



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](#)

工學博士 學位論文

2점 계류된 부이형 수중감시체계의
계류시스템 및 수중케이블 거동 특성에
대한 연구

A Study on Mooring System and Submerged Cable Behavior of
Floating Underwater Surveillance System with Two Point
Mooring

指導教授 趙 孝 濟

2019年 8月

韓國海洋大學校 大學院

造船海洋 시스템工學科

吳 太 源

工學博士 學位論文

2점 계류된 부이형 수중감시체계의
계류시스템 및 수중케이블 거동 특성에
대한 연구

A Study on Mooring System and Submerged Cable Behavior of
Floating Underwater Surveillance System with Two Point
Mooring

指導教授 趙 孝 濟

2019年 8月

韓國海洋大學校 大學院

造船海洋 시스템工學科

吳 太 源

본 논문을 오태원의 공학박사 학위논문으로
인준함.

위원장	박 주 용	(인)
위 원	조 효 제	(인)
위 원	최 병 렬	(인)
위 원	이 승 재	(인)
위 원	이 성 욱	(인)

2019년 6월 27일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	III
List of Figures	V
Abstract	XII
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구 동향	2
1.3 연구 목적	3
제 2 장 부이 계류시스템의 동적안정성에 대한 연구	6
2.1 운용조건 및 안전기준	6
2.1.1 운용조건	6
2.1.2 계류안전기준	7
2.2 부이 정적안정성 및 유체력	9
2.2.1 부이 모델링	9
2.2.2 유체력 계산	11
2.2.3 부이 복원성	17
2.3 계류형식 및 계류선 구성	23
2.3.1 계류형식 분석	23
2.3.2 계류선 개수의 결정	24
2.3.3 계류선 재질	28
2.3.4 계류형식의 최적화	37
2.4 최적화된 계류시스템의 동적계류안정성 평가	38
2.4.1 환경조건	38
2.4.2 계류시스템 모델링	41
2.4.3 하중조합	43
2.4.4 계류선 인장력 평가	45
2.4.5 계류시스템 안정성 평가	53
제 3 장 수중케이블 동적안정성에 대한 연구	63

3.1 개요	63
3.2 수중케이블 설치형상에 따른 비교해석	64
3.3 Lazy Wave 형상의 수중케이블 구성 및 연결	68
3.4 최적화된 Lazy Wave형 수중케이블 동적해석	70
3.4.1 수중케이블 배치 및 제원	70
3.4.2 수중케이블 동적해석 결과 분석	71
3.5 Lazy Wave형 수중케이블 안정성	84
3.5.1 VIV(Vortex Induced Vibration)	84
3.5.2 Dynamic Cable 피로해석	86
제 4 장 수리모형 실험 및 이론계산과의 비교해석	100
4.1 개요	100
4.2 실험방법 및 모형	100
4.2.1 실험방법	100
4.2.2 실험모형	103
4.2.3 실험조건	106
4.3 실험결과 및 이론계산과 비교	109
4.3.1 실험 Case-1	109
4.3.2 실험 Case-2	124
제 5 장 실증테스트를 통한 부이형 수중감시체계의 동적안정성 검증	132
5.1 개요	132
5.2 실증테스트용 부이형 수중감시체계 계류시스템 및 수중케이블 최적화	133
5.2.1 최적화된 계류시스템 및 수중케이블 구성	133
5.2.2 실증테스트용 부이형 수중감시체계 동적안정성 해석	135
5.3 실증테스트용 부이형 수중감시체계의 실험역 설치 및 운용	143
5.3.1 실험역 설치 및 운용시 해상조건	143
5.3.2 실험역 설치 및 운용 과정	144
5.4 실증테스트 결과 및 분석	150
제 6 장 결론	152

List of Tables

Table 2.1 WMO Sea State	7
Table 2.2 Operating condition of Floating Underwater Surveillance System	7
Table 2.3 Safety factors of mooring line and anchor	8
Table 2.4 Principal dimensions of Nomad Buoy	9
Table 2.5 The value of X1	19
Table 2.6 The value of X2	19
Table 2.7 The value of k	19
Table 2.8 The value of s	20
Table 2.9 The result of GM calculation of Nomad Buoy	21
Table 2.10 The result of stability of Nomad Buoy	22
Table 2.11 Characteristics of synthetic fiber ropes	29
Table 2.12 Mooring rope material properties applied to mooring analysis	30
Table 2.13 Mooring tension result according to rope material	31
Table 2.14 Environmental condition	41
Table 2.15 Dimension of mooring System and submerged cable	42
Table 2.16 Combination of environmental load	44
Table 2.17 Correction factor(a)	46
Table 2.18 Result of maximum mooring tension and extreme value statistics(EVS) ·	46
Table 2.19 Result of mooring tension and design tension	48
Table 2.20 Result of maximum mooring tension and extreme value statistics(EVS) ·	51
Table 2.21 Mooring line safety evaluation	54
Table 2.22 Dimension of mooring line	54
Table 2.23 Dimension of gravity anchor	56
Table 2.24 Holding capacity and weight of drag anchor	58
Table 2.25 Result of horizontal movement for mooring buoy	59
Table 2.26 Touch down length of mooring line	62
Table 3.1 Properties of submerged cable	70
Table 3.2 Result of cable tension for submerged cable	72
Table 3.3 Maximum cable tension and safety evaluation of dynamic cable	72
Table 3.4 Minimum bend radius and safety evaluation of dynamic cable	74
Table 3.5 Touch down length of dynamic cable	74
Table 3.6 Calculation result of vortex shedding frequency(fs)	84
Table 3.7 Calculation result of natural period for dynamic cable	85
Table 3.8 Wave occurrence rate(South sea of Seogwipo, KHOA)	87

Table 3.9 Result of fatigue analysis	88
Table 3.10 Dimension of array-assembly cable and weight block	89
Table 3.11 Evaluation condition of On-Bottom Stability	90
Table 3.12 Seabed roughness(Reference: DNV-RP-F109_On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines)	91
Table 3.13 Load coefficients	97
Table 3.14 Safety factor()	98
Table 4.1 Dimensions of 2-Dimensional Ocean Engineering Basin	101
Table 4.2 Experimental model data of the buoy(Scale : 1:43)	103
Table 4.3 Mooring line material properties applied to numerical analysis and model test	105
Table 4.4 Environmental condition of numerical analysis and model test	107
Table 4.5 Load Case(Numerical analysis/Model test)	109
Table 4.6 Result of model test and numerical analysis(Surge motion)	110
Table 4.7 Result of model test and numerical analysis(Heave motion)	111
Table 4.8 Result of model test and numerical analysis(Pitch motion)	111
Table 4.9 Result of model test and numerical analysis(Mooring tension)	119
Table 4.10 Result of dynamic cable tension	129
Table 5.1 Dimension of mooring System and submerged cable	133
Table 5.2 Environmental condition	135
Table 5.3 Result of maximum mooring tension and extreme value statistics(EVS) ·	136
Table 5.4 Mooring line safety evaluation	136
Table 5.5 Result of cable tension for submerged cable	138
Table 5.6 Maximum cable tension and safety evaluation of dynamic cable	138
Table 5.7 Environmental condition of site(Geoje-do Ocean Data Buoy)	143

