 영향을 미칠 수 있는 설계 변수를 파악하여 온전 및 파단 조건에서 민감도 해석(sensitivity analysis)을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 초기 설계변수인 체인 지름을 증가시키는 방향으로 설계를 수정하면서 계류선 최대 장력의 변화를 살펴보고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에 사용된 소프트웨어는 내항성능해석(seakeeping analysis)을 위한 Hydrostar v7.22와 계류해석(mooring analysis)을 위한 Ariane 7이다. Hydrostar는 LNG-FSRU의 내항성능을 해석하기 위하여 주파수 영역에서 선형 및 2차 Radiation/diffraction 해석을 수행하며, 6 자유도 운동에 대한 운동응답함

수(Response amplitude operator, RAO)와 유체 동역학적 계수(부가 질량 및 감쇠 계수), 1차 및 2차 파랑 하중 등을 계산한다. Ariane7은 Hydrostar 해석 결과를 활용하여 계류시스템에 대한 준정적 해석(quasi-static analysis)을 수행하며, 해양환경 중에 놓여있는 부유식 해양구조물의 오프셋(offset)과 계류선 장력에 대한 시간 영역 시뮬레이션을 수행한다.

2.1 대상 구조물 제원 및 계류 시스템 구성

LNG-FSRU의 주요 제원(Table 1)은 Lee, et al. (2010)으로부터 인용하였다. 운동 해석을 위해 생성한 격자의 개수는 2046개이고, 이 격자계(Fig. 1)의 배수량은 200,028 ton으로 실선 배수량과의 오차가 0.15%이므로 해석에 적합하다고 판단하였다.

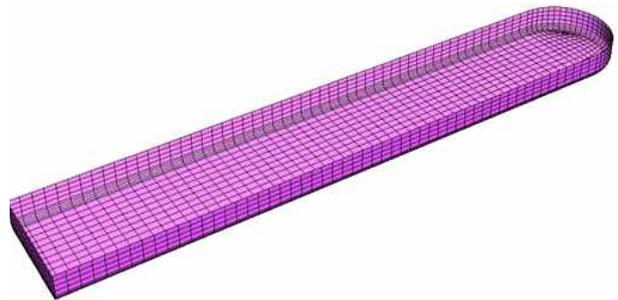


Fig. 1 Mesh generation of LNG-FSRU

Table 1 Main particulars of LNG-FSRU

Description	Magnitude
Length overall	317.75 m
Length between perpendicular	315 m
Breadth	53 m
Depth	28 m
Draft	12 m
Displacement	200,331 ton
Longitudinal center of gravity from A.P.	142.26 m
Vertical center of gravity from keel	16.71 m
Mass radius of gyration in <i>x</i> axis	19.08 m
Mass radius of gyration in <i>y</i> axis	78.75 m
Mass radius of gyration in <i>z</i> axis	78.75 m
Transverse wind area	2,283.58 m ²
Longitudinal wind area	9,291.95 m ²

LNG-FSRU는 LNG의 적하역시 비교적 가혹한 해양환경조건에 놓여있더라도 Weather-vaning을 통해 안전을 확보하기 위해

서 터렛 계류시스템을 적용하고 있다. LNG-FSRU에 설치된 터렛은 수평 방향 무게중심으로부터 선수 방향으로 $0.45L_{pp}$ 만큼 떨어진 지점에 위치하고, 터렛 페어리더(fairlead)에는 총 9개의 계류선이 연결되어 있다. Fig. 2는 3개의 계류선이 2° 간격으로 배치되어 1개의 다발을 이루고, 3개의 다발이 120° 간격으로 배치되는 계류 레이아웃(mooring layout)을 나타낸다. 전체 계류선의 배치와 제원은 Cho, et al. (2010)을 참고해 구성했으며, 지름이 152 mm인 R4K4 Studless 체인의 제원은 Table 2에 상세히 기술하였다.

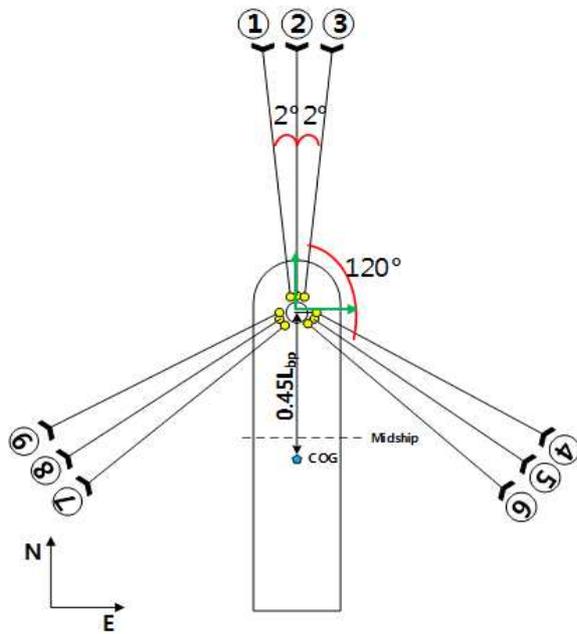


Fig. 2 Schematic drawing of mooring layout

2.2 해석 조건

운동 해석에 사용된 파 주파수 영역은 0.05 rad/s부터 2.0 rad/s까지 0.05 rad/s 간격으로 총 40개이고, 파향은 0° 에서 180° 까지 30° 간격으로 총 7개이다. 횡동요(roll) 운동 감쇠계수는 임계 감쇠 계수의 7%를 적용하였다.

계류 해석을 위해 Cho, et al. (2010)에서 모형실험과 수치해석에 사용한 해양환경조건을 참고하였다. Table 3은 북미 동부 해안(North America east coast)에서 수심 192 m인 해역에 파랑, 바람, 해류가 함께 존재하는 복합 해양환경조건이다. 불규칙 파랑을 구현하는 JONSWAP 스펙트럼의 파랑 첨두 주기(wave peak period) 14.2s와 첨예도 계수(peak enhancement factor, γ) 2.5, 유의파고(significant wave height) 11.9 m이다. Table 3에서 파랑, 파랑, 해류방향은 0° 로 동일하고, 환경별 세부 조건을 제시한다. Table 3의 해양환경별 조건들을 재조합한 3가지의 복합해양환경을 Table 4에서 제시하고 있으며, A조건은 파랑과 해류의 조합이고 B조건은 파랑과 바람의 조합이며, C조건은 파랑, 바람, 해류의 조합이다.

