



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

해양플랜트의 스콜에 대한
폭풍안전계류 평가에 관한 연구



2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 산 업 공 학 협 동 과 정

윤 상 준

공 학 박 사 학 위 논 문

해양플랜트의 스콜에 대한
폭풍안전계류 평가에 관한 연구

지도교수 김 현 태

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 산 업 공 학 협 동 과 정

윤 상 준

윤상준의 공학박사 학위논문을 인준함.

2018년 8월 24일



주 심 공학박사 윤 한 삼 인

위 원 공학박사 김 도 삼 인

위 원 공학박사 이 인 철 인

위 원 공학박사 류 용 욱 인

위 원 공학박사 김 현 태 인

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	viii
List of Symbols	xii
Abstract	xiv
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 폭풍안전계류(Storm safe mooring)	4
1.3 연구목적 및 내용	6
2. 폭풍안전계류 해석 모델	8
2.1 FPSO	8
2.2 계류시스템	11
2.3 좌표계	15
3. 폭풍안전계류 해석방법	17
3.1 해석 케이스 및 시나리오	17
3.2 해석 방법	18
3.3 환경외력	22
3.4 안전 판정 기준	30
4. 준정적 해석 결과	34
4.1 4개 라인 연결 (준정적 해석)	34
4.2 8(7)개 라인 연결 (준정적 해석)	39
4.3 12(11)개 라인 연결 (준정적 해석)	48
5. 동적 해석 결과	56
5.1 12(11)개 라인 연결 (동적 해석)	56

5.2 8(7)개 라인 연결 (동적 해석)	62
5.3 4개 라인 연결 (동적 해석)	70
6. 해석 결과 분석	71
6.1 준정적 해석과 동적 해석 결과 비교 요약	71
6.2 동적 해석 결과 분석	75
6.3 준정적 해석 및 동적 해석 시간 비교	81
7. 대안 해석 방법 제안 및 비교	84
7.1 특성 스콜 구간을 고려한 대안 해석 제안 및 검증	84
7.2 대안 동적해석 I (Dynamic ^{*I})	89
7.3 대안 동적해석 II (Dynamic ^{*II})	97
7.4 대안 동적해석 III (Dynamic ^{*III})	109
7.5 대안 준정적해석 (Quasi-static [*])	112
7.6 특성 스콜 구간을 고려한 대안 해석 결과 비교	114
8. 요약 및 결론	118
참 고 문 헌	124

List of Figures

- Fig. 1.1 The working stage of tug.
- Fig. 1.2 Storm safe mooring condition.
- Fig. 2.1 General arrangement and coordinates system of FPSO.
- Fig. 2.2 FPSO modelling and coordinates.
- Fig. 2.3 Mooring arrangement and ID of fairlead, mooring line and anchor.
- Fig. 2.4 Mooring system modeling in MOSES for Quasi-static analysis.
- Fig. 2.5 Modelling of mooring line layouts in MOSES.
- Fig. 2.6 Mooring system modeling in OrcaFlex for dynamic analysis.
- Fig. 2.7 Modelling of mooring line layouts in OrcaFlex.
- Fig. 3.1 Methodology flowchart of storm safe mooring analysis.
- Fig. 3.2 A sample squall time history measured offshore West Africa (Arun Duggal et al, 2011).
- Fig. 3.3 Scaled squall time history #1 with maximum 1 min. averaged wind velocity 25.86m/sec (Sq1).
- Fig. 3.4 Scaled squall time history #2 with maximum 1 min. averaged wind velocity 24.09m/sec (Sq2).
- Fig. 3.5 Scaled squall time history #3 with maximum 1 min. averaged wind velocity 23.32m/sec (Sq3).
- Fig. 3.6 Scaled squall time history #4 with maximum 1 min. averaged wind velocity 29.73m/sec (Sq4).
- Fig. 3.7 Scaled squall time history #5 with maximum 1 min. averaged wind velocity 24.24m/sec (Sq5).
- Fig. 3.8 Scaled squall time history #6 with maximum 1 min. averaged wind velocity 24.69m/sec (Sq6).

- Fig. 4.1 Maximum tension of 4 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS).
- Fig. 4.2 Maximum offset of 4 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS).
- Fig. 4.3 Maximum tension of 8 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS).
- Fig. 4.4 Maximum tension of 7 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS).
- Fig. 4.5 Maximum offset of 8 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS).
- Fig. 4.6 Maximum offset of 7 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS).
- Fig. 4.7 Maximum tension of 12 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS).
- Fig. 4.8 Maximum tension of 11 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS).
- Fig. 4.9 Maximum offset of 12 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS).
- Fig. 4.10 Maximum offset of 11 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS).
- Fig. 5.1 Effective tension (S1 mooring line) of 12 mooring lines
condition in Sq4 (Dynamic analysis, ULS).
- Fig. 5.2 Effective tension (S1 mooring line) of 11 mooring lines
condition in sq4 (Dynamic analysis, ALS).
- Fig. 5.3 FPSO Offset of the critical cases with 12 mooring lines
(Dynamic analysis, ULS).
- Fig. 5.4 Effective Tension of S1 Line in Sq4 and 8 mooring lines
condition (Dynamic analysis, ULS).

- Fig. 5.5 The distribution of maximum tension.
- Fig. 5.6 Effective Tension of S1 Line in Sq4 and 7 mooring lines condition (Dynamic analysis, ALS).
- Fig. 5.7 FPSO Offset of the critical cases with 8 mooring lines (Dynamic analysis, ULS).
- Fig. 5.8 Effective Tension of S1 Line in Sq4 and 4 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS).
- Fig. 6.1 Tension and wind speed in Sq4.
- Fig. 6.2 Theoretical squall model(OMAE2006-92328)..
- Fig. 6.3 Tension and characteristic squall section of Sq4.
- Fig. 6.4 Tension and wind speed in Sq5.
- Fig. 6.5 Tension and characteristic squall section of Sq5.
- Fig. 6.6 Tension and wind speed in Sq3.
- Fig. 6.7 Tension and characteristic squall section of Sq3.
- Fig. 7.1 The SF1 position in 12 lines mooring condition for 10,800sec dynamic analysis.
- Fig. 7.2 The SF1 position in 7 lines mooring condition for 10,800sec dynamic analysis.
- Fig. 7.3 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition for 300sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*¹).
- Fig. 7.4 The FPSO position in 8 lines mooring condition for 300sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*¹).
- Fig. 7.5 The FPSO position in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*¹).
- Fig. 7.6 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*¹).
- Fig. 7.7 The FPSO position in 12 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*¹).

- Fig. 7.8 Tension of S1 line in 12 lines mooring condition
for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*^I).
- Fig. 7.9 Tension of S1 line in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*^I).
- Fig. 7.10 Tension of S1 line in 11 lines mooring condition
for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*^I).
- Fig. 7.11 The SF1 position in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic*^I).
- Fig. 7.12 Maximum tension in various environmental incidence.
- Fig. 7.13 The FPSO position in 12 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.14 Tension of S1 line in 12 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.15 The FPSO position in 11 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.16 Tension of S1 line in 11 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.17 The FPSO position in 8 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.18 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.19 The FPSO position in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.20 Tension of P6 line in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).
- Fig. 7.21 Wind speed time series in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic*^{II}).

- Fig. 7.22 Tension of S1 line in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).
- Fig. 7.23 The FPSO position in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).
- Fig. 7.24 The SF1 position in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).
- Fig. 7.25 The tension of 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II})
in various analysis time duration.
- Fig. 7.26 The SF1 position of 2nd proposed analysis method
(Dynamic^{*II}) in various analysis time duration.
- Fig. 7.27 Tension of S1 line in 12 lines mooring condition
for 1,200sec by 3rd proposed analysis method(Dynamic^{*III}).
- Fig. 7.28 Tension of S1 line in 11 lines mooring condition
for 1,200sec by 3rd proposed analysis method(Dynamic^{*III}).
- Fig. 7.29 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition
for 1,200sec by 3rd proposed analysis method(Dynamic^{*III}).
- Fig. 7.30 Tension of S1 line in 7 lines mooring condition
for 1,200sec by 3rd proposed analysis method(Dynamic^{*III}).
- Fig. 7.31 Comparison of quasi-static analysis in ULS.
- Fig. 7.32 Comparison of quasi-static analysis in ALS.

List of Tables

- Table 2.1 FPSO configuration
- Table 2.2 Fairlead location in local coordinates system
- Table 2.3 Theoretical anchor point position in local coordinates system
- Table 2.4 Specifications of mooring lines
- Table 2.5 Paid out length of mooring lines from floater
- Table 3.1 Analysis cases by connecting mooring lines (ULS)
- Table 3.2 Acceptable return periods for (characteristic) wind velocities (DNVGL-OS-H101, 2011)
- Table 3.3 Wind velocities of squall and scaled factor for dynamic analysis
- Table 3.4 Acceptable return periods for the characteristic significant wave height, H_s (DNVGL-OS-H101, 2011)
- Table 3.5 Environmental condition combination
- Table 3.6 Safety factor and SWL for mooring line tension
- Table 4.1 Maximum tension of 4 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)
- Table 4.2 Maximum offset of 4 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)
- Table 4.3 Maximum tension of 4 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)
- Table 4.4 Maximum offset of 4 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)
- Table 4.5 Maximum tension of 8 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)
- Table 4.6 Maximum offset of 8 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.7 Maximum tension of 7 mooring lines condition
in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.8 Maximum offset of 7 mooring lines condition
in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.9 Maximum tension of 8 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.10 Maximum tension of 7 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.11 Maximum offset of 8 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.12 Maximum offset of 7 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.13 Maximum tension of 12 mooring lines condition
in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.14 Maximum offset of 12 mooring lines condition
in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.15 Maximum tension of 11 mooring lines condition
in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.16 Maximum offset of 11 mooring lines condition
in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.17 Maximum tension of 12 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.18 Maximum tension of 11 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ALS)

Table 4.19 Maximum offset of 12 mooring lines condition
(Quasi-static analysis, ULS)

Table 4.20 Maximum offset of 11 mooring lines condition
Quasi-static analysis, ALS)

- Table 5.1 Maximum tension of 12 mooring lines condition
(Dynamic analysis, ULS)
- Table 5.2 Maximum tension of 11 mooring lines condition
(Dynamic analysis, ALS)
- Table 5.3 The maximum offset from critical cases of 12 mooring
lines condition (Dynamic analysis, ULS)
- Table 5.4 Minimum vertical height of SSW above seabed
in 12 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)
- Table 5.5 Maximum tension of 8 mooring lines condition
(Dynamic analysis, ULS)
- Table 5.6 Maximum tension of 7 mooring lines condition
(Dynamic analysis, ALS)
- Table 5.7 The maximum offset from critical cases of 8 mooring
lines condition (Dynamic analysis, ULS)
- Table 5.8 Minimum vertical height of SSW above seabed
in 8 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)
- Table 5.9 Maximum tension of 4 mooring lines condition
(Dynamic analysis, ULS)
- Table 6.1 Result summary of storm safe mooring analysis in
quasi-static and dynamic analysis
- Table 6.2 Maximum tension summary of quasi-static and
dynamic storm safe mooring analysis
- Table 6.3 Maximum offset summary of quasi-static and
dynamic storm safe mooring analysis
- Table 6.4 Minimum seabed clearance summary of quasi-static
and dynamic storm safe mooring analysis
- Table 6.5 Comparison of analysis time duration
between quasi-static and dynamic analysis

Table 7.1 Proposed analysis methods by 3 dynamic analysis and
1 quasi-static and dynamic analysis

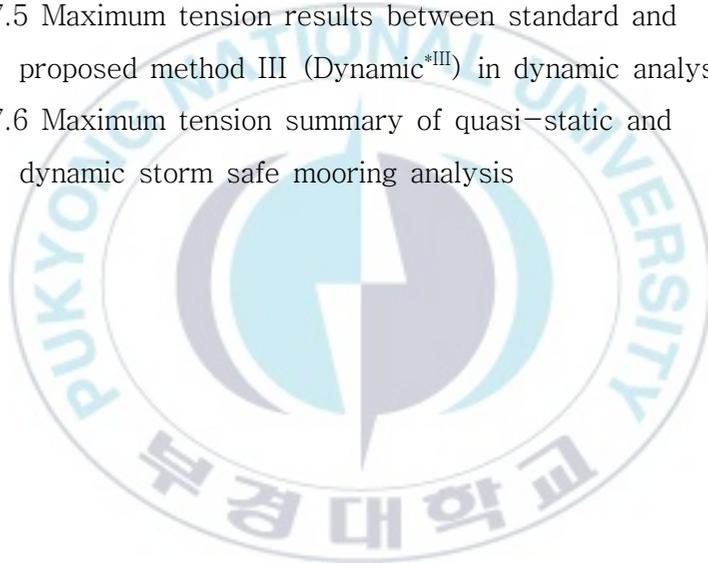
Table 7.2 Maximum tension results between standard and 1st
proposed method (Dynamic^{*I}) in dynamic analysis

Table 7.3 Combination of environmental incidence
by top 8 maximum tension

Table 7.4 Maximum tension results between standard and
proposed method II (Dynamic^{*II}) in dynamic analysis

Table 7.5 Maximum tension results between standard and
proposed method III (Dynamic^{*III}) in dynamic analysis

Table 7.6 Maximum tension summary of quasi-static and
dynamic storm safe mooring analysis



List of Symbols

ALS	Accidental Limit State
B	Breadth
COG	Center of Gravity
D	Depth at side
D_I	Installation Draft
Dir	Direction of squall observed
DNV	Det Norske Veritas
DNVGL	Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd
F_C	Characteristic Force, mooring load
F_D	Design Force
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
GM	Transversal Metacentric Height
H_s	Significant wave height
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
ID	Identification
K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}	Radius of gyration
LCG	COG longitudinal location
LOA	Length overall
LRFD	Load and Resistance Factor Design
MBL	Minimum Breaking Load
MOSES	Multi-Operational Structural Engineering Simulator
P1, ..., P6	Mooring lines on Port side no. 1~6
QS	Quasi-Static
R_C	Characteristic Resistance

R_D	Design Resistance
RP	Return Period
S1,···,S6	Mooring lines on Starboard side no. 1~6
Sq1,···,Sq6	Squall time series scaled no. 1~6
Sq1*,···,Sq6*	Squall time series observed no. 1~6
SSW	Spiral Strand Wire
SWL	Safety Working Load
TAP	Theoretical Anchor Point position
TCG	COG transversal location
T_d	Return Period
T_p	Peak Period of Wave
T_R	Reference Period
ULS	Ultimate Limit State
VCG	COG vertical location
WD	Water Depth
X_F	X-direction of floater, FPSO
X_L	Local coordinates in X-direction
X^*	Maximum offset position in X-direction
Y_F	Y-direction of floater, FPSO
Y_L	Local coordinates in Y-direction
Y^*	Maximum offset position in Y-direction
Z_L	Local coordinates in Z-direction
γ_f	Load factor
γ_m	Material factor
Δ	Displacement

A Study on Storm Safe Mooring Assessment of Offshore Structures in Squall

Sang-Joon Yoon

Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering,
Pukyong National University

Abstract

The design methodology of offshore mooring system has been settled as industrial standards and guidelines by abundant references throughout long times. This offshore mooring system has various design requirements in the installation engineering.

As the representative engineering item in offshore mooring installation, storm safe mooring is to identify the minimum number of mooring lines required to meet the storm safe mooring condition during installation. During mooring line hook-up operations, mooring lines will be successively transferred and connected to the offshore structure. Once the minimum required lines considered to be storm safe are hooked-up to the offshore structure, the supporting tugs for station keeping will depart the installation site, and the offshore structure is to be completely supported by the mooring lines.

The oil field of West Africa is governed by squall which are wind episodes characterized by a sudden increase in wind speed and direction over a relatively short duration. Although a large number of studies have been made on the offshore mooring system design including storm safe mooring, little is known about the design procedures settled for this squall condition so far.

In this study, it was performed with storm safe mooring analysis for squall in quasi-static and dynamic. After the results were compared, the several alternative analysis methods were proposed for the time saving in installation engineering and the results were also compared with the conventional analysis results.

Based on the results presented in this study, the following summarization and conclusion are made:

1. FPSO with 12 mooring lines and the squall environment were defined respectively. The evaluation process and limitation were established, then the quasi-static and dynamic analysis were performed.
2. The quasi-static and dynamic analysis results have the differences by 11~58% from the criteria of maximum tension and 10~23% from the criteria of maximum offset.
3. The maximum tension was selected for the significant index of the storm safe mooring analysis, it was pointed out the relation between the maximum tension and shorten analysis time window throughout the investigation of time series results in squall environment. The three kinds of dynamic analysis and one additional quasi-static analysis

were proposed as alternative evaluation procedure in squall environment.

4. First, alternative dynamic analysis I (Dynamic^{*I}); constant maximum wind speed of squall for 20 minutes calculation was proposed. The results have 0.1~1.8% difference with the 3 hours conventional dynamic analysis methodology.
5. Secondly, alternative dynamic analysis II (Dynamic^{*II}); time series wind speed of squall but fixed wind direction for below 20 minutes calculation was proposed. The results have 1.0~2.8% difference with the 3 hours conventional dynamic analysis methodology.
6. Thirdly, alternative dynamic analysis III (Dynamic^{*III}); time series wind speed and direction of squall for below 20 minutes calculation was proposed. The results have 0.7~3.8% difference with the 3 hours conventional dynamic analysis methodology.
7. Additionally, alternative quasi-static analysis (Quasi-static^{*}); constant wind speed by peak value of 1 minutes averaged wind velocity in scaled squall time series for quasi-static calculation was proposed. The results have 0.3~4.6% difference with the 3 hours conventional dynamic analysis methodology.

This study needs following verification with various additional squall time series data. There remains a second question: how different in various parameter, e.g. floater type, size, weight and mooring lines configuration, etc. Finally, it is remained also more calculation cases by the variation of irregular wave seed.

Despite of the above limitation, it seems reasonable to conclude that this study would be effective as alternative procedure to provide time saving engineering.



1. 서론

1.1 연구배경

외해에 설치되는 대형 해양구조물은 대부분 해양유전 관련 시설이다. 천해 수심에 설치되던 초기 해양구조물은 해양유전 개발과 역사를 같이하며 점차 수심이 깊은 곳으로 확대되어 설치되고 있다. 대수심의 해양구조물은 고정식과 비교할 때 제작 및 설치 비용이 저렴한 이유로 인해 부유식으로 제작된 후 계류 시스템을 이용하여 설치된다. 대표적인 해양구조물로는 부유식 생산·저장·하역시설(FPSO, Floating Production, Storage and Offloading) 및 반잠수식(semi-submergible) 구조물 등이 있다.

대형 해양구조물의 계류라인 설계에 관한 국내 연구로는 FPSO 계류 시스템에 대한 최적설계 변수에 따른 해석방법의 타당성을 분석한 연구(Lim et al., 2009) 및 부유식 해양플랜트 계류라인에 대한 여러 피로손상모델 소개 및 수치해석적 비교연구를 수행한 연구(Park et al., 2013) 등이 있다. 그러나 조선 관점에서 접근하는 설계 기술과 달리 계류시스템 설치 관점의 엔지니어링 영역은 선진 해외기술에 비해 국내 기술이 많이 뒤쳐져 있다. 이는 동해-1 가스전 플랫폼을 제외하면 국내의 해양유전 관련 외해(offshore) 설치 시장이 거의 없는 것이 가장 큰 이유일 것이다. 선진사와의 기술력 차이를 줄이기 위한 다방면의 노력에도 불구하고, 까다로운 산업기술 규정과 설치경험을 요구하는 등의 진입장벽 때문에 쉽게 접근하기 힘든 것이 사실이다. 그 와중에 최근 FPSO 신조 발주계약에서는 해양설치 일부를 해양구조물 건조 계약에 포함하여 국내 조선사로 발주하는 사례가 나타나고 있다.

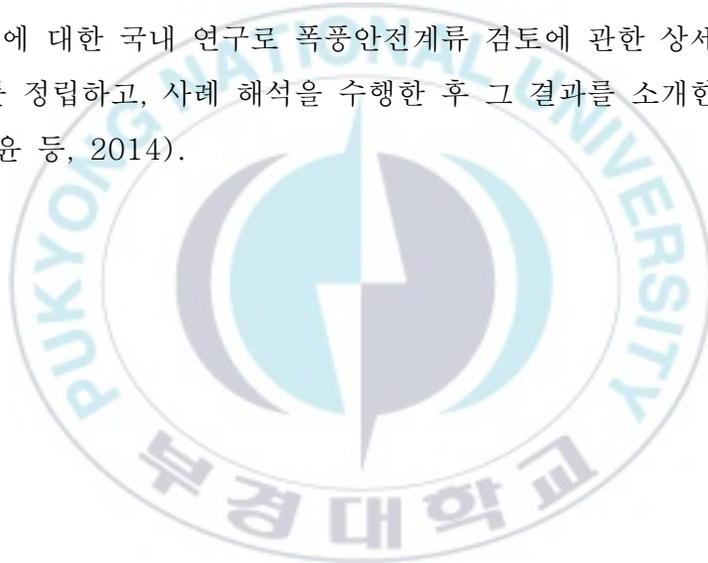
해양유전 구조물의 전체적인 설치과정은 탐사, 시험시추, 상업성 검토, 생산시추 및 해양구조물 건조 순으로 이어진 다음, 고정식 해양구조물은 구조물 설치 기초를 건설한 후 제작된 해양구조물을 이송하여 기초 위에 거치하는 방식으로 설치를 완료한다. 이와 달리 부유식 해양구조물은 계류용 앵커파일 설치, 설치해역 해저면 상 계류라인의 사전 배치, 건조된 해양구조물 이송 후 해저면에 사전 배치된 계류라인을 해양구조물에 연결하면서 기본적인 설치를 마치게 된다. 이후 URF(Umbilical, Riser, Flowline) 및 해저시스템(subsea system) 등 필요한 부가 시설물을 설치, 연결하여 시운전까지 마치면 모든 설치 과정이 완료된다.

이러한 해양구조물의 설치 과정을 다룬 국내의 연구로는, 완공된 해양구조물을 설치 해역으로 안전하게 이송하고, 이어서 현장 설치 작업 중 해양구조물 위치유지(Position keeping)를 돕는 작업 지원선 용량과 동원 선박의 수량 산정, 계류 라인 of 제원과 해양구조물의 허용 이격변위 등 안전성 확보 관련 제반 파라미터를 분류하고 정리한 연구가 있다(Lee et al., 2014).

설치작업 지원선박에 의한 해양구조물 위치 유지 이후 사전 배치된 계류라인을 해양구조물에 연결(Hook-up)하는 작업이 이어질 때, 요구되는 최소 개수만큼의 계류라인이 해양구조물에 연결되고 나면, 해양구조물의 위치유지 역할을 하는 해양설치 작업지원선은 설치현장에서 철수하게 되고, 해양구조물은 온전히 계류라인에 의해서만 위치유지를 하면서 주 설치선에 의해 잔여 작업이 마무리된다. 이때 해양구조물이 작업지원선의 도움 없이 계류라인에 의해 위치유지를 하게 되는 최소한의 계류라인 연결상태를 폭풍안전계류(Storm safe mooring)라고 부른다.

대략 1년 안팎에 걸쳐 진행되는 해양구조물 건조 작업과 조선소에서 설치 해역까지 수개월간 이어지는 이송 작업 등 여러 가지

장기 작업 과정과 비교해 볼 때, 계류 설치 작업은 단기간 행해지는 공정이지만, 프로젝트의 성패를 결정짓는 중요한 과정으로서 매우 리스크가 크면서 동시에 부가가치가 높은 시장 특성을 지니고 있다. 설치 작업 중에서 소요 기간 대비 작업 인력과 선박 동원비용을 최소화하면서도 작업 중 예상되는 환경 외력을 견디기 위한 최소한의 계류 상태를 만족시키는 폭풍안전계류 조건(Storm safe mooring condition)에 대한 검토를 하는 것은 상세한 작업 절차서(Working procedure)를 수립하기 위한 중요한 요소 중 하나이다. 이에 대한 국내 연구로 폭풍안전계류 검토에 관한 상세한 해석 절차를 정립하고, 사례 해석을 수행한 후 그 결과를 소개한 연구가 있다(윤 등, 2014).



1.2 폭풍안전계류(Storm safe mooring)

해양구조물은 조선소에서 건조가 완료되면 해양작업지원선(Tug)을 이용하여 설치 해역으로 이송된다. 보통 해양구조물 이송을 맡는 해양작업지원선은 4척으로 구성되고, 만일을 대비한 비상투입 등의 목적으로 추가 1척의 선박이 필요하다. 해양구조물이 설치 해역에 도착하면 이송을 목적으로 하는 해양작업지원선은 Fig. 1.1과 같이 위치를 이동시킨 후 견인선 연결을 재배치하여, 해양구조물의 위치유지 작업 상태로 전환된다.

해양작업지원선에 의해 위치유지가 된 해양구조물은 2주~4주간에 걸쳐 해저면에 사전 설치된 계류라인을 일정한 순서로 인양하여 연결하는데, 이러한 작업을 수행하는 계류라인 설치선이 필요하다.

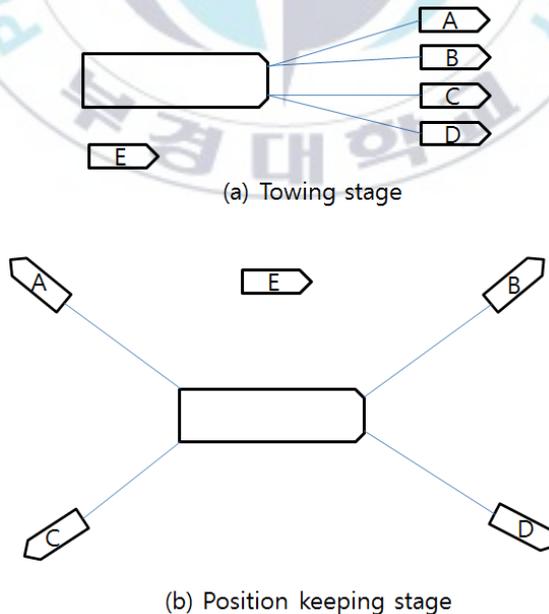


Fig. 1.1 The working stage of tug.

이때 계류라인이 연결되는 일정 시점부터는 설치 과정에 만날 수 있는 극한의 폭풍상태에서도 견딜 수 있는 상태가 되고, 이때 위치유지를 돕는 해양작업지원선은 모두 설치 현장에서 철수할 수 있다. 이러한 계류상태를 폭풍안전계류(Storm safe mooring) 상태라고 부르다고 앞 절에서 소개한 바 있다.

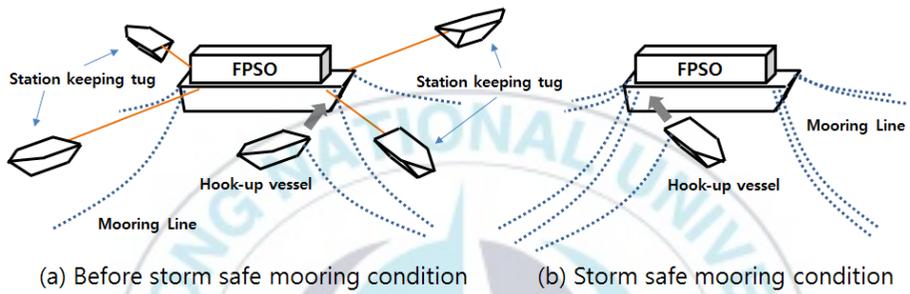


Fig. 1.2 Storm safe mooring condition.

1.3 연구목적 및 내용

폭풍안전계류 해석의 목적은 계류라인 설치 작업 중 발생 가능한 폭풍 조건에서 안전한 계류상태가 되는 최소의 계류라인 연결 개수를 규정하는 것이다. 이때 부유체는 발라스트(ballast) 상태이므로 수면 위로 노출되는 면적이 크기 때문에 바람으로 인한 환경 외력은 매우 중요한 요소이다.

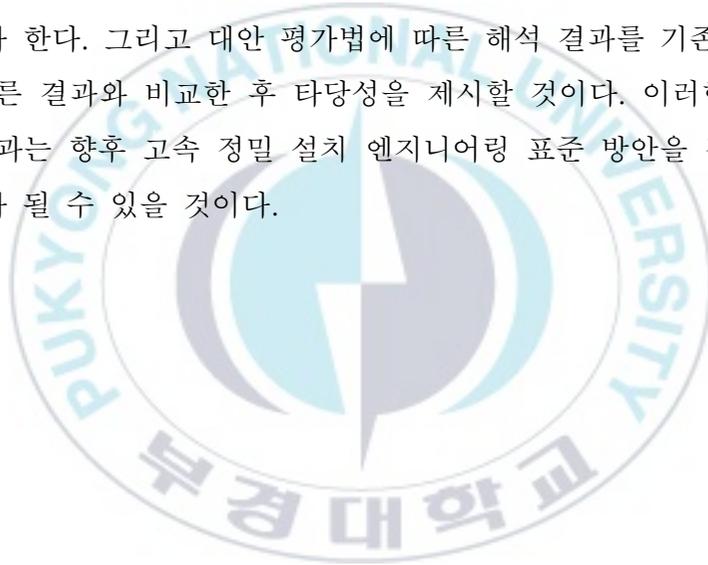
일반적 풍하중을 고려한 구조물 설계 등에 관한 산업계 가이드라인 및 검토 절차는 상세히 정립되어 있는 편이다. 그러나 일부 해역에서 발생하는 스콜(squall)에 대해서는 현시점까지 충분히 체계화되어 있지 않다. DNV-RP-F205(2010)는 스콜 해역의 풍하중은 특별한 주의를 요한다고 언급하고 있으며, DNV-RP-C205(2010)은 스콜 바람의 통계적 표현이 아직 진행 중인 연구 소재라고 소개하고 있다. 또 스콜 해역의 계류라인 설계에 대한 내용은 산재된 여러 규정 또는 권고안에서 소단원 또는 몇 문장으로 짧게 다루어지고 있는 실정으로 통일된 설계 기준이 없는 상황이다(DNV-OS-H101, DNV-OS-E301, BV-NR 493 DT R02 E, DNVGL-ST-N001, GLND-0032). 또 스콜 해역의 계류시스템 설계에 관한 실패 확률 분석에 대해서도 거의 알려진 바가 없다.

본 연구는 이러한 스콜 해역에서 대형 해양구조물이 계류 설치되는 것을 가정한 가상의 프로젝트를 상정하고, 그 중 폭풍안전계류 수치해석의 방법론에 대해 연구하였다.

계류해석은 크게 준정적(quasi-static) 해석과 동적(dynamic) 해석 두 가지로 나뉜다(DNVGL, 2016). 본 연구에서는 스콜이 없는 해역에서 적용할 수 있는 준정적 해석 방법과 스콜 해역에서 권고되는 동적 해석 방법 각각에 대한 해석 방법론을 재정립하고, 해석 결과의 안전 여부 판별 기준을 LRFD(Load and Resistance

Factor Design) 방법을 근거로 산출하였다. 선급 규정에 산재하고 있는 여러 조항들을 기반으로 하여 두 가지 해석 방법으로 계산한 후 계류라인 최대장력, 부유체 이격거리 및 계류라인 헤지면 접촉 검토 결과를 정량적으로 비교하였다.

이를 통해 현재 권고되고 있는 스콜 조건의 부유식 해양구조물 계류시스템의 해석 평가 방법론에 관한 몇 가지 논점에 대해 언급 하면서, 과도한 계산시간을 개선할 수 있는 새로운 접근 방향으로 스콜 해역의 폭풍안전계류를 위한 네 가지의 대안 평가법을 제시 하고자 한다. 그리고 대안 평가법에 따른 해석 결과를 기존 평가법 에 따른 결과와 비교한 후 타당성을 제시할 것이다. 이러한 본 연구 결과는 향후 고속 정밀 설치 엔지니어링 표준 방안을 정립하는 기초가 될 수 있을 것이다.



2. 폭풍안전계류 해석 모델

폭풍안전계류 해석은 해양구조물 건조 후 해역으로 이동시킨 뒤 설치되는 과정의 구조물 거동 및 계류라인 장력 등을 해석하는 것에 그 목적이 있다. 본 해석에서는 라이저, 엄빌리컬(umbilical) 및 기타 송유관 등은 연결되지 않은 상태로 해석하였다. 해석을 위해 사용된 구조물 및 계류시스템 모델은 다음과 같다.

2.1 FPSO

대상 부유체는 선체 길이가 300 m, 선폭이 60 m이며, 180만 배럴의 저장 용량을 가진 FPSO로 가정하였다. FPSO 형상은 건조기간 단축을 위해 단순한 형태의 선수·선미 형상을 채용하는 경향이 있다.

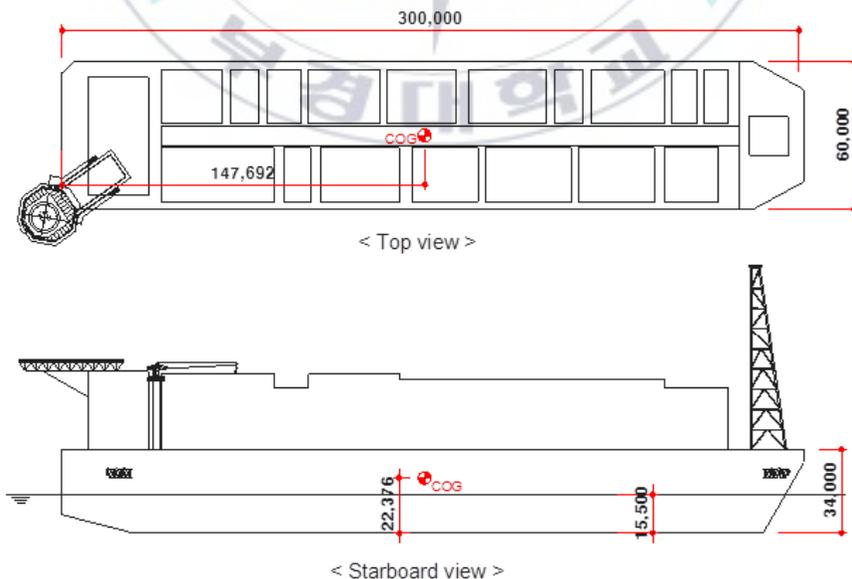


Fig. 2.1 General arrangement and coordinates system of FPSO.

설치 완료 상태의 FPSO는 흘수가 25 m인데, 해상 설치상태인 발라스트 조건은 15.5 m의 흘수 상태이며, 이를 기준으로 한 FPSO 상세 제원은 Table 2.1과 같다.

또한 설정된 제원을 바탕으로 한 FPSO 선체 모델링 결과는 Fig. 2.2와 같다. 본 모델을 이용하여 RAO, QTF 및 부가 질량 등의 동유체력 자료를 계산하였다. 부유체 경사(trim)는 없는 것으로 가정하였다.

Table 2.1 FPSO configuration

Item	Symbol	Configuration
Length overall (m)	LOA	300.0
Breadth (m)	B	60.0
Depth at side (m)	D	34.0
Installation Draft in Ballast (m)	D_I	15.5
Radius of gyration (m)	K_{xx}	21.5
	K_{yy}	89.9
	K_{zz}	89.4
Displacement (t)	Δ	269,970
COG longitudinal location (m)	LCG	147.7
COG transversal location (m)	TCG	0.001
COG vertical location (m)	VCG	22.4
Transversal Metacentric Height (m)	GM	5.4

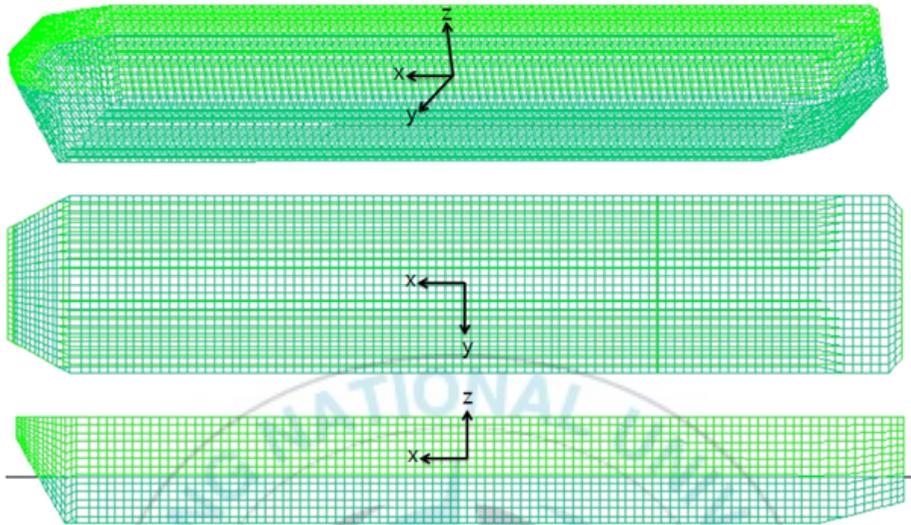


Fig. 2.2 FPSO modelling and coordinates.