List of Figures

Fig. 1.1 The configuration of Floating Underwater Surveillance System	3
Fig. 1.2 Conceptual design of Floating Underwater Surveillance System	5
Fig. 2.1 General arrangement plan of Nomad Buoy	10
Fig. 2.2 Nomad Buoy	10
Fig. 2.3 Wire frame model of Nomad Buoy	11
Fig. 2.4 Displacement RAO(Surge) for Nomad Buoy	12
Fig. 2.5 Displacement RAO(Sway) for Nomad Buoy	12
Fig. 2.6 Displacement RAO(Heave) for Nomad Buoy	12
Fig. 2.7 Displacement RAO(Roll) for Nomad Buoy	13
Fig. 2.8 Displacement RAO(Pitch) for Nomad Buoy	13
Fig. 2.9 Displacement RAO(Yaw) for Nomad Buoy	13
Fig. 2.10 Load RAO(Fx) for Nomad Buoy	14
Fig. 2.11 Load RAO(Fy) for Nomad Buoy	14
Fig. 2.12 Load RAO(Fz) for Nomad Buoy	14
Fig. 2.13 Load RAO(Mx) for Nomad Buoy	15
Fig. 2.14 Load RAO(My) for Nomad Buoy	15
Fig. 2.15 Load RAO(Mz) for Nomad Buoy	15
Fig. 2.16 QTF(Wave Drift)-Surge for Nomad Buoy	16
Fig. 2.17 QTF(Wave Drift)-Sway for Nomad Buoy	16
Fig. 2.18 QTF(Wave Drift)-Yaw for Nomad Buoy	16
Fig. 2.19 Stability criteria	18
Fig. 2.20 Stability curve of Nomad Buoy(GZ Curve)	21
Fig. 2.21 Mooring pattern of 1 point mooring buoy(Plan view)	25
Fig. 2.22 Mooring pattern of 1 point mooring buoy(Side view)	25
Fig. 2.23 Contact clearance between mooring line and dynamic cable for 1 point mooring buoy	26
Fig. 2.24 Mooring pattern of 2 point mooring buoy(Plan view)	26
Fig. 2.25 Mooring pattern of 2 point mooring buoy(Side view)	26
Fig. 2.26 Contact clearance between mooring line and dynamic cable for 2 point mooring buoy	27
Fig. 2.27 Mooring pattern of 3 point mooring buoy(Plan view)	27
Fig. 2.28 Mooring pattern of 3 point mooring buoy(Side view)	27
Fig. 2.29 Contact clearance between mooring line and dynamic cable for 3 point mooring buoy	28

Fig. 2.30 Mooring arrangement(Side view)	31
Fig. 2.31 Comparison of mooring tension by mooring rope material	32
Fig. 2.32 Mooring tension distribution along arc length of wire rope	32
Fig. 2.33 Mooring tension distribution along arc length of polyester rope(Rope Length=185m)	33
Fig. 2.34 Mooring tension distribution along arc length of nylon rope	33
Fig. 2.35 Mooring tension distribution along arc length of wire rope	34
Fig. 2.36 Mooring tension distribution along arc length of polyester rope(Rope Length=190m)	34
Fig. 2.37 Mooring tension distribution along arc length of nylon rope	35
Fig. 2.38 Mooring tension distribution along arc length of wire rope	35
Fig. 2.39 Mooring tension distribution along arc length of polyester rope(Rope Length=195m)	36
Fig. 2.40 Mooring tension distribution along arc length of nylon rope	36
Fig. 2.41 Concept of mooring line and submerged cable	37
Fig. 2.42 JONSWAP Spectrum	39
Fig. 2.43 Wave elevation	39
Fig. 2.44 Current Profile	41
Fig. 2.45 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System(Side view)	42
Fig. 2.46 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance	43
Fig. 2.47 Environmental direction for wave, wind and current	44
Fig. 2.48 Mooring tension distribution along arc length of Line-1(Seed 1,000)	48
Fig. 2.49 Mooring tension distribution along arc length of Line-2(Seed 1,000)	49
Fig. 2.50 Time history of mooring tension for fairlead point	49
Fig. 2.51 Time history of mooring tension for fairlead point	50
Fig. 2.52 Time history of mooring tension for anchor point	50
Fig. 2.53 Time history of mooring tension for anchor point	50
Fig. 2.54 Time history of mooring tension for maximum tension point(Line-1, LC9)	51
Fig. 2.55 Time history of mooring tension for anchor point	52
Fig. 2.56 Time history of mooring tension for maximum tension point	52
Fig. 2.57 Time history of mooring tension for anchor point	52
Fig. 2.58 Mooring tension distribution along arc length	53
Fig. 2.59 Mooring system arrangement	55
Fig. 2.60 Concrete gravity anchor	57

Fig 2.61 Horizontal movement of mooring buoy(Plan view)	59
Fig 2.62 Horizontal movement of mooring buoy(Side view-1)	60
Fig 2.63 Horizontal movement of mooring buoy(Side view-2)	60
Fig. 2.64 Time history of maximum X-direction horizontal movement for mooring buoy(Load Case : LC-1)	60
Fig. 2.65 Time history of maximum Y-direction horizontal movement for mooring buoy(Load Case : LC-2)	61
Fig. 2.66 Concept of mooring line touch down length	61
Fig. 3.1 Potential dynamic cable configurations	64
Fig. 3.2 Behavior characteristics of catenary type dynamic cable	66
Fig. 3.3 Behavior characteristics of lazy wave type dynamic cable	67
Fig. 3.4 Conceptual design of submerged cable	69
Fig. 3.5 Submerged cable arrangement	71
Fig. 3.6 Cable tension calculation point	72
Fig. 3.7 Cable tension distribution along arc length of dynamic cable	73
Fig. 3.8 Behavior characteristics of submerged cable(LC1)	74
Fig. 3.9 Behavior characteristics of submerged cable(LC2)	75
Fig. 3.10 Behavior characteristics of submerged cable(LC3)	75
Fig. 3.11 Behavior characteristics of submerged cable(LC4)	76
Fig. 3.12 Behavior characteristics of submerged cable(LC5)	76
Fig. 3.13 Behavior characteristics of submerged cable(LC6)	77
Fig. 3.14 Behavior characteristics of submerged cable(LC7)	77
Fig. 3.15 Behavior characteristics of submerged cable(LC8)	78
Fig. 3.16 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC1)	78
Fig. 3.17 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC1)	79
Fig. 3.18 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC2)	79
Fig. 3.19 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC2)	79
Fig. 3.20 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC3)	80
Fig. 3.21 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC3)	80
Fig. 3.22 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC4)	80
Fig. 3.23 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC4)	81
Fig. 3.24 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC5)	81
Fig. 3.25 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC5)	81
Fig. 3.26 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC6)	82
Fig. 3.27 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC6)	82

Fig. 3.28 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC7)	82
Fig. 3.29 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC7)	83
Fig. 3.30 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC8)	83
Fig. 3.31 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC8)	83
Fig. 3.32 Modal analysis result of dynamic cable	86
Fig. 3.33 T-N Curve of dynamic cable	87
Fig. 3.34 Result of fatigue life evaluation along arc length for dynamic cable	88
Fig. 3.35 Result of fatigue damage evaluation along arc length for dynamic cable	88
Fig. 3.36 Weight block arrangement of array-assembly cable	90
Fig. 3.37 Significant flow velocity amplitude at seabed level	92
Fig. 3.38 Mean zero up-crossing period of oscillating flow at seabed level	93
Fig. 3.39 Definition of penetration	95
Fig. 3.40 Definition of trench parameters	96
Fig. 4.1 Schematic of 2-Dimensional Ocean Engineering Basin	101
Fig. 4.2 2-Dimensional Ocean Engineering Basin	101
Fig. 4.3 Tensiometer	102
Fig. 4.4 Wave-height meter	102
Fig. 4.5 3D position sensitive detector	102
Fig. 4.6 Experimental model of buoy	103
Fig. 4.7 Model installation in Ocean Engineering Basin	106
Fig. 4.8 Configuration of model installation(Case-1)	108
Fig. 4.9 Configuration of model installation(Case-2)	108
Fig. 4.10 Configuration of numerical analysis(Case-1)	109
Fig. 4.11 Comparison of experiment and numerical(Surge motion)	112
Fig. 4.12 Comparison of experiment and numerical(Heave motion)	112
Fig. 4.13 Comparison of experiment and numerical(Pitch motion)	112
Fig. 4.14 Time history of measured surge response in experiment(LC1)	113
Fig. 4.15 Time history of surge response in numerical analysis(LC1)	113
Fig. 4.16 Time history of measured surge response in experiment(LC2)	113
Fig. 4.17 Time history of surge response in numerical analysis(LC2)	113
Fig. 4.18 Time history of measured surge response in experiment(LC3)	114
Fig. 4.19 Time history of surge response in numerical analysis(LC3)	114
Fig. 4.20 Time history of measured surge response in experiment(LC4)	114
Fig. 4.21 Time history of surge response in numerical analysis(LC4)	114
Fig. 4.22 Time history of measured heave response in experiment(LC1)	115