Table 2 Mooring layout and mooring line properties

Description		Magnitude
Number of lines		3×3
Outer bundle angle		120°
Inner bundle angle		2°
Paid out length	line 1~3	574 m
	line 4~9	606 m
Total line length	line 1~3	1,080 m
	line 4~9	720 m
Pretension		1,670 kN
Chain grade		R4K4 Studless
Initial diameter		152 mm
Weight in water		405.7 kg/m
Weight in air		466.7 kg/m
Stiffness		23,048 kN/m
Minimum breaking load (MBL)		20,156 kN

Table 3 Metocean data for North America east coast

Description		Magnitude
Wave	Wave spectrum	JONSWAP($\gamma=2.5$)
	Significant wave height	11.9 m
	Wave peak period	14.2 s
Wind	Direction	0°
	Speed	40 m/s
Current	Direction	0°
	Speed	2 m/s

Table 4 Metocean condition

Condition	Wave	Wind	Current
A	○	×	○
B	○	○	×
C	○	○	○

2.3. 해석 결과 비교 검증

LNG-FSRU의 파향 0°와 45° 조건에서 횡동요, 상하요, 종동요 운동해석 결과를 모형실험 결과 (Lee, et al., 2010)를 비교 검증하였다. 횡동요(roll) 임계 감쇠 계수의 7%의 운동 감쇠계수를 적용한 해석 결과가 모형실험 결과보다는 다소 작게 나타났지만, 전반적으로 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 3). 상하요(heave) 운동은 파향 0°(Fig. 4)와 45°(Fig. 5)에서 전반적인 파 주파수 영역에서의 수치해석 결과와 모형실험 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 종동요(pitch) 운동은 고유 주파수 영역(0.3~0.4 rad/s)을 포함한 전 주파수 영역에서 모형실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

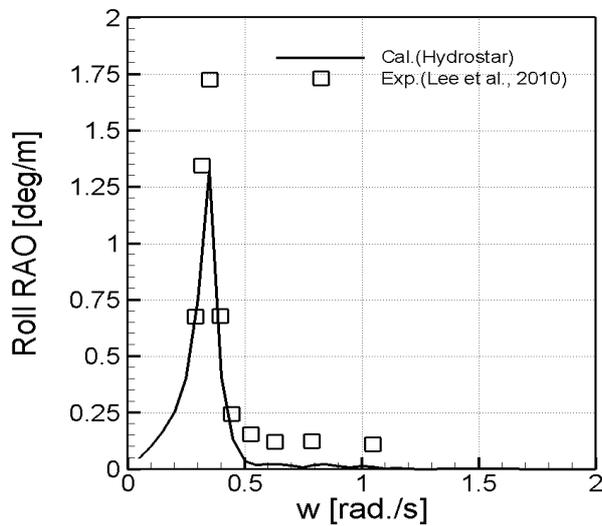


Fig. 3 Comparison of roll motion RAO at wave heading 45°

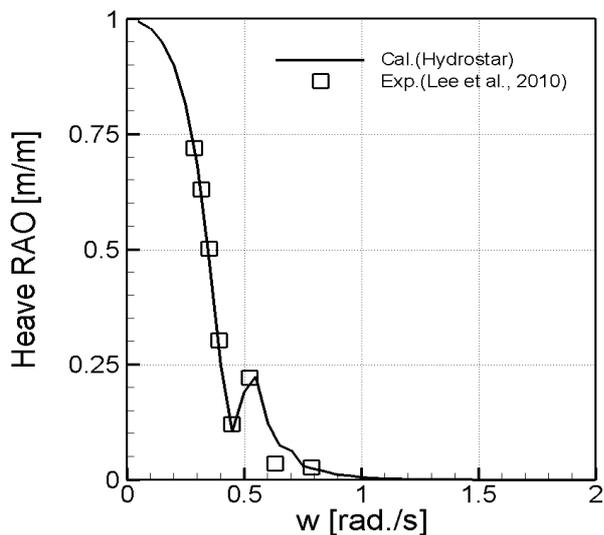


Fig. 4 Comparison of heave motion RAO at wave heading 0°

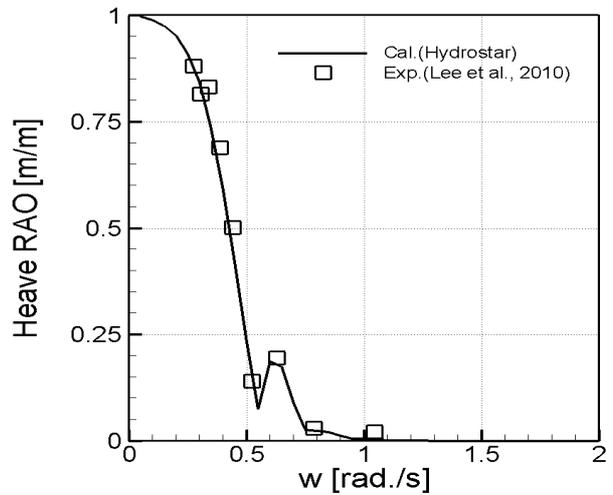


Fig. 5 Comparison of heave motion RAO at wave heading 45°

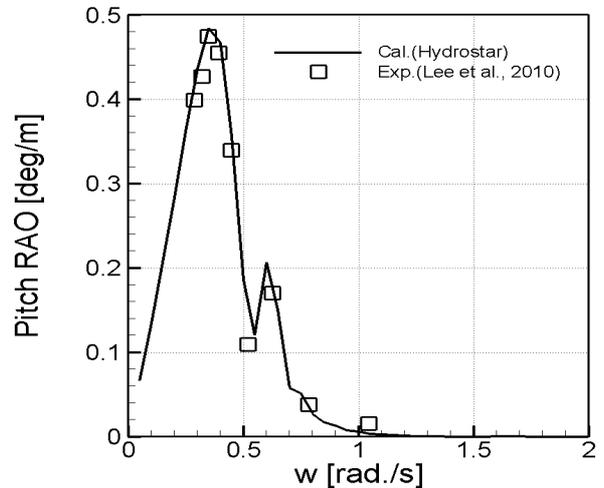


Fig. 6 Comparison of pitch motion RAO at wave heading 0°

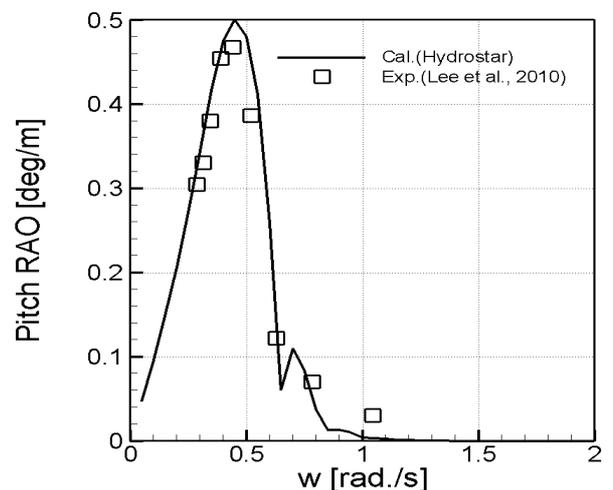


Fig. 7 Comparison of pitch motion RAO at wave heading 45°

Fig. 8~13은 각각의 해양환경조건에 대해 1~9번 계류선의 장력의 평균값과 최대값을 Lee, et al. (2010)의 모형실험 결과와 비교해 나타낸 것이다. 세 가지 해양환경조건에서 모두 각각의 해양환경하중이 선수파와 나란하게 입사하기 때문에, 선수 쪽 계류선 다발에 속해있는 1~3번 계류선 장력이 다른 계류선 다발에 속해있는 계류선 장력보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 각 해양환경조건 A, B, C에서 계류선 별 평균 장력을 나타내는 Fig. 8, 10, 12를 비교해보면, 파랑, 바람, 해류가 함께 존재하는 C 조건에서 가장 큰 장력이 발생하고, 파랑과 해류가 함께 존재하는 A 조건에서 그 다음으로 큰 장력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 해류가 존재하지 않는 B 조건에서는 가장 작은 장력이 발생한다.