2.2 계류시스템

2.2.1 계류시스템 기본배치

FPSO 계류시스템의 기본배치도는 Fig. 2.3과 같다.

계류시스템은 총 12개의 계류라인을 가지며, 4개의 클러스터 즉, 선수 좌우현 및 선미 좌우현 각각에서 3개씩의 계류라인이 연결되는 형식이다. 각 클러스터의 계류라인들은 동일하게 4° 간격으로 설치되어 있다. 계류시스템은 선수미를 관통하는 종축 방향(X_F)을 기준으로 좌우현이 대칭이 되도록 설정하였다.

해저면의 높이 차이를 반영하여 계류라인 반대쪽 끝 앵커좌표를 설정하였으며, 모든 계류라인의 수평거리는 동일하게 2,500 m가 되도록 하였다.

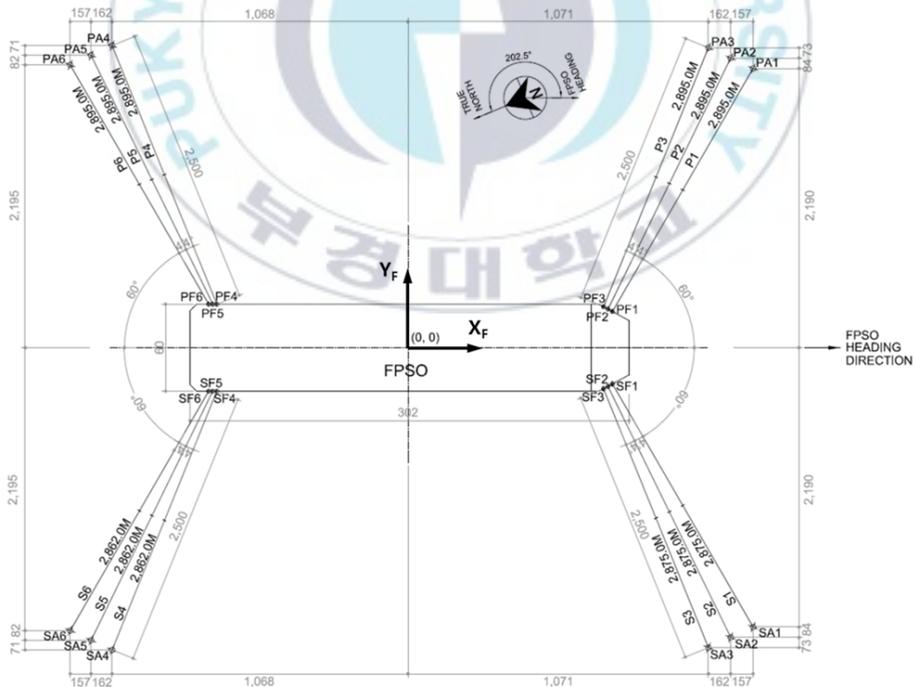


Fig. 2.3 Mooring arrangement and ID of fairlead, mooring line and anchor.

계류라인 P1부터 P6까지는 좌현(Port) 선수부터 선미방향으로 매긴 번호이며, S1부터 S6까지는 우현(Starboard) 선수부터 선미 방향으로 매긴 번호이다.

2.2.2 페어리드(Fairlead)

Table 2.2는 FPSO 국부 좌표계 상의 페어리드(fairlead) 좌표값이다.

Table 2.2 Fairlead location in local coordinates system

Mooring line (Fairlead ID)	Fairlead location		
	x_L (m)	y_L (m)	z_L (m)
P1 (PF1)	140.77	24.97	9.5
P2 (PF2)	137.70	26.64	9.5
P3 (PF3)	134.66	28.30	9.5
P4 (PF4)	-131.50	30.00	9.5
P5 (PF5)	-134.30	30.00	9.5
P6 (PF6)	-137.10	30.00	9.5
S1 (SF1)	140.77	-24.97	9.5
S2 (SF2)	137.70	-26.64	9.5
S3 (SF3)	134.66	-28.30	9.5
S4 (SF4)	-131.50	-30.00	9.5
S5 (SF5)	-134.30	-30.00	9.5
S6 (SF6)	-137.10	-30.00	9.5

2.2.3 앵커좌표(TAP)

해석에 사용된 이론적 앵커 좌표(TAP, Theoretical Anchor Point)는 아래 Table 2.3과 같다.

Table 2.3 Theoretical anchor point position in local coordinates system

Mooring line (Anchor ID)	Theoretical Anchor Point position		
	x_L (m)	y_L (m)	z_L (m)
P1 (PA1)	1,390.77	2,190.03	-1,269.72
P2 (PA2)	1,233.63	2,273.63	-1,269.22
P3 (PA3)	1,071.18	2,346.26	-1,268.62
P4 (PA4)	-1,068.02	2,347.69	-1,250.55
P5 (PA5)	-1,230.23	2,276.99	-1,248.27
P6 (PA6)	-1,387.10	2,195.06	-1,245.53
S1 (SA1)	1,390.77	-2,190.03	-1,241.62
S2 (SA2)	1,233.63	-2,273.63	-1,236.88
S3 (SA3)	1,071.18	-2,346.26	-1,231.97
S4 (SA4)	-1,068.02	-2,347.69	-1,172.14
S5 (SA5)	-1,230.23	-2,276.99	-1,168.37
S6 (SA6)	-1,387.10	-2,195.06	-1,164.96

2.2.4 계류라인

계류시스템을 구성하는 계류라인의 주요사양 및 각 계류라인 구성 요소의 경계점에 대한 FPSO 기준 길이(Paid out length)는 각각 Table 2.4 및 2.5와 같다.

Table 2.4 Specifications of mooring lines

Item	Mooring lines		
	Top chain	Wire rope	Ground chain
Type	R4S studless	Spiral strand	R3 studless
Nominal diameter (mm)	152	108	127
MBL (ton)	2,280.5	1,306.8	1,241.2
Weight (ton/m)	0.462	0.063	0.323
Axial stiffness (ton)	201,203.3	114,215.8	140,424.2
Length (m)	40	1,967 (S4~S6) 1,980 (S1~S3) 2,000 (P1~P6)	855

Table 2.5 Paid out length of mooring lines from floater

Item	Mooring lines		
	P1~P6	S1~S3	S4~S6
Paid out length (m)	2,985	2,875	2,862
SSW end length (m)	2,007	2,020	2,040
Top chain end (ton)	40		
Horizontal length (m)	2,500		

2.3 좌표계

2.3.1 준정적 해석 좌표계(MOSES)

MOSES를 이용한 준정적 해석 좌표계는 Fig. 2.4와 같다. Fig. 2.5는 MOSES로 모델링된 계류시스템을 보여주는 그림이다.

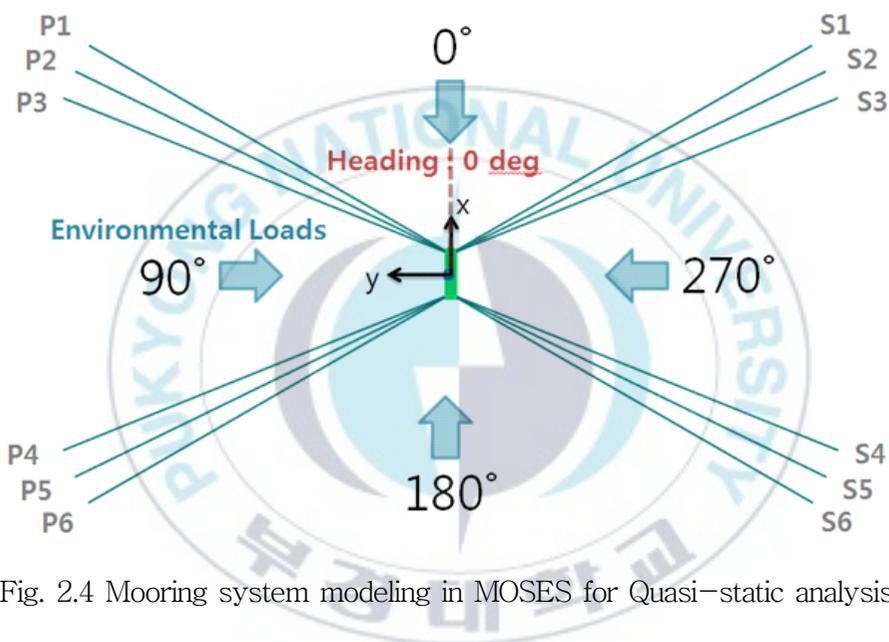


Fig. 2.4 Mooring system modeling in MOSES for Quasi-static analysis.

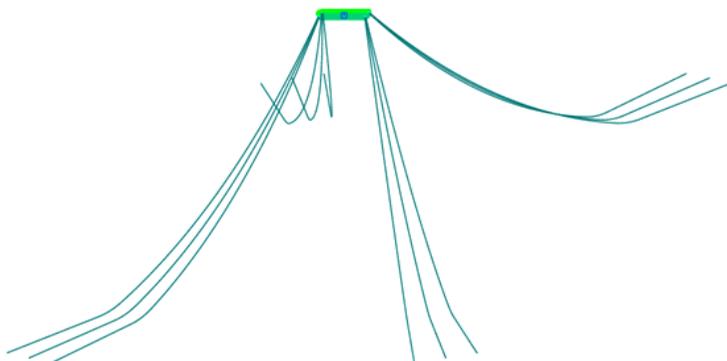


Fig. 2.5 Modelling of mooring line layouts in MOSES.

2.3.2 동적 해석 좌표계 (OrcaFlex)

OrcaFlex를 이용한 동적 해석 좌표계는 Fig. 2.6과 같다. Fig. 2.7은 OrcaFlex로 모델링된 계류시스템을 보여주는 그림이다.

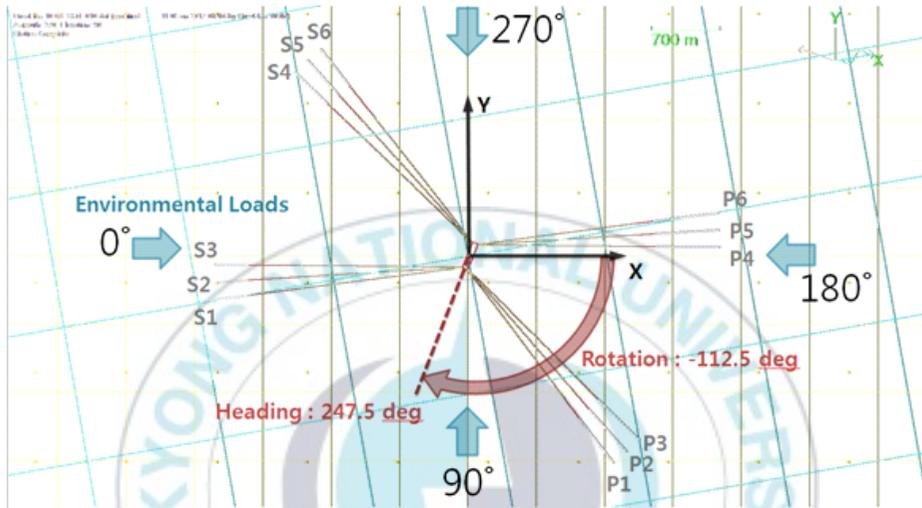


Fig. 2.6 Mooring system modeling in OrcaFlex for dynamic analysis.

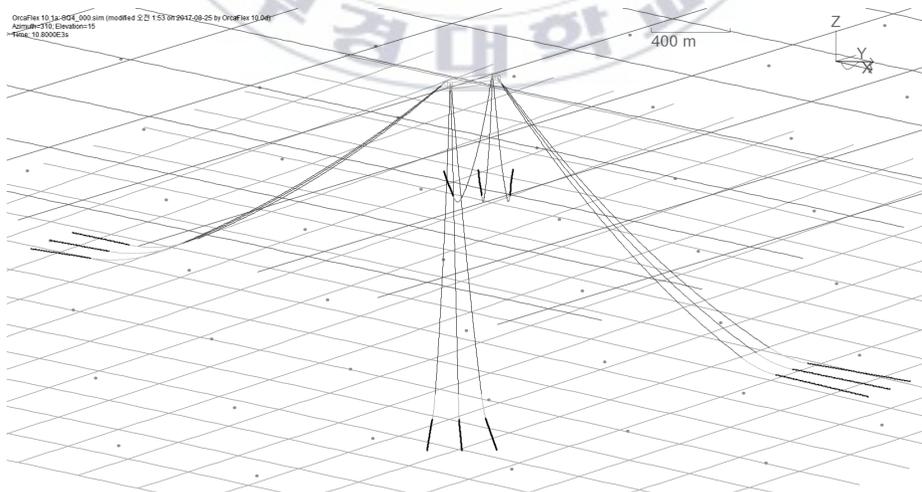


Fig. 2.7 Modelling of mooring line layouts in OrcaFlex.

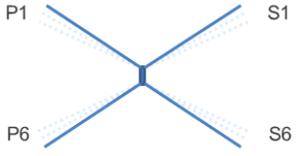
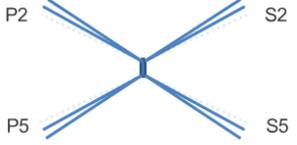
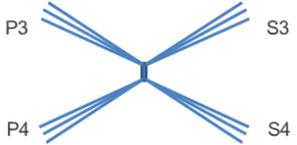
3. 폭풍안전계류 해석방법

3.1 해석 케이스 및 시나리오

폭풍안전계류는 부유체의 계류라인 연결과정에서 작업지원선들이 현장에서 철수 가능한 계류상태이므로 반드시 역학적 평형이 되어야 한다. 본 연구의 계류시스템은 4개의 클러스터를 가지고 있으므로 폭풍안전계류 상태는 4개, 8개 또는 12개의 전체 계류라인이 연결되는 조건 중 하나가 된다.

해석에서 위 3가지 단계의 계류라인 연결 조건에서 환경외력으로 인해 발생하는 최대장력 등을 검토한다. 해양 환경외력인 바람, 조류 및 파랑은 10° 간격으로 전방향에 대해 해석을 수행하였다. Table 3.1은 각 단계별 계류라인 연결 시나리오를 설정한 것이다.

Table 3.1 Analysis cases by connecting mooring lines (ULS)

Analysis cases (Number of lines connected)	Mooring lines connecting order	Figure (— connected, ... planned)
4 lines	S1, P6, S6, P1	
8 lines	S1, P6, S6, P1 → S2, P5, S5, P2	
12 lines	S1, P6, S6, P1 → S2, P5, S5, P2 → S3, P4, S4, P3	

3.2 해석 방법

계류해석은 크게 준정적 해석과 동적 해석으로 나뉜다. 계류라인을 연결하는 설치작업은 단기간의 해양작업이며, 이러한 경우 작업 안정성 등의 검토를 위해 위 두 가지 해석 방법 모두 적용할 수 있다(DNVGL, 2016).

Fig. 3.1은 폭풍안전계류 해석 방법을 순서도로 나타낸 그림이다. 그림에서 짧은 점선은 준정적 해석 절차이고, 긴 점선은 동적 해석 절차이며, 실선은 두 가지 모두 거치는 공통 해석 절차이다.

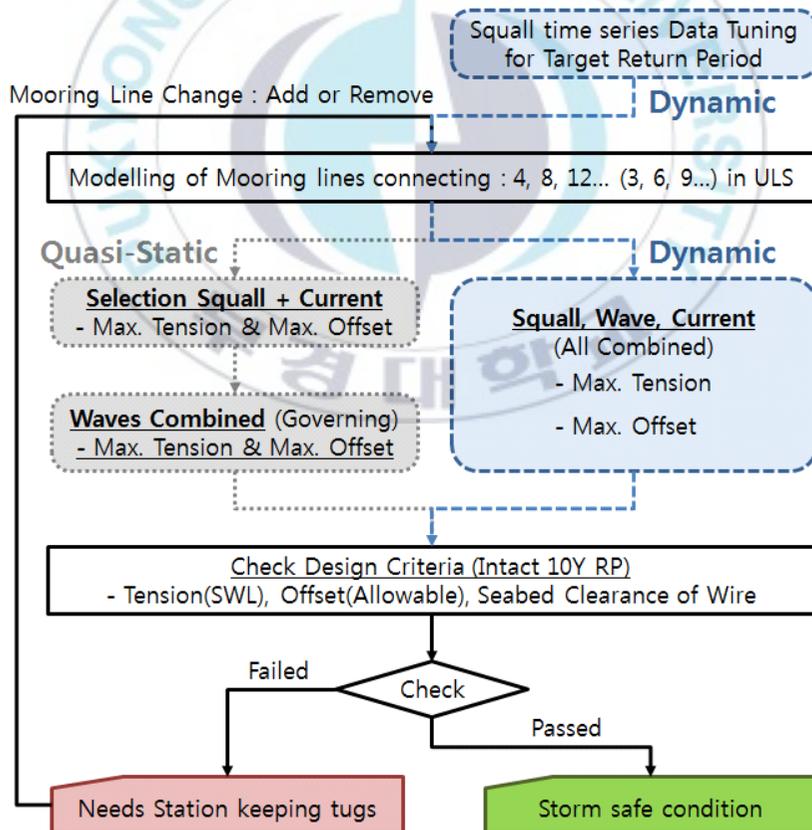


Fig. 3.1 Methodology flowchart of storm safe mooring analysis.

3.2.1 준정적 해석 방법론(MOSES)

계류라인의 응답을 수치 모사할 때, 계류시스템의 평균 작용력은 저주파수 운동 응답 개념을 감안한 정적 현수선 방정식으로 계산될 수 있으며, 파 주파수의 부유체 운동 응답은 준정적 해석 또는 동적 해석으로 계산된다(API RP 2SK, 2005). 여기서 준정적 해석은 파에 의한 동하중을 파 유발 운동(wave induced motion)에 의한 부유체의 정적 이격에 의한 것으로 간주하는 것이다. 계류라인의 수직운동이나 질량, 감쇠 및 유체 가속도는 무시되므로, 이들 요인의 영향에 의해 계산 결과는 편차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 폭풍안전계류 평가를 위한 준정적 해석에 상용 해석 프로그램 MOSES(Ultramarine Inc., 2014)를 사용하였다. MOSES는 해양 부유시스템에 대한 유체력, 관성력, 계류력 등의 물리력을 정수역학(Hydrostatic) 및 동수역학(Hydrodynamic) 기반으로 계산하는 소프트웨어이다. FPSO 및 플랫폼 선체 모델링과 안정성 계산부터 모션 예측, 구조해석을 비롯하여 계류 해석이나 자켓 진수를 포함한 수송·설치(Transportation & Installation) 해석에도 많이 사용되고 있다. 본 해석 프로그램의 자세한 계산 방법에 대한 사항은 Bentley systems(2014)에 수록되어 있다.

본 연구에 적용된 상세한 폭풍안전계류 준정적 해석 방법론은 아래와 같이 설정하였다.

먼저 클러스터별 1개씩 계류라인이 증가하는 역학적 평형상태인 4개, 8개 및 12개 계류라인이 연결되는 각 단계별 계류시스템에 대한 역학적 평형상태를 확인한다.

다음 스콜과 조류는 시간에 따른 강도 및 방향 변화 없이 일정하게 입사하는 것으로 설정하여 10° 간격으로 전 방향 해석을 수행한다. 해석 결과는 연결된 각 계류라인에서 최대의 장력이 나타나는 외력 입사방향과 FPSO의 최대 이격거리가 나타나는 외력 입사

방향을 각각 찾아낸다.

최대장력 및 최대이격거리를 만드는 스콜 및 조류 조건을 적용하면서 이에 중첩하여 다시 10° 간격 전방향으로 파를 입사시킨다. 이때 얻어지는 최대장력 및 최대이격거리를 최종적으로 찾아낸다.

산출된 최대장력과 최대이격거리가 만약 허용기준 이내임이 확인되면, 그 경우에 한해 계류라인 구성 항목인 와이어(SSW) 해저면 접촉여부를 검토한다. 이 마지막 검토항목은 본 연구의 검토 대상 계류시스템과 같이 구성 항목에 와이어가 포함되어 있는 경우로 한정한다.

위 모든 과정을 만족하면 폭풍안전계류 상태가 되고, 그렇지 못한 경우 각 클러스터별 계류라인을 1개씩 증가시켜 해석을 반복한다.

3.2.2 동적 해석 방법론(OrcaFlex)

동적 해석은 질량, 감쇠 및 유체 가속도에 의한 시간 변동 효과를 고려하는 해석 방법이다. 즉, 각 시간 변화에 따른 부유체의 6자유도 운동을 계산하여 원하는 목적 함수를 다시 계산하는 것이다. 일반적으로 동적 해석은 계류라인의 늘어나는 특성과 형상, 유체력, 심지어 해저면 효과까지 고려 가능한 모든 비선형 요소를 시간 영역에서 순차적으로 계산해 나가는 것으로서, 준정적 해석에 비해 긴 계산 시간을 요한다.

한편, 해석 시간을 줄이기 위해 동적 해석에서도 매우 제한적인 상황에서 주파수 영역 해석이 응용되기도 한다. 이때 언급한 제한적인 상황은 주파수 영역의 동적 해석을 할 때, 여러 가지 비선형 효과에 대한 근사와 중첩이 가져다주는 계산 결과가 수용 가능한 정도인지 확인이 필요한 상황을 말한다.

본 연구에서는 시간 영역에서 동적 해석을 수행하였으며, 폭풍안전계류 평가를 위한 동적 해석에 상용 해석 프로그램 OrcaFlex

(Orcina Ltd., 2018)를 사용하였다. OrcaFlex는 유연관 라이저 (flexible riser), 부이, 케이블 포설, 수중장비 설치 등 라인 다이 나믹스(Line Dynamics) 기반의 하중 및 거동 해석 소프트웨어이다. 3차원 비선형 해석을 시간 및 주파수 영역에서 수행할 수 있으며, 강력한 일괄계산 수행 기능과 파이썬(Python), 매트랩 (Matlab) 등 다른 소프트웨어와 호환성이 우수하다.

OrcaFlex를 이용한 폭풍안전계류 동적 해석 방법은 앞서 나타낸 Fig. 3.1에서 볼 수 있는 바와 같이 전체적인 계산 흐름에서 준정적 해석 방법론과 동일하다. 다만, 한정된 스콜 시계열 자료를 활용하여 목표하는 풍속 강도를 구현하기 위해 시계열 자료를 보정하는 작업에서부터 출발한다. 파랑과 조류의 입사방향은 동일한 방향(Collinear)으로 적용하였다. 이는 해석을 위해 구성된 모델이 바람에 지배적인 영향을 받는 것을 감안한 것인데, 별도의 해석을 통해 비동일 방향(Non-collinear)에 대한 검토도 수행하였다.

이후 위 외력 조건을 적용한 해석에서 얻어진 최대장력과 최대이격거리가 허용기준 이내인지를 확인하고, 이를 만족하는 경우 와이 어 해저면 접촉 검토를 시행하는데 이는 준정적 해석과 동일하다.

3.3 환경외력

해양구조물의 해석을 위한 환경외력은 바람, 조류 및 파랑 세 가지이다. 다양한 해양작업의 계획, 준비 및 실행에 대한 일반적인 요구사항 및 권고안들에 대해서는 DNV-OS-H101(2011)에 잘 나타나있다.

3.3.1 기준 풍속 및 준정적 해석 풍속

현수선 계류라인이 적용된 선박이나 해양구조물의 경우, 해양의 바람은 해수면으로부터 10 m 높이의 10분 평균풍속을 사용한다. 설치 해역의 바람 관측자료를 통계 처리한 여러 가지 풍속 중에서, 해양구조물 계류시스템 설계를 위한 풍속은 100년 재현주기 풍속을 사용하고(DNVGL-OS-E301, 2015), 계류시스템 설치 검토를 위한 풍속은 설치 작업 기간에 따라 아래 Table 3.2에서 분류된 기준 풍속을 사용한다.

본 연구에서 대상으로 다루는 계류라인 해양설치작업은 30일 이내의 작업이므로 바람 기준은 10년 재현주기의 풍속을 사용하면 된다. 10년 재현주기의 10분 평균 풍속은 대략 20~23 m/sec인 것으로 확인되었으며, 본 연구에서는 설치작업 기간 동안의 기준 풍속이자 준정적 해석의 풍속 값으로 20.7 m/sec을 사용하였다.

Table 3.2 Acceptable return periods for (characteristic) wind velocities (DNVGL-OS-H101, 2011)

Reference period, T_R	Return period, T_d
$T_R \leq 30$ days	$T_d \geq 10$ years
$T_R > 30$ days	$T_d \geq 100$ years

3.3.2 스콜 및 동적 해석 풍속

스콜(Squall)은 적란운 폭풍과 관련된 집중적인 저준위 바람으로 정의되고 있다. 적란운을 동반한 집중적인 강우는 대기의 하강 흐름을 유발시키는데, 이러한 대기 흐름이 해수면에 부딪혀 수평으로 퍼지게 될 때 생기는 방사형 바람이 스콜이다.

스콜은 시간 영역에서 다루어지는데, 그 이유는 단시간 급격한 풍속(최대 20~40 m/sec) 및 풍향 변화를 일으키는 현상이기 때문이다. 따라서 위성관찰 또는 예보자료가 아닌 현장 관측 자료만으로 획득 가능하여 자료가 상대적으로 빈약한 실정이다. 여러 가지 이유로 인해 이러한 스콜 시계열 자료는 비공개로 취급되고 있다.

스콜 지역에 있어서, FPSO와 같이 계류시스템을 동반하는 해양 구조물 설계를 위해서 보통 적당한 수준의 설계 풍속을 정하고, 획득한 실제 스콜 관측 시계열자료의 통계값이 그것과 일치하도록 전체 시계열자료를 보정한 바람 자료를 사용한다. 아래 Fig. 3.2는 획득한 스콜 시계열 자료를 설계 풍속으로 보정한 예시 자료이다.

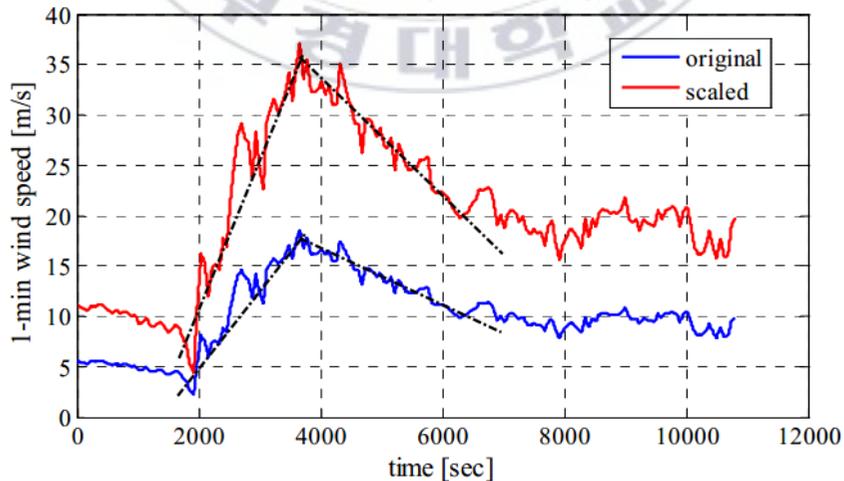


Fig. 3.2 A sample squall time history measured offshore West Africa (Arun Duggal et al, 2011).

그림에서 original로 표기된 최대풍속 약 18 m/sec의 1분 평균 풍속 시계열 자료는 목표하는 100년 설계 풍속을 재현하도록 최대 1분 평균풍속이 약 37 m/sec까지 일괄 상향 보정(scaled)된 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 6개의 스콜 시계열 자료를 입수하여 위와 같은 보정(scaling) 작업을 수행하였다.

Table 3.3은 획득한 1분 평균풍속 스콜 시계열 자료의 10분 평균풍속 통계값과 기준 풍속 20.7 m/sec를 만족시키기 위한 보정 관련 정보들이다. 각 시계열 자료의 시간 길이는 3시간(10,800 초)이다.

Fig. 3.3 ~ Fig. 3.8은 스콜 풍속 관측 시계열 자료(Sq1*~Sq6*)와 시간영역 해석을 위해 보정된 10년 재현주기 기준 풍속을 나타내는 시계열 자료(Sq1~Sq6)를 나타낸 그림이다. Dir1~Dir6은 각 스콜의 풍향 시계열 자료를 나타낸다. 시계열 자료는 모두 3시간 동안의 매 1분(60초)별 1분 평균 풍속 값들이다.

Table 3.3 Wind velocities of squall and scaled factor for dynamic analysis

Squall	Wind Velocity 10min. averaged (m/sec)				Scale Factor
	Original data		Scaled data		
	Average	Maximum	Average	Maximum	
Sq1	10.42	15.08	14.30		1.37
Sq2	6.13	15.47	8.20		1.34
Sq3	12.66	24.84	10.55	20.70	0.83
Sq4	7.24	17.04	8.79		1.21
Sq5	6.24	17.11	7.55		1.21
Sq6	9.63	17.18	11.60		1.20

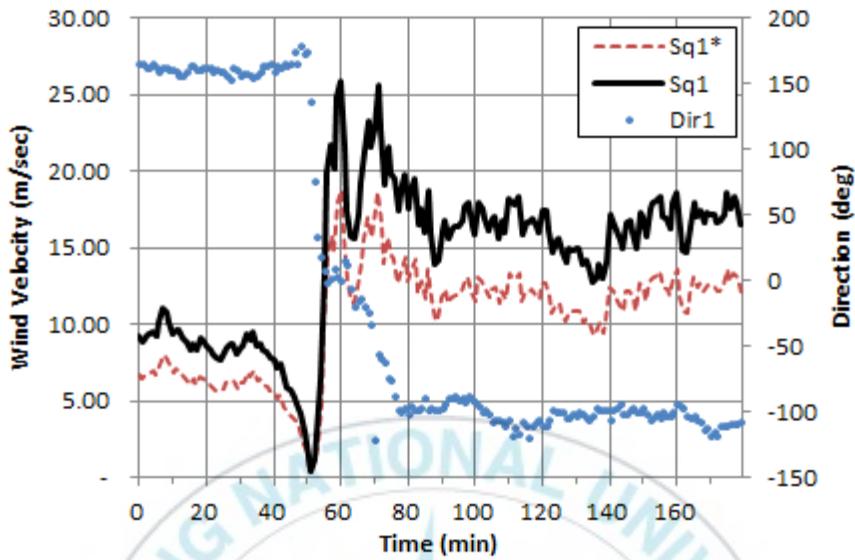


Fig. 3.3 Scaled squall time history #1 with maximum 1 min. averaged wind velocity 25.86 m/sec (Sq1).

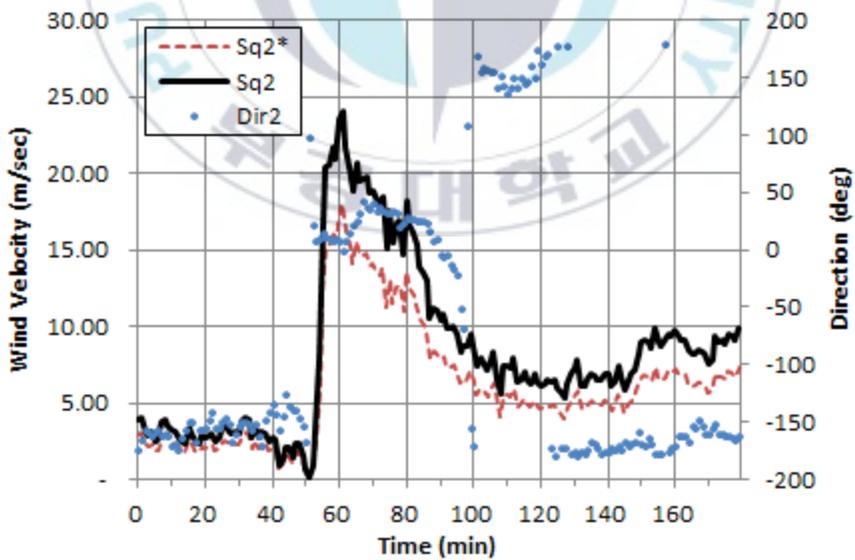


Fig. 3.4 Scaled squall time history #2 with maximum 1 min. averaged wind velocity 24.09 m/sec (Sq2).

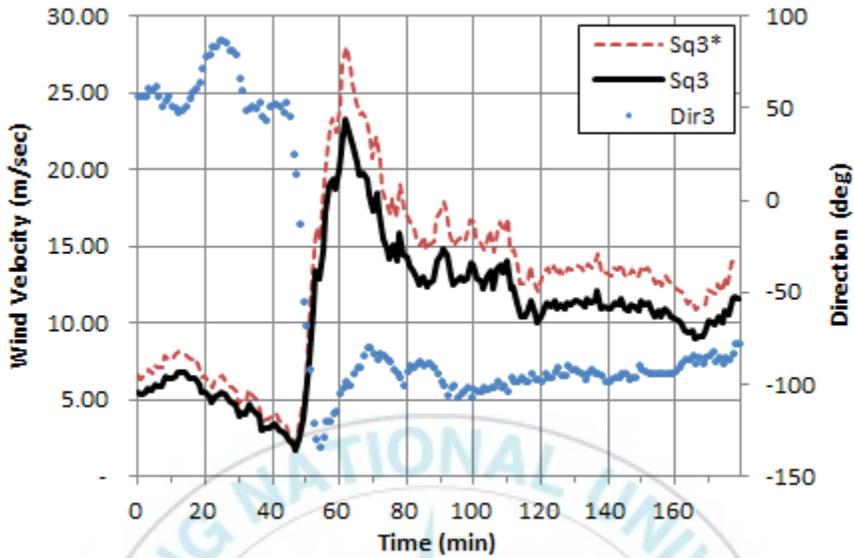


Fig. 3.5 Scaled squall time history #3 with maximum 1 min. averaged wind velocity 23.32 m/sec (Sq3).

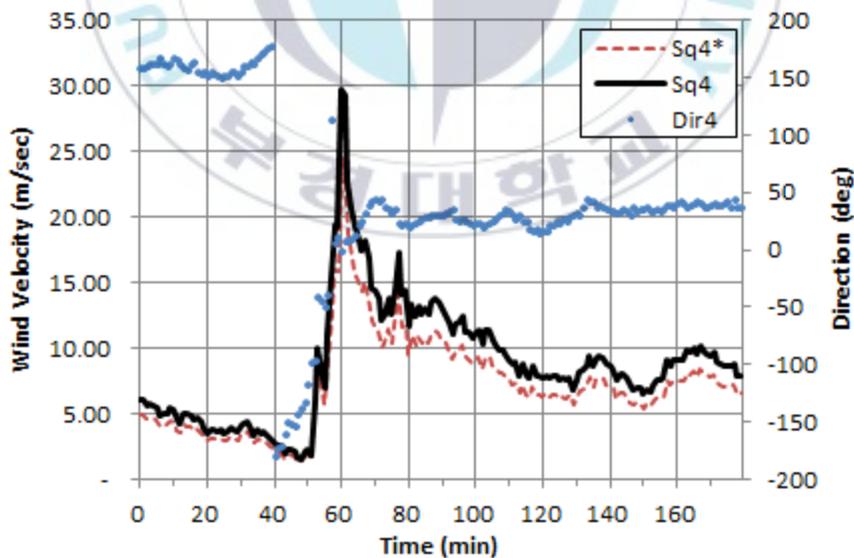


Fig. 3.6 Scaled squall time history #4 with maximum 1 min. averaged wind velocity 29.73 m/sec (Sq4).

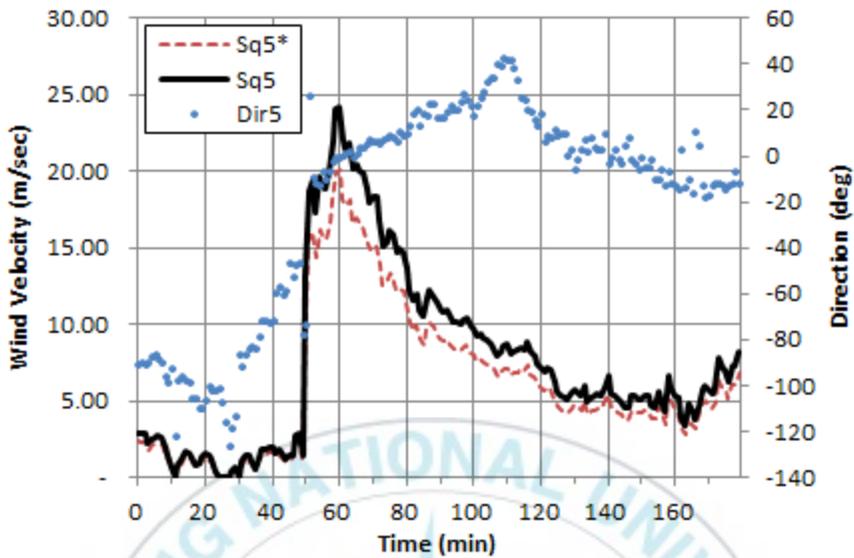


Fig. 3.7 Scaled squall time history #5 with maximum 1 min. averaged wind velocity 24.24 m/sec (Sq5).