Fig. 4.23 Time history of heave response in numerical analysis(LC1)	115
Fig. 4.24 Time history of measured heave response in experiment(LC2)	115
Fig. 4.25 Time history of heave response in numerical analysis(LC2)	115
Fig. 4.26 Time history of measured heave response in experiment(LC3)	116
Fig. 4.27 Time history of heave response in numerical analysis(LC3)	116
Fig. 4.28 Time history of measured heave response in experiment(LC4)	116
Fig. 4.29 Time history of heave response in numerical analysis(LC4)	116
Fig. 4.30 Time history of measured pitch response in experiment(LC1)	117
Fig. 4.31 Time history of pitch response in numerical analysis(LC1)	117
Fig. 4.32 Time history of measured pitch response in experiment(LC2)	117
Fig. 4.33 Time history of pitch response in numerical analysis(LC2)	117
Fig. 4.34 Time history of measured pitch response in experiment(LC3)	118
Fig. 4.35 Time history of pitch response in numerical analysis(LC3)	118
Fig. 4.36 Time history of measured pitch response in experiment(LC4)	118
Fig. 4.37 Time history of pitch response in numerical analysis(LC4)	118
Fig. 4.38 Comparison of experiment and numerical(Mooring tension)	119
Fig. 4.39 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC1)	120
Fig. 4.40 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC1)	120
Fig. 4.41 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC1)	120
Fig. 4.42 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC1)	120
Fig. 4.43 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC2)	121
Fig. 4.44 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC2)	121
Fig. 4.45 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC2)	121
Fig. 4.46 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC2)	121
Fig. 4.47 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC3)	122
Fig. 4.48 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC3)	122
Fig. 4.49 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC3)	122
Fig. 4.50 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC3)	122
Fig. 4.51 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC4)	123
Fig. 4.52 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC4)	123
Fig. 4.53 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC4)	123
Fig. 4.54 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC4)	123
Fig. 4.55 Behavior characteristics of dynamic cable	125
Fig. 4.56 Behavior characteristics of dynamic cable	125
Fig. 4.57 Behavior characteristics of dynamic cable	126

Fig. 4.58 Behavior characteristics of dynamic cable	126
Fig. 4.59 Behavior characteristics of dynamic cable	127
Fig. 4.60 Behavior characteristics of dynamic cable	127
Fig. 4.61 Behavior characteristics of dynamic cable	128
Fig. 4.62 Behavior characteristics of dynamic cable	128
Fig. 4.63 Comparison of tension on dynamic cable top and bottom	129
Fig. 4.64 Time history of tension on dynamic cable top(LC1)	130
Fig. 4.65 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC1)	130
Fig. 4.66 Time history of tension on dynamic cable top(LC2)	130
Fig. 4.67 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC2)	130
Fig. 4.68 Time history of tension on dynamic cable top(LC3)	131
Fig. 4.69 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC3)	131
Fig. 4.70 Time history of tension on dynamic cable top(LC4)	131
Fig. 4.71 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC4)	131
Fig. 5.1 Location of test bed	132
Fig. 5.2 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System	134
Fig. 5.3 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System	134
Fig. 5.4 Mooring tension distribution along arc length of Line-1	136
Fig. 5.5 Mooring tension distribution along arc length of Line-2	137
Fig. 5.6 Time history of mooring tension for fairlead point(Line-1, LC1)	137
Fig. 5.7 Time history of mooring tension for anchor point(Line-2, LC6)	137
Fig. 5.8 Cable tension distribution along arc length of dynamic cable	138
Fig. 5.9 Behavior characteristics of submerged cable(LC1)	139
Fig. 5.10 Behavior characteristics of submerged cable(LC2)	139
Fig. 5.11 Behavior characteristics of submerged cable(LC3)	140
Fig. 5.12 Behavior characteristics of submerged cable(LC4)	140
Fig. 5.13 Behavior characteristics of submerged cable(LC5)	141
Fig. 5.14 Behavior characteristics of submerged cable(LC6)	141
Fig. 5.15 Behavior characteristics of submerged cable(LC7)	142
Fig. 5.16 Behavior characteristics of submerged cable(LC8)	142
Fig. 5.17 Installation location and typhoon route	144
Fig. 5.18 Loadout and transportation	145
Fig. 5.19 Installation of anchor and mooring line	146
Fig. 5.20 Submerged cable laying	147
Fig. 5.21 Mooring line and submerged cable connection and lifting	148

Fig. 5.22 Launching 149

A Study on Mooring System and Submerged Cable Behavior of Floating Underwater Surveillance System with Two Point Mooring

Oh, Tae Won

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate Ph. D of Korea Maritime University

Abstract

A floating underwater surveillance system is a weapon system that uses an acoustic sonar to detect a target infiltrating the sea. It has excellent mobility and features that it is easier to install, recover, and maintain than a fixed underwater surveillance system. This surveillance system consists of a nomad-type buoy, 2 point catenary mooring system and submerged cable. The submerged cable consists of a dynamic cable with a lazy wave geometry and an array-assembly cable with an acoustic sonar. The purpose of this study is to verify the stability of submerged cable and mooring system of floating underwater surveillance system. In order to evaluate the operability and survivability in sea state 7, dynamic analysis of buoy considering marine environmental load was performed and reflected stiffness of mooring system and submerged cable. The design tension was calculated by dynamic analysis and the safety of mooring system and submerged cable was verified. The behavior of buoy and submerged cable was evaluated. A model test was performed in a two - dimensional wave tank. Buoy motion, mooring line tension, submerged cable behavior and cable

tension were measured under the conditions of irregular wave and current. The model test results were compared with the numerical analysis results to verify the reliability of the analysis results. The sea test site is located near Geoje Island and operated for about 2 months. A floating underwater surveillance system was installed under the environmental conditions of sea state 3. And it was operated in an environmental condition of sea state 6 by the indirect influence of the typhoon. However, installation and operation were stable. Therefore, the floating underwater surveillance system developed in this study is expected to be stable operation under the environmental condition of sea state 7.

KEY WORDS: Floating underwater surveillance system 부이형 수중감시체계; Submerged cable 수중케이블; Dynamic cable 동적케이블, Array-assembly cable 배열케이블

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 신재생에너지에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 풍력, 파력, 해류, 해수온도차와 같은 다양한 해양에너지를 활용하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 해양에너지를 생산하기 위한 플랫폼은 육지와 가까운 천해가 아닌 외해로 나갈수록 고정식 보다는 부유식이 더 경제적이며, 부유식 해상풍력, 부유식 파력발전 등이 대표적인 사례이다.

부유식 해상풍력이나 파력발전은 크게 부유체와 계류시스템, 수중케이블로 구성되며, 극한해상조건에서 운용성과 생존성을 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 국방 분야에서, 수중감시체계 중 최근 연구되고 있는 부이형 수중감시체계 역시 부유체와 계류시스템, 수중케이블로 구성되어 있어 부유식 풍력발전 또는 파력발전과 유사한 설계개념이 적용된다.

해상에 설치되는 부유체는 파랑 외에도 바람과 조류의 영향을 함께 받으며 계류시스템의 계류선 강성과 수중케이블의 강성이 더해져 한층 복잡한 운동응답 특성을 갖는다. 이처럼 복잡한 시스템을 갖는 부유식 구조물을 개발하기 위해서는 사전에 동적해석과 수리모형실험 등을 통해 전체 시스템의 동적특성을 고려한 부이의 운동응답과 계류시스템의 인장력, 그리고 수중케이블의 설치형상에 대한 적절한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 새로 개발된 부이형 수중감시체계에 대한 동적해석과 수리모형실험, 실험실 증 테스트를 통해 부이 및 계류시스템, 수중케이블의 불규칙 파랑중의 안정성과 운용성을 검증하였다. 동적해석을 통해 환경외력에 대한 부이와 계류시스템, 수중케이블의 연성효과를 고려한 부이의 동적응답 특성과 계

류시스템의 계류특성 및 인장력 평가, 수중케이블의 설치형상에 대한 거동특성 및 피로해석, VIV에 대한 model 해석, on bottom stability를 평가하였다. 그리고 수리모형실험에 의해 계측된 값과 비교하여 동적해석의 신뢰성을 함께 검증하였다. 또한 sea state 6의 해상조건에서 실험역 실증 테이스를 수행하여 설치 및 회수, 운용시 안정성을 검증하였다.

1.2 연구 동향

수중감시체계(USS : underwater surveillance system)는 음향탐지기를 비롯한 여러 센서를 다중방책 개념으로 해저에 설치하여 항만에 침투하는 수중세력을 24시간 탐지, 식별 및 추적하기 위한 목적으로 개발되었으며, 이러한 수중감시체계는 미국 등 일부 선진국에서만 자국 항만의 환경 특성에 맞는 체계를 개발·운용하고 있는 핵심장비로 꼽힌다.