반면 최대 장력의 경우 A와 C 조건에서 모형실험 결과보다 Ariane을 이용한 해석 결과가 훨씬 작게 나타난다. Ariane의 해석과정에 고려되지 않은 계류선 동적 거동과 부유체 운동의 연성 영향으로 인하여 모형실험과 다소 차이를 보일 수 있다고 판단된다. 각 해양환경조건 A, B, C에서 계류선 별 최대 장력을 나타내는 Fig. 9, 11, 13를 비교해보면, 파랑, 바람, 해류가 함께 존재하는 C 조건에서 가장 큰 장력이 발생하고, 해류가 존재하지 않는 B 조건에서 가장 작은 장력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 해류가 존재하지 않는 해양환경조건에서는 평균 장력과 최대 장력 모두 모형실험 결과와 Ariane을 이용한 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

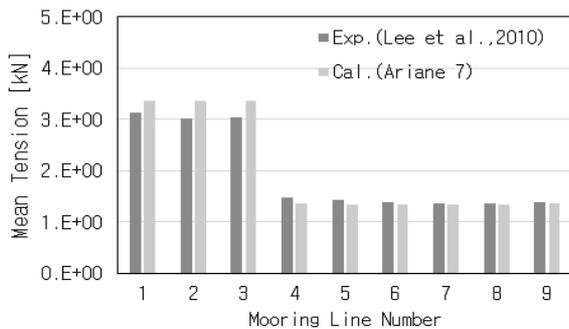


Fig. 8 Mean tension for a condition (wave & current)

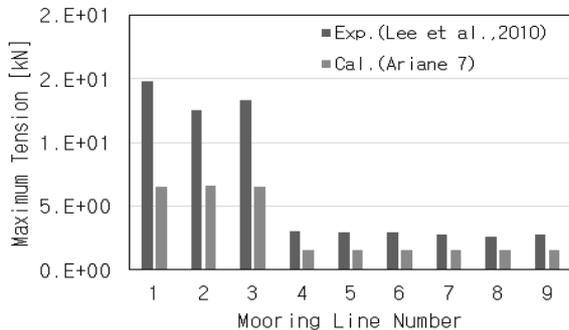


Fig. 9 Maximum tension for A condition (wave & current)

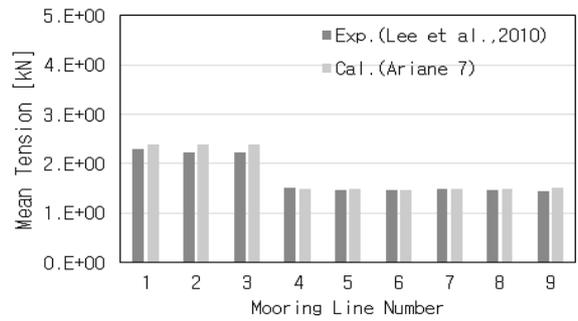


Fig. 10 Mean tension for B condition (wave & wind)

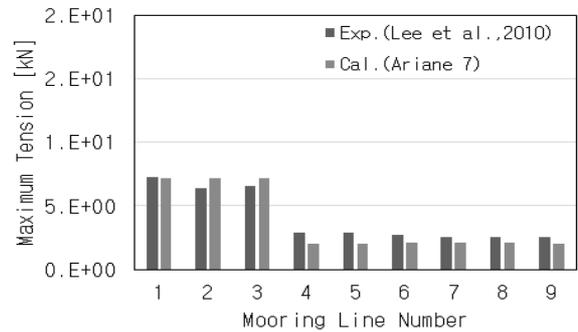


Fig. 11 Maximum tension for B condition (wave & wind)

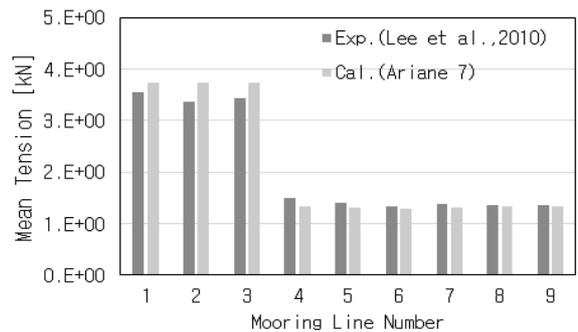


Fig. 12 Mean tension for C condition (wave, wind & current)

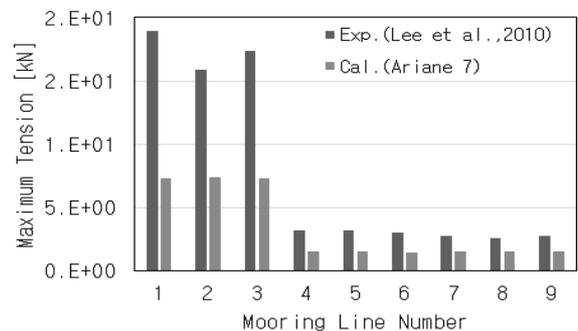


Fig. 13 Maximum tension for C condition (wave, wind & current)

3. 극한 계류 해석

3.1 극한 계류 해석 절차

계류시스템의 설계 변수로는 부유식 해양구조물의 초기 위치, 계류선의 종류 및 개수, 레이아웃, 페어리드와 앵커의 위치, 초기 인장력(pretension) 등이 있다. 본 연구에서는 주요 설계변수 중의 하나인 체인지름을 결정하기 위해 선별 방법을 적용한 극한 계류 해석을 수행하며 그 절차는 Fig. 14와 같다. 극한 계류 해석을 수행하기 위해서는 대상 해양구조물의 6 자유도 운동에 대한 RAO, 유체동역학적 계수, 파랑 하중 등의 계산을 선행하여 운동특성을 파악한다. 대상 해양구조물의 운동특성과 대상 해역의 해양환경조건의 특성을 고려하여 계류선의 구성과 배치를 결정한다.