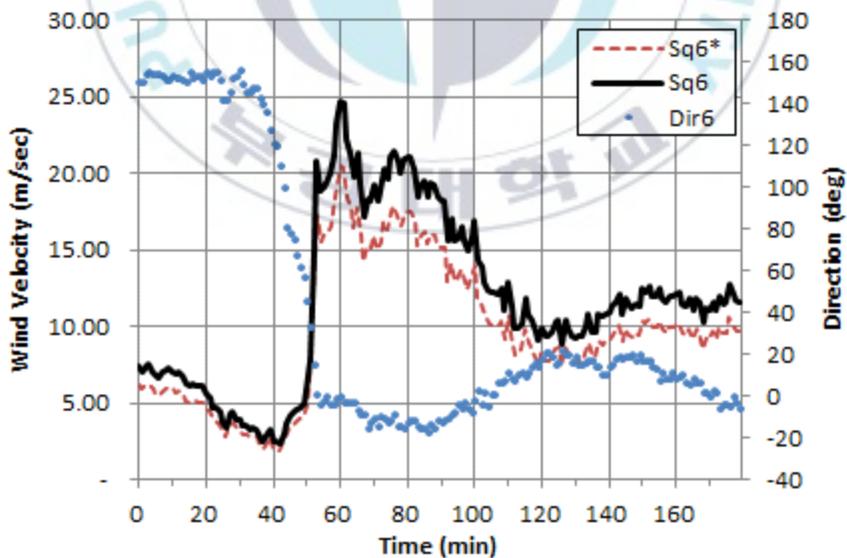


Fig. 3.8 Scaled squall time history #6 with maximum 1 min. averaged wind velocity 24.69 m/sec (Sq6).

3.3.3 파랑

해양구조물 설계에 사용되는 파(water wave)는 다양한 방법으로 정의되고 있다. 이러한 파랑 조건은 특성 파고(characteristic wave height) 또는 특성 유의파고(characteristic significant wave height) 및 파주기(wave period)로 정의하는데, 해양설치작업 표준(DNV-OS-H101) Sec.3 C. Wave Conditions의 Design methods(C200), Unrestricted operations, general (C400), Unrestricted, characteristic waves(C500), Unrestricted, alternative method(C600), Design wave method(C700), Design spectra method(C800) 및 Short crested sea(C900)에 정의되어 있다.

이 중 Unrestricted, alternative method는 장기 파랑관측 자료를 토대로 한 통계처리 값을 이용하여 작업 시점이 특정되지 않은 비제한(unrestricted) 해양설치작업의 설계파 선정법인데, 본 연구에서는 이를 적용하였다. Table 3.4는 작업 기간에 따른 통계값을 선정하는 기준을 보여주는 것으로, 본 연구는 설치작업기간이 2~4 주이므로 1년 재현주기의 값을 사용하면 된다.

Table 3.4 Acceptable return periods for the characteristic significant wave height, H_s (DNVGL-OS-H101, 2011)

Reference period, T_R	Return period, T_d
$T_R \leq 3$ days	$T_d \geq 1$ month
$3 \text{ days} < T_R \leq 7$ days	$T_d \geq 3$ months
$7 \text{ days} < T_R \leq 30$ days	$T_d \geq 1$ years
$30 \text{ days} < T_R \leq 180$ days	$T_d \geq 10$ years
$T_R > 180$ days	$T_d \geq 100$ years

3.3.4 조류

조류(tidal current) 속도는 보통 해당 지역의 통계 자료나 경험 값을 사용하는데, 장기적 변동성이 매우 적을 것으로 생각할 수 있다. 선급의 해양설치작업 표준에서도 별다른 구분 없이 10년 재현 주기 값 사용을 권고하고 있다.

이상 본 연구에 적용할 환경외력조건은 Table 3.5와 같이 설정하였다.

Table 3.5 Environmental condition combination

Squall (wind)	Wave		Tidal current
Max. 10min-avg (m/sec)	H _s (m)	T _p (sec)	Speed (m/sec)
20.7	2.56	16.10	1.32 (surface, 0 m) 0.36 (mid, 600 m) 0.27 (bottom, 1,000 m)
0~350° , 10° step, Constant in QS, Time series data in dynamic	0~350° , 10° step, JONSWAP		0~350° , 10° step
10Y RP	1Y RP		10Y RP

Note: QS means Quasi-Static analysis.

3.4 안전 판정 기준

해양 설치 작업 중인 구조물, 시스템 및 시설물 등이 작업 자체는 물론 하중의 선택, 설계 검증 및 제작이 안전한 것인가를 판정하는 기준이 DNV-OS-H101(2011) 및 DNV-OS-H102(2012)에 자세히 설명되어 있다.

하중을 받는 구조물 또는 시스템은 그것을 견디는 저항력이 있을 때 안전하다고 판단하며, 이는 구조물과 시스템을 설계할 때 기본적인 개념이 된다.

LRFD(Load and Resistance Factor Design) 방법에 따른 설계는 이러한 기본 개념에 충실한 것으로서, 하중(Load) 및 저항(Resistance) 각각의 안전율(Factor)을 이용하여 하중보다 저항력이 크도록 설계(Design)하는 방법이다.

이때 목적하는 기능이 만족스럽게 작동하는 한계 상태에 대한 정의가 이루어지는데, 본 연구는 설치작업 기간을 대상으로 한 것이므로 아래 두 가지 한계 상태에 대한 정의를 제시한다.

- ULS (Ultimate Limit State) : 비손상 상태의 최대하중 상태
- ALS (Accidental Limit State) : 손상 상태의 최대하중 상태

위 두 가지 한계 상태에서 계류시스템과 강구조물은 다음과 같이 설계되어야 한다.

$$F_D \leq R_D \quad (1)$$

여기서, F_D 는 설계하중(design force), R_D 는 설계저항(design resistance)이다.

설계하중은 다음과 같이 정의된다.

$$F_D = F_C \gamma_f \quad (2)$$

여기서, F_C 는 특성계류하중(characteristic force, mooring load), γ_f 는 하중 계수(load factor)이다. 하중 계수는 ULS 조건에서 1.3, ALS 조건에서 1.0을 사용한다.

계류라인의 설계저항(R_D)은 다음과 같이 정의된다.

$$R_D = \frac{R_C}{\gamma_m} \quad (3)$$

여기서, R_C 는 특성 저항(characteristic resistance), γ_m 은 재료 계수(material factor)이다. 재료 계수는 ULS 조건에서 1.35, ALS 조건에서 1.18을 사용한다.

위 식 (2) 및 식 (3)을 식 (1)에 대입하면, 사용 방정식(utilization equation)은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{F_C}{R_C} \leq \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_m} \quad (4)$$

위 식의 좌변은 사용 비율(utilization ratio)이고, 우변은 최대 허용 사용계수(maximum allowable utilization factor)가 된다.

3.3.1 장력 기준

계류 라인을 이루는 구성 요소들은 설치 과정 중 만날 수 있는 최대 장력을 견딜 수 있어야 한다. 보수적 관점에서 상부 체인 대

비 상대적으로 약한 와이어 케이블의 MBL 1,306.8 ton을 장력 초과여부 판정 기준을 정하기 위한 출발선으로 잡았다.

식 (4)를 이용하여 Table 3.6에 있는 ULS(비손상상태) 및 ALS(계류라인 손상상태) 조건의 설계 한계, 즉 최대 허용장력 (SWL)을 구할 수 있다.

Table 3.6 Safety factor and SWL for mooring line tension

Limit state	Maximum allowance			
	Load factor γ_f	Material factor γ_m	Utilization factor	SWL (ton)
ULS	1.3	1.35	0.57	744.6
ALS	1.0	1.18	0.85	1,107.4

위 최대장력 판정에 관한 기준을 다시 설명하면, 임의의 해석케이스에서 검출된 최대장력이 ULS 조건에서 SWL 744.6 ton 이내인 경우, ALS 조건에서 SWL 1,107.4 ton 이내인 경우라야 설계된 시스템은 안전하게 설치될 수 있다는 것을 의미한다.

3.3.2 부유체 이격거리 기준

해양유전 생산을 위한 부유체는 계류라인 외에 라이저, 엠빌리컬 등 다수의 부가 시스템이 해저 유전으로부터 올라와서 연결된다. 이러한 시설물이 계속해서 안전하게 부착되어 있으려면, 부유체의 이격거리를 일정 범위 이내로 제한할 필요가 있으며, 계류시스템은 이러한 내용을 반영하여 설계되어야 한다.

최소 계류라인이 연결되는 시점에서는 라이저와 엠빌리컬 등의 부가 시스템이 전혀 연결되어 있는 않은 상태이다. 직관적으로 이

상태의 부유체 이격거리는 그것들을 포함한 설계 과정 중 검토된 이격거리보다는 어느 정도 클 것이다. 하지만, 설계 과정의 이격거리는 재현주기 100년 또는 그 이상의 생애주기 전체의 수명을 대상으로 한 것이기에 1개월 전후의 짧은 설치 기간을 고려한 재현주기인 10년 이내의 환경외력에서 이격거리는 상대적으로 짧아질 것이 분명하다.

산업계에서는 이러한 면을 고려해서, 보수적인 측면에서 설치기간 중의 부유체 이격거리를 설계 기준과 같은 값으로 일괄 적용하거나 선주사(엔지니어링사) 결정에 따른 또 다른 임의 값을 기준으로 사용하기도 한다.

본 연구에서는 해저시설물 설계시 많이 사용하고 있는 기준인 수심 대비 8%인 값을 적용하였다. 해양구조물이 설치되는 것으로 설정한 해역의 평균 수심은 1,200 m이므로 본 연구의 이격거리 기준은 96 m가 된다.

3.3.3 와이어 해저면 접촉

계류용으로 제작된 체인이 상당한 두께를 가진 고리형 강체임에 비해 와이어의 경우는 상대적으로 매우 가느다란 줄 형태의 강선을 여러가닥 꼬아서 만든 계류 시스템 구성요소이다. 이러한 와이어는 제조 과정에서부터 선상 작업이나 해저면 설치 작업을 포함하여 계류 연결 후 설계수명이 끝날 때까지 외부와의 마찰로 인한 손상 여부가 구조물 수명을 좌우하는 치명적인 위험 요인이므로, 이를 엄밀히 검토하고 있다.

폭풍안전계류 검토 과정 역시 모든 극단적 조건에 대해서 와이어 구간의 해저면 접촉은 일어나지 않는지를 확인하여야 한다.

4. 준정적 해석 결과

4.1 4개 라인 연결 (준정적 해석)

앞서 정립한 해석 방법에 따라 먼저 계류라인 연결 과정 중 최초로 역학적 평형이 되는 4개 라인 연결 상태에서 바람과 조류가 일으키는 최대장력을 살펴보았다. 바람과 조류는 동일방향(Collinear)으로 입사되는 것을 적용하였으며, 10° 간격으로 전 방향에 대해 해석을 수행하였다. 풍속은 20.7 m/sec, 조류속은 최대 1.32 m/sec이다.

해석 결과는 Table 4.1에 정리된 바와 같이, 바람과 조류의 입사각이 290° 일 때 약 749 ton의 최대장력이 나타났다.

같은 방법으로 최대이격거리는 바람과 조류의 입사각이 240° 일 때 나타났으며, 그 크기는 약 98 m이다(Table 4.2).

Table 4.1 Maximum tension of 4 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum tension
Squall & current	290°	748.75 ton (S1 mooring line)

Table 4.2 Maximum offset of 4 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum offset
Squall & current	240°	98.093 m

4.1.1 4개 라인 연결 상태의 최대장력 (준정적 해석)

앞서 검토한 각각의 조건에서 파랑을 추가하여 최대장력을 검토하였다. 적용된 파랑은 H_s 2.56 m, T_p 16.1 sec이다.

해석 결과, 바람과 조류 환경에서의 최대장력 748.75 ton(Table 4.1)은, 280° 로 입사하는 파가 추가될 때 894.57 ton(Table 4.3)으로 약 20% 상승하는 것을 확인하였다. 최대장력이 발생하는 계류라인은 기존과 동일한 S1 계류라인에서 발생하였다.

Table 4.3 Maximum tension of 4 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum tension (A, ton)	SWL in ULS (B, ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	290°	894.57 (S1 line)	744.6	+20.1
Wave	280°			

Fig. 4.1은 4개 계류라인이 연결된 부유체의 360° 전방향으로 입사하는 환경외력에 대한 계산 결과 얻어진 최대장력을 보여주는 그림이다.

전체 환경외력 입사방향 중 약 61% 이상의 영역에서 최대장력은 허용기준 745 ton을 넘어서는 것을 볼 수 있다.

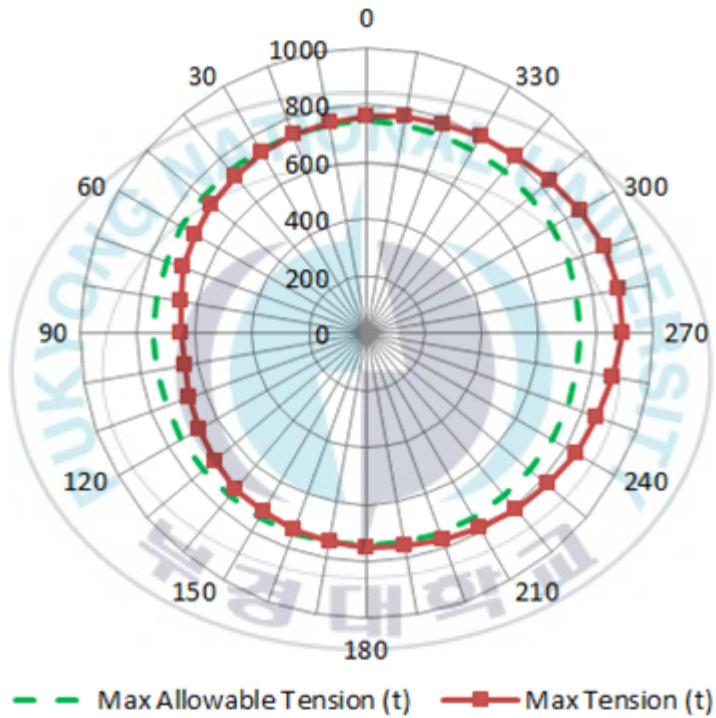


Fig. 4.1 Maximum tension of 4 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS).

4.1.2 4개 라인 연결 상태의 최대이격거리 (준정적 해석)

같은 방법으로 최대이격거리를 만드는 파랑 조건을 검토하였다. 최대이격거리는 계류라인 4개가 연결된 경우에서 정적 평형상태 (equilibrium position)가 되는 해양구조물 위치를 기준점으로 잡은 뒤 환경외력을 만나면서 이동한 거리를 의미한다.

해석 결과, 기존 바람과 조류만 있는 상태의 최대이격거리 98.093 m (Table 4.2)는 260°로 입사하는 파가 추가될 때 114.98 m (Table 4.4)로 약 17% 상승한 것을 확인할 수 있다.

Table 4.4 Maximum offset of 4 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum offset (A, ton)	Maximum allowable (B, ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	240°	114.98 (9.6% of WD)	96.0 (8.0% of WD)	+19.8
Wave	260°			

Fig. 4.2는 4개 계류라인이 연결된 부유체의 360° 전방향으로 환경외력이 입사하는 경우에 대한 계산 결과 얻어진 최대이격거리를 보여주는 그림이다.

산출된 최대이격거리는 입사방향 중 약 69% 이상의 영역에서 허용기준 96 m(평균수심의 8%)를 19.8% 정도 넘어선다.

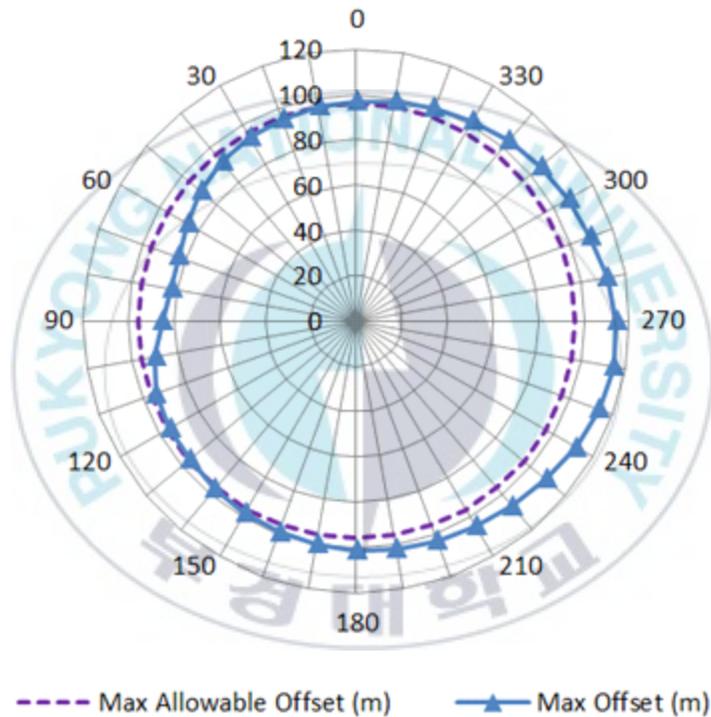


Fig. 4.2 Maximum offset of 4 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS).

4.1.3 4개 라인 연결 상태의 해저면접촉 검토 (준정적 해석)

폭풍안전계류 판정을 위한 세 번째 항목인 와이어의 해저면접촉 여부 검토는 최대장력 및 최대이격거리 모두 허용기준을 초과하는 것으로 나타남에 따라 검토를 생략하였다.

4.2 8(7)개 라인 연결 (준정적 해석)

계류라인 연결 과정에서 두 번째로 역학적 평형이 되는 8개 라인 연결 상태에서 바람과 조류가 일으키는 최대장력을 검토하였다. 해석 결과, 바람과 조류 입사각이 300° 일 때 약 539 ton의 최대장력이 나타났으며(Table 4.5), 바람과 조류 입사각이 220° 일 때 약 63 m의 최대이격거리가 확인되었다(Table 4.6).

Table 4.5 Maximum tension of 8 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum tension
Squall & current	300°	539.35 ton (S1 mooring line)

Table 4.6 Maximum offset of 8 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum offset
Squall & current	220°	63.047 m

이어서 1개 라인이 손상된 시나리오를 설정하여, 7개 라인 연결 상태에서 최대장력과 최대이격거리가 나타나는 바람과 조류 입사각을 검토하였다. 계류라인 손상은 최대장력이 걸리는 S1 라인을 절단하는 경우 및 S1 라인과 인접한 S2 라인을 절단하는 두 가지 조건을 비교한 후 그 중 더 큰 변동폭을 보이는 S2 라인 절단 조건에 대한 결과를 정리한 것이다. 최대장력은 입사각이 290° 일 때 약 895 ton이 나타났으며(Table 4.7), 최대이격거리는 입사각이 290° 일 때 약 87 m가 나타나는 것을 확인하였다(Table 4.8).

Table 4.7 Maximum tension of 7 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum tension
Squall & current	290°	895.11 ton (S1 mooring line)

Table 4.8 Maximum offset of 7 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum offset
Squall & current	300°	87.471 m

4.2.1 8(7)개 라인 연결 상태의 최대장력 (준정적 해석)

Table 4.5의 8개 라인 연결 상태에 적용된 바람 및 조류에 추가하여 파랑을 입사하여 계산하였다.

해석 결과, 바람과 조류 환경에서의 최대장력 539.35 ton(Table 4.5)은, 280° 로 입사하는 파가 추가될 때 598.36 ton(Table 4.9)으로, 11% 상승하는 것을 확인하였다. 최대장력이 발생하는 계류라인은 4개 라인 연결시와 동일한 S1 계류라인에서 발생하였다.

이때 바람, 조류 및 파랑의 수평성분 외력 기여도를 살펴보면, 각 환경외력별로 47.2%, 35.9% 및 17%인 것을 확인하였다. 앞서 파랑 추가시 확인된 최대장력 상승 비율 또는 환경외력의 수평성분 기여도에서 볼 수 있듯이 파랑의 기여분은 대략 1/6에 해당하는 것으로 파악되었으며, 바람과 조류가 절대적 영향인자임을 알 수 있다.

Fig. 4.3은 8개 라인이 연결된 상태에서 360° 전방향 입사하는 환경외력에 대한 최대장력을 보여주는 그림이다. 산출된 최대장력은 전방향에서 허용기준 744.6 ton을 만족하고 있다.

Table 4.9 Maximum tension of 8 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum tension (A, ton)	SWL in ULS (B, ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	300°	598.36 (S1 line)	744.6	-19.6
Wave	280°			

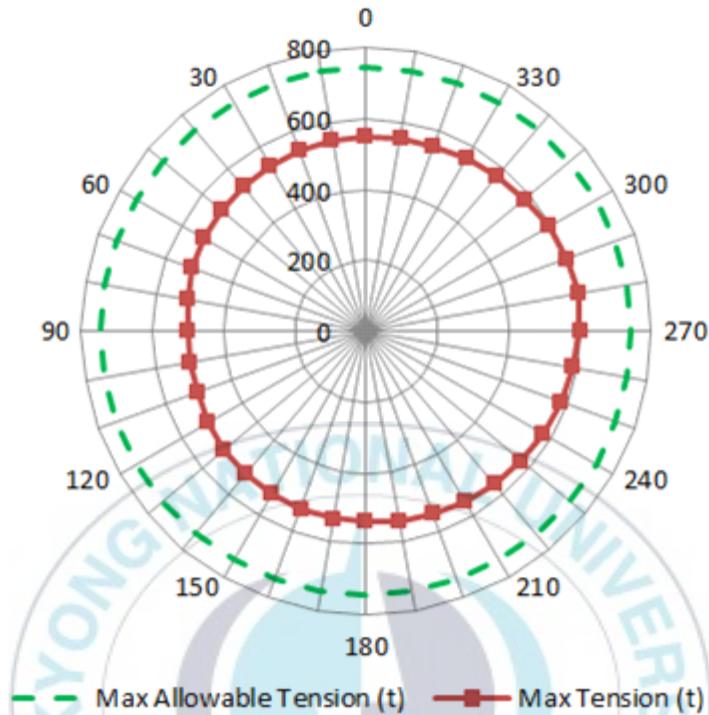


Fig. 4.3 Maximum tension of 8 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS).

DNV의 해양설치에 관한 기준에 따라, 한 개 라인이 손상된 경우에 대해서 동일한 검토를 실시하였다.

Table 4.10 및 Fig. 4.4의 해석 결과는 8개 라인 연결 상태에서 하나가 손상된 7개 라인 연결 상태의 최대장력을 검토한 것이다. 이 경우, 앞에서 언급한 바와 같이 적용하는 안전계수 변경에 따라 최대장력 허용기준은 1,107.4 ton이 되며, 전방향에서 허용기준을 만족하고 있음을 볼 수 있다. 최대장력은 S1 라인에서 발생한다.

본 연구에서 연구 모델로 선정된 계류시스템의 준정적 해석 결과에 따르면, 최대장력은 5개~7개 라인이 연결되는 일정 시점에서 안전한 것으로 판단된다.

Table 4.10 Maximum tension of 7 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum tension (A, ton)	SWL in ALS (B, ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	290°	1,030.22 (S1 line)	1,107.4	-7.0
Wave	280°			

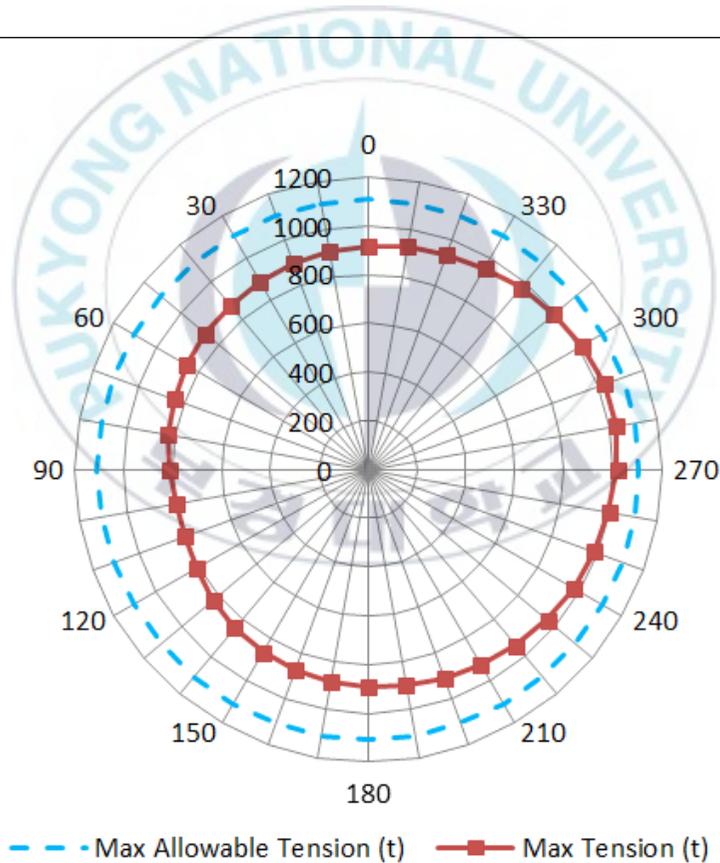


Fig. 4.4 Maximum tension of 7 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS).

4.2.2 8(7)개 라인 연결 상태의 최대이격거리 (준정적 해석)

최대이격거리를 만드는 파랑 조건을 검토하였다. 8개 라인 연결 상태에서 해석 결과, 바람과 조류만으로 발생한 최대이격거리 63.047 m는 250° 로 입사하는 파가 더해질 때 약 16% 상승하여 73.44 m까지 이동한 것을 확인할 수 있다(Table 4.11 및 Fig. 4.5).

Table 4.11 Maximum offset of 8 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum offset (A, ton)	Maximum allowable (B, ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	220°	73.44 (6.1% of WD)	96.0 (8.0% of WD)	-23.5
Wave	250°			

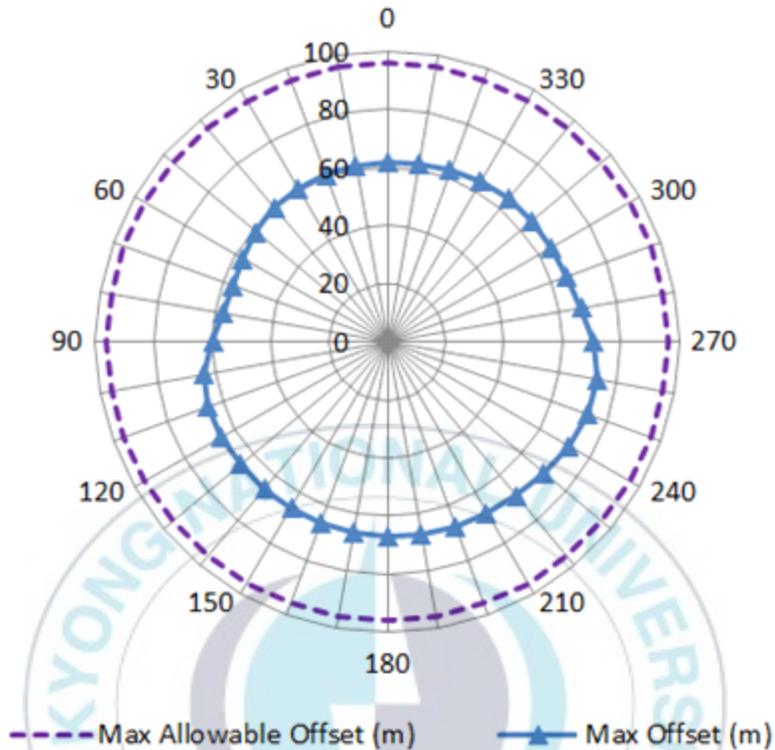


Fig. 4.5 Maximum offset of 8 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS).

마찬가지로 ULS 조건에 대해 만족하는 것이 확인되었으므로, 한 개 라인이 손상된 경우인 ALS 조건에 대해서 다시 최대이격거리 기준을 만족하는지 검토하였다. 최대장력과는 달리 최대이격거리에 대한 허용기준은 ULS 및 ALS 조건 모두 동일하다.

해석 결과, 7개 라인 연결 상태의 최대이격거리는 260~310° 구간에서 허용기준을 넘어선다(Table 4.12 및 Fig. 4.6).

여기서 연구 모델로 선정된 계류시스템의 준정적 해석 결과에 따르면, 최대이격거리는 8개 라인 이상일 때가 안전한 것으로 나타났다.

Table 4.12 Maximum offset of 7 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum offset (A, ton)	Maximum allowable (B, ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	300°	99.01 (8.3% of WD)	96.0 (8.0% of WD)	+3.1
Wave	290°			

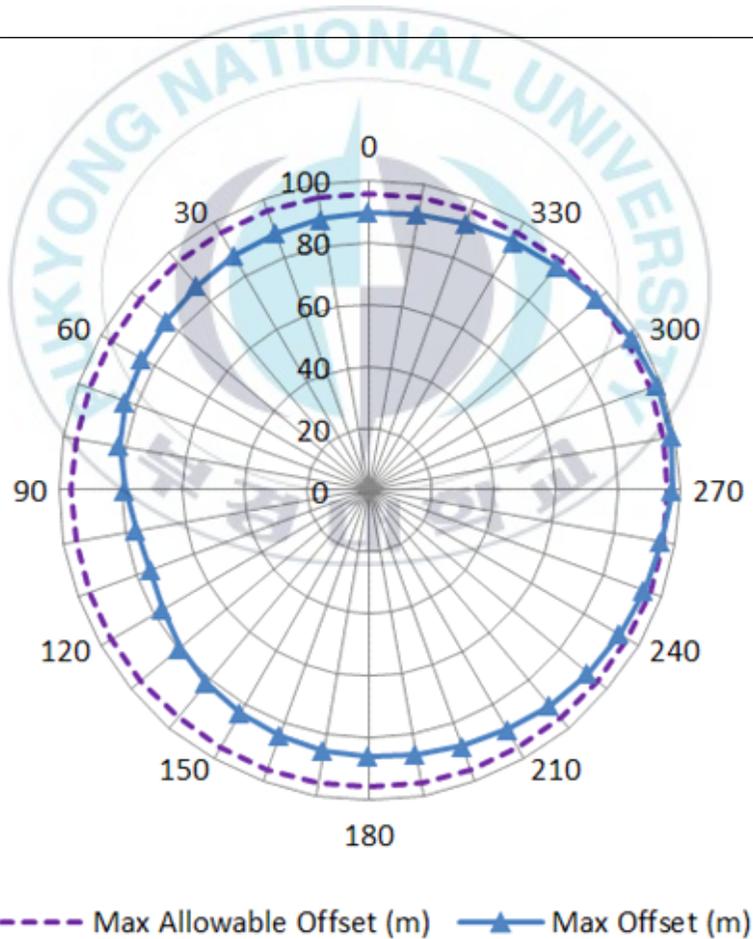
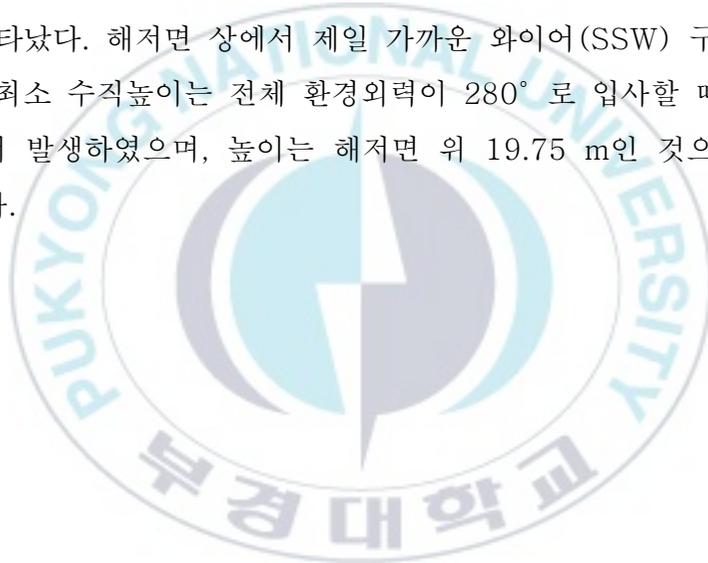


Fig. 4.6 Maximum offset of 7 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS).

4.2.3 8개 라인 연결 상태의 해저면접촉 검토 (준정적 해석)

8개 라인이 연결된 경우는 최대장력의 경우에는 허용기준을 만족하지만, 최대이격거리는 ALS 조건에서 허용기준을 초과하는 것으로 나타남에 따라 8개 라인 연결 경우는 폭풍안전계류가 될 수 없는 것으로 밝혀졌다. 이에 따라 해저면접촉 여부 검토는 생략할 수 있다.

다만, 폭풍안전계류 판정 여부와 상관없이 와이어 구간의 해저면 접촉 여부를 검토해 본 결과, 구조물 및 계류시스템은 안전한 것으로 나타났다. 해저면 상에서 제일 가까운 와이어(SSW) 구간 시작점의 최소 수직높이는 전체 환경외력이 280°로 입사할 때 P6 라인에서 발생하였으며, 높이는 해저면 위 19.75 m인 것으로 확인되었다.



4.3 12(11)개 라인 연결 (준정적 해석)

계류라인 연결 과정에서 세 번째 역학적 평형이 되는 12개 라인 연결 상태의 최대장력 및 최대이격거리 해석 결과이다. 최대장력은 바람과 조류 입사각이 300° 일 때 약 480 ton으로 나타났으며 (Table 4.13), 최대이격거리는 바람과 조류 입사각이 220° 일 때 약 51 m로 확인되었다(Table 4.14).

Table 4.13 Maximum tension of 12 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum tension
Squall & current	300°	480.34 ton (S1 mooring line)

Table 4.14 Maximum offset of 12 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum offset
Squall & current	220°	50.723 m

1개 라인 손상 조건인 11개 라인 연결 상태에서 바람과 조류가 일으키는 최대장력과 최대이격거리를 검토해 보았다. 손상 조건에서는 최대장력과 최대이격거리 모두 바람과 조류 입사각이 300° 일 때 나타났으며, 그 크기는 각각 631.63 ton, 52.265 m로 확인되었다(Table 4.15 및 Table 4.16).

Table 4.15 Maximum tension of 11 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum tension
Squall & current	300°	631.63 ton (S1 mooring line)

Table 4.16 Maximum offset of 11 mooring lines condition in no waves (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum offset
Squall & current	300°	52.265 m

4.3.1 12(11)개 라인 연결 상태의 최대장력 (준정적 해석)

Table 4.13의 최대장력 발생 조건에서 파랑 외력을 추가하여 해석한 결과, 바람과 조류 환경에서의 최대장력 480.34 ton은, 280° 로 입사하는 파랑이 추가될 때 약 520 ton으로, 파가 없는 경우 대비 9% 상승하는 것을 확인하였다(Table 4.17). 최대장력 발생위치는 기존과 동일한 S1 계류라인에서 발생하였다. 7개 라인 연결 상태에서 최대장력은 허용기준 이내에 있음을 이미 확인한 바와 같이, 12개 라인이 연결된 상태가 되면 최대장력은 매우 여유 있는 차이로 허용기준을 만족한다(Fig. 4.7).

Table 4.17 Maximum tension of 12 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum tension (ton)	SWL in ULS (ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	300°	519.60 (S1 line)	744.6	-30.2
Wave	280°			

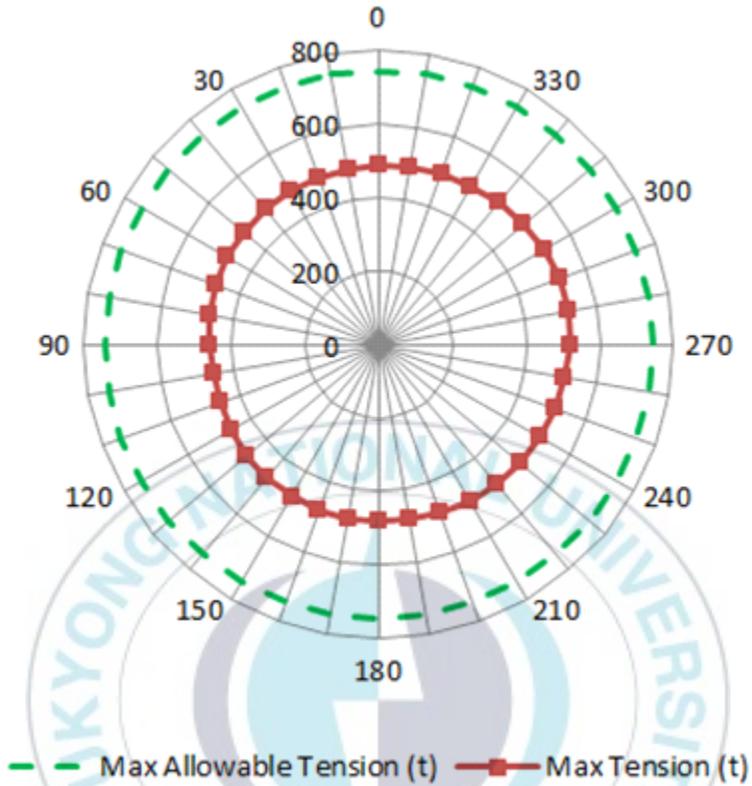


Fig. 4.7 Maximum tension of 12 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS).