수중감시체계는 설치환경에 따라 외해에서는 해저 부설형 선(線)배열 수동소나를 설치, 적 잠수함·수상함·반잠수정을 조기에 탐지하고 내해의 수로에서는 자기음향 탐지장비를 설치하여 수상함, 잠수정, 이송정(移送艇)을 포함한 수중 침투세력을 탐지·추적한다. 그리고 항만의 내항에서는 고주파 능동소나, 레이더, 전자광학 탐지장비 등을 사용해 잠수함(정)은 물론 테러를 목적으로 침투하는 특수전 요원까지 탐지·추적이 가능하다.

국내에서 개발된 수중감시체계는 매설형 선배열 음향탐지장비, 매설형 자기음향탐지장비, 능동음향탐지장비, 전자광학장비, 음향탐지식별 분석장비, 종합통제장비 등으로 구성돼 있다. 해외의 경우 이스라엘 DSIT 사의 항만감시체계 HSS(harbor surveillance system), 이탈리아 SITEP사의 IHSS(integrated harbour surveillance system)도 유사한 개념으로 음향탐지기·레이더·전자광학장비를 조합해 탐지한다.

미 해군이 개발한 수중감시체계는 우리의 감시체계와 유사하게 원해·근해의 해저에 음향탐지장비를 고정시켜 표적을 탐지하는 SOSUS/FDS(sound surveillance system/fixed distribute system)와 이동형인 SURTASS/LFA(surveillance towed array sonar system/low frequency active)를 갖고

있다.

최근에는 이동식 수중감시체계인 ADS(advanced deployable system)를 개발하고 있다. ADS는 천해 및 항만 부근에서 작전하는 원자력추진 잠수함이나 소음이 적은 재래식 잠수함을 감시·탐지하기 위한 수중감시체계로써 기존 항만 주변에 설치했던 고정식과는 달리 함정을 이용해 원하는 장소에 신속하게 설치할 수 있는 수동 음향탐지장비다. [출처: 한국국방연구원 박태유, 항만감시체계]

1.3 연구 목적

부이형 수중감시체계는 해상으로 침투하는 표적을 음향센서를 이용하여 감시하는 기술로 고정형 수중감시체계 설치가 어려운 감시공백 지역에서 일정기간 설치하여 운용할 수 있는 이동형 수중감시체계이며, 기존 기술에 비해 설치와 회수 그리고 유지보수가 용이하여 설치기간 단축 및 비용면에서 매우 효율적인 감시체계이다.

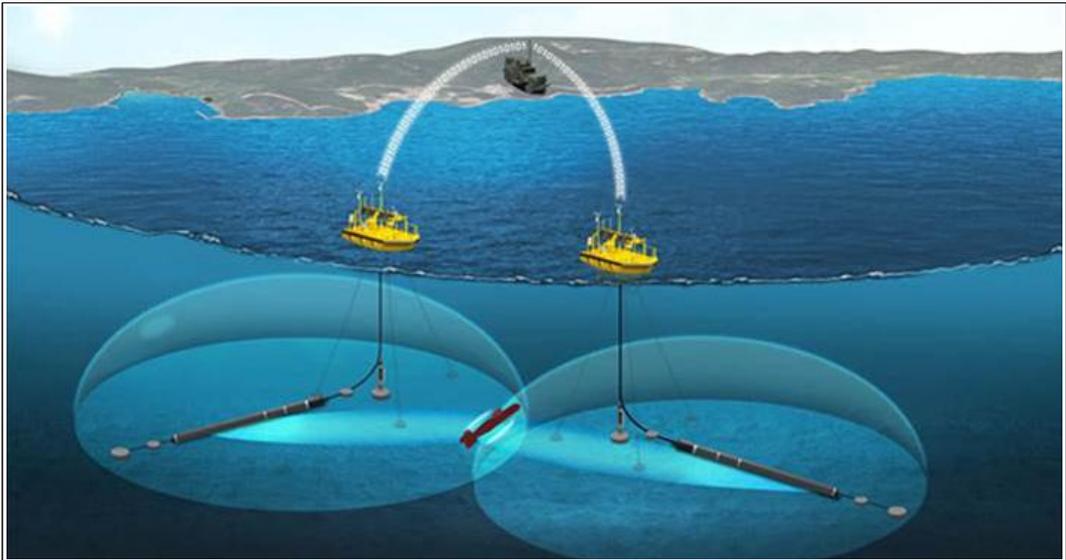


Fig. 1.1 The configuration of Floating Underwater Surveillance System

부이형 수중감시체계는 부이와 계류시스템 그리고 수중케이블로 구성되는데 이 중 부이는 수중의 음향센서로부터 수신된 탐지신호를 육상 기지국으로 전달하기 위한 통신장비와 전원 공급을 위한 배터리를 탑재하고 있다. 부이는 nomad형 부이를 사용하였으며 이 부이는 일반적으로 1점 계류하여 바람에 따라 이동하는 표류형 부이이나 본 연구 목적에 부합하도록 부력 및 복원력을 향상시키기 위하여 원통형의 보조부력탱크를 양쪽 선측에 부착하였고 선수와 선미에 계류선이 체결되는 2점 카테너리 계류시스템을 채택하였다.

부이의 위치 유지를 위한 계류시스템은 계류선과 앵커로 이루어지며 계류선은 상부로부터 체인(buoy chain)+로프(nylon rope)+체인(anchor chain)으로 구성된 카테너리 형상이고 해저에 고정시키는 앵커는 중력식 앵커와 닷형 앵커를 겸용할 수 있도록 하였다. 카테너리(catenary) 계류는 계류선의 자중에 의해 인장력이 부유체 이동에 대한 복원력으로 작용하며 넓은 계류범위를 갖고, 비교적 천해에서 높은 수면변위에도 인장력이 크게 변화하지 않는 계류특성을 갖는다. 따라서 계류선의 구성은 계류선의 길이를 최소화 하면서 부이의 잉여부력과 계류복원력, 파고와 조위차 등을 고려하여 결정된다.

수중케이블은 배열케이블과 dynamic cable로 구성된다. 배열케이블은 다수의 음향센서가 한 줄로 배열된 형태이며 선형으로 해저에 부설된다. Dynamic cable은 배열케이블과 부이를 연결하며, 음향센서에서 수신된 신호를 부이로 전달하는 역할을 한다. 부이의 과도한 동요가 배열케이블까지 직접 전달되게 되면 배열케이블의 형상이 흐트러지고 음향센서를 손상시킬 수 있다. 따라서 dynamic cable은 이러한 동요를 잘 흡수하고 인장력이 크게 발생하지 않도록 설치형상을 최적화 하여야 한다.

본 연구에서는 부이형 수중감시체계의 부이와 계류시스템 그리고 수중케이블의 연성효과를 고려한 동적해석을 수행하여 부이의 복원성, 계류시스템과 수중케이블의 동적안정성 및 설계 적정성을 검증하였다. 그러기 위하여 상용프로그램인 Moses와 Orcaflex를 사용하였으며 Moses 프로그램으로는 부이의 유체력 및 복원성을 계산하였고 Orcaflex 프로그램으로는 계류선과 수중케이블의 운동 및 인장력에 대한 시간영역해석을 수행하여 설계인장력을 산출하고 수중케이블

의 피로해석, 모드해석을 수행하였다. 그리고 파랑과 조류에 의한 배열케이블의 on bottom Stability는 DNV-RP-F109 기준에 따라 평가하였다.

부이형 수중감시 시스템의 계류 및 케이블 안정성에 대한 동적해석 결과값의 신뢰성 검증을 목적으로 2차원 조파수조에 축소모형에 대한 수리모형 실험을 수행하였다. 불규칙파랑 중에서 부이의 운동응답과 계류장력 그리고 수중케이블의 설치형상에 대한 거동특성을 고찰하기 위하여 수리모형 실험을 통해 부이의 surge, heave, pitch 동요량, 계류선과 수중케이블의 장력을 측정하였으며, 파랑과 조류에 변화하는 수중케이블의 설치형상을 육안으로 관찰하였다.

최종 단계에서는 실제 해상에서의 설치, 회수 및 운용성 검증을 위한 실험역 실증 테스트를 수행하였다. 설치해역은 거제 지심도에서 동북쪽으로 약 2.0km 떨어진 해상이며 2018년 8월 1일~2018년 10월 3일까지 약 2개월간 설치 운용하였다. 부이형 수중감시체계의 설치 작업은 sea state 3 이하의 정온한 상태에서 수행되었으며 sea state 6의 해상상태에서 안정성 및 운용성을 검증하였다.