극한 계류 해석에서는 대상 해역의 해양환경자료를 바탕으로 크기와 방향을 조합하여 생성한 다양한 해양환경조건에 대해 계류 해석을 수행한 뒤, 가장 큰 응답이 발생하는 해양환경하중 조합을 찾는 선별 방법을 사용한다. 모든 계류선이 온전한 조건에 대해 계류 해석을 수행한 뒤 온전 조건에 대한 해석 결과 가장 큰 설계 장력이 발생했던 계류선이 파단 되는 경우를 가정한다. 온전 조건 및 파단 조건의 안전 계수와 계류선의 설계 장력의 곱이 체인의 최소 파단 하중보다 클 경우, 계류시스템의 안전성을 확보하기 위하여 체인지름을 증가시키는 방향으로 설계를 수정한다. 해석 결과에 영향을 미칠 수 있는 설계 변수를 파악하여 온전 및 파단 조건에서 민감도 해석을 수행하고, 온전 조건 및 파단 조건의 안전 계수와 계류선의 설계 장력의 곱이 체인의 최소 파단 하중보다 작아질 때 까지 체인지름을 증가시킨다.

3.2 극한 계류 해석 조건

Cho, et al. (2010)에서 제시한 대상해역인 북미동부해안 해양환경조건(Table 3)의 파랑, 바람, 해류의 크기에 대하여 파랑 (H)을 중심으로 풍향(V)의 변화와 주어진 풍향을 중심으로 해류방향(C)을 변화하여 조합한 해양환경조건을 적용하여 계류 해석을 수행하였다. 파랑, 바람, 해류 방향 변화에 따른 극한 계류 해석을 수행하기 위하여 파랑은 0°에서 345°까지 15°간격으로 24개 방향, 풍향은 각각의 파랑을 기준으로 -45°에서 45°까지 15°간격으로 7개 방향, 해류방향은 각각의 풍향을 기준으로 -30°에서 30°까지 15°간격으로 5개를 변화하여 총 840개의 해양환경하중 조합을 선정하였다. Table 6에서 #0~4를 보면, 파랑은 0°로 정의되고, 풍향은 0°를 기준으로 -45°로 정의된다. 해류방향은 -45°를 기준으로 -30°에서 30°까지 15°간격으로 변화시킨 -75°, -60°, -45°, -30°, -15°로 정의된다.

Fig. 15를 참고하면, 파랑이 0°이고 풍향이 -45°일 때 해류 방향이 285°~345°인 빗금 친 영역이 #0~4에 해당하고, 파랑이 0°일 때 풍향이 315°~45°인 빗금 친 영역이 #0~34에 해당한다.

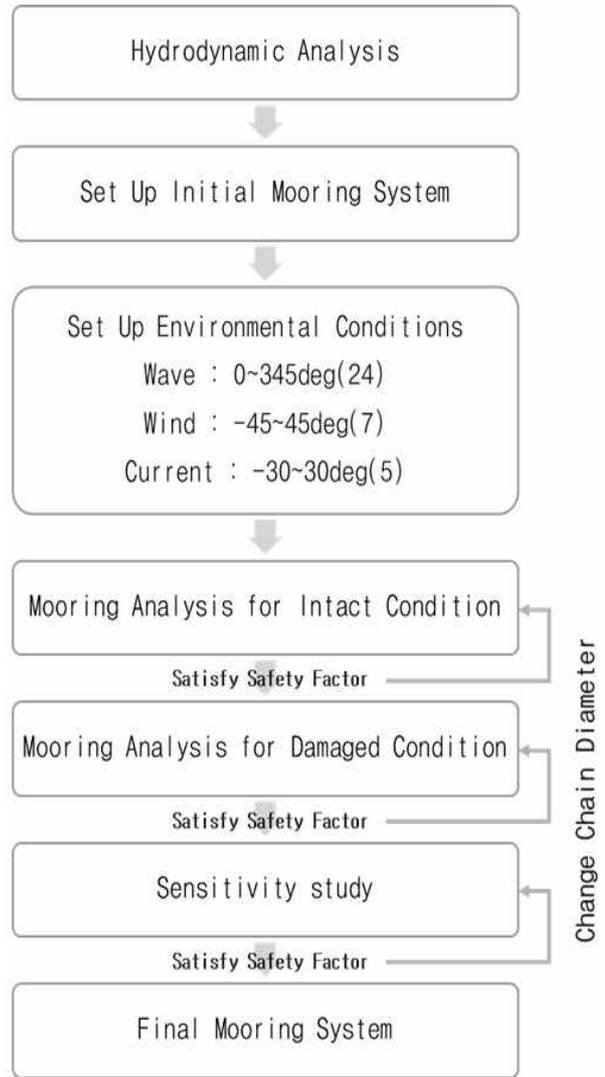


Fig. 14 Procedure of extreme mooring analysis

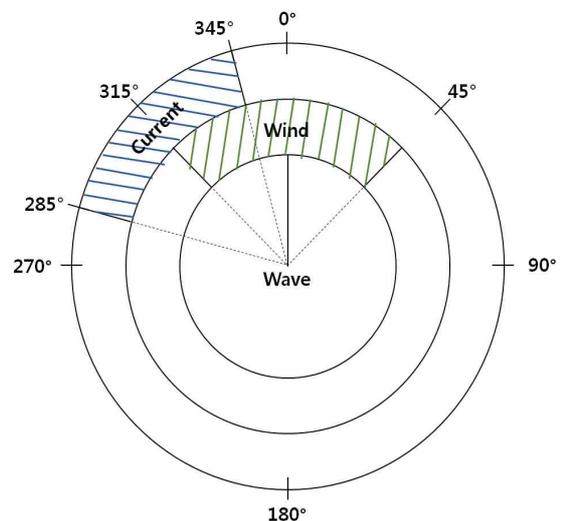


Fig. 15 Drawing of metoccean combination number 0~144

Table 5 Example of metocean combination

Metocean Combination	H	V	C
# 0	0°	-45°	-75°
# 1			-60°
# 2			-45°
# 3			-30°
# 4			-15°
# 5~9		-30°	V-30°~ V+30°
# 10~14		-15°	V-30°~ V+30°
# 15~19		-0°	V-30°~ V+30°
# 20~24		+15°	V-30°~ V+30°
# 25~29		+30°	V-30°~ V+30°
# 30~34	+45°	V-30°~ V+30°	
# 35~69	15°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 70~104	30°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 105~139	45°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 140~144	60°	15°	V-30°~ V+30°
# 145		0°	
# 146		15°	
# 147		30°	
# 148		45°	
# 149		60°	
# 150~154		45°	V-30°~ V+30°
# 155~159		60°	V-30°~ V+30°
# 160~164		75°	V-30°~ V+30°
# 165~169		90°	V-30°~ V+30°
# 170~174	105°	V-30°~ V+30°	
# 175~209	75°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 210~244	90°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 245~279	105°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 280~314	120°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 315~349	135°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 350~384	150°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 385~419	165°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 420~454	180°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 455~489	195°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 490~524	210°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 525~559	225°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 560~594	240°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 595~629	255°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 630~664	270°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 665~669	285°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 700~934	300°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 735~769	315°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 770~804	330°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°
# 805~839	345°	H-45°~ H+45°	V-30°~ V+30°