Table 4.18 및 Fig. 4.8은 위 12개 라인 연결 상태에서 하나가 손상된 11개 라인 연결 상태의 최대장력을 검토한 것이다. 마찬가지로, 손상조건의 허용기준 1,107.4 ton에 비해 매우 낮은 최대장력을 보임으로써 허용기준을 넉넉하게 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 최대장력은 S1 라인에서 발생한다.

Table 4.18 Maximum tension of 11 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum tension (ton)	SWL in ALS (ton)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	300°	691.36 (S1 line)	1,107.4	-37.6
Wave	290°			

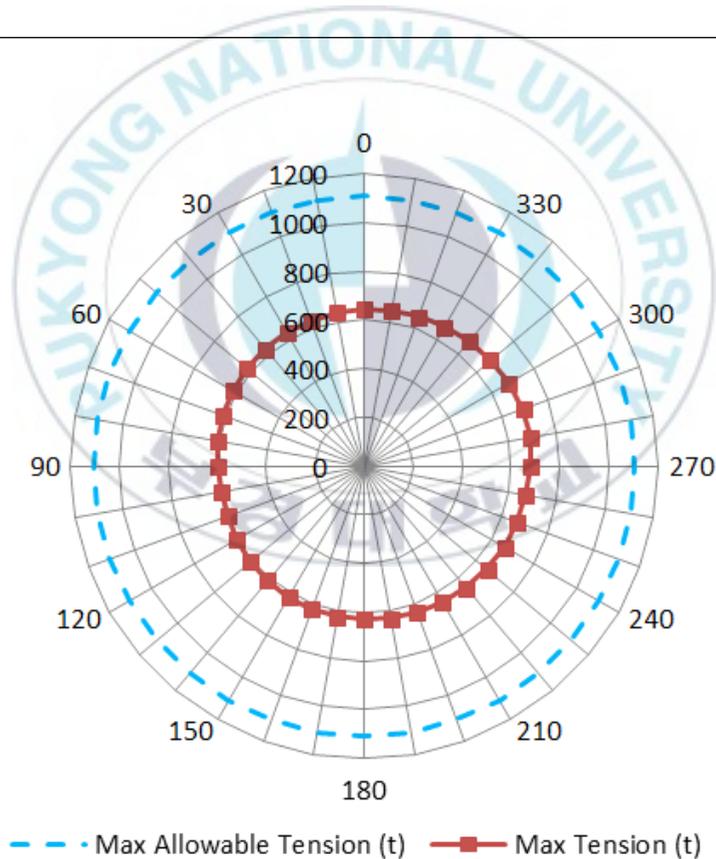


Fig. 4.8 Maximum tension of 11 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS).

4.3.2 12(11)개 라인 연결 상태의 최대이격거리 (준정적 해석)

최대이격거리를 만드는 파랑 조건을 검토하였다. 해석 결과, 바람 및 조류 환경에서의 최대이격거리 50.72 m(Table 4.14)는 파랑이 250°로 입사할 때 약 15% 상승하여 58.29 m로 이동한 것을 확인할 수 있다(Table 4.19). 산출된 최대이격거리는 전방향에서 허용기준을 만족한다(Fig. 4.9).

Table 4.19 Maximum offset of 12 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS)

Environment	Incidence	Maximum offset (m)	Maximum allowable (m)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	220°	58.29 (4.9% of WD)	96.0 (8.0% of WD)	-39.3
Wave	250°			

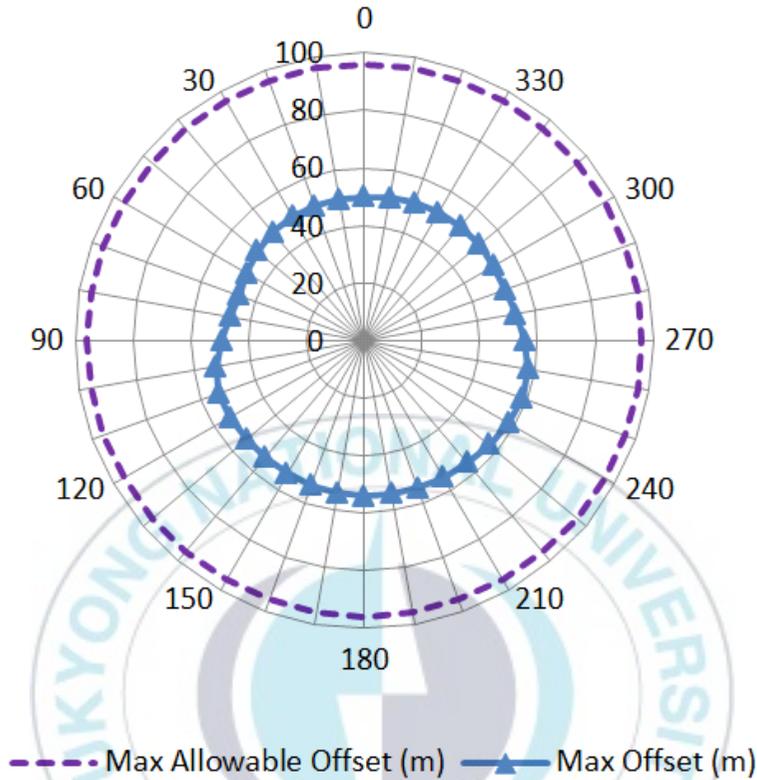


Fig. 4.9 Maximum offset of 12 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ULS).

11개 라인 연결 상태의 최대이격거리는 63.32 m로 나타났다 (Table 4.20). ALS 조건에서도 허용기준 대비 34% 적은 값이며, 11개 라인에서 최대이격거리는 전방향에서 매우 안정적인 수준이 되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4.10).

4.3.3 12개 라인 연결 상태의 해저면접촉 검토 (준정적 해석)

8개 라인이 연결된 경우에 이미 해저면 접촉은 안전한 것으로 판명되었으므로, 12개 라인 연결 상태의 검토는 생략하였다.

Table 4.20 Maximum offset of 11 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS)

Environment	Incidence	Maximum offset (m)	Maximum allowable (m)	Ratio (=A/B-1, %)
Squall & current	300°	63.32 (5.2% of WD)	96.0 (8.0% of WD)	-34.0
Wave	290°			

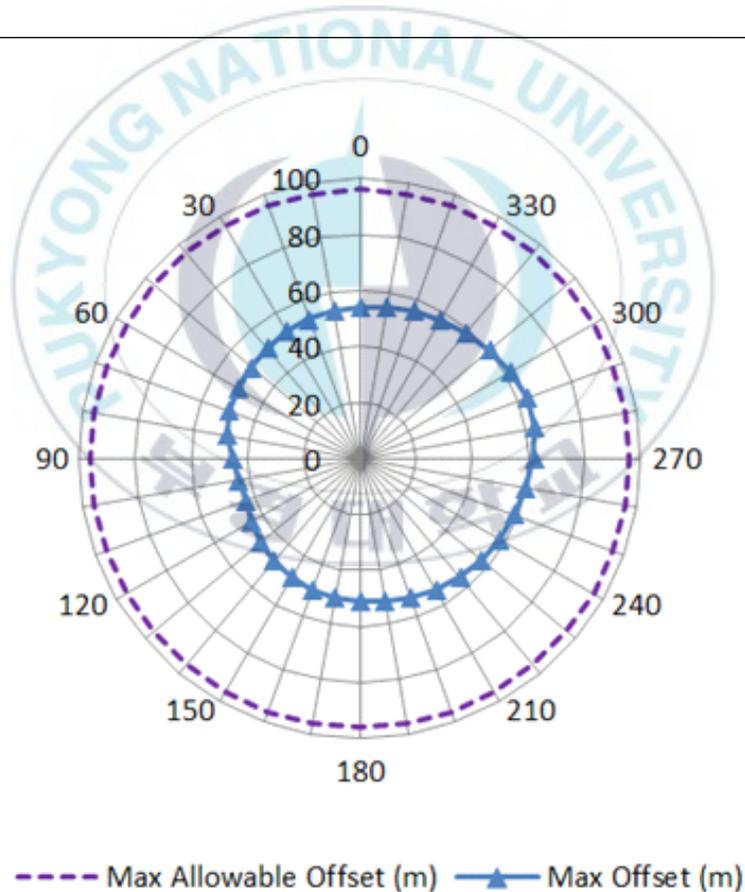


Fig. 4.10 Maximum offset of 11 mooring lines condition (Quasi-static analysis, ALS).

5. 동적 해석 결과

5.1 12(11)개 라인 연결 (동적 해석)

5.1.1 12(11)개 라인 연결 상태의 최대장력 (동적 해석)

동적 해석에서는, 조류는 준정적 해석에서와 같은 조류를 사용하였고, 바람은 3장에서 설정한 스콜 시계열 자료를 사용하였다. 12개 계류라인 연결 상태의 동적 해석 결과, 얻어진 최대 장력은 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 Maximum tension of 12 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Squall	Incidence of wave and current (°)	Maximum tension (ton)	SWL in ULS (ton)	Critical line
Sq1	0	581.12	744.6	S1
Sq2	10	564.63		S1
Sq3	180	538.74		P4
Sq4	0	604.59		S1
Sq5	0	574.45		S1
Sq6	0	578.40		S1

Table 5.1에서 보는 바와 같이 6개의 스콜 중에서 스콜4(Sq4)의 경우 가장 큰 최대 장력 605 ton이 나타났다. 이는 ULS 조건의 허용장력 744.6 ton 이내의 값이다. 또 이 스콜4에서 얻어진

최대 장력은 상대적으로 제일 작게 나타난 스콜3(Sq3)의 경우와 비교할 때 약 66 ton에 달하는 차이를 보이고 있으며, 이는 스콜3과 비교할 때 12%가 큰 값이다.

스콜3의 경우는 환경외력 입사각이 180° 일 때 최대장력이 나타났다. 이는 다른 스콜 시계열의 경우 최대풍속이 0° 부근으로 들어오는 시점에 최대장력이 발생한 것에 비해 스콜3의 경우는 최대풍속 발생시점의 풍향도 260° 부근으로 다르다는 것이 하나의 이유이다. 또한 최대장력 크기도 다른 스콜에 비해 크게 낮은 값을 갖는 스콜임을 볼 수 있는데, 이는 전체 해석구간의 장력 시계열이 최대풍속 발생 시점과 일치하지 않는 것을 볼 때, 단순히 계류시스템에 영향을 미친 불규칙파의 의외성에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5.1은 최대 장력이 나타난 스콜4에 대한 장력 시계열 자료를 보여주는 그림이다. 파랑에 의해 대략 100 ton 크기의 폭으로 계류라인의 장력은 출렁이고 있는데, 추가적인 계류라인의 장력 특성은 6.2절에 자세히 분석하여 정리하였다.

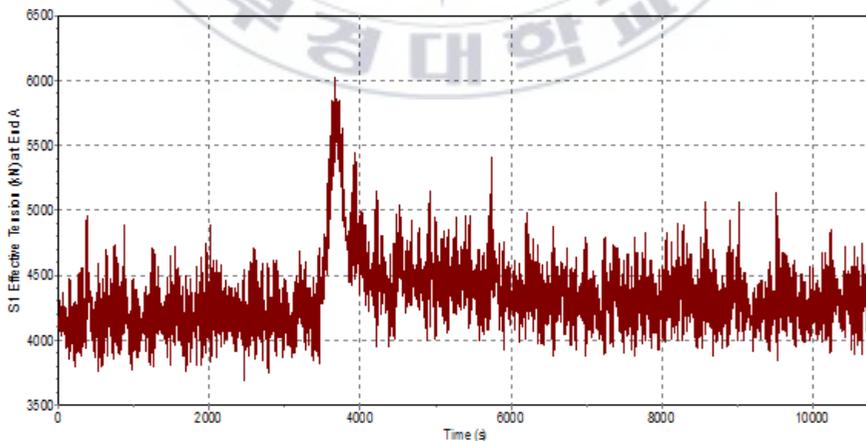


Fig. 5.1 Effective tension (S1 mooring line) of 12 mooring lines condition in Sq4 (Dynamic analysis, ULS).

준정적 해석과 마찬가지로 ALS 조건에 대해 검토하였다(Table 5.2 및 Fig. 5.2). 11개 라인이 연결되는 ALS 조건 해석 결과, 스콜4에서 S2 계류라인이 절단된 경우 S1 계류라인에서 최대장력 824.52 ton이 나타났으며, 이는 ALS 조건의 허용장력 1,107.4 ton을 만족하는 값이다.

Table 5.2 Maximum tension of 11 mooring lines condition (Dynamic analysis, ALS)

Squall	Incidence of wave and current (°)	Maximum tension (ton)	SWL in ALS (ton)	Critical line
Sq4	0	824.52	1,107.4	S1

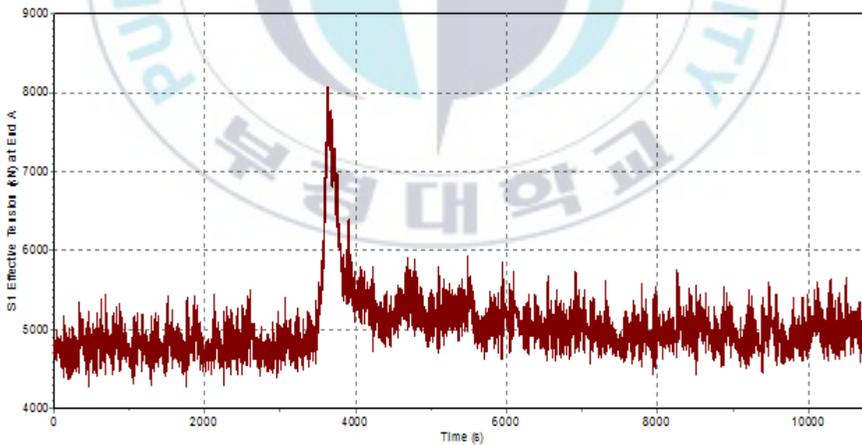


Fig. 5.2 Effective tension (S1 mooring line) of 11 mooring lines condition in Sq4 (Dynamic analysis, ALS).

5.1.2 12개 라인 연결 상태의 최대이격거리 (동적 해석)

Table 5.3은 12개 계류라인이 연결된 상태의 최대이격거리를 나타낸 것이다. 최대이격거리는 최대 장력이 발생하는 순간과 함께 최소 장력이 발생하는 경우 모두에 대해 검토하였다. 이는 보통 최대이격거리가 최대의 장력이 걸리는 경우에 발생하지만, 전체 해석 영역에서 최소의 장력이 걸리는 계류라인이 존재할 때 그 반대편 계류라인이 기준점에서 가장 크게 이동된 상태가 될 가능성도 있기 때문이다.

Table 5.3 The maximum offset from critical cases of 12 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Item		Incidence of wave and current (°)	
		0	310
Tension (ton)		604.6 (Max.)	130.9 (Min.)
Critical line		S1	P4
Event time (sec)		3,624.0	3,578.6
Equilibrium position	X (m)		-7.1
	Y (m)		-11.5
Max. offset position	X* (m)	57.5	51.6
	Y* (m)	-10.1	-20.9
Max. offset (m)		64.6 (5.4% of WD)	59.4 (5.0% of WD)
Allowable offset (m)		96	96
Result		OK	OK

분석 결과, 최대 장력은 파 및 조류가 0° 방향으로 입사할 때, S1 계류라인에서 나타났으며, 최소 장력은 파 및 조류가 310° 방향으로 입사할 때, P4 계류라인에서 나타났다. 두 경우 모두 최대이격거리 허용값 96 m 이내인 것으로 나타났다. Fig. 5.3은 이러한 내용을 나타낸 그림이다.

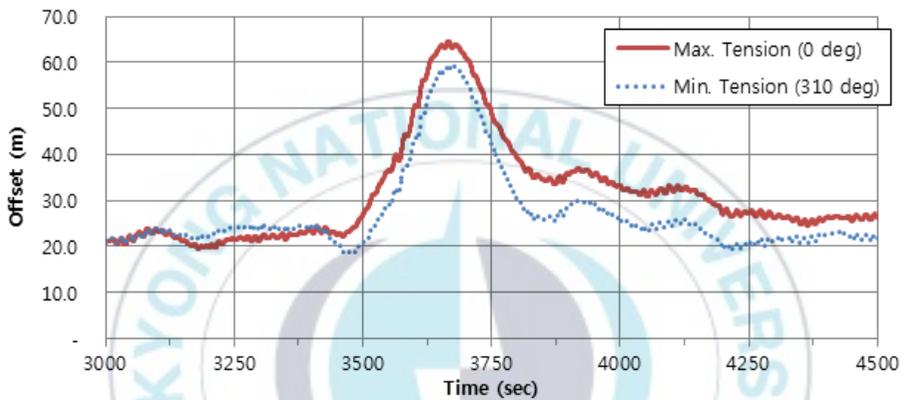


Fig. 5.3 FPSO Offset of the critical cases with 12 mooring lines (Dynamic analysis, ULS).

ALS 조건인 11개 라인 연결상태의 최대이격거리 검토는 생략하였는데, 그 이유는 이보다 작은 8개 라인 연결상태에서 허용값 이내가 되는 것을 이미 확인하였기 때문이며, 이에 관한 자세한 내용은 4.3.2절에 나타내었다.

5.1.3 12개 라인 연결 상태의 해저면 접촉 (동적 해석)

12개 계류라인이 연결된 상태에서 계류라인의 와이어(SSW) 구간은 최대이격거리를 보이는 스킴4에서도 해저면과 접촉하지 않는 것으로 나타났다.

Table 5.4는 와이어 구간 최하단의 해저면 기준 수직방향 높이가 가장 낮게 위치하는 계류라인 3개(1개 클러스터)에 대해 나타낸 것이다. 검토는 전방향의 파랑 및 조류 입사각도로 수행하였으나 최소 수직높이가 나타난 20° 와 최대이격거리 검토를 위해 확인된 최대·최소 장력이 검출된 입사각 0° 및 310° 에 한하여 표로 나타내었다.

Table 5.4 Minimum vertical height of SSW above seabed in 12 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Minimum vertical height of SSW (m)			
Mooring line	Incidence of wave and current (°)		
	0	20	310
P6	11.1	10.4	14.3
P5	11.3	11.0	14.1
P4	11.5	11.6	13.9

5.2 8(7)개 라인 연결 (동적 해석)

5.2.1 8(7)개 라인 연결 상태의 최대장력 (동적 해석)

8개 라인 연결상태의 동적 해석을 수행하여 최대장력을 검토하였다(Table 5.5). 스콜4의 경우, 파랑과 조류 입사방향이 340° 일 때 S1 라인에서 최대장력 724 ton이 나타났다. 최대장력 크기가 가장 작은 스콜3과 비교하면 약 180 ton 높은 값이다(+33%).

Table 5.5 Maximum tension of 8 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Item	Sq3	Sq4
Max. tension (ton)	544	724
SWL in ULS (ton)	744.6	
Critical line	P5	S1
Wave & current incidence (°)	180	340
Event time (sec)	3,623	3,676
Result	OK	OK

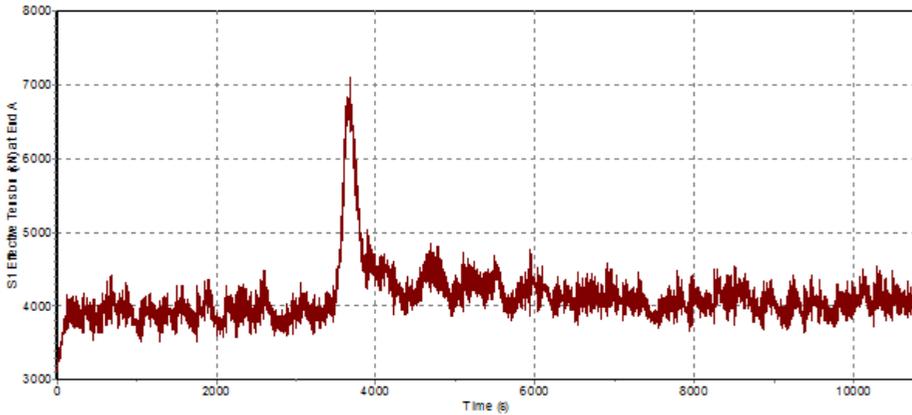


Fig. 5.4 Effective Tension of S1 Line in Sq4 and 8 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS).

이상 확인된 바와 같이, 8개 계류라인이 연결된 상황의 동적 해석 결과는 허용기준 744.6 ton 이내이므로 ALS 조건인 7개 라인이 연결된 상태의 해석을 수행하였다.

Table 5.6에서 볼 수 있듯이, 7개 계류라인 연결 상태에서는 최대장력이 허용기준 1,107 ton을 크게 상회한다.

Table 5.6 Maximum tension of 7 mooring lines condition (Dynamic analysis, ALS)

Item	Sq4
Max. tension (ton)	1,273.8
SWL in ALS (ton)	1,107.4
Critical line	S1
Wave & current incidence (°)	0
Result	Fail

여기서, 7개 계류라인 연결 상태에서 최대장력 1,274 ton은 불규칙파와 시계열(wave train) 변화를 통한 20회의 재해석을 통해 얻어진 값이다.

DNVGL-OS-E301에서는 동적 해석의 경우 불규칙파의 파열(wave train)에 따라 임의의 극한값이 크게 변동될 수 있으므로 20회 정도의 반복 해석을 통한 최빈 최대(MPM, Most Probable Maximum) 장력값을 찾을 것을 권고하고 있다. 최빈 최대 극한값은 표본의 수가 증가함에 따라 검벨(Gumbel) 분포를 잘 따르는 것으로 알려져 있다. 얻어진 20개의 최대값의 검벨 분포 최빈값을 대신해서 20개 최대값의 평균값을 이용할 수도 있다. 또 다른 대안으로 20개의 다른 해석이 아니라 하나의 긴 불규칙 값을 가진 시계열로부터 대푯값을 추출할 수도 있다. 다만, 이 경우는 인정할 만한 추가 검토 작업이 필요한데, 스콜 현상처럼 단기간 나타났다가 사라지는 환경 조건의 경우에는 적용하기 곤란하다.

Fig. 5.5는 서로 다른 파열을 이용한 20개의 해석결과 얻어진 최대장력 분포를 나타낸 그림이다.

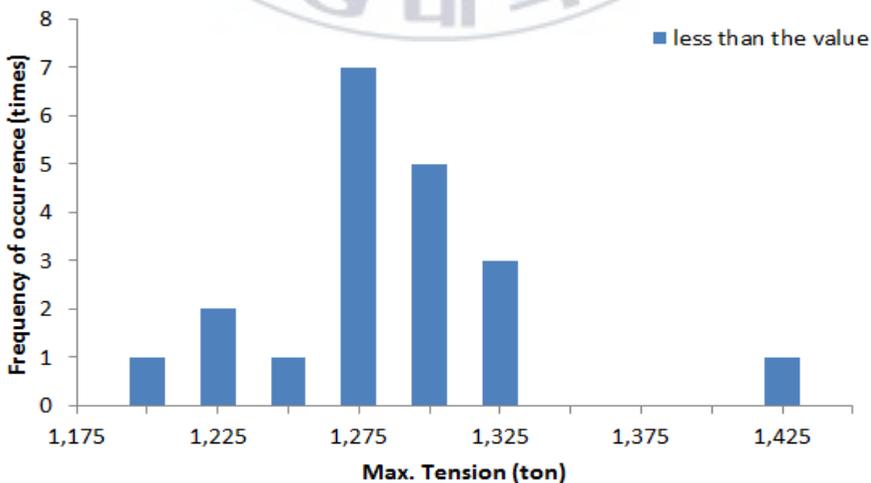


Fig. 5.5 The distribution of maximum tension.

Fig. 5.5에서 확인되는 바와 같이, 최빈 최대값 기준 최상위값은 +11%, 최하위값은 -8%의 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 최빈 최대값으로 20개 최대장력값의 평균값인 1,273.8 ton을 취하였다.

사실 7개 라인 연결 경우, 첫번째 3시간 동적 해석 수행결과에서 최대장력이 1,416 ton이라는 큰 값이 나타났는데(Fig. 5.6), 이는 본 논문 7장에 언급하고 있는 대안 해석 결과를 비교할 때, 8개 라인 이상 연결된 경우에 비해 상대적으로 큰 오차를 유발하는 원인이 되었다. 이러한 배경으로 추가 19회의 불규칙과 해석을 시행하여 얻어낸 최빈 최대값이며, 이 결과를 분석한 결과, 최초의 해석이 최상위에 분포하는 것임을 확인하게 되었다.

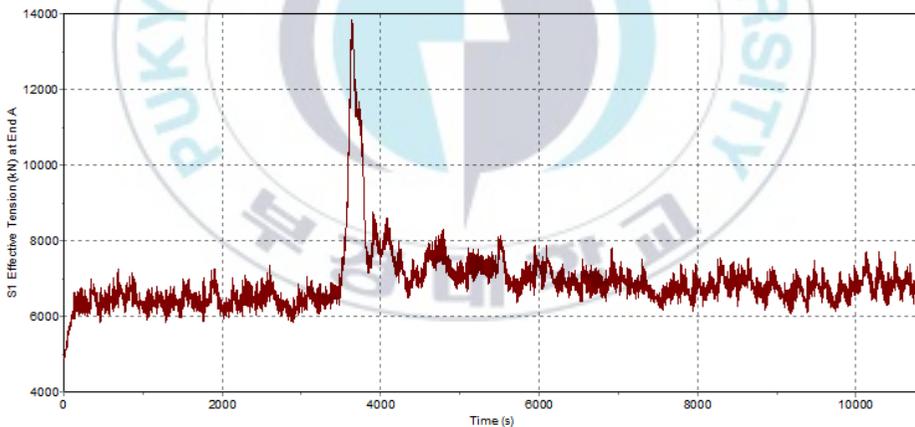


Fig. 5.6 Effective Tension of S1 Line in Sq4 and 7 mooring lines condition (Dynamic analysis, ALS).

계류시스템 설계시에는 동적 해석의 경우, 20개(경우에 따라 5개 또는 10개) 이상의 불규칙과 해석 자료의 통계적 판단을 통해 불규칙과에 따른 운동응답이나 장력 시계열 자료의 대푯값을 추출하는 것이 불규칙한 외력이 초래하는 의외성을 감안하는 방법이 될

수 있다. 하지만 본 연구에서 다루는 폭풍안전계류 해석의 경우는 연결되는 계류라인 개수가 4개, 8개 및 12개 등과 같이 일정 간격으로 존재하는 단계적 허용기준에 대한 만족 여부만을 검토하므로, 검출된 최대 장력의 변동 범위가 안전 판별 기준 근처가 아니라 기준에서 충분히 크게 벗어난 경우라면 이러한 반복 수행을 통한 통계처리 검토는 생략할 수 있다. 본 연구에서는 이를 고려하여 기본적으로 위와 같은 반복 수행 시뮬레이션은 생략하였으며, 의외성이 크다고 판단되는 7개 계류라인 연결 경우에 한해서만 이러한 20회 반복 수행 시뮬레이션 결과의 통계처리를 통한 최빈 최대 장력값을 추출한 것임을 밝힌다.



5.2.2 8개 라인 연결 상태의 최대이격거리 (동적 해석)

12개 라인 연결 때와 마찬가지로 8개 라인 연결 상태의 최대이격거리 검토를 위해 최대 및 최소 장력이 생기는 두 가지 경우를 모두 검토하였다(Table 5.7 및 Fig. 5.7). 최대 장력은 파랑 및 조류가 340° 방향으로 입사할 때, S1 계류라인에서 나타났으며, 최소 장력은 파랑 및 조류 입사각이 310° 일 때, P5 계류라인에서 나타났다. 두 경우 모두 최대이격거리는 허용값 96m 이내인 것으로 나타났다.

Table 5.7 The maximum offset from critical cases of 8 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Item		Incidence of wave and current (°)	
		340	310
Tension (ton)		723.9 (Max.)	130.9 (Min.)
Critical line		S1	P5
Event time (sec)		3,676	3,579
Equilibrium position	X (m)	-7.1	
	Y (m)	-11.5	
Max. offset position	X* (m)	86.9	79.1
	Y* (m)	-19.0	-24.2
Max. offset (m)		94.3 (7.9% of WD)	87.1 (7.3% of WD)
Allowable offset (m)		96	96
Result		OK	OK

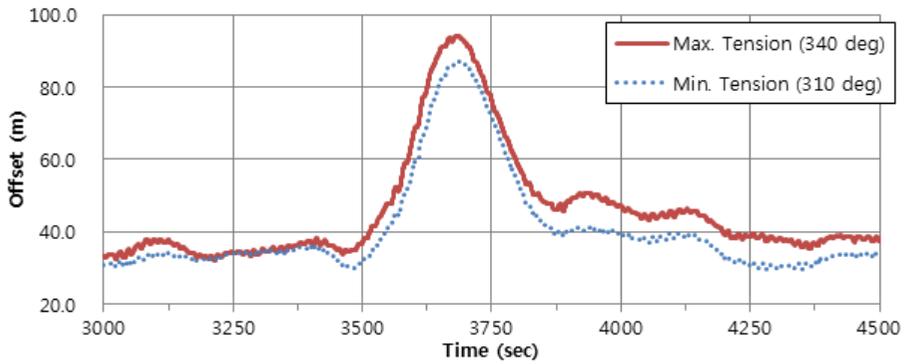


Fig. 5.7 FPSO Offset of the critical cases with 8 mooring lines (Dynamic analysis, ULS).

ALS 조건인 7개 계류라인 연결시의 최대이격거리는 앞선 최대 장력 검토 결과 허용값을 초과한 것을 이미 확인하였으므로 검토를 생략하였다.

5.2.3 8개 라인 연결 상태의 해저면 접촉 (동적 해석)

8개 라인 연결 상태의 계류라인 와이어(SSW) 구간에 대한 해저면 접촉을 검토하였다(Table 5.8). 계산 결과 모든 방향에 대하여 해저면 접촉은 생기지 않았다.

Table 5.8 Minimum vertical height of SSW above seabed in 8 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Minimum Vertical Height of SSW (m)						
Mooring Line	Incidence of Wave and Current (°)					
	0	10	20	310	340	350
P6	8.5	8.1	8.5	9.9	8.8	8.6
P5	8.5	8.3	8.8	9.6	8.6	8.5
P2	32.5	39.3	46.9	29.5	29.2	31.3
P1	35.9	43.4	51.6	32.0	32.2	34.6
S1	97.1	100.3	100.3	64.0	86.6	91.9
S2	94.1	96.9	96.5	63.7	84.8	89.6
S5	60.9	55.2	51.1	88.8	74.0	67.3
S6	59.5	53.7	49.4	89.7	73.4	66.3

5.3 4개 라인 연결 (동적 해석)

Table 5.9는 4개 라인 연결 상태의 동적 해석 수행을 통한 최대장력 결과를 나타낸 것이다. 최대장력은 허용기준을 매우 큰 격차로 초과하고 있다.

4개 라인 연결상태의 최대이격거리 및 와이어의 해지면 접촉검토는 최대장력 조건을 만족시키지 못하였으므로 검토를 생략하였다.

Table 5.9 Maximum tension of 4 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS)

Item	Sq4
Max. Tension (ton)	1,328
SWL in ULS (ton)	744.6
Critical Line	S1
Wave & Current Incidence (°)	330
Result	Fail

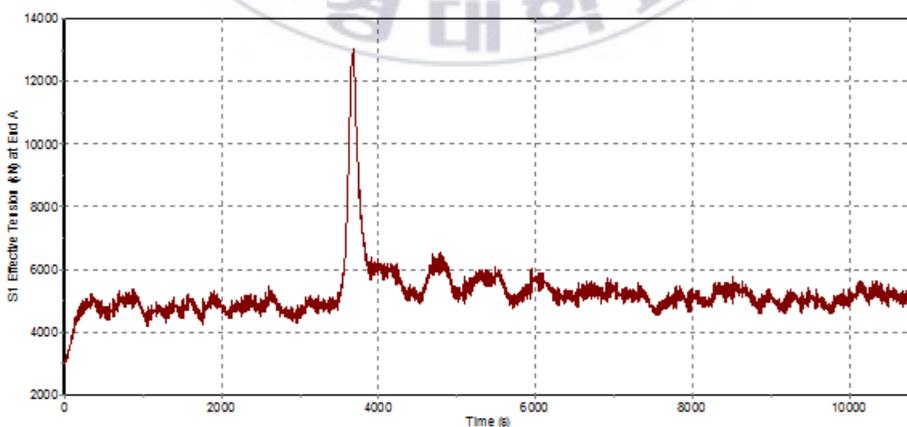


Fig. 5.8 Effective Tension of S1 Line in Sq4 and 4 mooring lines condition (Dynamic analysis, ULS).

6. 해석 결과 분석

6.1 준정적 해석과 동적 해석 결과 비교 요약

이상에서 수행한 계류시스템의 해양설치작업 안정성 검토를 위한 폭풍안전계류 평가 방법으로 준정적 해석 결과와 동적 해석 결과를 하나의 표로 정리한 것이 Table 6.1과 같다.

표에서 보는 바와 같이, 4개 라인이 연결되어 있는 상태에서는 최대장력 허용기준을 초과하므로 폭풍안전계류 상태가 되지 못한다. 8개 라인 연결된 상태에서는 준정적 해석 및 동적 해석 모두 허용기준을 만족하였지만, 1개 라인이 손상된 ALS 조건까지 살펴볼 때, 준정적 해석은 최대이격거리 기준을 초과하였고, 동적 해석은 최대장력 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

Table 6.1 Result summary of storm safe mooring analysis in quasi-static and dynamic analysis

		Storm safe mooring					
Analysis	Item	4 lines		8 lines		12 lines	
		ULS	ALS	ULS	ALS	ULS	ALS
Quasi-static	Tension	Fail	-	OK	OK	OK	OK
	Offset	Fail	-	OK	Fail	OK	OK
	Clearance	-	-	OK	-	(OK)	(OK)
Dynamic	Tension	Fail	-	OK	Fail	OK	OK
	Offset	-	-	OK	-	OK	(OK)
	Clearance	-	-	OK	-	OK	(OK)

결론적으로 본 계류 시스템의 폭풍안전계류는 12개 라인이 연결되어야 확보되는 것을 알 수 있다. 괄호 안에 OK로 표시된 곳은 더 불리한 조건에서 안전함이 확인되어 사실상 안전함을 의미한다.

6.1.1 최대장력 검토 결과 요약

Table 6.2는 폭풍안전계류 해석의 최대장력에 관한 준정적 해석과 동적 해석 결과를 요약한 것이다. 각각의 해석 조건에서 산출된 최대장력과 허용기준 대비 비율을 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이, 4개 라인이 연결되어 있는 상태에서는 허용기준 대비 정적해석은 20% 이상(120.1), 동적 해석의 경우는 78% 이상(178.3) 크게 초과하는 것을 확인할 수 있다. 8개 라인 연결 단계에서 1개 라인이 손상된 ALS 조건의 경우, 준정적 해석은 최대장력 기준을 만족하는 반면, 동적 해석은 최대장력 허용기준을 약 15%(115.1) 초과하고 있다.

Table 6.2 Maximum tension summary of quasi-static and dynamic storm safe mooring analysis

Analysis	Maximum tension (ton)					
	12 lines		8 lines		4 lines	
	ULS	ALS	ULS	ALS	ULS	ALS
Quasi-static	520	691	598	1,030	895	-
% of criteria	69.8	62.4	80.2	93.0	120.1	-
Result	OK	OK	OK	OK	Fail	-
Dynamic	605	825	724	1,274	1,328	-
% of criteria	81.2	74.5	97.2	115.1	178.3	-
Result	OK	OK	OK	Fail	Fail	-
Criteria	745	1,107	745	1,107	745	1,107

6.1.2 최대이격거리 검토 결과 요약

Table 6.3은 폭풍안전계류 해석의 최대이격거리에 관한 준정적 해석과 동적 해석 결과를 요약한 것이다.

표에서 보는 바와 같이, 두 해석 방법 모두 12개 라인이 연결 단계에서 기준을 만족하고 있다. 동적 해석 결과는 준정적 해석 결과 대비 약 11(64.6/58)~29(94.3/73)% 크게 나타났다.