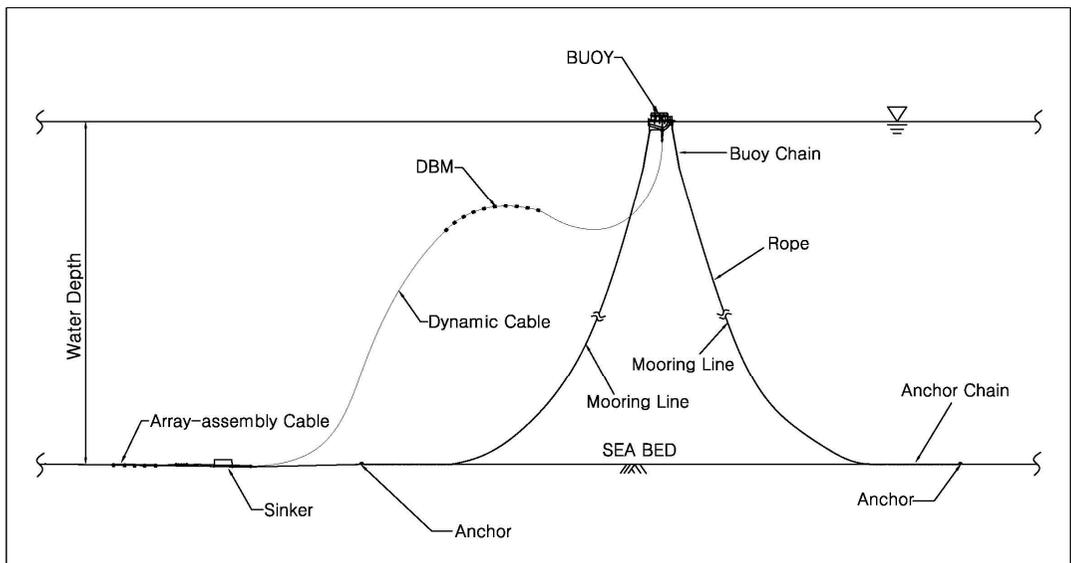


Fig. 1.2 Conceptual design of Floating Underwater Surveillance System

제 2 장 부이 계류시스템의 동적안정성에 대한 연구

2.1 운용조건 및 안전기준

2.1.1 운용조건

부이형 수중감시체계는 고정형 수중감시체계 설치가 어려운 감시공백 지역에서 일정기간 설치하여 운용할 수 있는 이동형 수중감시체계이므로 빠른 이동성과 설치 및 회수의 편리성이 요구된다. 그리고 해상조건의 운용기준 내에서 부이 및 계류시스템, 그리고 수중케이블의 안정성이 확보되어야 한다.

부이는 빠른 이동성이 요구되므로 예인 안정성이 우수한 선박형태인 nomad형 부이를 채택하였다. 앵커 중량을 경량화 하여 설치 및 회수가 용이하도록 계류인장력을 최소화 할 수 있는 계류시스템을 적용하여야 한다. 수중케이블은 계류선과 간섭되지 않고, 부이 동요에 의한 인장력과 거동이 배열케이블에 직접 전달되지 않도록 적절한 설치형상으로 최적화 되어야 한다. Dynamic cable은 VIV에 의한 공진 가능성에 대한 평가와 반복적인 파랑하중에 의해 손상이 발생하지 않도록 케이블 교체주기에 대한 피로수명이 적절히 평가되어야 한다. 그리고 배열케이블은 파랑과 조류하중에 의한 안정성(on bottom stability)을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 부이형 수중감시체계를 제주도 근해의 수심 200m 해역에 설치하는 것으로 가정하였다. 운용 및 생존시 최대 해상상태는 sea state 7이며 Table 2.1과 같이 세계기상기구 WMO(World Meteorological Organization)의 sea state 7은 유의파고 기준으로 파고 6.0~9.0m를 의미한다. 따라서 설계 유의파고는 보수적으로 9.0m를 적용하였다.

WMO의 sea state code는 파고 외에 유속이나 풍속에 대한 기준은 따로 명시하고 있지 않아 유속은 수치해도 상 제주도 근해 표층유속이 최대 1.9knots이므로 보수적으로 2.0knots(약 1.0m/s)를 적용하였고, 풍속은 51.5m/s(100knots)를 적용하였는데 이 값은 한국선급의 이동식 해양 구조물 규칙의 복원성 평가시 극한하중상태에서의 풍속 기준이다.

Table 2.1 WMO Sea State

Sea state code	Wave height(m)	Characteristics
0	0	Calm(glassy)
1	0~0.1	Calm(rippled)
2	0.1~0.5	Smooth(wavelets)
3	0.5~1.25	Slight
4	1.25~2.5	Moderate
5	2.5~4.0	Rough
6	4.0~6.0	Very rough
7	6.0~9.0	High
8	9.0~14.0	Very high
9	14.0 이상	Phenomenal

Table 2.2 Operating condition of Floating Underwater Surveillance System

Description	Operating condition	Remark
Significant wave height	9.0m	WMO Sea State 7
Wind velocity	51.5m/s	Wind velocity at 10m height
Current velocity	1.0m/s	

2.1.2 계류안전기준

부이형 수중감시체계가 운용성과 생존성을 확보하기 위해서는 계류선과 수중 케이블이 과단되거나 서로 간섭되는 현상이 발생하지 않도록 하여야 하며 앵커는 적절한 과주력을 확보하여야 한다. 배열케이블은 선배열된 형상이 유지될

수 있도록 부이의 동요와 파랑 및 조류 하중에 의한 안정성이 확보되어야 한다. 그리고 부이는 충분한 복원성을 확보하여 탑재 장비 중량에 대한 적정 건현을 유지하고 높은 파도와 바람에도 전도되지 않아야 한다.

계류선의 파단과 앵커 끌림에 대한 안전기준은 API RP 2SK에 따르며 Table 2.3과 같이 규정하고 있다. 동해석시 계류선의 파단강도는 비손상시(intact) 조건에서 1.67, 손상시(damage) 조건에서 1.25이며, anchor의 파주력은 비손상시(intact) 조건에서 1.5, 손상시(damage) 조건에서 1.05 이상의 안전율이 확보되어야 한다.

Table 2.3 Safety factors of mooring line and anchor

Description	Mooring line		Anchor	
	Quasi-dynamic	Dynamic	Quasi-dynamic	Dynamic
Intact	1.75	1.67	1.60	1.5
Damaged	1.25	1.25	1.15	1.05
Transient	1.25	1.20	1.15	1.05

※ Reference : API RP 2SK

2.2 부이 정적안정성 및 유체력

2.2.1 부이 모델링

부이는 선박 형상의 본체(hull)와 상부구조물(mast) 그리고 측면의 원통형 보조부력탱크로 구성되어 있다. 본체 내부에는 2차전지 배터리와 각종 통신장비들이 탑재되고 하부에는 무게중심을 낮추기 위한 발라스트 무게추(weight)가 부착되어 있다. 상부구조물에는 태양광 패널과 등명기, 통신용 안테나 등이 탑재되어 있으며, 측면의 보조 부력탱크는 부이가 복원성을 확보하고 적정 건현을 유지하기 위한 목적으로 부착되었다.

부이의 전체 길이는 6.5m, 폭은 2.82m이며, 보조 부력탱크를 포함한 전폭은 5.86m이다. 건현까지 높이는 2.9m, 흘수는 2.5m, 배수량은 약 30톤이고 무게중심은 부이 저면 기준으로 약 1.4m 높이에 위치하고 있다. 부이의 기본 제원 및 관성모멘트, 풍압면적, 유수압 면적은 Table 2.4와 같으며 풍하중 및 유수하중 계산시 항력계수는 보수적으로 1.2를 적용하였다.