BV Rule Note NR 493 (2012)에서 제안하는 파향과 풍향의 상대각도 변화에 따른 풍속을 보정하기 위하여, 감소 지수 (reduction factor, q_v)를 식 (1)과 같이 제시한다. 정의된 해양환경하중 조합의 풍속에 BV Rule Note NR 493 (2012)에서 제시한 $0.9q_v$ (intensity of the elements)를 곱한 결과를 계류해석에 이용한다(Table 6).

$$q_v = \begin{cases} 1 & \text{when } |V-H| \leq 30^\circ \\ 2 - \frac{|V-H|}{30} & \text{when } 30 < |V-H| \leq 45^\circ \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 V와 H는 각각 풍향과 파향을 의미한다.

해류속도는 제시된 해양환경조건의 해류속도에 0.5(intensity of the elements)를 곱한 결과를 계류해석에 이용한다 (BV Rule Note NR 493, 2012).

Table 6 Metocean combination for extreme mooring analysis

Description		Magnitude
Scanning step		15°
Wave (H)	Direction	0~345° (24)
	Intensity of the elements	1.0
Wind (V)	Direction	-45~45° (7)
	Intensity of the elements	$0.9q_v$
Current (C)	Direction	-30~30° (5)
	Intensity of the elements	0.5
Total		840

일정한 설계파고(Table 3)에서 해상상태의 변화에 대한 설계장력의 민감도를 평가하기 위하여 JONSWAP 스펙트럼에 세 개의 파랑 첨두 주기(12.1s, 14.2s, 16.3s), 세 개의 첨예도 계수(2.0, 2.5, 3.0)에 대한 계류해석을 수행하였다. 또한, 계류선 초기인장력에 대한 설계장력의 민감도 해석을 위하여 초기인장력을 1,670kN을 기준으로 10%씩 감소(1,503 kN)와 증가(1,837 kN)된 조건에서 계류해석을 수행하였다.

3.3 계류선 안전성 평가

제시된 해양환경하중 조합 하에서 온전 조건(Intact condition)에서 계류해석 수행 후 계류선 별 안전성 적합여부를 평가한다. 계류선의 설계장력(design tension, T_D)은 각 시뮬레이션에서 구한 장력 최댓값의 평균과 표준 편차(식 (2), 식 (3))를 이용하여 식 (4)로 결정한다 (BV NR 493, 2012).

$$T_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_k \quad (2)$$

$$T_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (T_k - T_m)^2} \quad (3)$$

$$T_D = T_m + aT_s \quad (4)$$

여기서 T_k 는 각 시뮬레이션에서 구한 계류선 장력의 최댓값이고, T_m 와 T_s 는 계류선 장력의 최댓값 T_k 들의 평균과 표준편차이다. a 는 시뮬레이션 횟수에 따른 보정 계수이다. 동일한 해양환경조건에서 여러 회 시뮬레이션을 수행하는 이유는 JONSWAP 스펙트럼에 여러 파 위상(random wave phase)을 적용하여 불규칙파랑의 시간이력에 대한 계류선 장력의 최댓값의 변화를 구현하였다. 온전 및 파단 조건을 적용한 극한 계류 해석에서는 10회 시뮬레이션에 대한 보정 계수 0.9를 사용하고, 민감도 해석에서는 30회 이상의 시뮬레이션에 대한 보정 계수 0.4를 사용한다 (BV NR 493, 2012).

계류선의 안전성을 평가하기 위한 안전계수(safety factor)는 최소 파단 하중(minimum breaking load)과 계류선 설계 장력의 비로 정의된다. 지름을 증가시키면 탄성 계수(elasticity coefficient)가 감소하면서 같은 해양환경하중에서 계류선에 발생하는 동적 장력이 감소하고, 체인의 최소 파단 하중이 증가하므로 체인의 최소파단하중과 계류선 설계 장력의 비가 커지게 된다. 온전 조건에 대한 계류 해석 결과의 설계 장력이 Table 7에 제시된 안전계수를 만족하는 체인지름을 결정한다. 본 연구에서는 체인지름을 1 mm씩 증가시켜 안전계수를 만족하는 체인지름을 결정하였다. 온전 조건에 대한 극한 계류 해석 결과 가장 큰 최대 장력이 발생하는 계류선을 찾고, 이 계류선이 파단 조건에 대한 계류해석 수행 결과를 파단조건 안전계수(Table 7)를 만족하는 체인지름을 결정한다.

Table 7 Safety factor for intact and damaged condition(BV Rule Note NR 493, 2012)

Description	Magnitude
Intact	1.75
Damaged (1 line missing)	1.25

3.4 극한 계류 해석 결과

Fig. 14에서 제시한 극한 계류 해석 절차를 적용하여 온전 조건, 파단조건, 민감도해석 순서로 해석을 수행하였다.

체인지름이 152 mm 일 때, 온전 조건에 대한 계류 해석 결과는 Fig. 16과 같이 나타낼 수 있다. 이때 가로축은 총 840개의 해양환경하중 조합(Table 5)을 순차적으로 나타낸 것이고, 세로축은 각 10회의 시뮬레이션을 통해 얻은 장력의 최댓값들의 평균과 보정 계수 0.9 곱한 표준편차의 합(식 4)인 설계 장력(T_D)을 나타낸다.

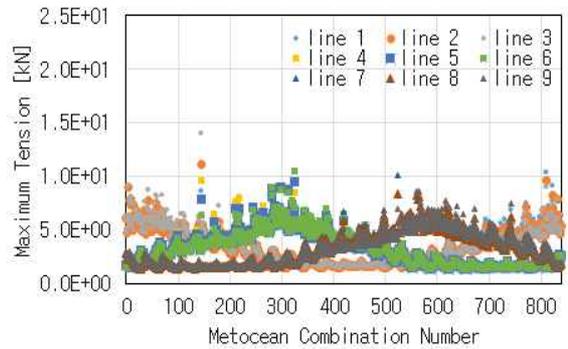


Fig. 16 Maximum tension at intact condition ($\Phi=152$ mm)

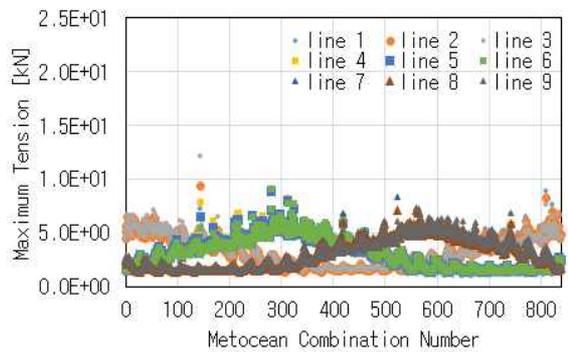


Fig. 17 Maximum tension at intact condition ($\Phi=160$ mm)