동적 해석은 앞서 7개 이하의 라인 연결 상태에서 최대장력이 허용기준을 초과한 경우(T/Fail) 검토를 생략하였고, 또 8개 라인 이상 연결 상태에서 최대이격거리가 허용기준 이내임을 확인되어 11개 라인이 연결되는 ALS 조건은 충분히 기준을 만족할 것으로 판단(OK)되므로 검토를 생략하였다.

Table 6.3 Maximum offset summary of quasi-static and dynamic storm safe mooring analysis

Analysis	Maximum offset (m)					
	12 lines		8 lines		4 lines	
	ULS	ALS	ULS	ALS	ULS	ALS
Quasi-static	58	63	73	99	115	T/Fail
% of criteria	60.4	65.6	76.0	103.1	119.8	T/Fail
Result	OK	OK	OK	Fail	Fail	T/Fail
Dynamic	64.6	-	94.3	T/Fail	T/Fail	T/Fail
% of criteria	67.3	-	98.2	T/Fail	T/Fail	T/Fail
Result	OK	(OK)	OK	T/Fail	T/Fail	T/Fail
Criteria	96					

Note: T/Fail means the fail of allowable maximum tension in which case it was not conducted offset check.

6.1.3 와이어 해저면접촉 검토 결과 요약

Table 6.4는 폭풍안전계류 해석의 해저면 접촉에 관한 준정적 해석과 동적 해석 결과를 요약한 것이다.

표에서 보는 바와 같이, 최대장력 및 최대이격거리 허용기준을 만족하는 조건에 한하여 해저면 접촉을 검토하였다. 해저면 접촉 검토를 생략한 경우 중 최대장력을 초과한 것은 T/Fail로, 최대이격거리를 초과한 경우는 O/Fail로 표시하였다. 검토 결과 8개 라인이 연결되어 있는 상태에서 준정적 해석과 동적 해석 모두에서 와이어는 해저면과 접촉하지 않는 것으로 확인되었다. 12개 및 11개 라인 연결 상태에서는 더욱 양호한 최대이격거리를 보이므로 해저면 접촉 여부를 확인할 필요가 없다. 다만, 준정적 해석 결과와 비교를 위해 별도로 분석을 수행하였으며, 동적 해석 결과는 10 m 이상 높이에서 와이어 시작점이 위치하고 있음을 확인하였다.

Table 6.4 Minimum seabed clearance summary of quasi-static and dynamic storm safe mooring analysis

Analysis	Minimum seabed clearance (m)					
	12 lines		8 lines		4 lines	
	ULS	ALS	ULS	ALS	ULS	ALS
Quasi-static	-	-	19.75	O/Fail	T/Fail	-
Result	(OK)	(OK)	OK	O/Fail	T/Fail	-
Dynamic	10.4	-	8.1	T/Fail	T/Fail	-
Result	OK	(OK)	OK	T/Fail	T/Fail	-
Criteria	0					

Note: T/Fail means the fail of allowable maximum tension and O/Fail means the fail of allowable maximum offset. It was not conducted clearance check in each cases.

6.2 동적 해석 결과 분석

Fig. 6.1은 폭풍안전계류 평가를 위한 동적 해석 결과를 스콜 풍속 시계열과 함께 나타낸 그림이다. 분석을 위한 자료는 최대장력이 나타난 스콜 4를 선택하였다. 해석은 3시간(10,800초) 동안 수행하였으나, 최대장력을 파악하는데 영향이 없는 6000초 이후의 구간은 나타내지 않았다.

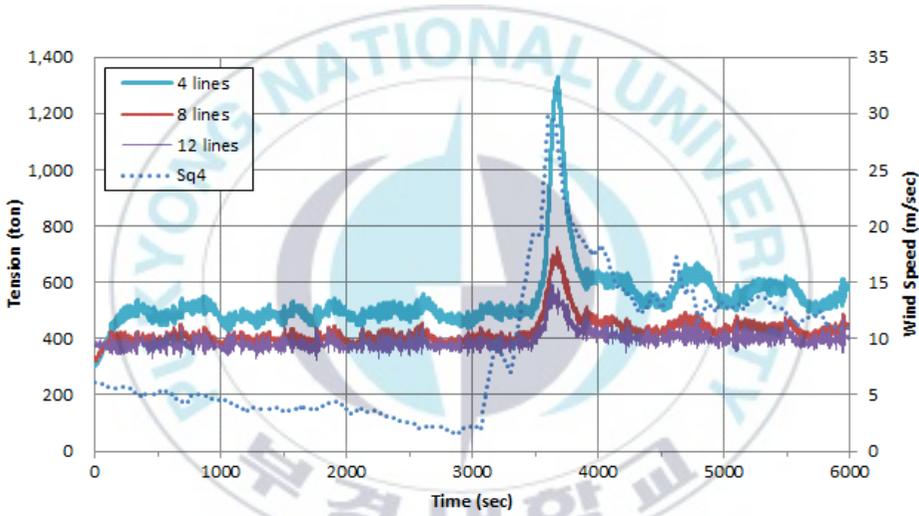


Fig. 6.1 Tension and wind speed in Sq4.

스콜 4의 경우, 대략 3,000초가 되는 시점부터 풍속은 급격히 상승하여 최고점을 지나고, 이후 최고점 대비 절반 정도로 풍속이 떨어지는 4,200초까지 20분(1,200초) 정도 되는 구간이 계류라인의 장력에 의미 있는 영향을 주는 것으로 판단된다. 본 논문에서는 언급한 유의미한 풍속 구간을 특성 스콜 구간(characteristic squall section)으로 정의한다. 서아프리카 스콜 해역의 계류체 응답에 대한 Franck Legerstee et al.(2006)의 연구에서도 이 특

성 스콜 구간과 유사한 개념으로 스콜 모델을 제시한 바 있다. Fig. 6.2는 해당 연구에서 제시한 이론적 스콜 모델을 나타낸 그림이며, Fig. 6.3은 스콜 풍속 구간에 대한 최대장력 변화를 보여주는 그림이다.

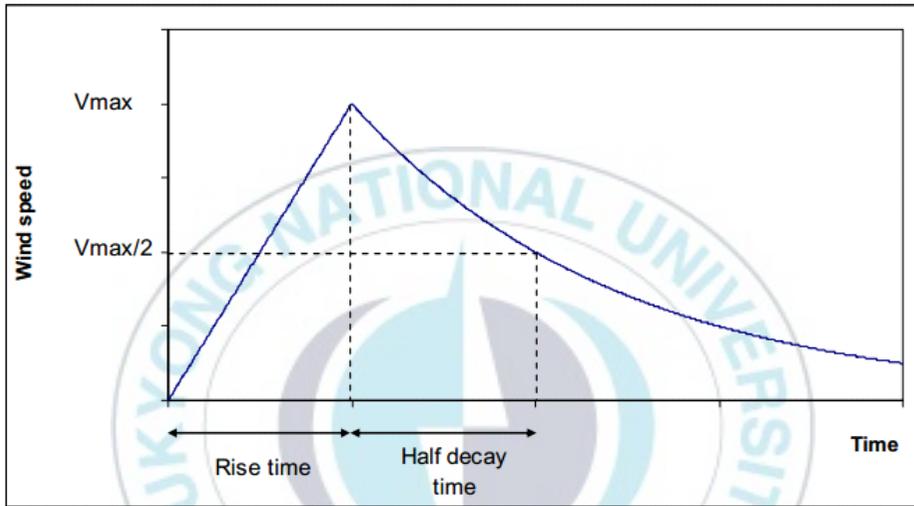


Fig. 6.2 Theoretical squall model(OMAЕ2006-92328).

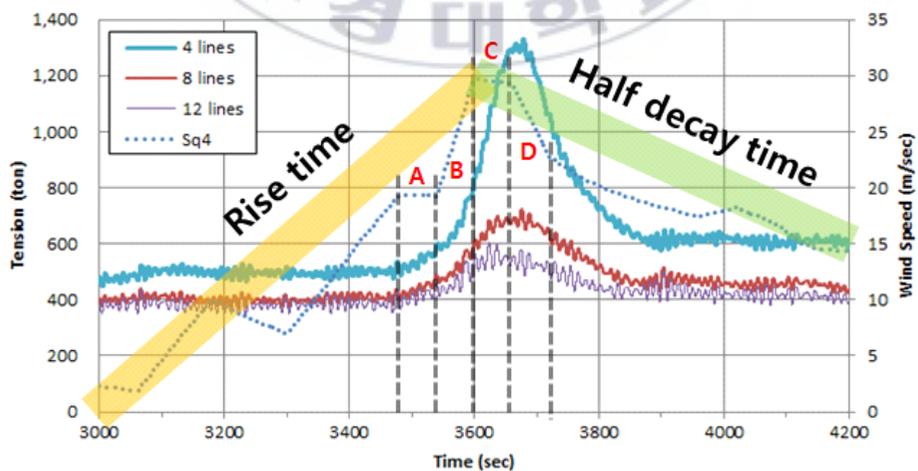


Fig. 6.3 Tension and characteristic squall section of Sq4.

동일한 스콜 풍속 조건에서 4개, 8개 및 12개의 계류라인을 가진 계류시스템은 각각 다른 최대 장력을 보이고 있다.

3,000초 이후 지속적으로 상승하는 풍속 구간 중에서 최대 풍속의 약 2/3에 해당하는 풍속이 1분간 지속되는 구간에 도달해서야 최대장력은 서서히 상승하기 시작한다(A).

이후 1분간 급속히 풍속이 상승해서 최대 풍속 29.73 m/sec이 되는 시점까지 계류라인의 장력은 계속해서 상승하고 있다(B).

이어서 1분간 약 29.3 m/sec까지 풍속이 미소하게 감소하는 구간이 이어지는데 사실상 최대풍속이 지속되는 구간으로 볼 수 있으며, 12개 라인 연결 조건에서는 이 구간에서 전체 해석구간의 최대장력이 검출된다(C).

계류시스템은 연결된 계류라인의 수가 작아질수록 환경외력과 평형을 이루는 시점이 뒤로 밀려나면서 동시에 최대 장력의 크기도 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 연결된 계류라인 수만큼 계류시스템은 안정 상태로 다가서는 것과 같은 맥락으로 이해할 수 있을 것이다.

4개 라인 연결 조건에서는 풍속이 약 23 m/sec까지 떨어지는 구간의 일정 시점까지 최대장력이 커지다가 정점을 지나면서 감소하는 경향을 확인할 수 있다(D).

이상의 스콜 풍속 변화와 최대장력 변동 특성을 살펴 볼 때, 스콜 4의 경우에는 좁게 본다면 대략 3,400초에서 3,800초까지 400여 초간의 최대장력 특성을 살펴보는 것만으로도 동적 해석 결과를 끌어내기에는 충분한 것으로 판단할 수 있다.

같은 방법으로 스콜 5에 대해 살펴보았다. Fig. 6.4에서 알 수 있듯이 스콜 5는 거의 무풍 상태에서 급속히 20 m/sec 부근까지 풍속이 상승한 이후 9분에 걸쳐 서서히 최고풍속 24.24 m/sec에 도달하고, 이어서 상대적으로 느린 변화율로 풍속이 떨어지는 경우

이다. 특이한 점은 이런 경우에 있어서도 풍속이 대략 20 m/sec를 초과하는 일정 시점부터 최대장력은 커지기 시작해서 최고 풍속 정점을 지난 후 1~2분 사이에 최대장력이 나타나고, 그 이후에는 풍속이 감소하는 변화율 대비 급격히 장력이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

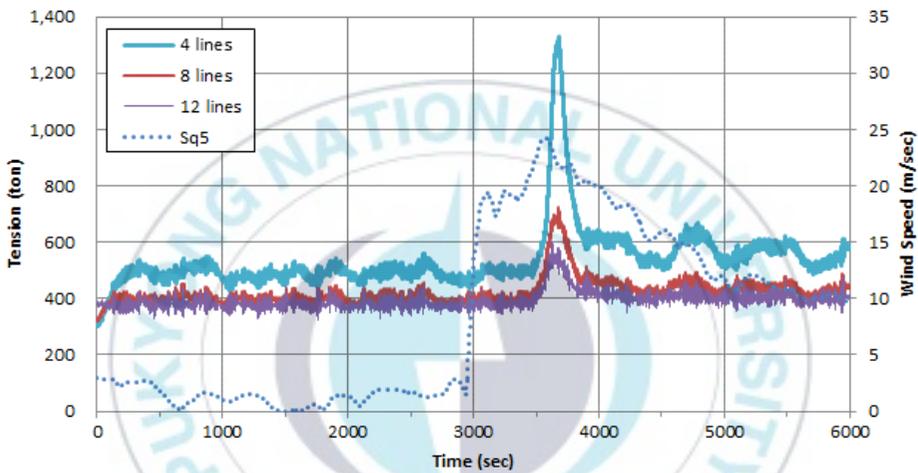


Fig. 6.4 Tension and wind speed in Sq5.

스콜 5의 경우에는 스콜 풍속이 급격히 상승하는 시계열 자료 시각 2,900초부터 시작해서 스콜4의 경우보다 10분이 더 긴 4,700초까지 30분간(1,800초)의 장력 변화를 살펴보았다(Fig. 6.5).

여기서 30분의 시간 영역은 앞서 정의한 특성 스콜 구간, 즉 최고풍속 24.24 m/sec의 절반인 12.12 m/sec까지 풍속이 감소하는 부분까지 포함하는 시간보다는 짧은 풍속 15 m/sec 정도까지만 살펴본 시간 영역인데, 스콜 특성 구간의 6,000~10,800초 범위가 포함되지 않은 것이지만, 전체 해석구간에 대한 최대장력을 추출하기에 충분한 것으로 판단되며, 더욱 좁게는 3,400초에서

3,800초까지 400초의 해석구간이면 충분한 것으로 보인다.

스콜 시계열 자료 중 최대장력 크기가 가장 작았던 스콜 3에 대해 같은 방법으로 해석 결과를 살펴보았다(Fig. 6.6). 스콜 3은 최대풍속이 23.32 m/sec를 가지는 시계열 자료이다.

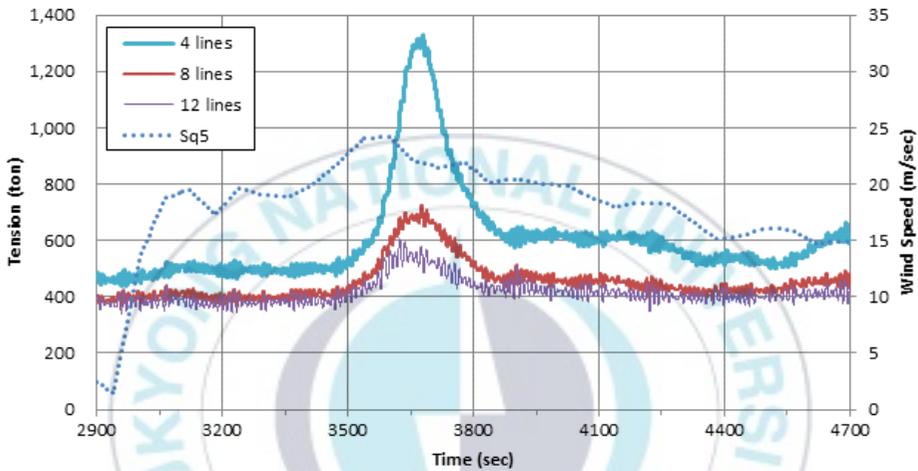


Fig. 6.5 Tension and characteristic squall section of Sq5.

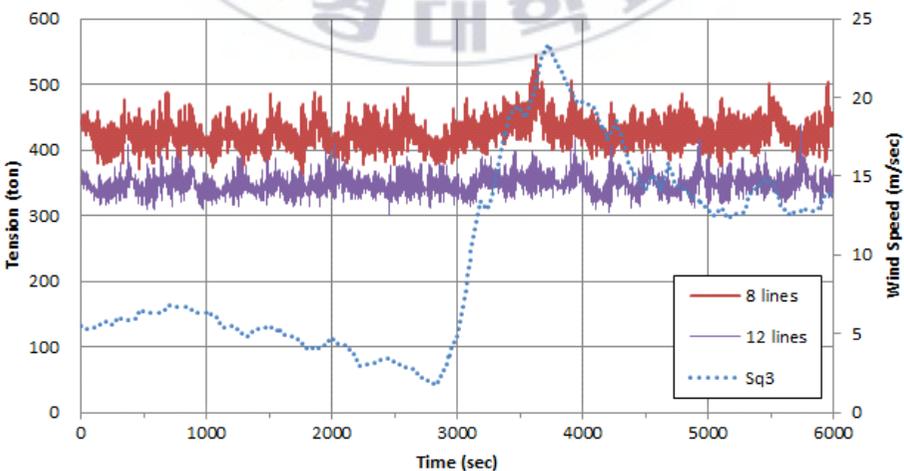


Fig. 6.6 Tension and wind speed in Sq3.

이미 여러차례 사전 검토 결과에서 인지한 바와 같이, 4개 계류 라인 연결 조건에서는 폭풍안전계류를 만족하지 못하였으므로, 결과 분석은 8개 및 12개 라인 연결 경우만 수행하였다.

Fig. 6.6에서 볼 수 있듯이, 스콜 3의 경우에는 앞선 스콜 4 및 5와 같은 뚜렷한 최대장력 증가 구역을 분리해내기 힘들다.

마찬가지로 특성 스콜 구간에 대한 자세한 장력 특성을 살펴보았다. 스콜 5와 같은 30분(1,800초) 구간에 대한 풍속 및 장력 변화 양상을 나타낸 그림이 Fig. 6.7과 같다.

3.3.2절에 나타낸 바와 같이, 1분 평균 풍속 최대값 29.73 m/sec를 가지는 스콜 4를 제외하면 나머지 5개 스콜 모두 1분 평균 풍속 최대값이 23~26 m/sec로 서로 유사하다. 특히 10분 평균 풍속의 전체 평균은, 스콜5가 7.55 m/sec인데 비해 스콜3은 10.55 m/sec이므로 오히려 높은 편이다. 그럼에도 불구하고 스콜 3의 최대장력값이 작은 원인은 다른 스콜에 비해 높은 평균 풍속이 최대풍속 충격을 무디게 한 때문인지, 스콜 방향 차이 때문인지 명확히 밝히기는 어려운 것으로 판단되었다.

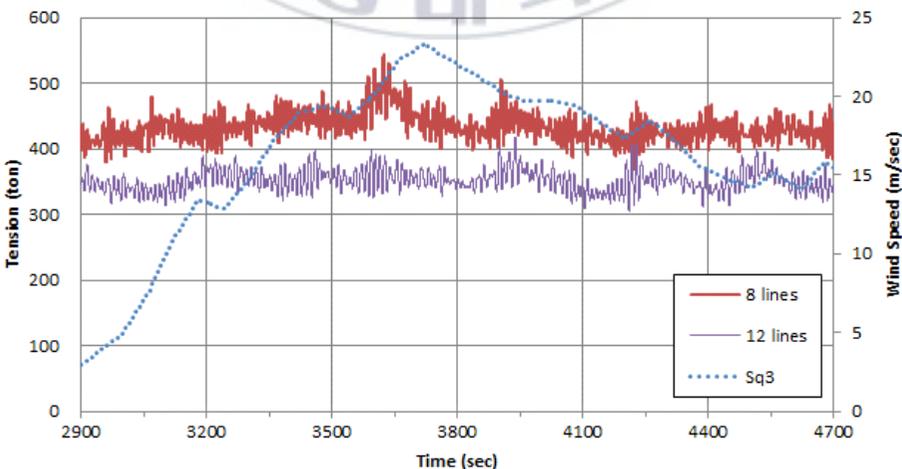


Fig. 6.7 Tension and characteristic squall section of Sq3.

6.3 준정적 해석 및 동적 해석 시간 비교

지금까지 본 연구에서 수행된 준정적 해석 및 동적 해석 시간을 비교해 보았다(Table 6.5). 여기서는 해석을 위한 해석 케이스 선정 및 해석 모델링 등 부수적인 요소들은 배제하고, 수치해석 수행에 소요된 컴퓨터의 계산 시간과 후처리 시간만을 비교한 것이다.

Table 6.5 Comparison of analysis time duration between quasi-static and dynamic analysis

Item	Storm safe mooring analysis		Remark
	Quasi-static	Dynamic	
Environment incidence (A)	36	36	0~360°
Calculation step (B)	2 ¹⁾	1	
Simultaneous calculation (C)	36	8	
Bundling no. of calculation (D)	2	4.5	$D=A \times B \div C$
Calculation time per bundle (E)	6min.	50, 100, 150min. ²⁾	
Calculation time per execution (F)	12min.	4, 8, 12hr. ³⁾	$F=D \times E$
Mooring condition, model case (G)	5	5	4, 7, 8, 11, 12 lines
Sum of calculation time (H)	1hr.	44hr. ⁴⁾	$H=F \times G$
Post-processing time (I)	5 min.	approx. 12hr.	
Total analysis time (J)	approx. 1hr.	approx. 56hr.	$J=H+I$

Note 1. Calculation step 2* could be 1 in depend on coding in MOSES.

2, 3. Calculation time is varying depends on the number of mooring lines.

4. $44hr. = 4hr + 8hr \times 2cases + 12hr \times 2cases$

Table 6.5의 계산 시간에 대한 자세한 설명은 아래와 같다.

- 환경외력 입사각(Environment incidence, A) : 36개 케이스.
0~360° 전방향 환경외력 평가를 위해 10° 간격 선정.
- 해석 단계(Calculation step, B) : 준정적 해석에서는 Morison 방정식에 근거한 풍력 및 조류력 계산을 먼저 수행하여 최대 장력(또는 최대이격거리)에 대한 환경외력 입사각을 먼저 선정하고, 선정된 각도의 바람 및 조류 위에 파를 다시 전방향으로 중첩시켜 최대 장력(또는 최대이격거리)을 최종적으로 찾는 두 단계의 방법론을 선택하였다. 반면 동적 해석에서는 파랑 및 조류를 동일한 방향으로 놓고, 스킴을 얹어 한번에 계산하는 방법을 선택하였다.
- 동시계산(Simultaneous calculation, C) : 준정적 해석을 위해 사용된 MOSES에서는 환경외력 입사각 36개에 대한 해석을 한 묶음으로 일괄계산이 가능하도록 코딩하여 계산하였다. 동적 해석에 사용된 OrcaFlex는 계류라인 모델링 후 모든 환경외력에 대한 일괄계산이 가능하도록 전처리 과정을 거친 뒤 일괄 계산을 실행하였는데, 이때 8개 해석케이스 묶음으로 동시계산이 가능하다.
- 계산묶음 개수(Bundling no. of calculation, D) : 해석 실행 횟수(A×B)를 컴퓨터가 묶음으로 처리하는 개수(C)로 나누는 산술적 계산묶음 개수.
- 계산묶음별 계산시간(Calculation time per bundle, E) : 해석 실행 시 확인된 개략적 계산묶음별 계산수행 시간.
- 계산 실행 시간(Calculation time per execution, F) : 일괄 계산 수행까지 포함된 준비된 모델에 대한 계산 시작부터 완료될 때까지의 실행 시간으로서, 계산묶음 개수(D)×계산묶음

별 계산 시간(E)에 해당한다.

- 계류 조건 또는 모델 케이스(Mooring condition, model case, G) : 폭풍안전계류 해석을 위한 계류 라인 연결 상태. 본 연구에서는 ULS 조건인 4, 8, 12개 계류라인 연결 및 ALS 조건인 7, 11개 계류라인 연결 등 총 5개 케이스.
- 총 계산시간(Sum of calculation time, H) : 위 경우의 수를 반영한 전체 계산시간.
- 후처리 시간(Post-processing time, I) : 계산 후 결과 분석에 소요되는 개략적인 후처리 시간.
- 전체 해석시간(Total analysis time, J) : 폭풍안전계류 해석을 위한 준정적 및 동적 해석 각각의 전체 소요시간.

Table 6.5에서 보는 바와 같이, 준정적 해석과 동적 해석의 계산 소요시간 차이는 55시간으로서, 쉬지 않고 연속작업을 한다고 보면 거의 2.5일에 육박한다. 스쿨의 시간적 변동 특성을 감안한 동적 해석은 계산 시간과 함께 필연적으로 계산 결과의 저장 공간 역시 대용량으로 필요하다.

그리고 표 맨 아래에 있는 전체 계산시간은 결과가 도출된 최종 모델의 계산시간으로서, 그 단계까지 도달하기 위해 소요된 많은 시행착오 과정의 시간을 감안하면, 격차는 더 큰 시간으로 늘어나게 된다. 또한 모든 계산은 스쿨 하나에 대한 소요시간이기 때문에 10개 또는 20개의 스쿨에 대한 검토시간은 그만큼 늘어나게 된다.

이런 점을 감안하면, 계류시스템의 검토를 위해 동적 해석 방법을 적용하는 것으로 결정되면 해석 과정의 인적·물적 비용 부담은 준정적 해석에 비해 극단적으로 늘어나게 되며, 이러한 이유로 Franck et. al(2006)은 스쿨을 심해 서아프리카 계류시스템 설계의 악몽이라고 언급한 바 있다.

7. 대안 해석 방법 제안 및 비교

7.1 특성 스콜 구간을 고려한 해석 제안 및 검증

지금까지 살펴본 폭풍안전계류 평가를 위한 준정적 해석과 동적 해석은 장단점을 가지고 있다. 준정적 해석은 비교적 비선형 특성을 무시할 수 있는 해양구조물(또는 계류라인을 포함하는 전체 시스템)에 대한 평가라는 제약이 있으나 해석 시간이 매우 짧다. 반면 동적 해석은 여러 가지 비선형 현상을 고려해야 하는 대상체의 평가를 위해 반드시 필요한 과정이지만, 준정적 해석의 최소 수십 배 이상에 달하는 극단적인 장기 해석 시간을 요구한다. 이러한 긴 해석 시간은 많은 장비와 인력을 요구하게 되고, 엔지니어링 측면에서 그 자체로 비용 증가를 의미한다.

계류 시스템 설계가 완료된 이후 설치를 위한 엔지니어링 검토 과정은 설치 가능성이 현저하게 낮거나 설치 위험도가 높은 상황이 아니라면, 방대한 시간을 투입하여 도출된 계류시스템의 설계 결과를 변경하는 것은 합리적인 판단이 될 수 없다. 이 단계의 엔지니어링 검토 결과는 안전한 설치를 목적으로 두면서, 그러한 설치가 가능한 선박이나 장비의 적정 사양을 결정하는데 유용하게 활용된다.

스콜 환경에서는 폭풍안전계류를 비롯한 설치 안정성 관련 엔지니어링 검토를 위해 설계와 마찬가지로 동적 해석 과정이 요구되고 있는 것이 현재 권고되는 방법론이다.

공학적 측면에서는 목적 대상체에 대한 안정성 평가나 극한의 특성값을 찾아내기 위해 수학적 엄밀해를 찾아내기 힘든 대부분의 경우 적당히 근사화시킨 모델링을 통한 수치해석을 수행하거나 모

형 실험을 하는 방법이 동원된다. 이와 함께 명확한 인과관계를 찾기 어렵거나 매우 까다로운 현상을 직관적으로 인지하기 위해 혹은 짧은 시간에 개략적인 값을 얻기 위해 여러 가지 경험식 또는 간략식을 사용하는 것은 공학에 있어서 일반적으로 이용되고 있다.

특히 방대한 경우의 수를 모두 고려한 수많은 모델에 대한 정밀 계산을 수행하려고 할 때, 일종의 사전 검토(screening) 과정을 거침으로써 계산해야하는 양을 대폭 줄인 뒤, 선택된 일부 모델을 대상으로 필요한 정밀 계산을 수행한다면 시간과 비용을 절감할 수 있는 합리적인 접근법이 될 수 있을 것이다.

본 장에서는 스콜 해역에서 기존에 행해지고 있는 동적 해석 기법에 대한 시간 단축 평가 방법을 제안하였다. 여기서 제안한 대안의 중요한 요소는 스콜 환경하의 최대장력이 스콜 최대풍속 발생 시점과 인접한 영역에서 발생하고 있음을 고려한다는 것이다. 또 이때 해양구조물 이격거리 역시 최대값이 발생하는 지점 부근이다.

Fig. 7.1에 나타난 궤적은 스콜4 환경에서 12개 라인이 연결된 경우, 최대장력이 검출된 S1 라인의 페어리더(SF1) 위치를 보여주는 그림이다. 최대풍속 발생시점은 3,600초이며, 최대장력 604.6 ton이 발생한 시점은 24초 뒤인 3,624초에 발생하였다.

Fig. 7.2는 동일한 스콜4의 환경에서 7개 라인이 연결된 경우에 대한 SF1의 궤적을 보여주는 그림이다. 최대장력 발생시점은 최대 풍속 발생시점 3,600초부터 약 41초 뒤인 3,640.9초에 발생하였다. 직관적으로 알 수 있듯이 연결된 계류라인 수가 적어질수록 계류시스템은 동일한 환경외력에서 상당 시간 더 밀리면서 그에 따른 최대장력도 더 크게 나타나고 있다.

7개 라인 연결 경우, 최대풍속이 발생하는 시간영역에서 해양구조물의 이격방향 불규칙성이 12개 라인 연결 경우 대비 크게 증가한 것을 확인할 수 있는데, 이는 7개 라인 연결 상태가 비대칭이

기 때문인 것으로 보인다. 이는 풍속과 풍향이 극단적으로 바뀌는 바람과 함께 불규칙과파가 적용되는 해역의 해석케이스에 따라 최대 장력의 수렴도가 크게 떨어질 가능성이 크다는 것을 단적으로 보여주는 부분이다.

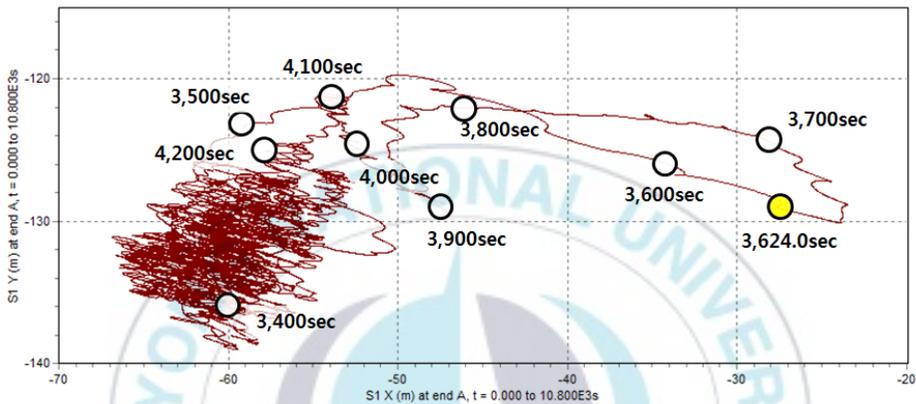


Fig. 7.1 The SF1 position in 12 lines mooring condition for 10,800sec dynamic analysis.

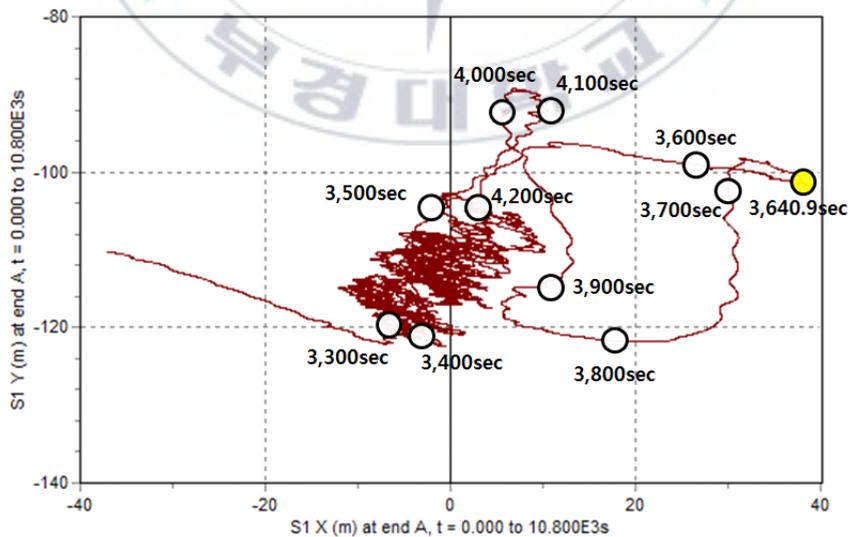


Fig. 7.2 The SF1 position in 7 lines mooring condition for 10,800sec dynamic analysis

이상 검토한 바와 같이 계류라인의 선박 고정점인 페어리더 SF1의 위치가 가장 멀리 떨어진 지점 부근에서 최대장력이 발생하였다. 해양구조물 운동 궤적 중에서 최대장력과 관련된 유의미한 구간은 최고풍속 전후에서 약 2~3회 정도의 큰 거동이 생기는 3,300초~4,200초, 약 15분에 해당하는 매우 짧은 시간 동안인 것으로 보인다. 다시 말해, 그림에서 시간을 표시한 부분 외의 많은 궤적은 최대장력과 무관한 계산영역으로 판단된다. 대안 해석 방법은 이러한 점을 감안한 계산시간 단축에 초점을 두고 있다.

대안 해석 방법의 두 번째 핵심은 앞서 수행한 해석 결과를 사전 검토 작업의 일환으로 활용하여, 최대장력 등이 검출된 극단적 스콜 시계열자료를 선정한다는 것이다. 본 연구에서 채택한 스콜 자료 중 스콜4 시계열 자료가 그러한 결과를 만들어 내는 것으로 확인되었다. 극단적 스콜 선정을 통하여 스콜을 고려한 동적 해석에 이용될 대표 풍속값(특성 풍속으로 정의)을 선정할 수 있다. 변환된 스콜4의 풍속 시계열 자료는 1분 평균 풍속 최대값이 29.73 m/sec이며, 이는 기존 설치 안정성 검토 기준인 10분 평균 최대 풍속 20.70 m/sec와 비교할 때 거의 1.5배에 해당되는 값이다. 다만, 이러한 대표 스콜 또는 대표 풍속값은 사전 해석을 통해 충분한 타당성을 확인한 뒤 면밀히 선정되어야 할 것이다.

폭풍안전계류 안전성 평가를 위해서는 최대장력, 최대이격거리 및 해저면 접촉 여부 세 가지 기준에 대해 검토해 보아야 하지만, 가장 중요한 검토 인자인 최대장력을 중심으로 본 연구에서 제안된 해석방법에 따른 결과와 기존 해석 결과를 비교해 보았다. 이러한 연구 전개 역시 지금까지 살펴본 준정적 해석 및 동적 해석 내용 전체를 하나의 큰 사전검토(screening) 과정으로 활용한다는 개념이다.

또, 이러한 사전검토 결과를 반영하여 안전평가 기준을 크게 초과

하는 4개 라인 연결은 생략하고, ULS 조건으로 8개 및 12개 라인 연결기준 및 이때의 ALS 조건인 7개 및 11개 라인 연결 상태를 살펴보았다.

Table 7.1은 지금까지 언급한 폭풍안전계류 평가에 관한 대안 해석 방법을 나타낸 표이다. 대안 해석 방법으로서 세 가지 동적 해석에 관한 대안과 함께 준정적 해석도 비교를 위해 포함하였다.

스콜 풍속 상수값으로 이용된 풍속은 스콜 시계열 중 가장 큰 장력을 보이는 대표 스콜의 스케일 변환된 풍속 시계열 최대값을 사용하는 것이다. 본 연구에서는 스콜4의 변환된 1분 평균 풍속 시계열 자료의 최대값 29.73 m/sec를 적용하였다.

스콜 시계열 자료라고 표시된 것은 이 29.73 m/sec의 1분 최대 풍속을 가지는 바람 시계열 자료를 말한다.

위 네 가지 대안 해석 방법으로 계산한 결과는 다음 절에서 기존 3시간 동적 해석 결과와 함께 비교·분석하였다.

Table 7.1 Proposed analysis methods in 3 dynamic analysis and 1 quasi-static analysis

Analysis	Squall		Time duration (sec)
	Wind speed	Wind direction	
Dynamic ^{*I}	Constant	Constant	1,200
Dynamic ^{*II}	Time series	Constant	1,200 ^{**}
Dynamic ^{*III}	Time series	Time series	1,200 ^{**}
Quasi-static [*]	Constant	Constant	N/A

Note) 1,200^{**} means that basically analysis time duration of Dynamic^{*II} and Dynamic^{*III} follow Dynamic^{*I} as 1,200sec, however the analysis results could be achievable from shorter time duration, e.g. 300, 600 and 900sec.