Table 2.4 Principal dimensions of Nomad Buoy

Description		Dimension	Remark
Length		6.5m	
Breadth		2.82m	
		5.85m	Buoyancy tank included
Depth		2.9m	
Draft		2.5m	
Freeboard		0.4m	
Displacement		30,350kg	Mooring line weight not included
Center of gravity		1.401m	
Moment of inertia	X	$35,246.9kg \cdot m^2$	
	Y	$69,082.6kg \cdot m^2$	
	Z	$57,912.2kg \cdot m^2$	
Wind area	Surge	$2.4m^2$	Drag coefficient : 1.2
	Sway	$7.2m^2$	
Current area	Surge	$6.73m^2$	Drag coefficient : 1.2
	Sway	$10.3m^2$	

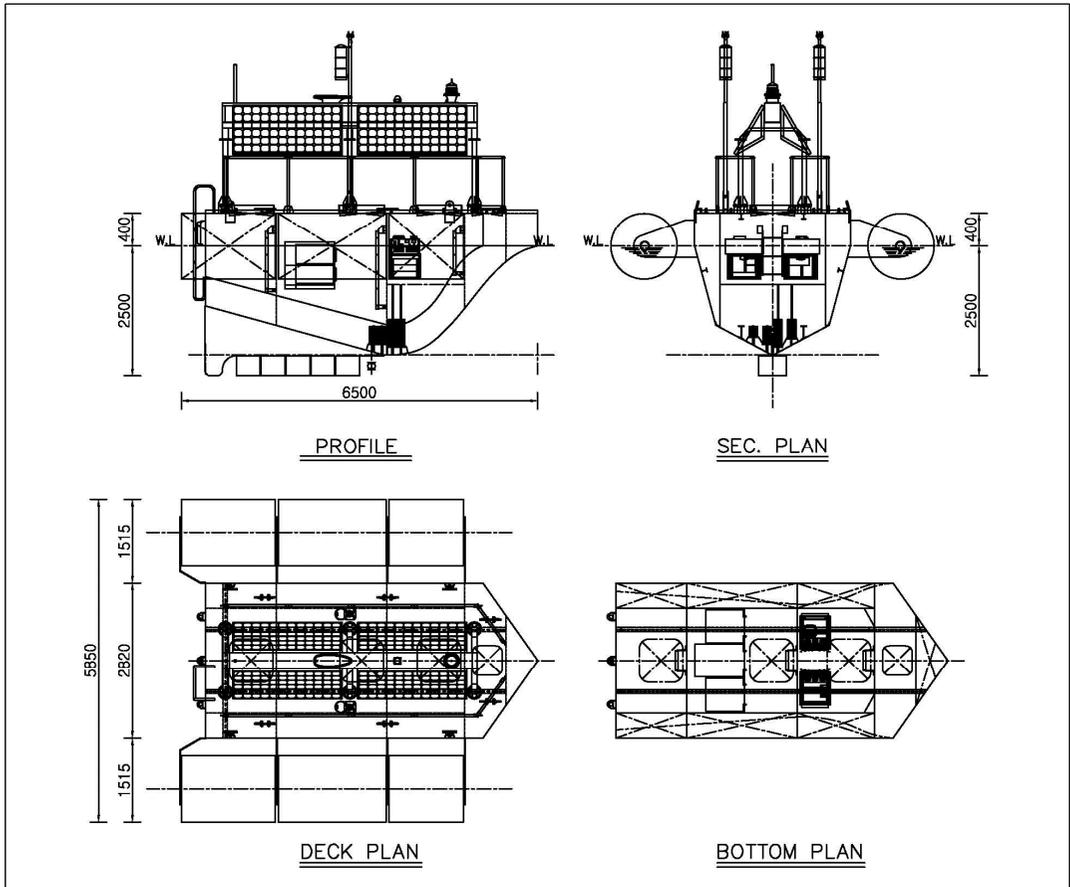


Fig. 2.1 General arrangement plan of Nomad Buoy



Fig. 2.2 Nomad Buoy

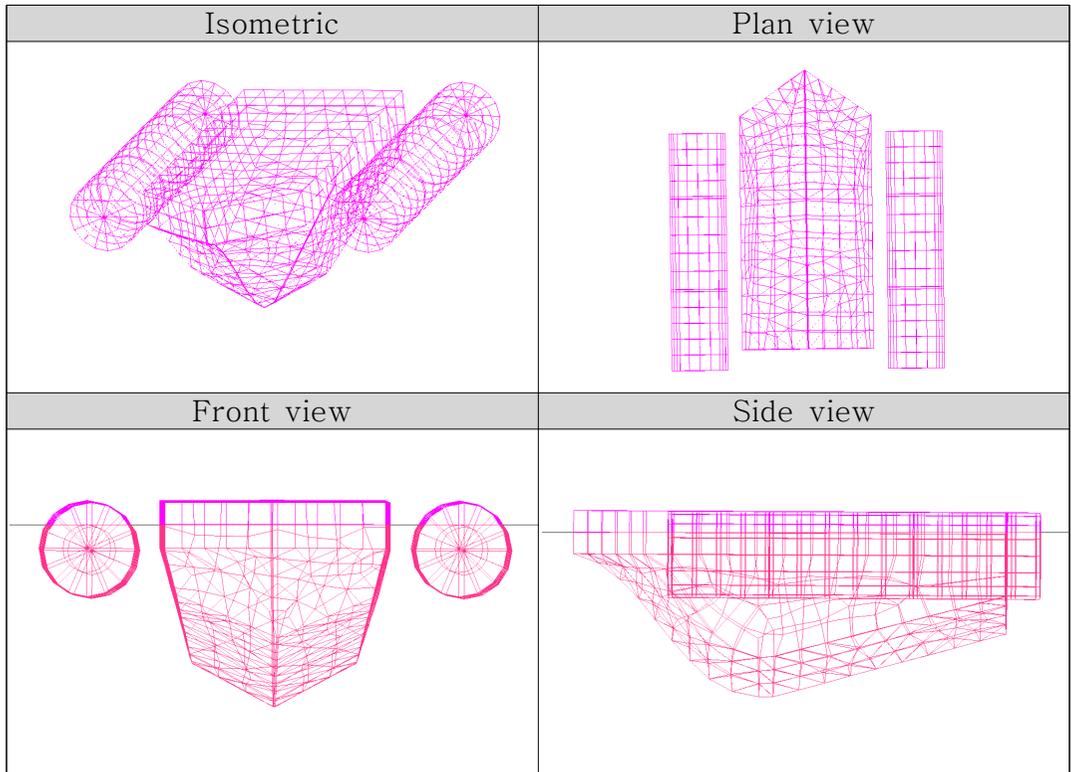


Fig. 2.3 Wire frame model of Nomad Buoy

2.2.2 유체력 계산

부이의 유체력값은 2차 방사/회절(Diffraction / Radiation) 문제를 해석하는 상용 프로그램인 MOSES를 사용하여 계산하였다. 모든 유체력 계수는 주파수 영역에서 계산되었으며 Fig. 2.4~Fig. 2.9는 displacement RAO, Fig. 2.10~Fig. 2.15는 load RAO, Fig. 2.16~Fig. 2.18는 QTF 계산 결과이다.