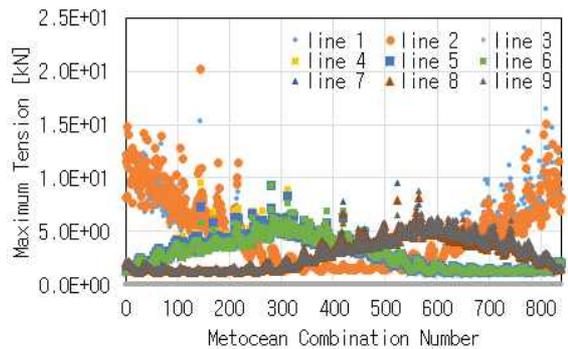


Fig. 18 Maximum tension at damaged condition ($\Phi=160$ mm)

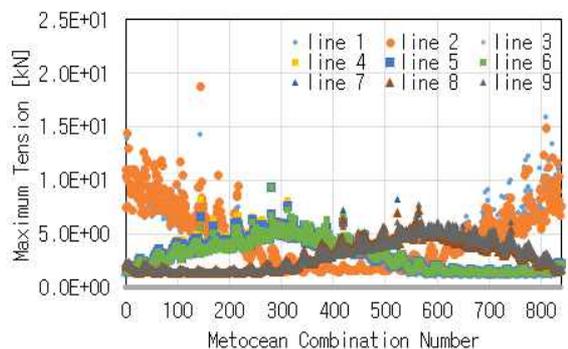


Fig. 19 Maximum tension at damaged condition ($\Phi=168$ mm)

1~3번 계류선에는 해양환경하중 조합 중 파향이 선수파 #0에서 선미파 #420으로 변화할 때 설계 장력이 감소하고, 선미파 #420에서 선수파 #839로 변화할 때 설계 장력이 증가하는 경향을 보인다. 4~6번 계류선은 파향 120° 부근인 #280~314에서, 7~9번 계류선은 파향 240° 부근인 #560~594에서 설계 장력이 대체적으로 크게 발생하므로, 계류선의 설계 장력은 풍향이나 해류방향보다는 파향의 영향이 비교적 크다는 것을 알 수 있다. (Fig. 16)

가장 큰 설계 장력이 발생하는 해양환경하중 조합(#145)에서 파향은 60°, 풍향은 30°, 해류 방향은 0°이다. Fig. 20, 21, 22, 23에서 점선으로 나타낸 10회의 시뮬레이션 결과(10 Trials)를 살펴보면, 특정 1회의 시뮬레이션 결과가 나머지 9회보다 최대 5배 이상 크다. 이러한 시뮬레이션 결과는 식 (4)를 통해 실선으로 나타낸 설계 장력에 반영된다.

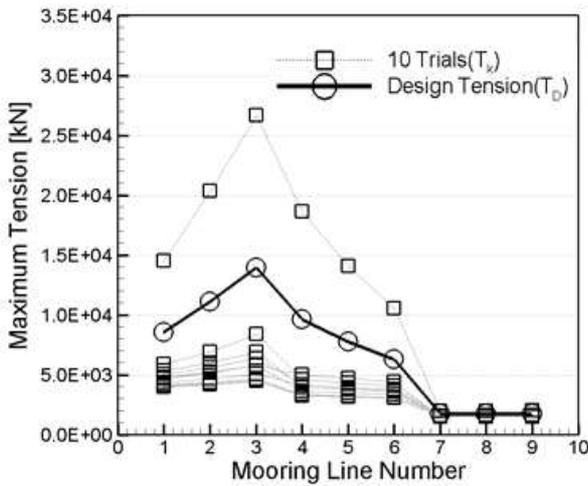


Fig. 20 Maximum tension at intact condition for metoccean combination #145 ($\Phi=152$ mm)

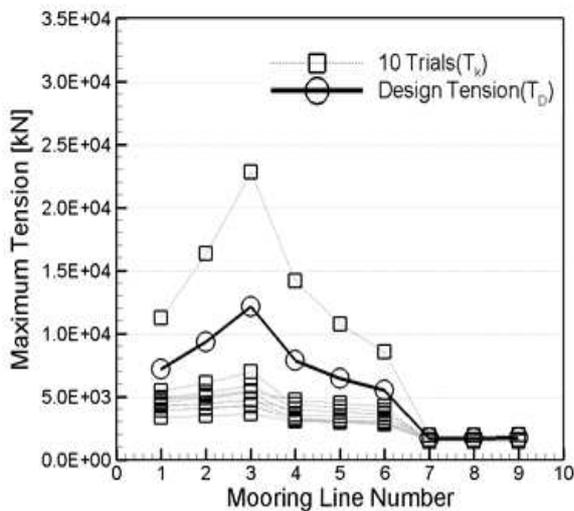


Fig. 21 Maximum tension at intact condition for metoccean combination #145 ($\Phi=160$ mm)

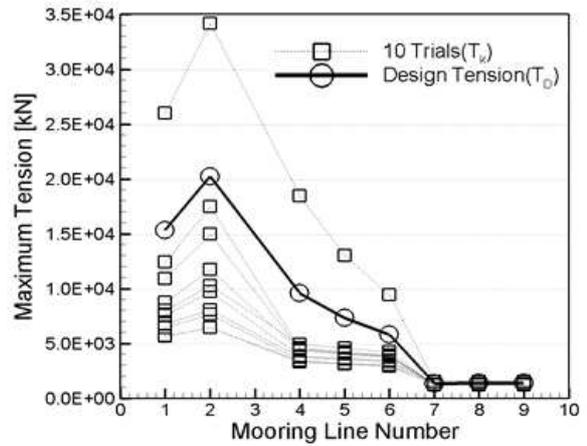


Fig. 22 Maximum tension at damaged condition for metoccean combination #145 ($\Phi=160$ mm)

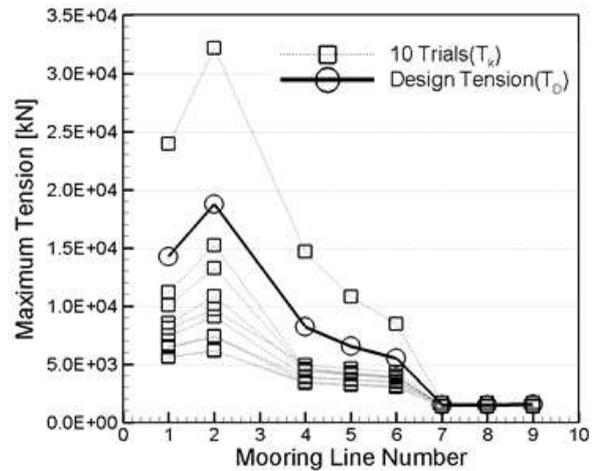


Fig. 23 Maximum tension at damaged condition for metoccean combination #145 ($\Phi=168$ mm)