7.2 대안 동적 해석 I (Dynamic*1)

특성 스콜 구간을 고려한 동적 해석의 첫 번째 대안 해석 방법은 특성 풍속값인 1분 평균 최대풍속 29.73m/sec를 풍속 상수값으로 적용한 동적 해석 방법이다. 조류는 기존과 같은 상수값이고, 파랑 역시 기존과 같은 불규칙파 스펙트럼을 적용하였다. 이때 특성 스콜 구간을 고려하여 기존 3시간(10,800초)의 시뮬레이션 시간을 크게 줄여 300초 및 1,200초 두 가지로 설정하였다.

스콜의 풍속과 풍향의 시간적 변동성을 고려하지 않고, 최고풍속을 상수값으로 적용한 해석이며, 이때 해양환경 측면에서의 변동성은 오로지 파랑뿐이므로 파주기를 감안한 300초의 해석시간을 고려하였다. 또한, 1,200초 시간 구간의 해석을 추가하여 해석 시작부터 구조물 이격거리에 영향을 미치는 바람으로 인한 계류시스템의 불규칙한 거동 양상이 어느 시간 구간에 충분히 포함되는지 파악하였다.

Fig. 7.3은 300초 시간 구간을 적용한 해석 결과이다. 10° 방향으로 모든 환경외력, 즉 바람, 조류 및 파랑이 입사될 때 최대장력 683.2 ton을 보이는 S1 계류라인의 장력 시계열 그래프이다.

동적 해석을 위해 목적 시간 구간 300초 이전에 20초의 안정화 구간을 거쳤음에도 불구하고, 계류라인의 장력 시계열은 전 해석시간 구간에서 안정화 되어있지 않은 것 같은 변동 양상을 보인다.

이러한 원인은 주어진 환경외력에서 해양구조물이 불안정한 거동을 보이는 것과 관련된다. 이 구조물 거동은 계류라인이 환경외력 변화에 대응하는데 충분하지 않아 발생하는 시간적 천이상태 또는 충분히 대표적이지 못한 거동이 원인이라는 추측을 할 수 있다.

Fig. 7.4는 해양구조물의 해석 시간 300초 동안의 거동을 나타낸 그림이다.

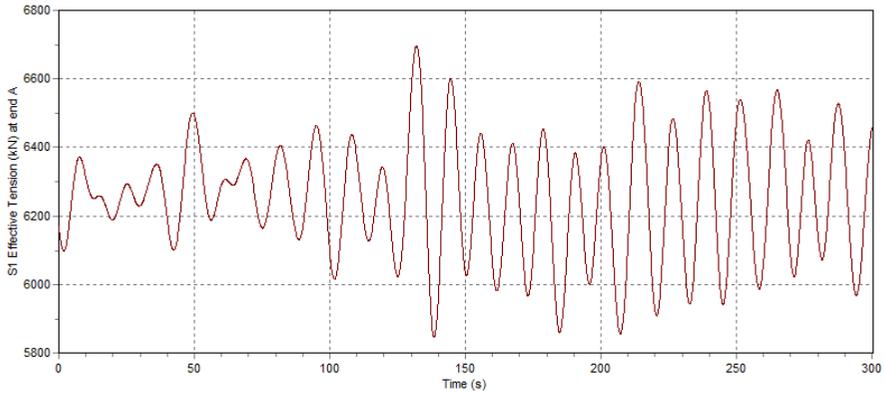


Fig. 7.3 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition for 300sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*1}).

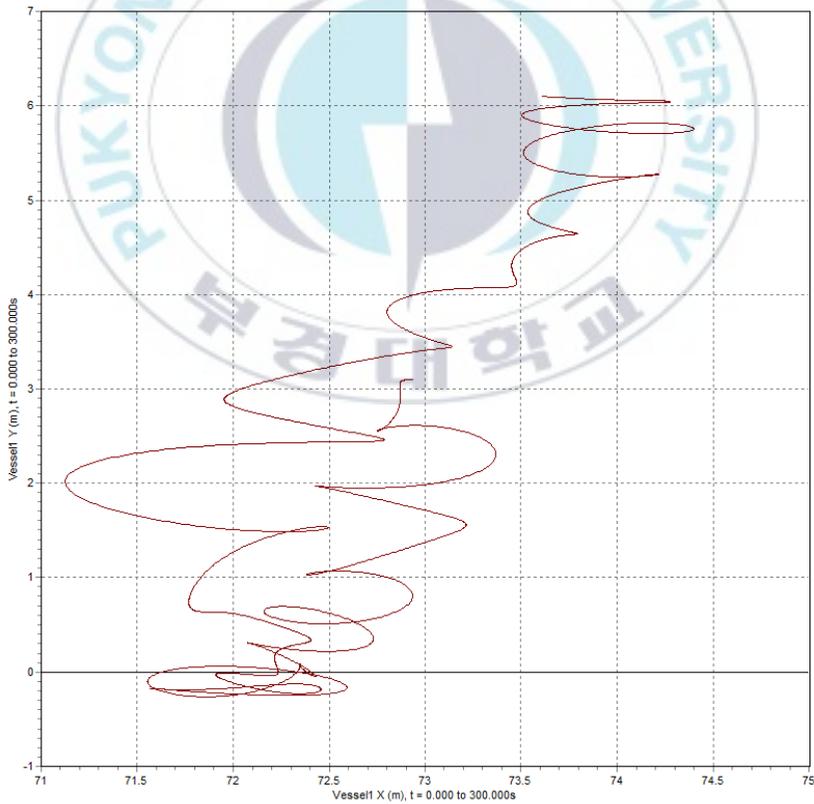


Fig. 7.4 The FPSO position in 8 lines mooring condition for 300sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*1}).

Fig. 7.4에서 해양구조물은 최소 1회의 방향 전환하는 구간을 포함하는 거동을 보이는 것처럼 보인다.

이에 대한 확인을 위해 1,200초까지 시간을 연장하여 해석을 수행하였다. 이때는 환경외력 입사각이 0° 일 때 S1 계류라인에서 최대장력 718.6 ton이 검출되었다.

Fig. 7.5는 1,200초 해석 시간 구간의 해양구조물 거동을 나타낸 그림이다. 해양구조물 궤적상의 변호는 시간 구간에서 장력 크기 상위 4개의 최대장력이 발생한 지점을 시간순으로 표시한 것이다.

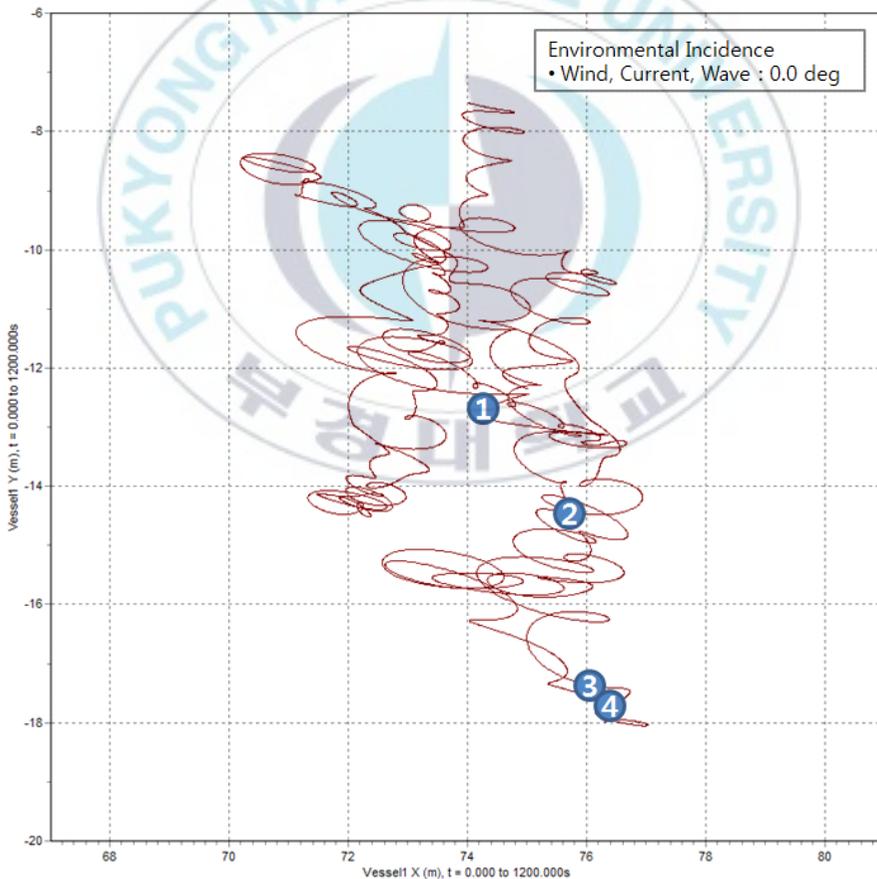


Fig. 7.5 The FPSO position in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*1}).

Fig. 7.5에서 보는 바와 같이 국부 최대장력이 해양구조물 궤적 일정 영역에 분산되어 분포된 것을 볼 수 있다. 차이가 미미한 4개의 국부 최대장력은 해양구조물이 X 방향으로 약 2 m, Y 방향으로 약 6 m 거동하면서 발생한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7.6은 해석 시간 동안의 상위 4개 장력을 확인할 수 있는 그림이다. 각 최대값의 차이는 약 20 ton에 불과한데, 300 sec를 지나는 시점에 한 번, 600 sec를 지나는 시점에 세 번 나타난다.

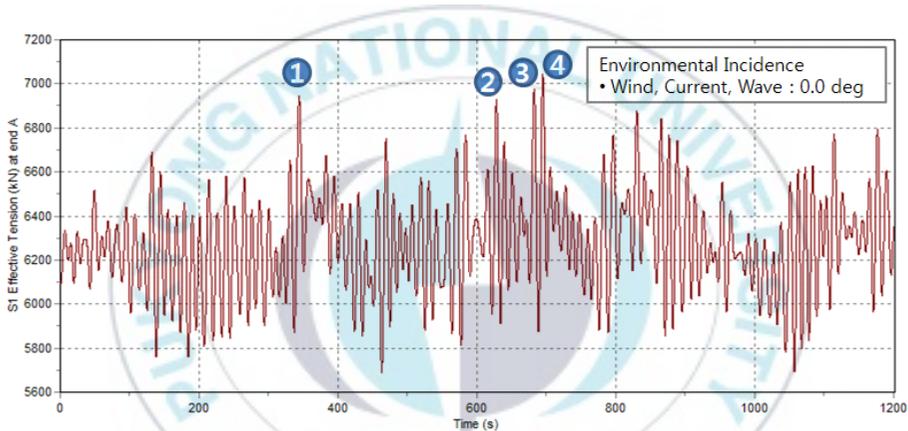


Fig. 7.6 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*I}).

같은 방법으로 12개 계류라인 연결 상태의 최대장력과 해양구조물 거동 양상을 살펴보았다. 최대장력은 환경외력 입사각 10° 에서 발생하였고, 크기는 593.9 ton, 발생위치는 S1 계류라인이다.

Fig. 7.7 및 Fig. 7.8은 차례로 12개 계류라인 연결 상태의 해양구조물 거동과 최대 장력을 나타낸 그림이다. 장력이 국부적으로 크게 나타나는 3개 지점을 번호로 표시하였다. 해당 지점들은 X 방향으로 약 1 m, Y 방향으로 3 m 이내이다. 또 최대장력이 발생한 지점이 거동궤적의 외곽이 아니라는 점도 특이할 만하다.

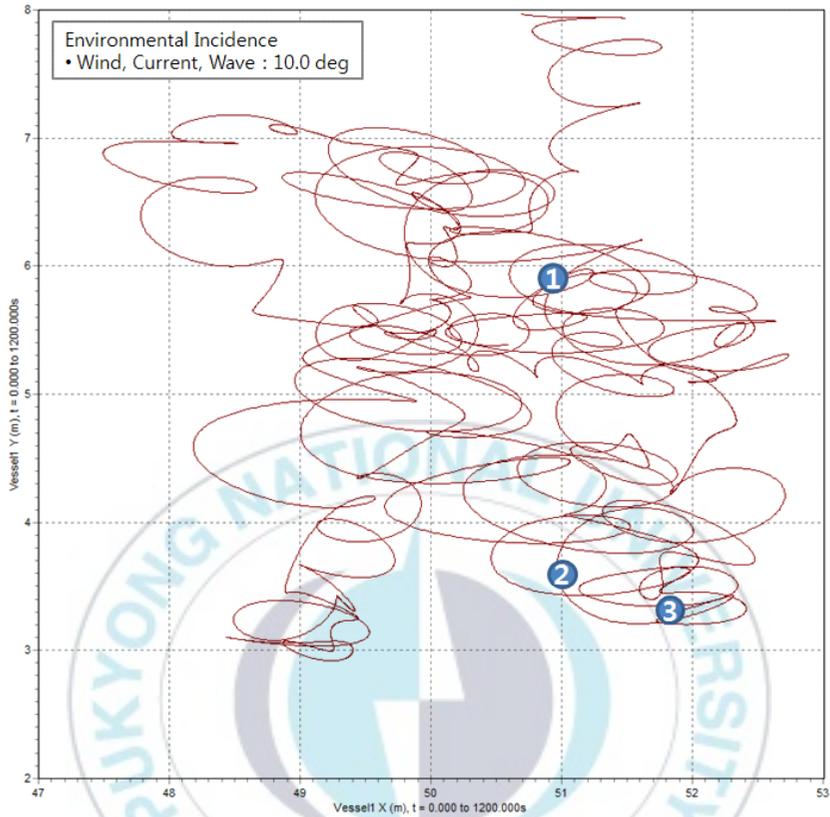


Fig. 7.7 The FPSO position in 12 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*I}).

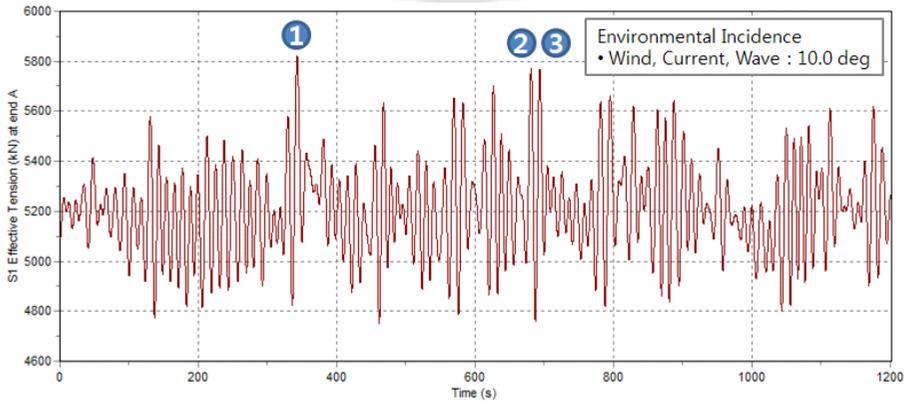


Fig. 7.8 Tension of S1 line in 12 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*I}).

Fig. 7.9 및 Fig. 7.10은 차례로 ALS 조건인 7개 및 11개 계류 라인 연결시의 장력 변화를 나타낸 그림이다.

7개 라인 연결시에는 외력 입사각 0° 일 때 S1 계류라인에서 최대장력 1,273.4 ton이 나타났으며, 11개 라인 연결시에는 외력 입사각 10° 일 때 S1 계류라인에서 최대장력 820.2 ton이 나타났다.

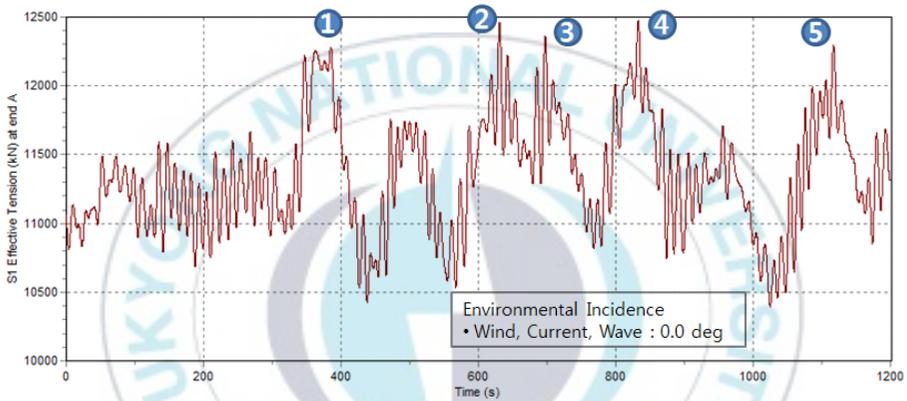


Fig. 7.9 Tension of S1 line in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*I}).

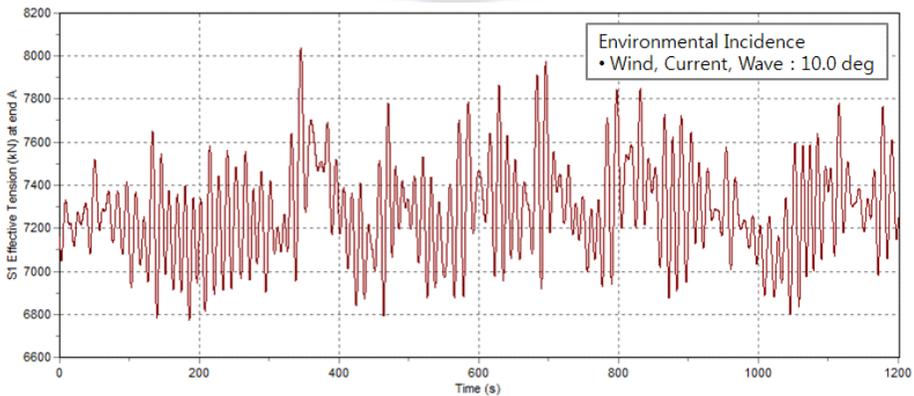


Fig. 7.10 Tension of S1 line in 11 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*I}).

앞서 거동측면에서도 최대장력이 나타나는 영역을 몇 차례 지나가는지 혹은 얼마나 오래 머무르는지에 따라 대안 동적 해석 I의 해석시간 설정의 타당성은 달라질 수 있으며, 그러한 이유로 5분 및 20분간의 해석을 비교하여 살펴본 바 있다.

Fig. 7.11은 7개 계류라인이 연결된 경우 1,200초 동안 최대장력이 나타난 5개 지점을 보여주는 그림이다.

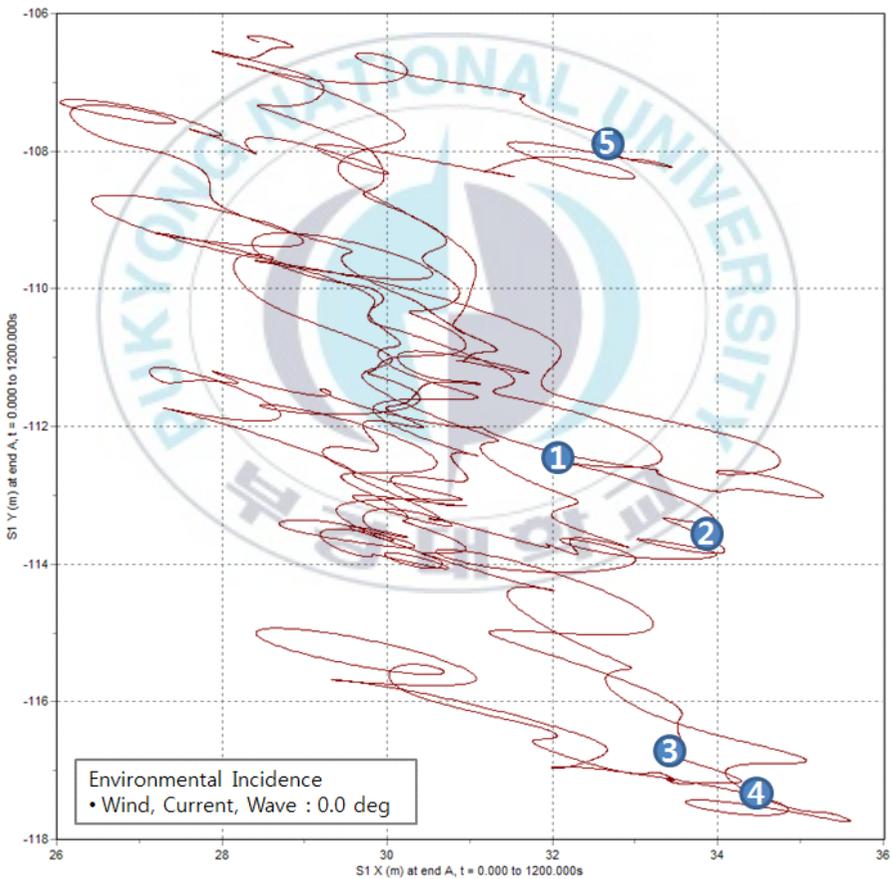


Fig. 7.11 The SF1 position in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 1st proposed analysis method(Dynamic^{*I}).

최대장력 이력을 보여주는 이상의 그래프들을 볼 때, 최대장력이 검출되는 지점들이 최대풍속을 상수값으로 적용했음에도 불구하고 10분을 넘어서는 지점에서 수차례 반복되는 것을 감안하면, 대안 동적 해석 I의 해석시간 설정은 20분으로 하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 특히 Fig. 7.11에서 최대장력 후보군의 마지막 5번째 최대장력 검출 시점은 18분 이후라는 것도 20분 시간 설정의 타당성을 높여주는 점이다.

스콜 해석의 동적 해석에 대한 첫 번째 대안으로서, 1분 평균 최대풍속을 상수값으로 사용한 지금까지의 동적 해석 결과를 정리한 표가 Table 7.2와 같다. 3시간 동안의 기존 동적 해석 결과도 함께 나타내었는데, 1/9로 줄인 20분간의 동적 해석만으로 모든 케이스에서 매우 높은 정도의 일치도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

그리고, 안전 판정기준 만족여부도 전체 해석케이스에서 기존 3시간 해석과 일치하고 있으므로 만족스러운 대안으로 판단된다.

Table 7.2 Maximum tension results between standard and 1st proposed method (Dynamic^{*1}) in dynamic analysis

Analysis no. and type	Wind data		Maximum tension (ton)			
	Max. (m/sec)	Type	12 lines		8 lines	
			ULS	ALS	ULS	ALS
2 Dynamic	29.73	Time series	605	825	724	1,274
3 Dynamic ^{*1}		Const.	594	820	719	1,273
Difference of maximum tension (%)			-1.8	-0.6	-0.7	-0.1
Criteria			745	1,107	745	1,107

7.3 대안 동적 해석 II (Dynamic*II)

7.3.1 파랑 및 조류 입사방향이 미치는 영향 검토

특성 스콜 구간을 고려한 동적 해석의 두 번째 대안 해석 방법은 스콜 풍속을 고정 상수값으로 사용하는 것이 아니라, 특성 스콜 구간으로 정의된 20분(1,200초)의 스콜 시계열 자료를 추출하여 사용하는 동적 해석 방법이다. 단, 스콜 시계열 자료에서 풍속은 시계열 자료를 따르고, 풍향은 고정시킨 채 일정 입사각 간격으로 360° 전방향으로 계산하였다. 조류는 풍향과 동일한 방향으로 입사하도록 설정하였다.

단, 이번 해석에서는 환경외력을 22.5° 간격으로 나눈 뒤 파를 바람 및 조류와 다른 방향(Non-collinear condition)으로도 입사하여 최대장력을 검토하였다.

사전 검토 과정의 준정적 해석 결과에 따르면, 최대장력에 영향을 주는 파의 기여분이 크지 않으며, 또 파가 바람 및 조류와 10~20° 차이의 거의 동일한 방향으로 입사될 때 최대장력이 나타난 것으로 이미 확인된 바 있으나, 파가 입사하는 방향별로 해양 구조물의 6자유도 운동응답이 다르기 때문에 동적 해석에서도 이에 대한 영향을 확인할 필요도 있으므로 Fig. 7.12와 같이 재확인 과정을 거쳤다.

전 방향의 반에 해당하는 180° 방향을 대표하는 위 64개 환경외력 입사각 조합에 의한 해석 결과, 최대장력 상위 8개에 대한 조합을 Table 7.3 같이 얻었다.

표에서 보는 바와 같이 최대장력이 얻어지는 상위 8개 중 4개가 바람과 조류가 S1 또는 P6 계류라인 방향(187.5°)으로 입사할 때이며, 상위 4개 중 3개도 마찬가지로인 것을 볼 때, 두 번째 대안 동적 해석도 기존 결과와 다르지 않을 것으로 예상할 수 있다.

위 8개 조합과 나머지 180° 대칭인 영역까지 고려한 해석 결과, 7, 8, 11 및 12라인 연결 상태 모두 파와 바람 및 조류가 7.5°로 동일하게 입사될 때 가장 큰 것으로 나타났다.

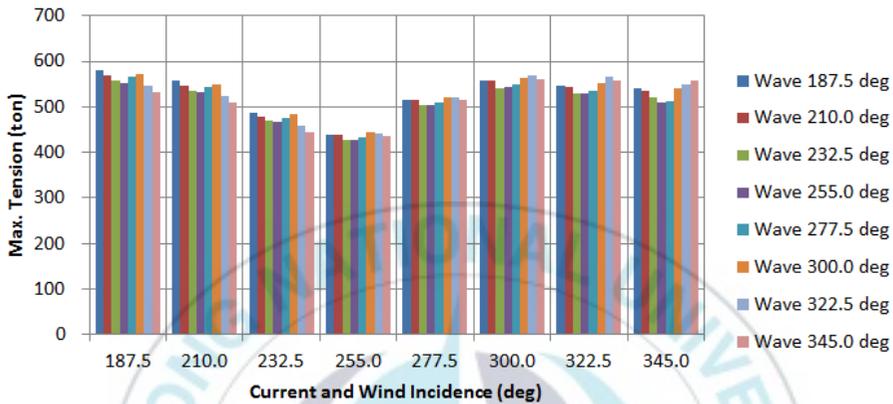


Fig. 7.12 Maximum tension in various environmental incidence.

Table 7.3 Combination of environmental incidence by top 8 maximum tension

No.	Environmental incidence (°)		Max. tension (ton)	Remark
	Wave	Wind & current		
1	187.5	187.5	579.6	Collinear
2	300.0	187.5	571.5	Non-collinear
3	322.5	300.0	568.9	Non-collinear
4	210.0	187.5	567.9	Non-collinear
5	322.5	322.5	565.5	Collinear
6	277.5	187.5	564.7	Non-collinear
7	300.0	322.5	563.4	Non-collinear
8	345.0	300.0	560.1	Non-collinear

7.3.2 대안 동적 해석 II에 따른 최대 장력 검토

Table 7.4는 앞서 계산한 결과와 함께 대안 동적 해석 I과 동일한 입사각을 적용한 해석 결과도 함께 나타낸 것이다. 두 번째 대안 동적 해석 결과도 모든 해석 케이스에서 기존 동적 해석 결과에 매우 가까운 값을 보여주고 있다. 첫 번째 대안 동적 해석 결과와 비교해도 1% 정도의 작은 차이를 보이고 있다.

Table 7.4 Maximum tension results between standard and proposed method II(Dynamic^{*II}) in dynamic analysis

Analysis No. and Type		Wind data		Maximum tension (ton)			
		Max. (m/sec)	Type	12 lines		8 lines	
				ULS	ALS	ULS	ALS
2	Dynamic	29.73	Time series	605	825	724	1,274
	Dynamic ^{*II}		Time series*	588	808	711	1,287
Difference of the maximum tension (%)				-2.8	-2.0	-1.8	+1.0
4	Dynamic ^{*II}	29.73	Time series*	587	809	715	1,270
				10°	10°	0°	0°
Difference of the maximum tension (%)				-2.9	-1.9	-1.2	-0.3
Criteria				745	1,107	745	1,107

Note: The direction(°) means the incidence of environment.

Fig. 7.13 ~ Fig. 7.20은 해양구조물 거동 및 계류라인의 장력 변동을 보여주는 그림이다. 고정 풍속으로 인해 좁은 영역에서 거동하는 대안 동적 해석 I의 경우와 달리, 시간에 따라 변하는 풍속으로 인해 해양구조물 위치 및 장력 변화가 크지만, 정의된 시간 영역 20분은 타당하다고 판단된다. 최대 장력은 매우 좁은 시간 구간에서 발생하고 있으므로 해당 구간의 파랑 차이에 따라 최대 장력은 어느 정도 변할 수도 있다.

이 결과 중 7개 라인 연결 동적 해석에서, 환경외력 입사각이 187.5° 일 때 P6라인에서 최대장력 1,287 ton이 발생하였다. 다른 경우의 최대장력은 입사각이 0° 일 때 나타난 것에 비해 7개 라인 연결 경우는 반대쪽인 187.5° 라는 점이 특이해 보일 수도 있으나, 환경외력 입사각 0° 일 때 S1 라인에서의 최대장력 1,270 ton이 발생한 것을 보면 그 크기 차이는 0.8%에 불과하며, 위상적으로 대칭이므로 특별히 추가 분석이 필요한 경우는 아닌 것으로 판단된다.

Fig. 7.21 ~ Fig. 7.24는 이를 보여주는 환경외력 입사각 0° 의 풍속, 최대장력, FPSO 기준좌표 및 SF1 페어리드 좌표를 차례로 나타낸 것이다. 번호는 최대장력이 발생한 시점을 표시한 것이다.

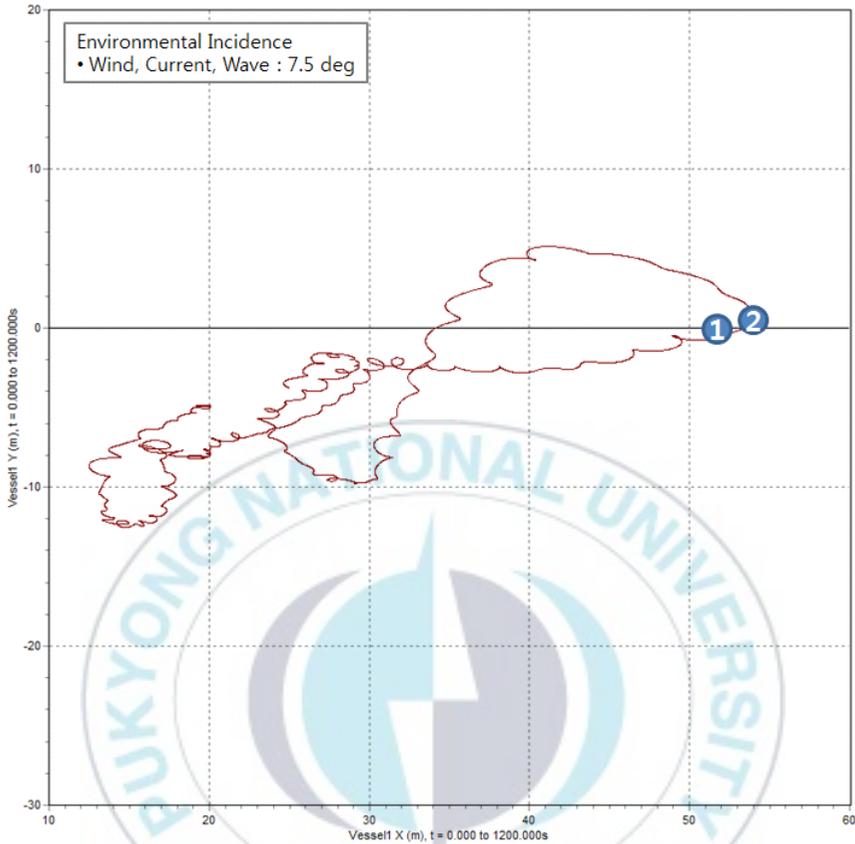


Fig. 7.13 The FPSO position in 12 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

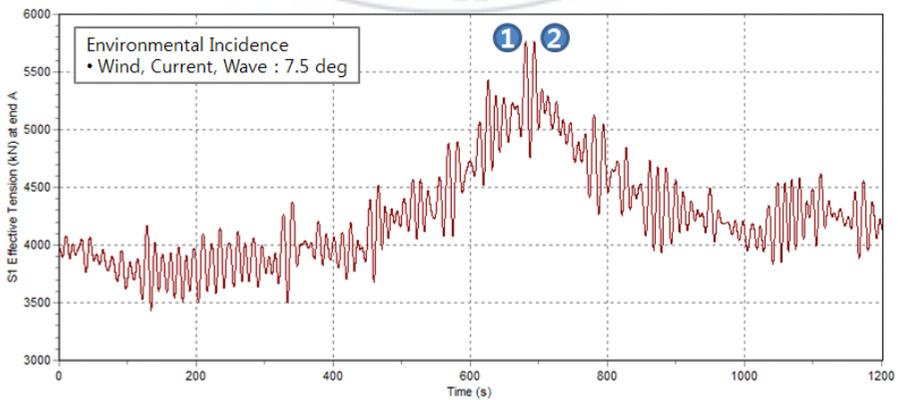


Fig. 7.14 Tension of S1 line in 12 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

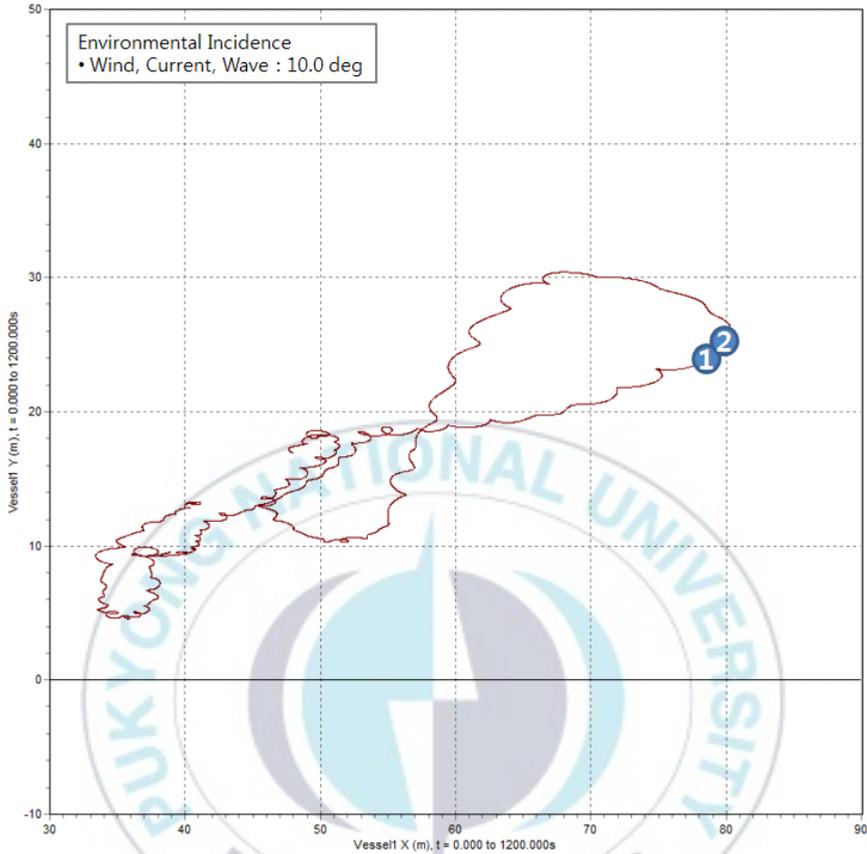


Fig. 7.15 The FPSO position in 11 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

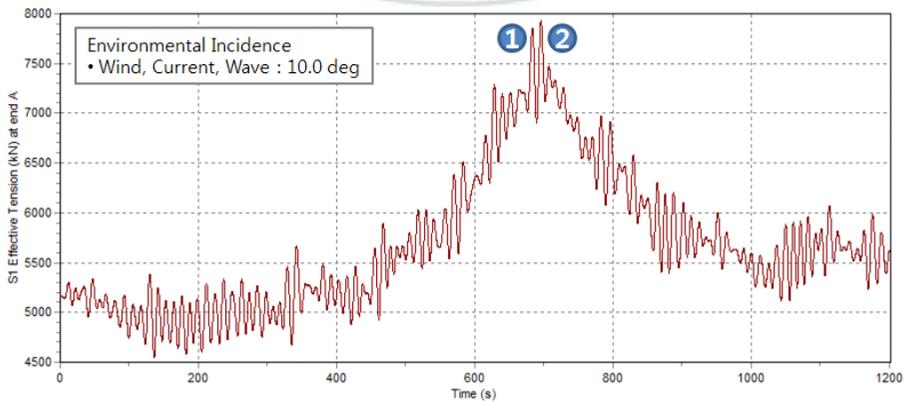


Fig. 7.16 Tension of S1 line in 11 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