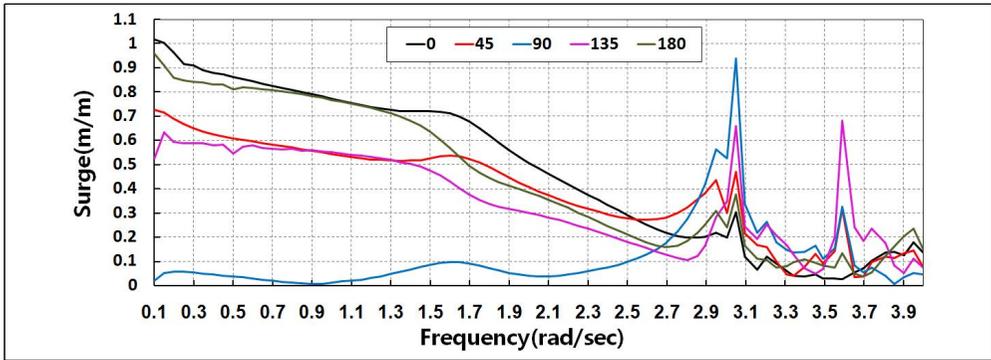


Fig. 2.4 Displacement RAO(Surge) for Nomad Buoy

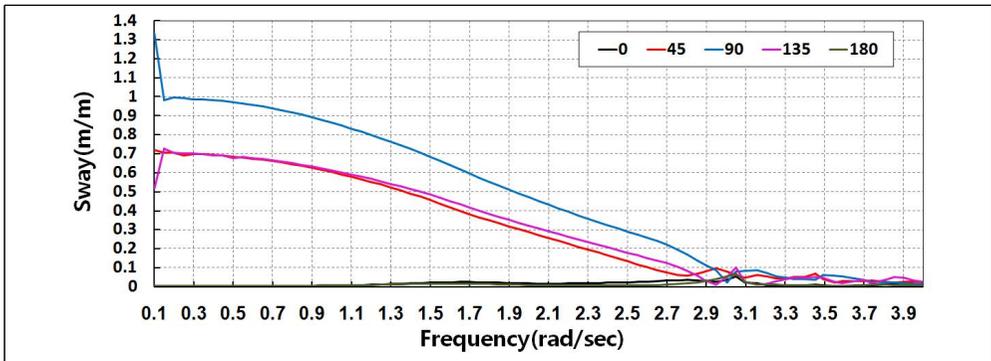


Fig. 2.5 Displacement RAO(Sway) for Nomad Buoy

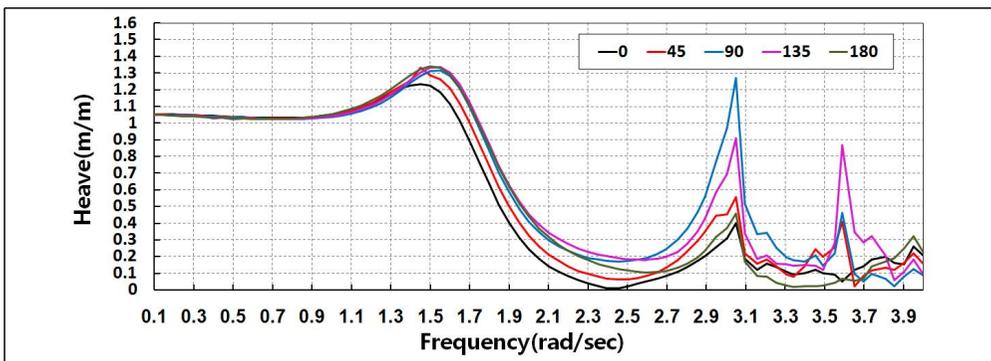


Fig. 2.6 Displacement RAO(Heave) for Nomad Buoy

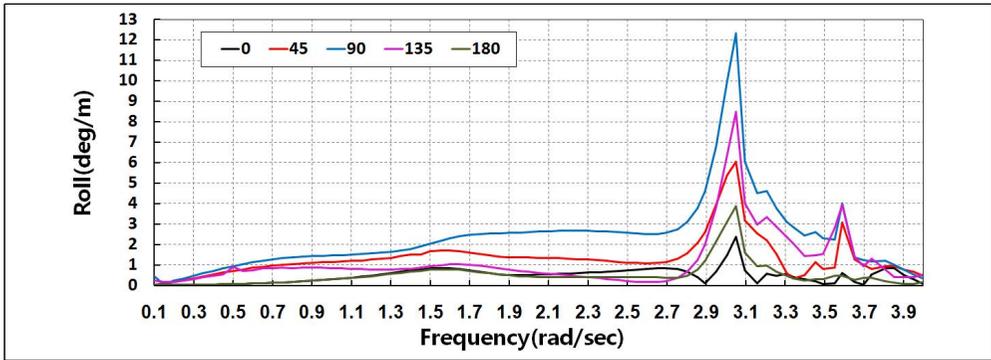


Fig. 2.7 Displacement RAO(Roll) for Nomad Buoy

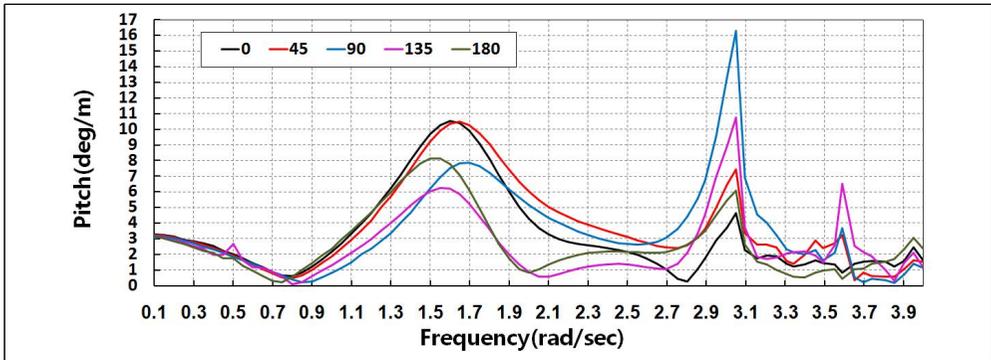


Fig. 2.8 Displacement RAO(Pitch) for Nomad Buoy

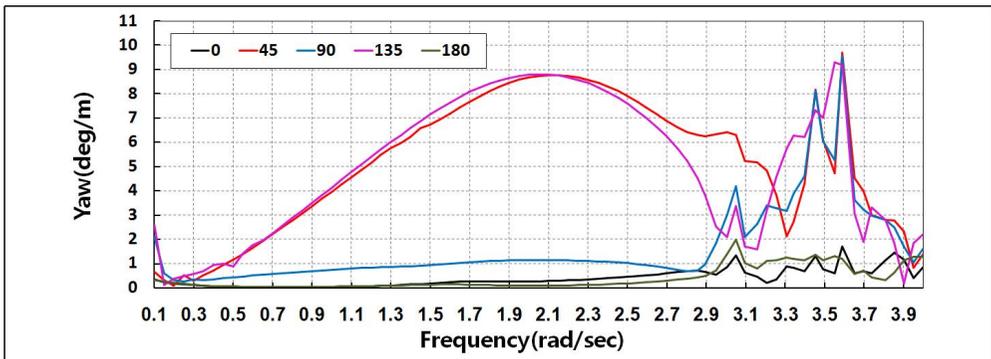


Fig. 2.9 Displacement RAO(Yaw) for Nomad Buoy

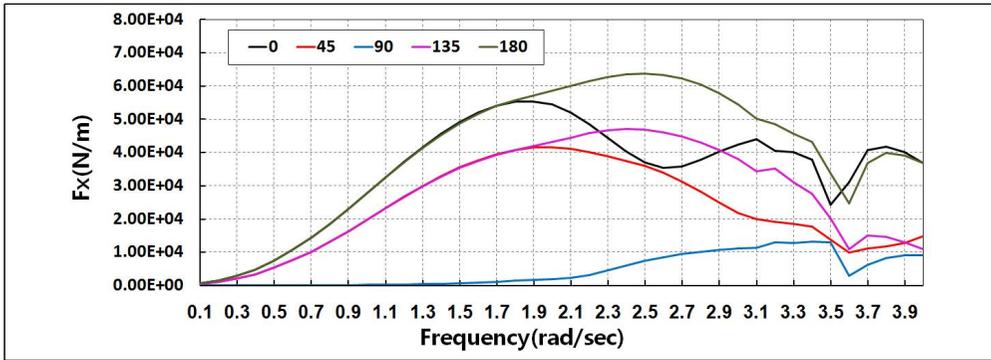


Fig. 2.10 Load RAO(F_x) for Nomad Buoy

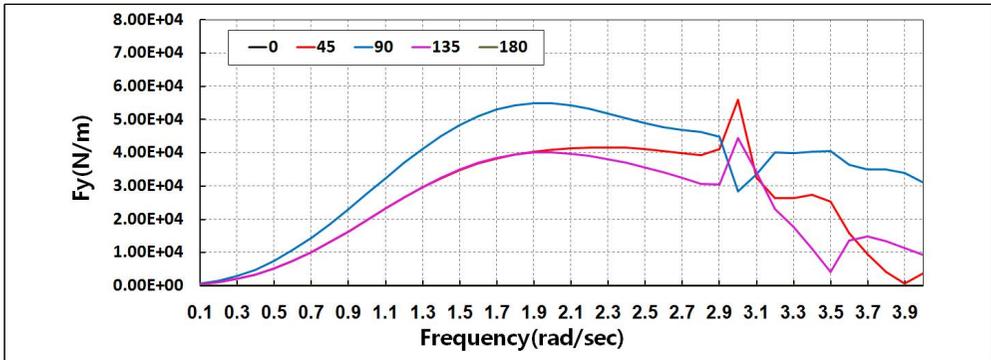


Fig. 2.11 Load RAO(F_y) for Nomad Buoy