지름이 152 mm인 체인의 최소 파단 하중은 20,156 kN이고 온전 조건에서의 안전 계수는 1.75이므로, 체인의 허용 하중은 11,518 kN이다. 145번째 해양환경하중 조합에서 3번 계류선 설계 장력은 13,929 kN이므로 체인의 허용 하중을 초과한다(Fig. 16). 체인지름을 1 mm씩 증가시키면서 탄성 계수와 최소 파단 하중의 변화를 검토하고 체인지름을 160 mm까지 증가시킨 결과, 최소 파단 하중이 21,885 kN으로 증가하면서 허용 하중도 12,506 kN으로 증가하고, 설계 장력은 11,881 kN으로 감소해 계류선의 설계 장력이 체인의 허용파단하중보다 작아지므로 체인지름을 160 mm로 결정한다(Fig. 17).

다음으로는 온전 조건에 대한 해석 결과 가장 큰 설계 장력이 발생했던 3번 계류선이 파단된 조건을 가정한다. 체인지름이 160 mm일 때 온전 조건인 Fig.17 과 파단 조건인 Fig. 18을 비교해보면, 4~9 계류선의 설계 장력은 큰 차이가 없다. 하지만 3번 계류선이 파단 되면서 1번과 2번 계류선에 발생하는 설계 장력이 2배 가까이 증가하고 그 분포도 커짐을 알 수 있다. 지름이

160 mm인 체인의 최소 파단 하중은 21,885 kN이고 파단 조건에서의 안전 계수는 1.25이다. 따라서 이 체인의 허용 하중은 17,508 kN이고 2번 계류선의 설계 장력은 20,226 N이므로 체인의 허용 하중을 초과한다. 체인지름을 168 mm로 증가시키면 최소파단하중이 23,633 kN으로 증가하면서 허용 하중도 18,907 kN으로 증가하고, 설계 장력은 18,474 kN으로 감소해 계류선 설계 장력이 체인 허용 하중보다 작아짐을 알 수 있다(Fig. 19).

3번 계류선이 파단된 조건에서 대상 해역의 파랑 침두 주기 14.2초를 기준으로 15%씩 증가(16.33초) 또는 감소(12.07초)시킨 파랑 침두 주기에 대해 민감도 해석을 수행한 결과, 파랑 침두 주기가 감소했을 때 설계 장력이 증가하면서 파단 조건의 안전 계수 1.25를 만족시키지 않는 것을 알 수 있었다. 체인지름이 172 mm가 되었을 때 최소 파단 하중과 허용 하중은 각각 24,513 kN과 19,610 kN으로 증가하고 계류선 설계 장력은 19,167 kN으로 감소해, 체인의 허용 하중보다 계류선의 설계 장력이 작아짐을 알 수 있었다. Fig. 24의 우측 상단에서 하단으로 이어지는 민감도 해석 결과는 파랑 침두 주기를 감소시켰을 때 파단 조건의 안전 계수를 만족시키기 위해 체인지름을 변화시킨 결과이다. 또한, 파랑 침두 주기를 15%씩 증감시킴에 따라 계류선의 안전 계수가 절반 또는 두 배로 변화하므로, 파랑 침두 주기에 대한 민감도가 크다고 할 수 있다. 대상 해역에서의 JONSWAP 스펙트럼의 침에도 계수 γ 를 2.5에서 2와 3으로 각각 변화시키고, 계류선의 초기 인장력을 1,670 kN을 기준으로 10%씩 감소(1,503 kN) 또는 증가(1,837 kN) 시키며 민감도 해석을 수행한 결과, 해석 결과에 대한 두 변수의 영향은 크지 않음을 확인할 수 있었다.

Fig. 14에서 제시한 극한 계류 해석 절차를 적용하여 해석을 수행한 결과, 해석 조건에 해당하는 해양환경하중 조합 및 시뮬레이션 횟수(simulation number)와 해석 결과에 해당하는 체인지름의 변화를 요약하면 Table 8과 같이 나타낼 수 있다. 온전 조건 및 파단 조건에서는 모든 해양환경하중 조합(#0~839)에 대해 각 10회의 시뮬레이션을 수행한다. 민감도 해석에서는 전체 해석 조건 중에서 가장 큰 하중을 발생시키는 상위 30개의 해양환경하중 조합에 대해 각 30회의 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 8 Chain diameters in extreme mooring analysis process

Description	Metocean combination number	Simulation number	Chain diameter
Intact condition	# 0~839	10	152~160 mm
Damaged condition	# 0~839	10	160~168 mm
Sensitivity study	Wave peak period	30 metocean combinations at the 1st ~ 30th largest tension	168~172 mm
	γ		
	Pretension		

온전 조건과 파단 조건에 대한 극한 계류 해석, 민감도 해석의 순서로 이어진 계류 해석 결과 체인지름의 변화에 따른 최소 파단 하중과 계류선 설계 장력을 Fig. 24와 같이 도시하였다. Fig. 24 좌측 상단에서 하단으로 이어지는 온전 조건에 대한 결과를 살펴보면, 체인지름이 160mm보다 작을 때는 온전 조건의 안전 계수 1.25와 계류선의 설계 장력의 곱이 체인의 최소 파단 하중보다 크므로 체인지름을 160mm까지 증가시켜야 한다. 체인지름이 160mm일 때 온전 조건과 파단 조건의 결과를 함께 살펴보면, 계류선의 설계 장력은 같아도 안전 계수가 각각 1.25와 1.75로 다르다. 따라서 온전 조건에서는 안전 계수와 계류선의 설계 장력의 곱이 최소 파단 하중보다 작지만, 파단 조건에서는 최소 파단 하중보다 크므로 체인지름을 168 mm까지 증가시켜야 한다. 민감도 해석 결과 JONSWAP 스펙트럼의 침에도 계수와 계류선의 초기 인장력에 대한 민감도는 크지 않은 것으로 판단되었으나, 파랑 침두 주기에 대한 민감도는 큰 것으로 판단되었다. 파단 조건에서 파랑 침두 주기를 감소시켰을 때 안전 계수와 계류선의 설계 장력의 곱이 최소 파단 하중보다 크므로, 체인지름을 증가시켜야 한다. JONSWAP 스펙트럼의 침에도 계수와 계류선의 초기 인장력의 민감도 해석 결과는 체인지름을 변화시키는데 영향을 주지 않으므로, 세 가지 설계 변수를 구분하지 않고 파랑 침두 주기에 대한 민감도 해석 결과를 나타내는 범례로 표시하였다.