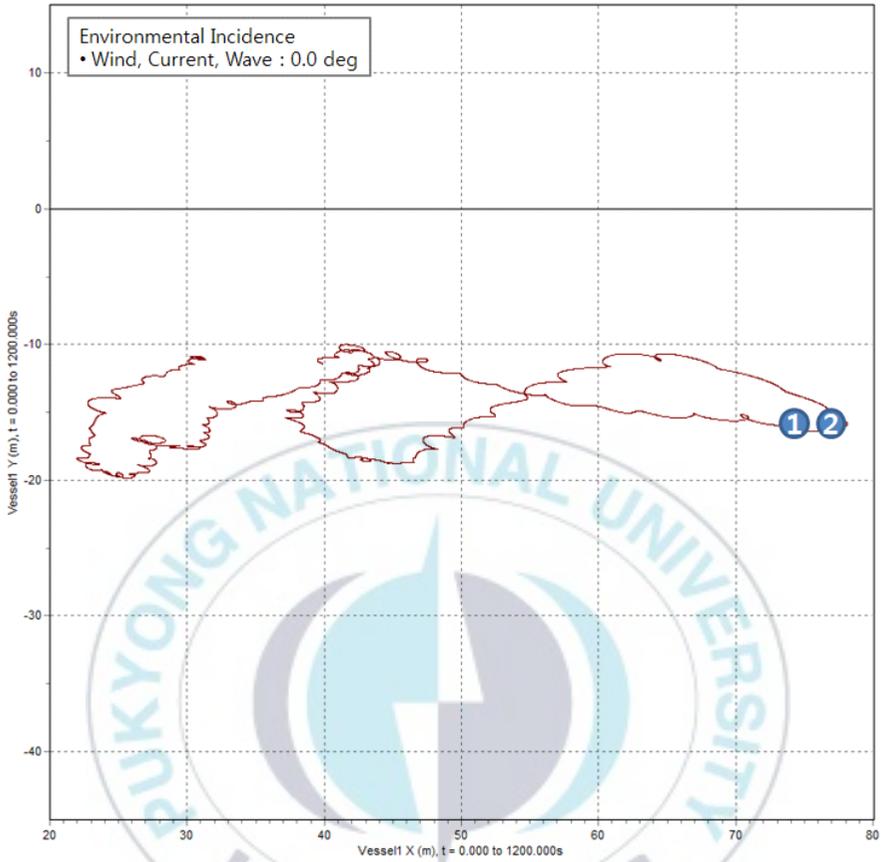


Fig. 7.17 The FPSO position in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

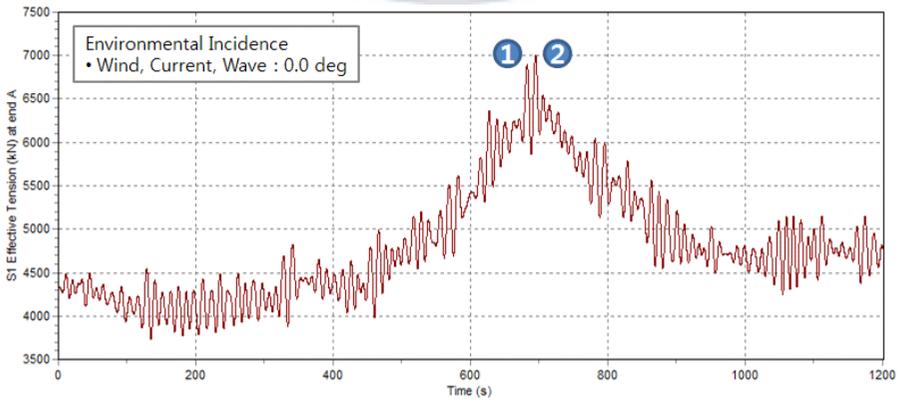


Fig. 7.18 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

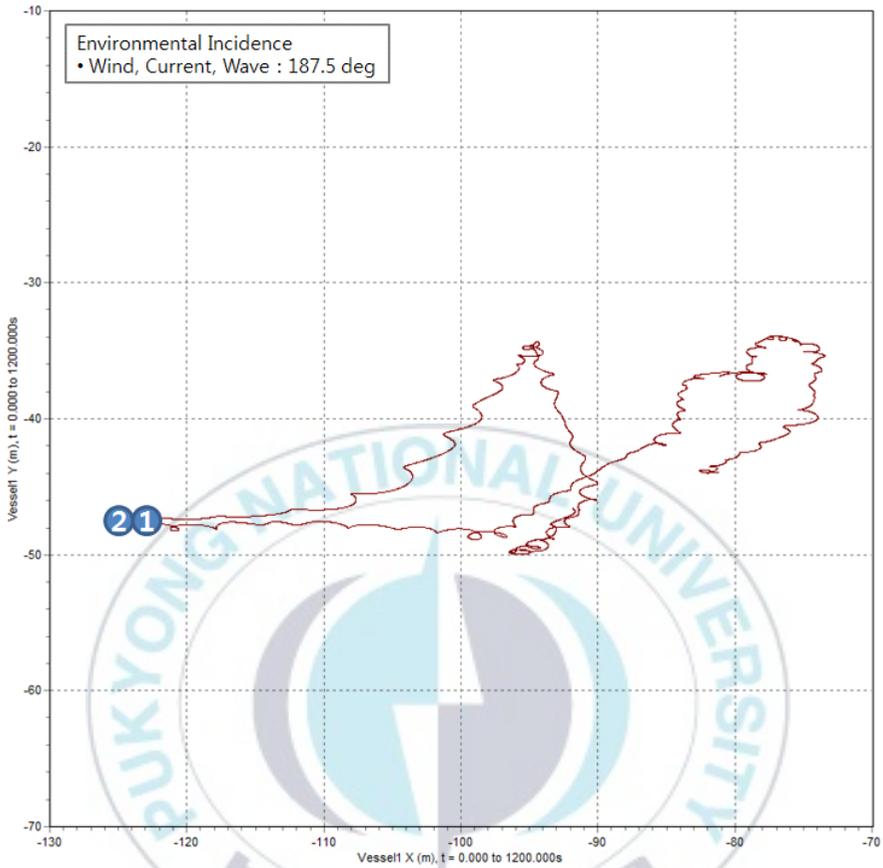


Fig. 7.19 The FPSO position in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

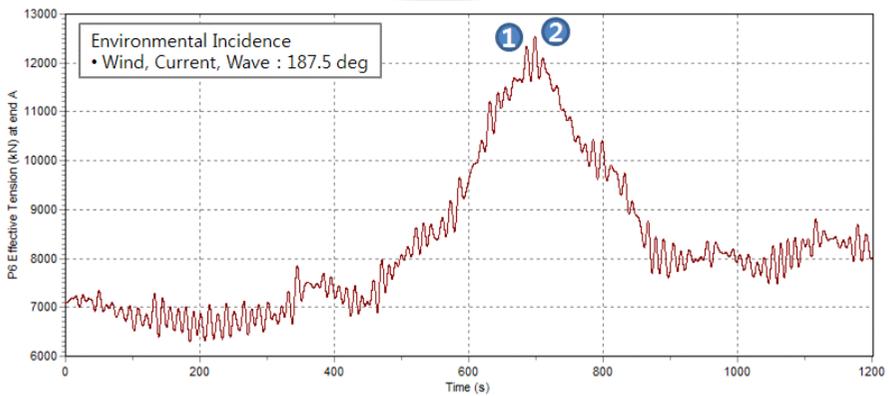


Fig. 7.20 Tension of P6 line in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

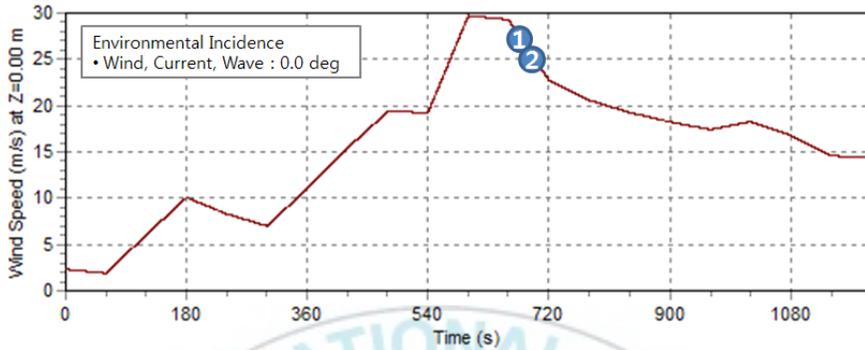


Fig. 7.21 Wind speed time series in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

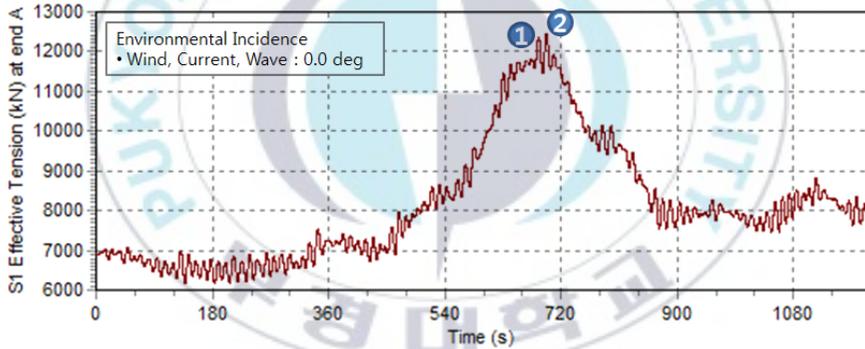


Fig. 7.22 Tension of S1 line in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

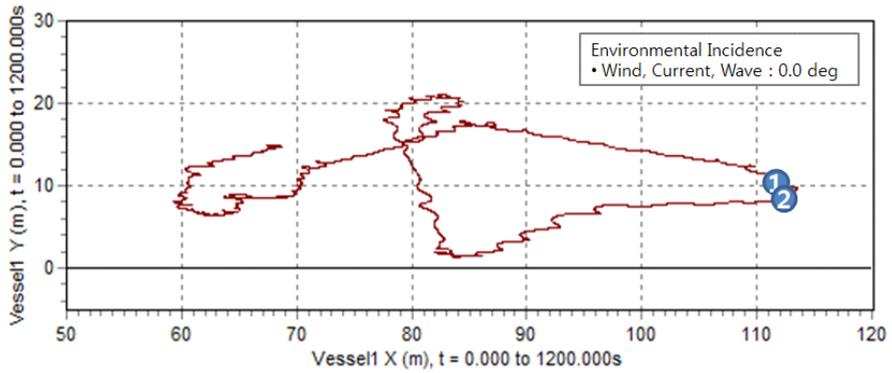


Fig. 7.23 The FPSO position in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

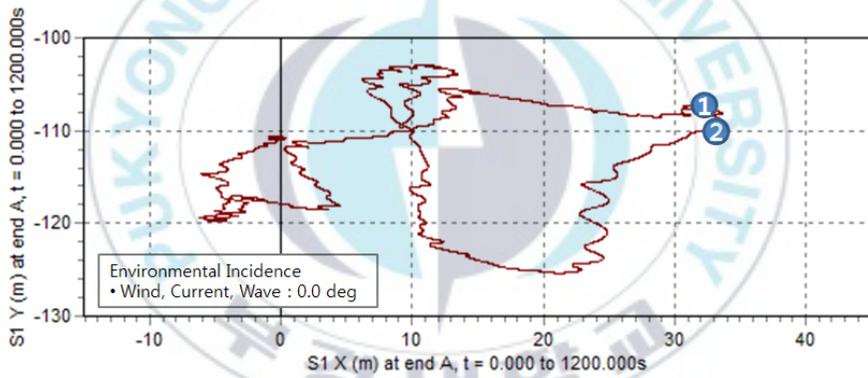


Fig. 7.24 The SF1 position in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 2nd proposed analysis method(Dynamic^{*II}).

7.3.3 대안 동적 해석 II의 해석시간 20분에 대한 타당성 검토

Fig. 7.25는 대안 동적 해석 II 해석시간으로 적용한 20분(1,200초)을 짧게는 5분에서부터 길게는 30분까지 다양하게 변화시켜 계산한 결과를 정리한 것이다. 해석 케이스는 가장 큰 장력이 검출되는 스킵4를 적용하고, 계류라인 연결 비대칭성이 상대적으로 큰 7개 라인을 연결한 경우를 검토하였다.

이 결과에 따르면, 1,317.7 ton이 검출된 600초간 해석이 가장 큰 값이며, 1,227.6 ton이 검출된 1,800초간의 해석이 가장 작은 값이다. 이는 위 값들의 평균 1,79.0 ton 대비 +3.0% 및 -3.7%에 해당하는 값인데, 이러한 범위는 앞서 살펴본 3시간 해석의 20회 반복 해석으로 살펴본 불규칙 파의 변동성 범위(+8% 및 -10%) 이내의 값이다. 최대풍속을 가지는 스킵 풍속 시계열을 이용한 이러한 동적 해석 결과는 사실상 스킵 최대풍속 발생지점 부근의 5분 이상의 좁은 시간 영역에 대한 해석만으로도 충분히 신뢰도가 높은 최대장력을 구할 수 있다는 것을 보여준다.

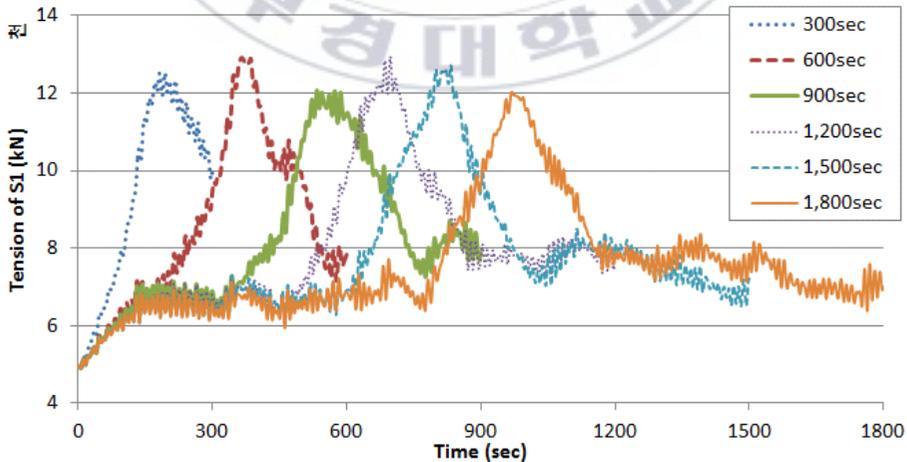


Fig. 7.25 The tension of 2nd proposed analysis method (Dynamic^{*II}) in various analysis time duration.

단시간의 해석으로 최대장력을 찾을 수 있다는 것은 최대장력이 검출되는 계류라인 S1의 페어리드 위치인 SF1의 좌표값을 통해서도 어느 정도 유추할 수 있다. Fig. 7.26은 이를 나타낸 그림이며, ○ 표시된 지점이 최대장력이 나타난 시점의 위치이다.

그림에서 보는 바와 같이, 바람 방향으로 가장 먼 위치에 도달했을 때 최대장력이 나타나고 있으며, 해석시간이 이 부근을 통과하도록 설정된 경우라면 유사한 최대장력이 나타날 것으로 판단할 수 있다. 살펴본 6개 해석 케이스 중 가장 짧은 5분(300초)간의 해석의 경우도, x방향으로 가장 크게 이동한 지점 및 최대장력이 나타나는 시점(○ 표시)을 넘어서는 일정 지점까지 거동 이력이 계속 이어지는 것을 확인할 수 있다. 다만, 짧은 해석 시간을 적용한 동적 해석이기 때문에, 스콜처럼 변동성이 큰 바람이 적용된 계류시스템의 최대 이격거리 위치는 충분한 시간 동안 안정적으로 만들어진 정적평형 상태인지에 대하여 불확실성이 존재한다.

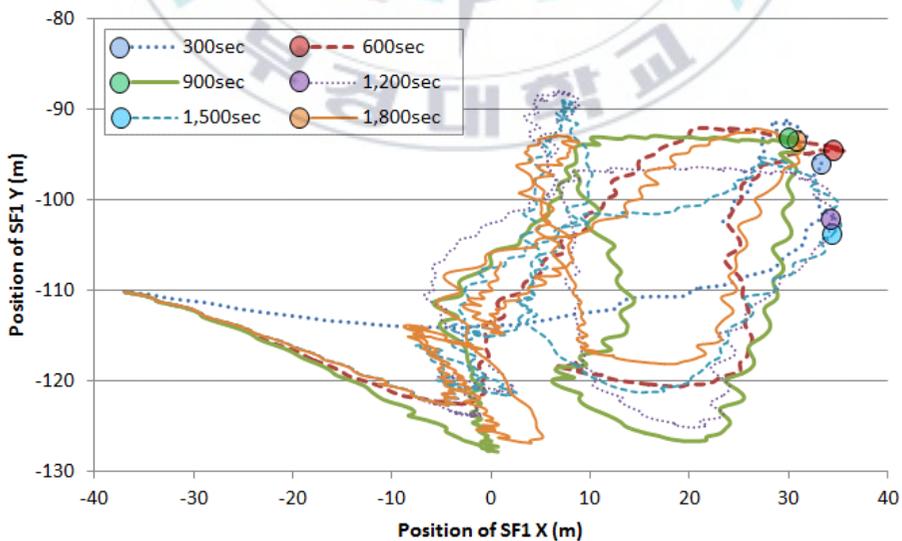


Fig. 7.26 The SF1 position of 2nd proposed analysis method (Dynamic^{*II}) in various analysis time duration.

7.4 대안 동적 해석 III (Dynamic^{*III})

특성 스콜 구간을 고려한 동적 해석의 세 번째 대안 해석 방법은 특성 스콜 구간으로 정의된 20분(1,200초) 동안의 스콜 시계열 자료를 그대로 활용한 동적 해석 방법이다. 이는 풍속 및 풍향이 동시에 변동하는 경우가 풍속만 변하는 두 번째 대안 해석과 어떤 차이를 보이는지 확인하기 위함이다. 조류 및 파랑 조건은 같다.

이 결과 역시 8개 라인 이상 연결되는 상태에서 기존 동적 해석 결과 대비 $\pm 1.6\%$ 이내의 작은 오차인 것을 확인할 수 있다. 다만, 7개 라인 연결 경우는 오차율이 3%를 약간 상회하고 있다.

Table 7.5 Maximum tension results between standard and proposed method III(Dynamic^{*III}) in dynamic analysis

Analysis No. and Type	Wind data		Maximum tension (ton)			
	Max. (m/sec)	Type	12 lines		8 lines	
			ULS	ALS	ULS	ALS
2 Dynamic	29.73	Time series	605	825	724	1,274
			595	818	734	1,323
			7.5°	7.5°	7.5°	7.5°
Difference of the maximum tension (%)			-1.7	-0.8	+1.4	+3.8
5	29.73	Time series	594	819	732	1,321
			10°	10°	10°	10°
Difference of the maximum tension (%)			-1.8	-0.7	+1.2	+3.7
Criteria			745	1,107	745	1,107

Note: The direction(°) means the incidence of environment.

Fig. 7.27 및 Fig. 7.28의 12개 및 11개 라인 연결시의 장력 변동 양상은 매우 유사하다. 특히 최대풍속 29.73 m/sec이 되는 600초를 지나 29.28 m/sec까지 1분간 풍속이 유지되는 구간을 지난 이후 22.78 m/sec로 풍속이 감소하는 구간에서 최대장력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 풍속 정점을 지나면서 해양구조물에 대한 계류라인의 구속력이 약해질 때 오히려 파에 의해 해양구조물의 운동이 커지는 것에 기인한 것으로 판단된다.

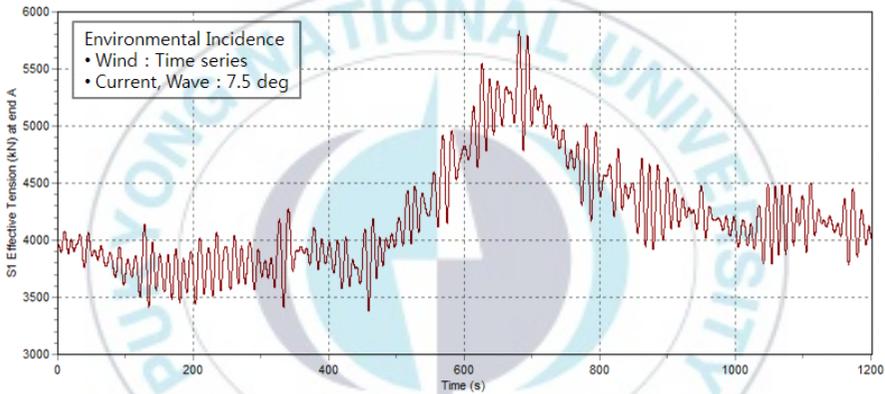


Fig. 7.27 Tension of S1 line in 12 lines mooring condition for 1,200sec by 3rd proposed analysis method (Dynamic^{*III}).

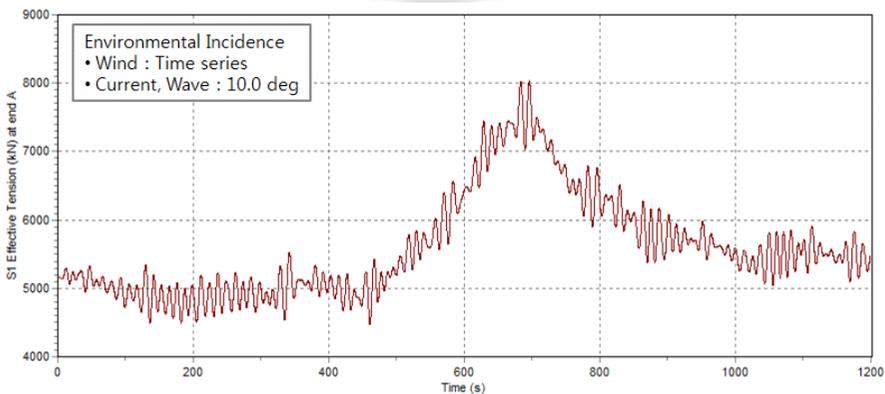


Fig. 7.28 Tension of S1 line in 11 lines mooring condition for 1,200sec by 3rd proposed analysis method (Dynamic^{*III}).

Fig. 7.29 및 Fig. 7.30은 8개 및 7개 라인의 장력 변동 양상을 보여주는 그림이다. 특히 7개 계류라인 연결 경우에는 전반적으로 장력의 요동 변화가 적은 것을 확인할 수 있는데, 이는 비대칭 계류라인 연결 상태에서 풍속 급변에 따른 해양구조물 거동이 계류라인의 비대칭적 운동 패턴을 보이는 것과 크게 상호작용하기 때문인 것으로 판단된다.

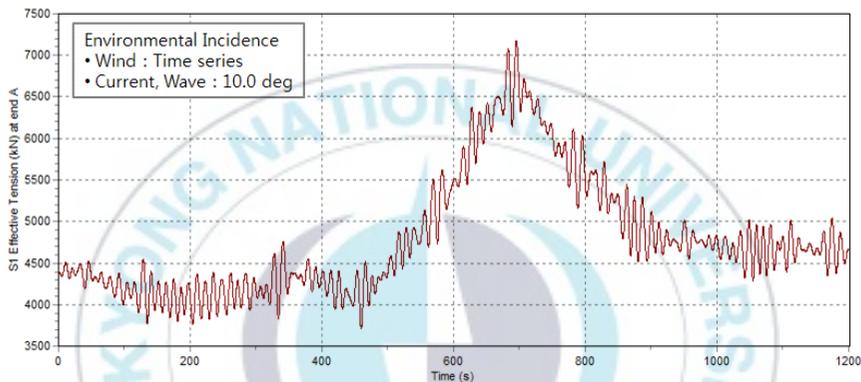


Fig. 7.29 Tension of S1 line in 8 lines mooring condition for 1,200sec by 3rd proposed analysis method(Dynamic^{*III}).

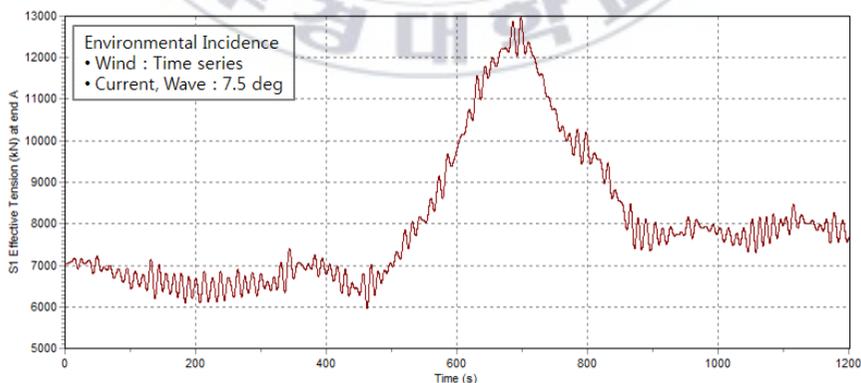


Fig. 7.30 Tension of S1 line in 7 lines mooring condition for 1,200sec by 3rd proposed analysis method(Dynamic^{*III}).

7.5 대안 준정적 해석 (Quasi-static*)

네 번째 대안은 앞서 사전 검토 과정으로 행해진 준정적 해석 방법을 사용한 것이다. 단, 사전 검토 과정의 동적 해석 결과 최대 장력이 검출된 스콜 4의 시계열자료 1분 평균 최대풍속 29.73 m/sec를 풍속 상수값으로 사용하였다. 이 수치는 기존에 보유하고 있는 스콜 관측 자료에서 설치 안정성 검토용으로 변환을 거친 일종의 설계풍속 개념이다. Fig. 7.31은 ULS 조건의 해석 결과이다.

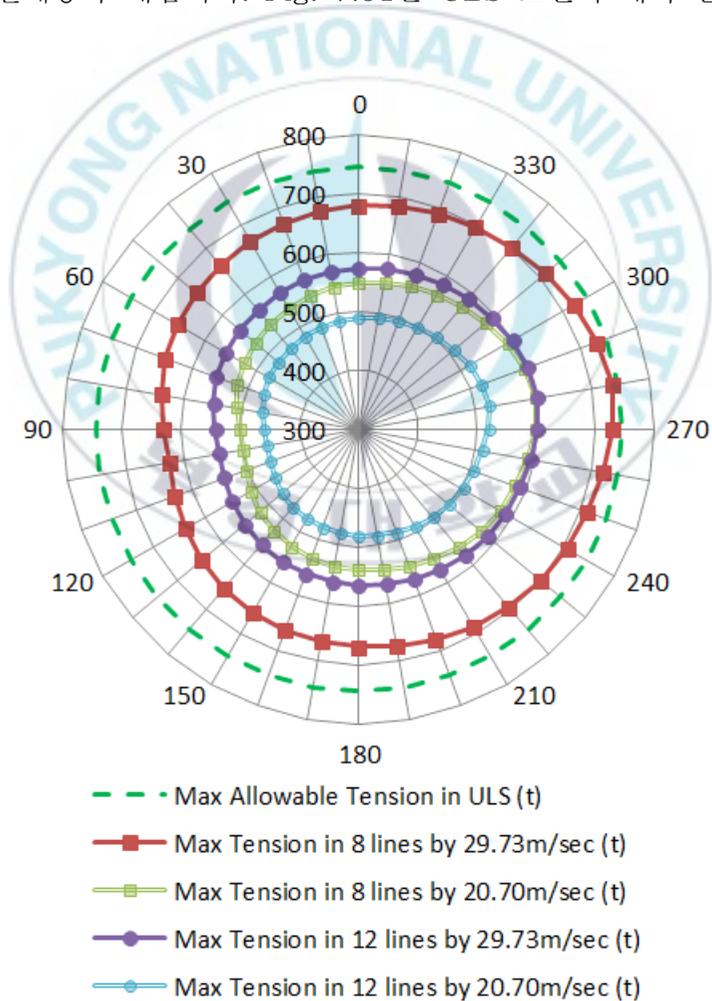


Fig. 7.31 Comparison of quasi-static analysis in ULS

풍속 증가에 따른 최대장력 증가는 예상한 바와 같은데, 풍속 29.73 m/sec의 12개 라인 연결상태의 준정적 해석 결과가 기존 해석 풍속 20.70 m/sec의 8개 라인 연결상태의 결과와 비슷한 수준으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 증가된 풍속의 8개 라인 연결상태 결과는 ULS 판정 기준값 745 ton에 근접하고 있다.

Fig. 7.32는 ALS 조건의 해석 결과이다. 기존 풍속에서는 ALS 조건에서도 만족하던 최대장력이 변경 풍속에서는 7개 라인 연결 시 대부분의 영역에서 크게 기준을 넘어서는 것을 확인할 수 있다.

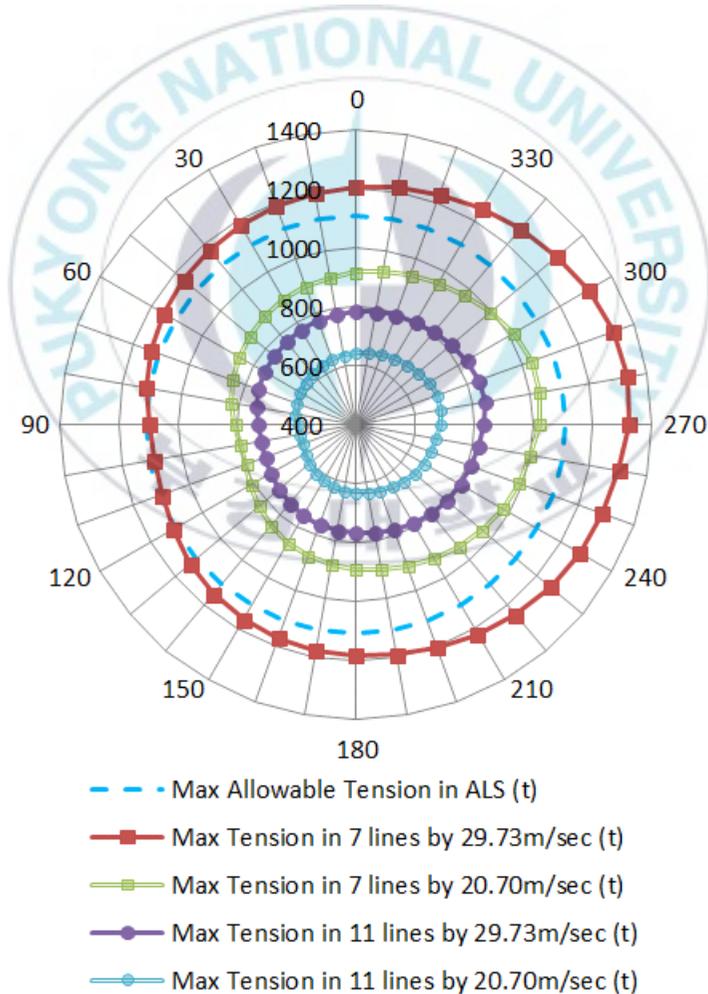


Fig. 7.32 Comparison of quasi-static analysis in ALS

7.6 특성 스쿨 구간을 고려한 대안 해석 결과 비교

Table 7.6은 스쿨 환경의 계류시스템에서 발생하는 최대장력을 최대풍속이 포함된 일정 시간 영역인 특성 스쿨 구간을 적용한 폭풍안전계류 해석 결과와 기존 해석 결과를 비교한 것이다. 해석 결과 얻어진 최대장력은 계류라인 연결 개수에 따라 나타내었으며, 스쿨 환경의 계류시스템 평가는 동적 해석으로 다루어지도록 권고되고 있는 점을 감안하여 나머지 해석 결과를 기존 동적 해석 결과(analysis no. 2)와 비교한 백분율(%) 차이도 함께 나타내었다.

기존 해석(No. 1~2)의 결과를 보면 동적 해석 대비 준정적 해석의 경우 약 14~27% 정도의 큰 차이로 작게 계산된다. 이는 동적 해석 대비 준정적 해석에서 사용되는 근사화가 여러 가지 비선형 현상을 재현하지 못해서 발생하는 것으로 잘 알려져 있으며, 특히 본 연구와 같은 스쿨 환경에서는 그 차이가 더 커질 수 있을 것으로 사료된다.

먼저 첫 번째 대안(Dynamic^{*1})으로 제안된 검토 환경조건의 1분 평균 최대풍속 29.73m/sec를 고정값으로 적용한 동적 해석(analysis no. 3)을 통해 얻어진 최대장력은, 12개 라인 연결 상태에서 약 1.8% 이내의 오차로, 11 및 8개 라인 연결 상태에서는 약 0.7% 이내로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 특히, 7개 라인 연결 상태에서는 최대장력의 차이가 0.1%로 기존 해석방법에 따른 결과와 거의 동일한 값을 얻었다. 모든 결과에서 평가 기준(criteria) 만족여부는 권고방안에 따른 동적 해석과 일치하였다.

고정 최대풍속을 적용한 대안 동적 해석 I의 해석시간으로 선정된 20분은 해석결과 얻어진 장력 시계열로부터 타당한 것으로 판단된다.

Table 7.6 Maximum tension summary of quasi-static and dynamic storm safe mooring analysis

Analysis No. and Type	Wind data		Maximum tension (ton)			
	Max. (m/sec)	Type	12 lines		8 lines	
			ULS	ALS	ULS	ALS
1 Quasi-static	20.70	Const.	520	691	598	1,030
			-14%	-16%	-17%	-27%
2 Dynamic	29.73	Time series	605	825	724	1,274
3 Dynamic ^{*I}		Const.	594	820	719	1,273
			-1.8%	-0.6%	-0.7%	-0.1%
4 Dynamic ^{*II}	29.73	Time series*	588	809	715	1,287
			-2.8%	-1.9%	-1.2%	+1.0%
5 Dynamic ^{*III}		Time series	595	819	732	1,323
			-1.7%	-0.7%	+1.1%	+3.8%
6 Quasi-static*		Const.	607	841	735	1,333
			+0.3%	+1.9%	+1.5%	+4.6%
Criteria			745	1,107	745	1,107

Note: % means the difference of the maximum tension to analysis 2 ratio.

두 번째 대안(Dynamic^{*II})으로 제안한 방법에 의한 동적 해석 (analysis no. 4) 결과 역시 12개 라인 이상 연결 상태에서 최대 장력의 오차는 2.8%로 나타났으며, 11개, 8개 및 7개 라인 연결 상태에서 $\pm 2\%$ 이내로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

최대풍속이 해석시간 내내 고정적으로 지속되는 첫 번째 대안 동적 해석에 비해 실제 시계열 자료를 활용하여 일시적 최대풍속에 도달하는 상황을 재현하는 두 번째 대안 동적 해석이 상대적으로 작은 최대장력을 만들어낼 가능성이 커보이지만, 본 연구에서 살펴본 몇몇 케이스에 따르면 결정론적인 관계는 없다고 판단된다. 왜냐하면, 일부 최대장력 발생 시점은 오히려 풍속이 적당히 감소되는 순간 또는 부유체가 최대 이격거리로부터 다시 돌아오는 일정 시점에서도 발생한 것이 수차례 확인되었기 때문이다. 이는 부유체의 복잡한 거동 양상과 이에 따른 계류라인 형상 및 운동이 복합적으로 작용하여 나타난 결과임을 보여준다고 할 수 있겠다.

최대풍속을 가지며 변동하는 풍속 시계열 자료를 이용한 대안 동적 해석 II의 해석시간으로 5분, 10분, 15분, 20분, 25분, 30분을 적용해 본 결과 20분 외 더 짧은 시간에서도 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

세 번째 대안(analysis no. 5)은 기존 동적 해석 방법을 그대로 따르면서 특성 풍속 구간의 시계열 자료만 뽑아내어 해석한 것으로 8개 라인 이상 연결된 경우 1.7% 오차까지 줄어든다. 특히 11 및 12개 라인에서는 첫 번째 대안 동적 해석과 거의 유사한 수준의 결과를 보이고 있다.

마찬가지로 조금 전에 언급한 바와 같이, 풍속의 변화 유무가 반드시 최대장력과 직결된다고 보기 어렵다는 의견과 같이 풍향의 변화 역시 최대장력에 결정적인 영향을 준다고 단정 짓기는 어려운 것으로 판단된다.

네 번째 대안(analysis no. 6)은 기존 준정적 해석을 적용하되, 변환된 시계열 자료의 1분 평균 최대풍속을 이용한 것인데, 12개 라인 연결 상태에서는 가장 오차가 적은 것으로 확인되었으나, 7개 라인에서는 동적 해석 결과보다 오히려 크게 나타났다.

본 연구에서 대안으로 제안한 여러 동적 해석 방법은 기존 해석 방법 대비 대략 1/10 수준으로 계산 시간이 단축된다. 동적 해석의 경우는 동일한 조건의 계류시스템일 때 10분 또는 20분 등으로 적용한 검토 시간 길이에 거의 비례하여 계산 시간이 소요되기 때문이다. 극단적으로 줄어든 해석시간 대비 대안으로 제시된 방법에 따른 해석결과는 매우 만족스럽다고 판단된다.

현재까지의 연구과정으로 판단할 때, 네 가지의 대안 중 반드시 어느 것 하나가 나머지 세 가지 대안 보다 우수하다는 결론을 내리기는 어려우며, 향후 다양한 검증이 뒤따라야 할 필요가 있다고 사료된다.