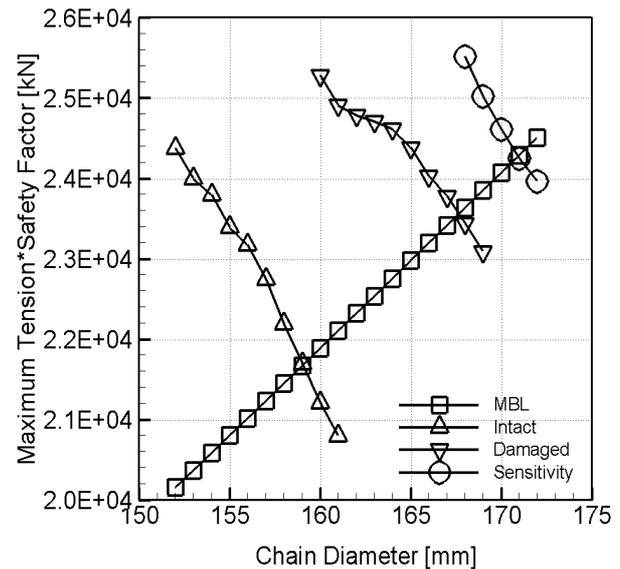


Fig. 24 Design tension for metocean combination # 145 (MBL=Minimum breaking load)

4. 결론 및 고찰

본 연구는 파랑, 바람, 해류의 크기와 방향을 조합한 복합 해양환경조건을 적용해 해석을 수행한 뒤, 가장 큰 응답이 발생하는 해양환경하중 조합을 찾는 선별 방법을 적용한 극한 계류 해

석 절차를 제시하고, 이 해석 절차에 따라 LNG-FSRU의 터렛 계류시스템을 구성하고 있는 체인지름을 증가시키는 방향으로 초기 설계를 수정해나기면서 계류선 설계 장력의 변화를 살펴보고자 하였다. 극한 계류 해석 절차와 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 극한 계류 해석은 파랑, 바람, 해류 속도와 방향을 조합한 복합 해양환경조건을 적용해 계류 해석을 수행하고 계류시스템의 안전성을 평가하기 위한 목적으로 수행되며, 운전 조건, 파단 조건 및 민감도 해석의 순서로 진행된다.

2. 운전 조건 및 파단 조건의 안전 계수와 계류선의 설계 장력의 곱이 체인의 최소 파단 하중보다 클 경우, 계류시스템의 안전성을 확보하기 위하여 체인지름을 증가시키는 방향으로 설계를 수정한다.

3. 체인지름이 증가할수록 최소 파단 하중도 증가하므로, 최소 파단 하중에 각 조건에 대한 안전 계수를 고려한 허용 하중도 증가한다. 또한, 체인지름이 증가할수록 탄성 계수는 감소해서 계류선에 발생하는 설계 장력은 감소하므로 계류선의 안전성을 확보할 수 있게 된다.

4. 초기 체인지름은 152 mm 이었으나, 극한 계류 해석 절차를 통해 최종 체인지름은 172 mm로 결정되었다.

체인지름뿐만 아니라 다른 설계 변수들에 대해서도 이와 같은 해석 절차를 통해 선별 방법을 적용한 극한 계류 해석을 수행한다면, 대상 해역의 복합 해양환경하중 조합에 대해서 계류선의 설계 장력 관점에서의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 준정적 해석을 통해 초기 설계 변수를 결정된 뒤, 결정된 값에 대한 민감도 해석을 수행한다면 초기 설계 변수에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 생각한다.

Ariane을 활용한 계류 해석은 계류선의 동적 거동과 해류 수직방향 유속 분포 영향을 포함하지 않는다. 해양환경의 영향을 받는 부유체의 운동이 계류선의 거동에 미치는 영향은 고려하지 않으나, 계류선의 거동이 부유체의 운동에 미치는 영향은 포함하지 않았다. 광범위한 설계조건별 계류선 성능 해석을 위해서는 해석 시간이 짧은 Ariane과 같은 준정적 해석 방법이 효율적으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 준정적조건에서 계류선 설계장력에 대한 극한 해양환경조건 선별과 민감도 해석기법을 계류선 동적 거동과 부유체 운동의 연성을 고려한 계류선 설계장력 등의 연구로 확대하고, 부유체 계류시스템 성능 검증에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 산업기술혁신사업(과제번호: 10063405) “위치유지와 계류 시스템을 적용하여 ARC7 조건에서 연중운용이 가능한 북극해 기반 부유식 해양구조물 형상 개발”과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

- Bureau Veritas, 2012. *Rule Note NR 493 DT R02 E-Classification of Mooring Systems for Permanent Offshore Units*. Bureau Veritas.
- Cho, S.K. Sung, H.G. & Hong, S.Y., 2010. Study on the dynamics of turret moored FSRU in waves. *Proceedings of the International Society of Offshore and Polar Engineers(ISOPE) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Busan Korea, 14-17 November 2010, pp.28-33.
- Cho, S.K. Sung, H.G. & Hong, J.P., 2013. Experimental Study of Excessive Yaw Motion of Turret Moored Floating Body. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(1), pp.8-13.
- Choung, J.M. Jeon, G.Y. & Kim, Y.I., 2013. Study on Effective Arrangement of Mooring Lines of floating-Type Combined Renewable Energy Platform. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(4), pp.22-32.
- Choung, J.M. Kim, H.J. & Jeon, G.Y., 2014. Design of Mooring Lines of a Floating Offshore Wind Turbine in South Offshore Area of Jeju. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(4), pp.300-310.
- Hong, J.P. Cho, S.K. Seo, J.H. Sung, H.G. Lee, D.Y. Park, I.B. Won, Y.U. Choi, S.K. & Kim, D.W., 2015. Experimental Study of Effect of Mooring Line Failure on Behavior of Turret-moored FPSO Ship. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(3), pp.231-240.
- Lee D.Y. Hong, J.P. Cho, S.K. Kim, Y.H. Sung, H.G. Seo, J.H. Kim, D.W. Kim, B.W. & Seo, Y.S., 2015. Experimental Study on Motion of FPSO and Characteristics of Mooring System according to Turret Position. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(2), pp.143-153.
- Lee, K.W. Cho, Y.R. Sun, J.O. Jeong, S.G. Choi, Y.D. Sung, H.G. & Hong, S.W., 2010. Study on ship motion analysis of turret-moored LNG FSRU compared with experiment. *Proceedings of the International Society of Offshore and Polar Engineers(ISOPE) Pacific/Asia Offshore Mechanics*

Symposium, Busan Korea, November 14-17, 2010, pp.5-9

Lim, Y.C. Kim, K.S. Choung, J.M. Kim, J.W. Kim, J.T. &Yeo, S.H., 2009. Study on Optimum Design of FPSO Spread Mooting System. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(6), pp.61-66.



이민경



정광효



박성부



유병석



정윤석