설치 안정성 검토에서는 제시된 모든 대안들이 짧은 검토 시간에 매우 근접한 장시간 동적 해석 결과와 매우 근사한 값을 보이고 있으므로, 엔지니어의 판단에 따라 해석 케이스 절감을 위한 사전 검토(screening) 목적으로 계산하거나 안전율을 감안하여 선택된 단일 내지 복수의 대안 결과를 참조하여 고속 검토 용도로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

8. 요약 및 결론

본 연구는 계류시스템 설치 과정에서 계류라인 연결 작업 선박의 사양 결정 및 작업 위험도 평가의 일환으로 검토되고 있는 폭풍안전계류 해석을 목적으로 하였다. 연구 내용으로는 스콜 해역을 고려한 여러 가지 폭풍안전계류 해석을 수행하고, 결과를 비교한 뒤 새로운 대안과 그에 따른 결과를 다시 비교하여 타당성을 논하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

설치기간을 고려한 검토 환경 수준(재현주기)의 설계 풍속에 따른 준정적 해석 결과와 산업계 권고에 따른 스콜 환경의 동적 해석 결과를 비교해 보았다.

두 해석 결과에 대한 비교해 보면, 최대장력의 경우 준정적 해석 대비 동적 해석이 작게는 11%, 많게는 58%까지의 큰 격차로 증가하는 것을 확인하였다. 이 점은 산업계 가이드라인인 동적 해석의 필요성이 재차 확인되는 부분이다. 두 번째 폭풍안전계류 평가 요소인 최대이격거리의 경우에는 준정적 해석 대비 동적 해석이 11~29% 증가한 것을 확인하였다.

폭풍안전계류의 안정성 판단의 세 가지 요소 중 최대장력을 대표적인 심층 분석 인자로 선정하여, 해당 인자를 중심으로 두 해석 결과의 상세한 분석을 통해 계산 수행 시간을 크게 줄인 대안 폭풍안전계류 해석 방법 세 가지를 제안하였다. 이때 대안을 마련하게 된 중요한 요소는 스콜 환경하의 최대장력이 스콜 최대풍속 발생 시점과 매우 인접한 영역에서 발생하였음을 고려한다는 것이다. 대안 해석 방법은 앞서 수행한 해석 결과를 사전검토 작업의 일

환으로 활용하여, 최대장력 등이 검출된 극단적 스콜 시계열자료를 선정하였다. 본 연구에서 채택한 스콜 자료 중 스콜 4 시계열 자료가 폭풍안전계류 평가를 위한 가장 극단적·결정적 수치를 만들어 내는 것으로 확인되었다. 해당 스콜 풍속 시계열 자료의 1분 평균 풍속 최대값은 29.73 m/sec이며, 이는 기존 기준 풍속 20.70 m/sec의 거의 1.5배에 해당되는 값이다.

이 새로운 특성 풍속값 29.73 m/sec 또는 10년 재현주기 스콜 최대풍속의 1.5배라는 수치는 더 많은 후속 사례 검증 등의 연구를 통해 타당성이 재확인되거나 수정될 수 있는 값이다. 특히 동적 해석 대안을 따르다면 방향성을 고려하여 본 연구의 스콜4와 같이 단일한 대표 스콜이 아닌 복수 개의 해석용 스콜 시계열자료가 해석에 활용되도록 선정 및 권고될 수 있을 것이다.

○ 폭풍안전계류 대안 동적 해석 I의 제안 및 결과

첫 번째 대안 해석 방법은 특성 풍속값을 상수값으로 적용한 동적 해석 방법이며, 계산 시간은 5분 및 20분 두 가지 경우에 대해 살펴보았다. 그 결과 모든 해석케이스에서 20분 시간영역으로 계산할 경우 기존 3시간의 동적 해석 결과의 0.6~1.8% 오차 범위로 접근한 것을 확인하였다. 이러한 오차 범위는 계류라인 연결 개수별 안전 판정기준 만족 여부가 기존 3시간 동적 해석 결과와 필연적으로 일치하게 되는 원인이 될 수 있으며, 결과적으로 일치하는 것을 확인하였다. 이는 극단적으로 줄어든 계산 수행 시간을 고려할 때 상당히 만족스러운 대안으로 판단된다. 또 해석시간 20분은 타당한 시간 설정으로 판단된다.

○ 폭풍안전계류 대안 동적 해석 II 제안 및 결과

두 번째 대안 해석 방법은 기존 스콜 시계열 자료의 풍속 시계열

값을 그대로 가져오되 최대장력이 발생할 것으로 보이는 시간 구간을 적절히 선정하여 해당 시간 구간에 대해서만 동적 해석을 수행하는 방법이다. 단, 풍향은 고정시킨 경우이다. 본 연구에서는 이 시간 구간을 20분(1,200초)으로 선정하였으며 이는 기존 3시간(10,800초)의 1/9에 해당하는 것이다. 이 방법을 적용한 해석 결과도 크게 만족스러운 것으로 판단되며, 전체 해석 케이스에서 첫 번째 대안 동적 해석보다 약간 높은 1.0~2.8% 오차를 보이는 것을 확인하였다. 해석시간은 5분부터 30분까지 5분 간격으로 적용해 본 결과, 모든 경우에서 유사한 결과를 얻어지는 것을 확인하였으며, 20분보다 더 짧은 해석 시간도 대안 해석 방법으로 적용할 수 있음을 확인하였다. 단, 설정된 시간 내에서 최대풍속 발생 시점의 해양구조물 최대이격 거리는 충분히 안정적인 정적 평형상태를 포함하고 있어야 할 것이다.

○ 폭풍안전계류 대안 동적 해석 III 제안 및 결과

세 번째 대안 해석 방법은 두 번째 대안 해석 방법과 같이 기존 스콜 시계열 자료를 사용하되, 20분 구간에 해당하는 풍속과 풍향 값을 모두 적용하여 해석을 수행하는 것이다. 이 결과도 전체 해석 케이스에서 0.7~3.8% 이내의 오차를 확인할 수 있다. 대안 동적 해석 II의 경우처럼 좀 더 짧은 해석시간을 적용할 수도 있음을 장력 시계열 자료를 통해 유추할 수 있다.

○ 폭풍안전계류 대안 준정적 해석의 제안 및 결과

네 번째 대안 해석 방법은 스콜 환경에 대한 계류시스템 해석은 동적 해석을 통해서 수행되어야 한다는 통념에서 벗어나, 극한의 스콜 특성 풍속을 준정적 해석에 이용한다는 것이다. 이때 스콜 특성 풍속은 사전검토과정을 통해 확보된 10년 재현주기 스콜 시계

열 자료의 1분 평균 최대풍속이며, 그것은 10분 평균 최대풍속의 약 1.5배였다. 이 풍속을 이용한 준정적 해석 결과는 모든 해석 케이스에 대해 기존 권고안에 따른 3시간의 동적 해석 결과와 매우 높은 일치도를 보이고 있음을 확인하였다. 특히 폭풍안전계류 연결상태에 가까워지는 11개 및 8라인 연결 상태에서 각각 1.9% 및 1.5%의 오차를 확인할 수 있으며, 특히 12개 라인 연결 경우에는 오차가 0.3%까지 줄어드는 것을 확인하였으며, 이는 기존 3시간 동적 해석 결과에 가장 가까운 값이다. 단, 7개 라인 연결 상태에서는 다른 동적 해석 대안들보다 큰 4.6%의 오차를 보이는 것을 확인하였다. 따라서, 스콜과 같은 변동성이 크고 비선형 현상이 중요한 모델의 경우 동적 해석을 수행하여 결과를 살펴보아야 하지만, 적절한 풍속을 선정할 경우 매우 짧은 시간의 준정적 해석만으로 3시간 동적 해석 결과와 매우 일치도가 높은 결과를 얻을 수 있었다.

○ 제안된 대안들의 한계와 유의점

본 연구의 한계는 첫째, 보다 풍부한 스콜 시계열 자료를 이용한 완벽한 검증을 필요로 한다는 점이다. 현 산업계에서 스콜 시계열 자료는 여전히 빈약한 수준의 공개에 그치고 있으며, 자료에 대한 접근이 매우 제한적이다. 이러한 점에서 본 연구 결과 및 내용에 대한 다른 연구자들의 검증을 통해 유효성이 입증되기를 기다려야 하는 것이 현 상황이다.

물론 기준풍속으로 사용된 특정 지역의 10년 재현주기 10분 평균풍속이 달라진다면, 특성 스콜 구간으로 정의된 변환 시계열 자료 특성이 달라지게 되고, 이를 이용한 최대장력 등의 특성도 어느 정도 달라질 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 스콜 특성 풍속의 스케일링 과정을 통한 1분 평균 최대풍속의 산정 과정을 동일하게

이용한 본 연구의 대안 방법론은 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

둘째, 아직 다양한 계류시스템에 대한 폭넓은 검토가 이루어지지 않았다는 점이다. 부유체의 형상, 크기, 중량 및 계류 라인의 구성, 재질, 길이 등 전체 계류시스템에 대한 다양한 변화가 본 연구 결과와 완벽히 일치한다는 보장은 없다. 그럼에도 불구하고, 스콜 환경의 대표 지역인 서아프리카 해역, 당 해역의 대표적 해양구조물인 FPSO, 또 크게 특징이 달라지지 않는 다점 계류시스템을 적용했다는 점에서 후속 검증 연구 과정에서도 결과의 큰 차이는 없을 것으로 사료된다.

셋째, 불규칙파의 해석용 시계열 케이스(Seed)를 충분히 늘려 최대값 또는 극한 기댓값에 대한 수렴도를 높이는 부분은 안전 여부를 판정하는 주요 케이스인 7개 계류라인 연결 경우에 한해 집중하였으며, 안전 판정 기준값과 큰 격차를 보이고 있는 다른 해석 케이스의 경우는 불규칙파 파열(wave train)을 변경하여 적용한 해석은 생략하였다. 이러한 부분은 본 연구에서 중점으로 다루는 내용을 감안할 때 도출된 결과에 근본적인 영향을 미칠 정도의 변동양은 없을 것으로 판단되었기 때문이다.

계류시스템 설계에 대한 기법은 해양구조물 개발의 역사 속에서 오랫동안 상호보완되고, 진화된 결과 상당히 체계적인 정립을 이루었다고 언급되고 있다. 이는 발달된 수치계산 해석 프로그램 개발의 도움도 큰 역할을 한 것으로 보인다.

그러나 극단적으로 역동적인 스콜 환경을 고려한 해양구조물의 설계는 서아프리카 심해 유전이 개발되고 있는 최근에서야 대두되

기 시작했고, 현재 여러 가지 기법들이 정립되고 있는 실정이다.

본 연구는 이러한 스콜 환경하의 해양구조물 계류시스템을 대상으로 특히 설치 관점에서 계류라인 연결 상황에서 발생 가능한 작업 위험도를 평가하는 네 가지 대안 해석 방법론을 제안하였다.

본 연구를 통해 시간소모적 성격이 강한 스콜 환경의 설치 엔지니어링 활동이 보다 짧은 시간에 목적하는 바에 대한 정밀한 계산을 돕는 고속 정밀 설치 엔지니어링에 관한 표준 방안을 정립하는데 작은 기초가 될 것으로 기대한다.

또 대안 적용 결과, 상대적으로 비대칭성이 큰 7개 라인 연결 상태에서 4.6% 이내의 오차를 보이고 있으나, 폭풍안전계류 상태에 가까워지는 단계이자 계류시스템의 안정성이 높아지는 일정 단계, 즉 본 연구의 경우 8개 라인 이상 연결 상태가 되면, 기존 동적 해석 결과 대비 대안으로 제안한 여러 가지 고속 검토 방법이 3% 이내의 매우 높은 일치도를 보여주는 점은 주목할 만하며, 특히 11개 라인의 경우 2% 미만의 오차율, 8개 라인의 경우 1.5%의 오차율을 보이는 점을 감안한다면, 계류시스템의 설계 영역에서도 참조할 만한 연구가 될 것으로 기대한다.

참고문헌

API(2005) : Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, API RP2SK, October 2005.

Arun Duggal, Amir Izadparast and Yu Ding(2014) : On the challenges of analysis and design of turret-moored FPSOs in squalls, Proceedings of the 19th Offshore Symposium, pp. 1~16.

Arun Duggal, Caspar Heyl, Amir H. Izadparast and Joerik Minnebo(2011) : Response of FPSO systems to squalls, Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2011, June 19~24, 2011, Rotterdam, The Netherlands, OMAE2011-49855, pp. 1~8.

Bentley Systems(2018) : How MOSES deals with technical issues.

BV(2012) : Classification of mooring system for permanent offshore units, BV-NR 493 DT R02 E.

DNV(2010) : Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

DNV(2010) : Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures, DNV-RP-F205.

DNV(2012) : Transit and Positioning of Offshore Units,

DNV-OS-H203.

DNVGL(2017) : Design of Offshore Steel Structure, General
- LRFD Method, DNVGL-OS-C101.

DNVGL(2011) : Marine Operations, General, DNV-OS-H101.

DNVGL(2011) : Marine Operations, Design, and Fabrication,
DNV-OS-H102.

DNVGL(2016) : Marine Operations and Marine Warranty,
DNVGL-ST-N001.

DNVGL(2015) : Position Mooring, DNVGL-OS-E301.

E. Fontaine(2013) : A stochastic model for the design of
mooring system against squall events, In: Proc. of 23rd
International Offshore and Polar Engineering, ISOPE,
Anchorage, Alaska, USA.

Franck Legerstee, Michel Francois, Cedric Morandini,
Stephane Le-Guenec(2006) : Squall: Nightmare for
Designers of Deepwater West African Mooring
Systems, Proceeding of AE2006, 25th International
Conference on Offshore Mechanics and Arctic
Engineering, June 4-9, 2006, Hamburg, Germany,
OMAE2006-92328, pp. 1~6.

Fugro GEOS(2004) : West Africa Gust Joint Industry
Project. Phase inal report, C56110/3219/R1,
[Confidential].

- G. Jeans, S. Redford, I. Bellamy, R. Mundy(2008) : The WAG squall measurement system, In: Proc. of 27th international conference on offshore mechanics and arctic engineering, OMAE2008-57337, Portugal.
- GLND(2010) : Guidelines for Moorings, GLND-0032.
- ISO(2005) : Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures, Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units, ISO 19901-7, December 2005.
- J. E. W. Wichers(1988) : simulation model for a single point moored tanker, PhD Thesis.
- I. Harris(2005) : Generalized Pareto methods for wind extremes. Useful tool or mathematical mirage?, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics.
- J. Alvares, P. Orsero, V. Quiniou-Ramus, M. Francois, A. G. Moysan, D. l' Hostis, A. Ledous(2011) : Squall response based design of floating units in West Africa, In: Proc. of 30th international conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2011-49237, Rotterdam, The Netherlands.
- J. Pickands III(1975) : Statistical inference using extreme order statistics, The Annals of Statistics, Vol. 3(1), pp. 119-31.

- Joerik Minnebo, Amir H. Izadparast, Arun Duggal and Rene H.M. Huijsmans(2012) : Response-based analysis of FPSO systems for squall loadings, Proceedings of the ASME 2012 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2012, July 1~6, 2012, Rio de Janerio, Brazil, OMAE2012-83633, pp. 1~8.
- M. James, G. Smith, J. Wolford & P. Whaley(1989) : Vibrations of mechanical and structural systems, Harper & Row publishers, inc. Singapore.
- M. R. Leadbetter, G. Lindgren, H. Rootzen : Extremes and related properties of random sequences and process, Springer Series in Statistics, Springer-Verlag.
- Orcina Ltd.(2018) : OrcaFlex Help 10.2b, www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation.
- Ultramarine Inc.(2014) : Reference manual for MOSES, Dec. 5, 2014, ver.07.10.01.
- Z. Zhong, Y. Luo, D. Curic(2005) : F(P)SO global responses in the west of Africa squall environment, In: Proc. of 24th international conference on offshore mechanics and arctic engineering, OMAE2005-67006, Greece.
- 박준범 · 김국현 · 김경수 · 고대은(2013) : 부유식 해양플랜트 다점 계류라인의 피로손상모델 비교, 한국해양공학회지, 제27권 제5호, pp. 63-69.

- 윤상준 · 조진욱 · 이진호(2014) : 반잠수식 해양구조물 설치를 위한 Storm Safe Mooring 해석, 한국해양공학회 2014년도 추계학술대회 초록집, pp. 334~337.
- 이진호 · 박준흠 · 장학수(2013) : 반잠수식 해양 구조물의 Tug Positioning Keeping을 위한 제반 파라미터 검토, 한국해양공학회 2013년 추계학술대회 초록집.
- 이호영 · 임춘규 · 신현경(2001) : 다점 계류된 원유 저장선에 대한 표류 운동 해석, 한국해양공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 222-227.
- 임유창 · 김경수 · 정준모 · 김재우 · 김진태 · 여승훈(2009) : FPSO 다점 계류 시스템의 최적 설계 연구, 한국해양공학회지, 제 23권 제6호, pp. 61-66.

감사의 글

마무리라는 걸 할 때마다 느껴지는 뿌듯한 느낌. 여러 다른 일상에서 매년 느끼면 서도 학위 논문만큼은 이런 저런 핑계로 미루고 있었는데, 오랜 시간이 걸린 만큼 수많은 인연들이 떠올라 그 뿌듯함과 묘하게 어우러져 감동이 크게 다가옵니다.

누구보다도 김헌태 교수님, 많이 모자란 제자임에도 오래 기다려주시고 언제나 따뜻하게 대해주셔서 감사합니다. 교수님께 조금 더 가까이 가고 싶은 맘이 항상 있지만, 여전히 어렵기만 하네요.

류청로 교수님, 학창시절 쉽지 않은 작업이라고 느끼던 논문 쓰기 작업을 편안한 마음으로 임할 수 있게 해주셨습니다.

류연선 교수님, 수업 들으면서 학문이란 세계가 이렇게 매력적일 수 있구나하고 느끼게 해주셨습니다. 제 시험답안에 써주신 칭찬은 영원히 잊지 못할 것 같습니다.

윤길수 교수님, 좋아하는 일에 완벽하게 몰입하시는 순수한 그 모습이 너무 좋았습니다. 건강하세요

이인철 교수님, 번뜩이는 멘트와 재치 있는 유머로 항상 밝게 대해주셔서 너무 좋습니다. 논문 심사 감사드리고요, 앞으로 지도교수님 더 잘 챙기겠습니다.

윤환삼 교수님, 학교 다닐 때부터 저를 사촌 동생처럼 아껴주시고 챙겨주셔서 감사드립니다. 요즘 만날 때마다 더 큰 일 하라고 하시는데 자랑스러운 조카가 되도록 노력하겠습니다.

김도삼 교수님, 바쁜신 중에도 논문 심사를 맡아주시고 좋은 연구라고 몇 번이나 칭찬해 주셔서 감사드립니다.

류용욱 교수님, 텍사스에서 지내셔서인지 영문 초록 새로 써보자고 말씀하신 계기로 좀 더 나은 초록을 쓰게 된 것 같아 감사드립니다.

특히 이번 논문의 출발점이라고 볼 수 있는 약칭 심해계류 국책과제를 통해 가까워진 많은 분들이 계십니다.

먼저 최재웅 센터장님, 항상 차별화와 고도화를 강조하신 덕분에 스쳐지나갈 국책과제인데도 한발 더 내디딘 결과가 이 논문으로 이어진 것 같습니다. 감사드립니다.

김봉재 파트장님, 2년 전 과제 시작할 때 밀린 학위 논문 쓰겠다는 제게 흔쾌히 한번 해보라고하신 말씀이 여기까지 온 계기가 되었습니다. 감사합니다.

성홍근 박사님, 학회에서나 연구소 가서 뵈 때마다 친근감 있게 해주시고 온라인으로 관심어린 말씀 많이 주셔서 감사합니다. 논문은 답에 꼭 쓸게요.

김병완 박사님, 비슷한 듯 조금 다른 영역에서 여러 가지로 조언 많이 해주셔서 감사드립니다. 앞으로 많은 일을 같이 할 수 있을 것 같은 느낌이 들어요.

김유일 교수님, 부끄럽게도 저를 국책과제의 중차대한 역할을 맡은 실무책임자라고 추켜세워주셔서 감사합니다. 특히 예쁜 딸 이름 지어주셔서 감사합니다. 약속대로 진짜 평생 예원이 잘 챙겨주세요. 용돈도요.

최병렬 대표님, 처음 만난 인연은 참 오래되었는데, 국책과제를 통해 또다시 뵈게 되었네요. 이런저런 회사 고민을 저한테 너무 많이 말씀해 주시는데, 제가 도와드릴 부분이 있다면 도와드리겠습니다.

이상길 상무, 이제 친구하자하고는 자주 연락 못해서 미안하기만 한데도, 만날 때마다

다 편안한 웃음으로 대해줘서 고맙네.

고혁준 차장님, 과제에서 가장 가까운 실무진이자 집도 서로 가까워서 저녁에 이따금 병개 연락 드렸는데, 항상 어김없이 응해주셔서 너무 감사드립니다.

본 논문의 일부는 한국산업기술평가관리원(KEIT) 산업기술혁신사업 과제 “심해용 부유식 해양플랜트의 다점 계류시스템 설계, 설치 핵심 기술 및 설계 패키지 개발” 수행 결과임을 밝힙니다. 산기평 김종현 PD님, 조재현 전임님, 정지홍 책임님, 박용수 책임님, 김진걸 전임님께도 감사드립니다. 특히 거제조선소에서 함께 근무하시다가 산기평으로 가셔서 다시 뵙게 된 서용석 PD님께도 감사드립니다. 거제에서 못 샀던 집들이 치킨은 담에 꼭 사겠습니다.

함께 이 과제를 하고 치맥도 자주 했었는데, 지금 새로운 곳으로 자리를 옮긴 자블 박한솔 선임과 착한 이원규 선임, 계속 만나고 연락해요. 우리의 치맥은 계속됩니다.

이 논문은 2001년 석사학위를 받고 시작한 회사 생활이 만 17년이 지난 시점에 와서야 나오게 된 것입니다. 그 동안 만난 많은 분들의 따뜻한 관심과 격려 덕분에, 이래저래 핑계를 대가며 잊혀지고 있던 논문이 이제야 결실을 맺은 것 같습니다.

첫 직장이었던 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 함께 일했던 김현주 박사님, 학교 졸업 후 첫 사회 생활을 하는 부족한 저에게 항상 힘과 용기를 불어넣어주셨습니다. 대전과 동해를 오가는 출장 중 제가 운전할 때 나왔으리라 여겨지는 수많은 고속 딱지를 단 한번도 제게 보여주지 않으셨는데, 어떻게 보답해야할까요.

홍기용 박사님, 연구소 같은 방에서 지낼 때 빵과자 주시면서 여러 조언과 관심어린 말씀 주셨는데, 회사 옮기고 또다른 국책과제로 만났었지요. 요즘도 빵과자 많이 드시는지 궁금합니다.

양찬규 박사님, 아니 형님, 언제나 친동생처럼 챙겨주시고 밤 늦게 실험 끝나면 꼭 투다리 데리고 가셔서 한 잔 사주셨던 추억이 잊혀지질 않네요. 요즘도 안주 나오기도 전에 소주 한 병은 기본으로 드시는지 궁금합니다.

홍사영 박사님, 연구소에서든 그렇지만, 떠나서도 여러 장소에서 우연히도 많이 뵙게 되었고, 그때마다 따뜻하게 대해 주셔서 너무 감사드립니다.

홍섭 박사님, 복도에서 흥겨운 성악 노래 부르고 다니시고, 유쾌한 농담과 배트민턴이나 탁구 함께 했던 추억 너무 좋아요.

정태환 박사님, 인생에 늘 고민이 많아서 우울하다며 저한테 하소연하시는 그게 어쩔 너무 우습기도 했던 정이 많으신 형님, 무주 지날 때 꼭 연락 드릴게요.

김진하 박사님, 모형실험 수조동에서나, 잔디 축구장에서나 자상하게 잘 챙겨주셔서 너무 감사드립니다. 게스트로 참여했던 대전 SADOL 모임 추억이 생각나네요.

최종수 박사님, 더 가깝게 지내고 싶었는데 부서나 과제가 달라서 아쉬웠었는데, 항상 환하게 웃으며 챙겨주셔서 감사드립니다.

두 번째 직장이었던 케이티서브마린에서 보낸 서른부터 마흔까지 딱 10년 동안의 청년 직장인 시절은 정말 좋은 경험이었습니다.

정원대 본부장님, 그냥 배가 좋아서 회사 생활 시작하셨다는 전설 같은 이야기들은 들을 때마다 재미있네요. 저도 그렇게 새로운 경험과 모험을 많이 해보고 싶습니다.

이근창 그룹장님, 사무실과 현장에서, 때로는 소주 한잔 나누는 자리에서 언제나 살

가운 형님으로 다정하게 대해주셔서 감사합니다. 매번 느끼지만 술이 너무 세신 거 같아 존경스럽습니다.

곽환환 부장님, 기업의 연구개발 활동을 누구보다도 강조하시면서 체계 힘이 되어 주셨습니다. 가끔씩 안부 물으시며 논문 쓰는지 확인하셨는데 이제야 제가 드릴 수 있게 되었네요.

이영 부장님, 좋았던 일과 힘들었던 일 여러 고민을 함께 많이 나눈 기억이 생생한데요, 그때 평생 할 고민을 다한 때문인지 요즘 너무 마음이 평온해 보이십니다.

지홍준 팀장님, 제가 막 입사했을 때, 신사업 기획 업무 어려워하는 저와 함께 고생 너무 많으셨어요. 건강 잘 챙기세요.

최인규 팀장님, 중국이라는 신세계를 보여주셨지요. 항상 반갑게 운사마라고 부르시며 맞아주셔서 감사합니다.

이종수 사장님, 만날 때마다 논문 쓰고 있냐고 챙겨주시고 신경 써주셔서 다시 한번 감사드립니다. 이제 좀 편안한 마음으로 뵈 수 있겠네요.

오영식 부장님, 특전사의 강력한 영혼과 털털함을 저도 갖고 싶어요. 항상 애정 어린 마음으로 잘 챙겨주셔서 감사합니다.

최인훈 차장님, 때론 무덤덤하면서도 때론 다정다감하게, 섬세하면서 우직한 ROV 같은 형님, 거친 해양 작업 속에서도 넘치는 서정미를 느낄 수 있어서 너무 좋아요.

홍종덕 차장님, 웬지 거친 바다랑 안 어울리도록 마음 착하신 형님. 또 한잔 해요.

김동원 차장님, 세계로호, 바다로호의 좁은 브릿지에서 함께 밤 새면서 많은 이야기 나누던 기억이 아련하네요. 많이 가르쳐주시고 끌어주셔서 감사합니다.

손재근 차장, 쿠웨이트 해양 설치선에서 함께 고생했던 시간이 어느덧 웃으며 이야기 나눌 수 있는 좋은 추억이 되었네. 담에 소주 한잔 하자.

김동욱 차장, 논문 쓰는 거 도와준다고 하고는 시간 많이 못 내줘서 미안하네. 갑자기 멀리 떠나는 내게 항상 먼저 안부 전화 줘서 고맙다.

김효상 부장, 한때 같이 많이 달렸는데, 쿨럭 몸은 건강한지.

김종식 팀장님, 먹지대고 결의서 쓰던 시절에 이런저런 이유로 제가 은근 많이 잔소리 들었는데, 혹시라도 담에 만나면 좀 살살 해주세요. 그땐 잘 몰라서 그랬어요.

또 바다에서 함께 프로젝트를 수행했던 권영호 선장님, 주재욱 선장님, 이영환 기관장님과 DP 선박에 대해 많이 알려주신 이종광 대표님, 최용하 상무님 감사합니다.

세 번째 직장인 이 곳 삼성중공업은 눈 깜짝할 사이 6년이 지나가고 있는데, 정말 많은 분들을 만난 것 같습니다.

오랫동안 인연을 이어오며 언제나 애정을 담아 따뜻하게 대해주시는 이진호 부장님, 자상함의 표본이라고 말씀드리고 싶은 박종진 파트장님, 여러 고민 상담도 해주시고 논문 쓸 마음도 다잡게 해주신 김문성 부장님께 먼저 감사의 말씀 드립니다.

판교 와서 만난 해양엔지니어링 식구들 중 논문이 탄생하기까지 많은 응원을 해주신 테니스 총무의 황계 신상명 책임과 티타임 친구 박성중 책임, 산책 친구 오환엽 책임, 술 흡수 마스터 안중은 책임, 툭툭 튀는 반항 영혼이자 듬직한 귀가 돌보미 함중호 책임, 흥어 패밀리 3인방 ① 필름 끊길 때까지 술 사주시는 최충영 책임, ② 너무 잘생긴 김종도 책임, ③ 테니스 대회 우승 상품 양보해 주신 최정인 책임님, 얼굴도 잘 생기고 맘도 착한 최봉균 선임, 만능 스포츠맨 여정환 책임, 무뚝뚝 철철 송창

우 선임, 힘든 회사 생활이지만 덕분에 좋은 추억 많이 쌓아가고 있어서 너무 좋아요. 지금 다른 곳으로 가신 일본문화 마스터 김병만 수석님, 담에 일본 여행 같이 한번 가요. 거제에서 항상 편안한 웃음으로 대해 주셨던 정운교 부장님, 보고 싶어요.

MOSES의 세계로 첫 발을 내딛게 해주신 김병우 파트장님을 비롯한 구 해양기술 연구 박찬후 파트장님, 유영목 차장님, 도한성 과장, 한익승 수석님, 구본국 교수님, 마현호 부장님, 몇 번씩 인사드리러 간다고 했다가 못가서 죄송합니다. 자리 곧 만들게요. 인생 상담, 회사 생활 상담 많이 해주신 T&I 박지선 파트장님, 감사합니다.

영화배우 같으신 이중남 그룹장님, 판교 오시면 꼭 제자리 들러주시는 한상동 부장님, 용인시민 산책킹구 구명준 수석님, 고등학교 졸업 후 20여년이 지나 불쑥 다시 만난 이희성 파트장, KRISO에서 함께 지내다가 다시 이곳에서 뵈게 된 김현조 파트장님 여러분들의 여러 도움과 조언, 위로와 관심에 지면을 빌어 다시 한번 깊이 감사드립니다. 테니스 세계로 연락처를 도와주신 윤경태 수석님, 테니스채 감사합니다. 항상 깊이 있는 시사 비평과 넓은 안목을 보여주는 박희준 수석님과 이승재 수석님, 점심 함께 먹어서 너무 좋아요.

함께 마라톤 뛰며 좋은 말씀 많이 해주셨던 황보승면 전 소장님, 유쾌한 농담 많이 해주던 찰주바리 김은경 책임, 언제나 편안한 미소로 대해주신 서종수 전 소장님, FUN 행사에 늘 관심 가져주시고 힘을 실어주신 김부기 전 소장님께도 감사의 말씀드립니다. 출장비 잘 챙겨주신 유송이씨, 김국화씨 지면을 빌어 감사드립니다.

화발다풍우 인생족발리 김두태 부장님과 박종국 부장님, 담에 또 막걸리와 함께하는 문학의 밤 시간 보내고 싶어요. 거제 미술동호회 경환이형, 만기형 보고 싶어요. 판교 테니스 동호회 식구들, 함께 즐기고 뛰는 시간은 제게 소중한 시간입니다.

김일섭 선배님과 창호, 외화, 연선이, 그 시절 함께 연구실 책상에 모여앉아 지내던 때가 생각나네요. 칠훈, 기수, 중철, 흠서, 재훈, 치영 술자리 게임 또 하자. 자주 찾아오셔서 좋은 말씀 많이 해주신 김종규 교수님과 김종인 박사님, 이제는 제가 연락드릴게요. 열정적이시고 사려 깊으신 강윤구 선배님, 풍성한 지식과 문학적 감성을 동시에 가지신 이수호 부장님, 함께 과제하시다가 자리 옮기신 김종욱 부장님, 언제나 변함 없는 애정과 관심, 감사합니다. 동기 중에서 켈 친한 군진이와 승우, 현철이 오래오래 연락하고 잘 지내자. 운전대는 남 주는거 아니라는 인식이 선배님, 명심하고 살고 있습니다. 언제나 푸근한 박명원 선배님, 다정한 도동이 선배님. 휴스턴 갈 때마다 너무 잘 챙겨주시는 설동관 선배님, LA 계신 병철이 선배님, 가게 되면 꼭 연락 드릴게요, 수리모형실험의 세계와 축구의 세계를 동시에 보여주는 손병규 선배님, 덕분에 판교 풋살대회에서 득점왕 먹은 거 같아요. 재경 청해 흥근 회장님, 감사합니다. 뜨문뜨문 만나던 인연이 올해도 이어진 진휴, 매일 아침 날씨 카톡 고마워.

그리고 검도와 주도를 함께 한 백경 검도부 선배님들 감사합니다. 술은 안드네요.

스무살에 만난 제 영혼의 형님 한국전자통신연구원 유한영 박사님, 올곧은 신념과 용기가 무엇인지 보여주신 한국해양조사원 임관창 주무관님, 윤책임은 대단한 일 할 사람이라고 괜히 밀도 끝도 없이 칭찬해주셨던 해양대학교 오진석 교수님, 품위 있는 모습 본 받고 싶은 박한일 교수님, 목마른 자료 갈증 풀어 주시는 포스텍 최한석 교수님, 언제나 편안한 형처럼 대해주시는 부산대학교 정광효 교수님, 책 쓰고 싶게

만들어주신 인하대학교 조철희 교수님, 연구실 선배님처럼 항상 따뜻하게 대해주시는 DNVGL 신기석 김사관님, 함께 있으면 편안한 오션스페이스 정현 사장님과 오태원 차장님, 친절한 해양플랜트 설계연구회 윤기영 부장님, 또 뵙고 싶네요. 허니 정자현, 공수표만 날렸는데 담에 사무실 들르게 한잔 하자. 국과연 양승운 박사님, 걸걸한 너털웃음 소리 듣고 싶어요.

진실 같은 우애를 나누며 수중로봇 과제를 함께 했던 장인성 박사님, 민정탁 이사님, 서진호 박사님, 또 뵙고 싶네요. 제게 출판의 기회를 주신 해상풍력기초 권오순 박사님, 감사합니다. 진정한 롯데팬 박대성 대표님, 담에 야구장 같이 가요. 친구 먹은 박종범 과장, 낚시 한번 가자. 항상 기술개발에 의욕적이신 홍의석 대표님, 아쿠아드론 임흥현 대표이사님과 하진경 부장님, 참치 사랑해요. 갈증 느끼지만 자주 못가서 아쉬운 수학아카데미 식구들에게도 논문 소식 전하고 싶네요. 저보고 항상 흥길동 같다고 하시는 마이클 대표님, 재미있는 사업 이야기 또 듣고 싶어요. 세미나는 담에 꼭 해드릴게요.

Forever my FFF, first foreign friend Ryosuke Tomimatsu, hope to see you again. I miss mama & papa. My mentor in offshore installation, David Lowther, appreciate your advices and concerns. Aguirre Nino, I'll visit your town some day. Phong Chong Hui, go mountain hiking together. Steven Ng, let's have beer time in Singapore. Hugo Coquerel, when will you paint again? Jean-Michel Tissier, hope to provide vessels for you again, now as designer. Xuan Chi, I would like to show you the result of my R&D project.

이래저래 오래오래 만나고 있는 원석, 병호, 찬희, 인철, 혜근, 승태, 은석, 호준, 기희, 옥진, 중현이와 수다쟁이들 동현, 영철, 광민, 규조, 오철, 학열, 영진, 무성, 내게 스트레스 가득한 직장 생활의 컴퓨터가 바로 너희들이다. 태용아, 언제나 날 부럽다고 하지만, 난 니가 부럽다. 근데 용재는 어째 살지? 병구, 산에 담에 같이 함 가자. 영석이, 관식이, 언제 함 보자. 그리고 내 특별한 여친 은교와 향연이, 조만간 또 보자. 후배이자 동네 동생 기은아, 애 잘 키우고. 카스 댓글 한번씩 달아주는 고마운 윤경이, 혜영이랑 같이 함 보자.

그리고 이 모든 분들과의 인연을 합친 것보다 더 큰 운명의 그녀, 사랑하는 아내 바바나와 세상에서 제일 예쁜 딸 예원이, 그리고 언젠가 이 논문 한번 찾아보게 될 것 같은 자랑스런 우리 아들 선우에게 이 논문을 바칩니다.

아들이 사십대 중반이 되어서도 물가에 내 놓은 어린 아이처럼 걱정해주시고 기도 해주시는 아버지, 어머니, 감사합니다. 사랑과 염려 덕분에 계속 잘 지내는거 같아요. 세상에서 하나밖에 없는 사랑스런 여동생 개도밥 혜영아, 항상 고맙다.

마지막으로 이 문장을 오늘 다시 씁니다.

끝없이 연구하고 싶다.

2018년 7월 24일 윤 상 준