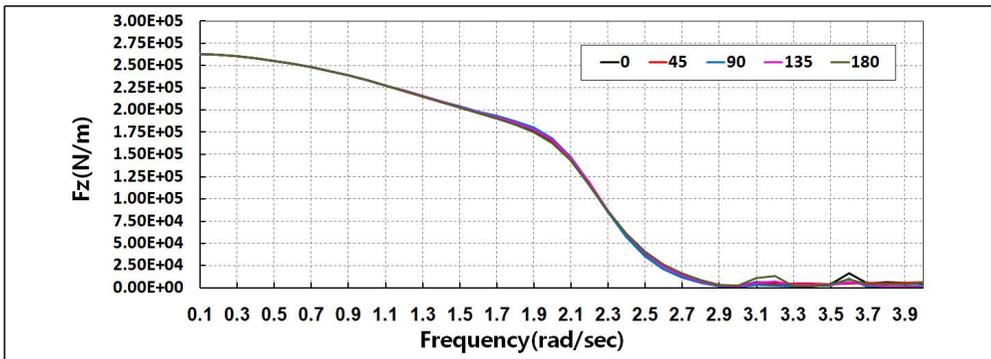


Fig. 2.12 Load RAO(F_z) for Nomad Buoy

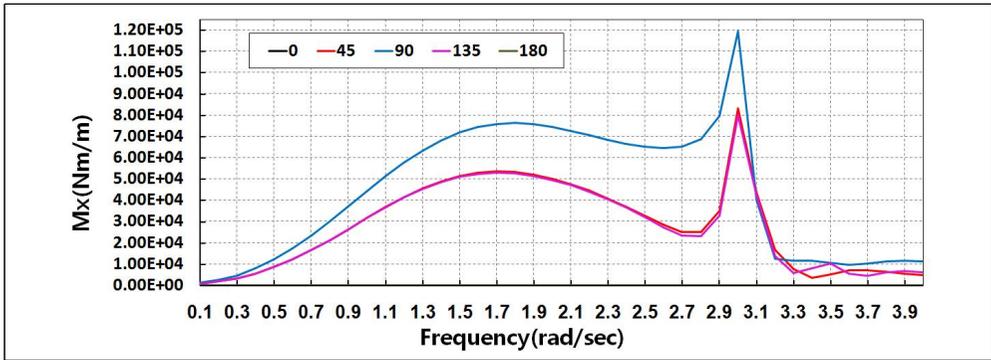


Fig. 2.13 Load RAO(M_x) for Nomad Buoy

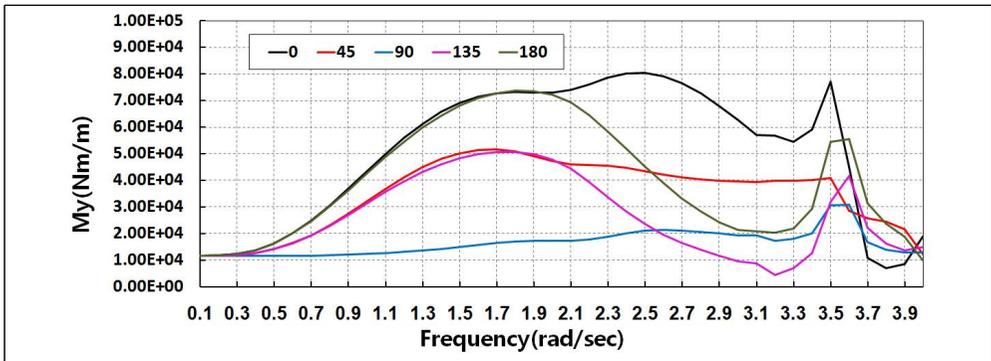


Fig. 2.14 Load RAO(M_y) for Nomad Buoy

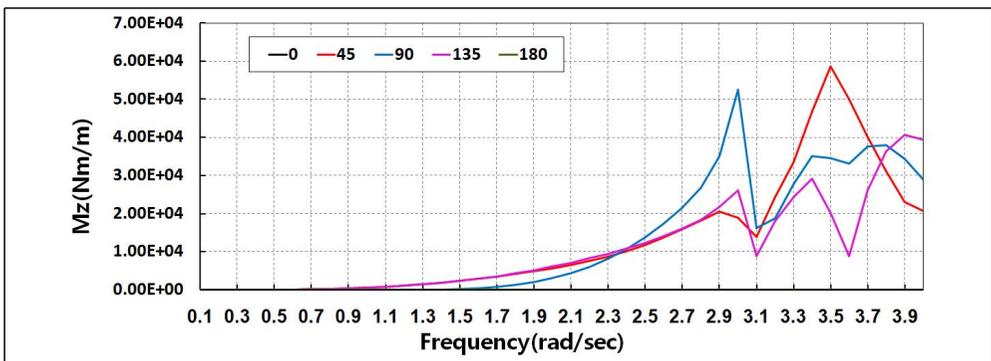


Fig. 2.15 Load RAO(M_z) for Nomad Buoy

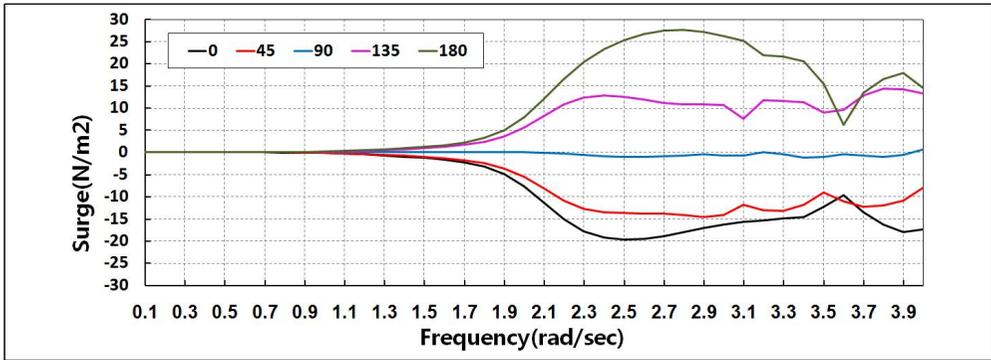


Fig. 2.16 QTF(Wave Drift)-Surge for Nomad Buoy

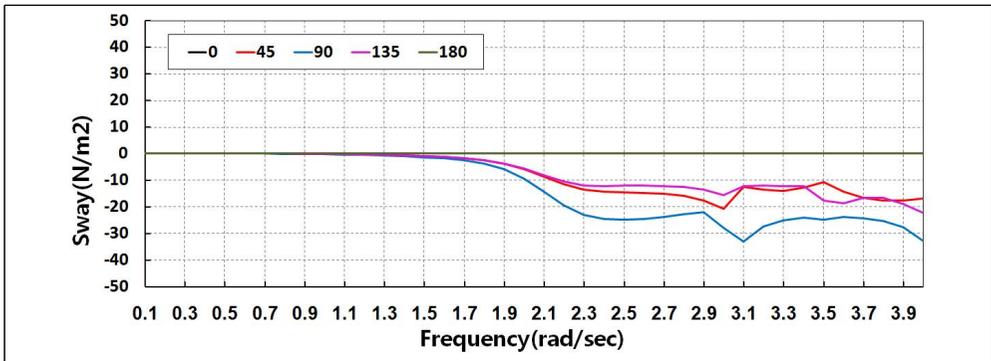


Fig. 2.17 QTF(Wave Drift)-Sway for Nomad Buoy

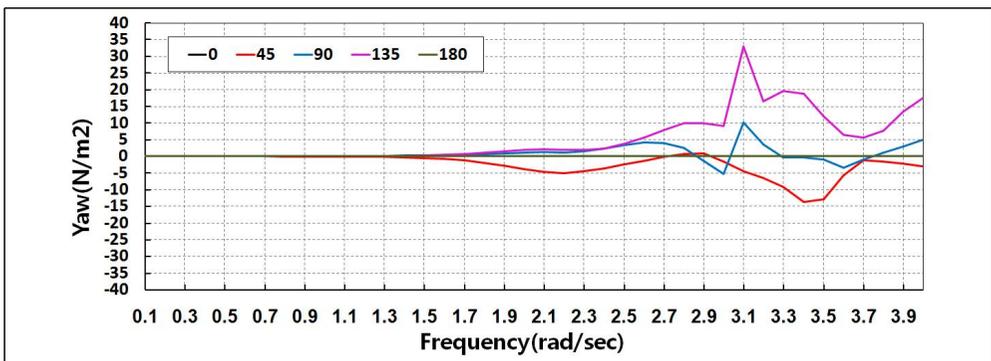


Fig. 2.18 QTF(Wave Drift)-Yaw for Nomad Buoy

2.2.3 부이 복원성

부이의 복원성은 한국선급의 일반 복원성기준과 바람에 대한 복원성 기준을 적용하여 평가하였다. 한국선급이 규정하는 선박의 비손상시 복원성은 선박의 길이가 24m 이상인 선박에 적용되나 길이가 6.5m로 이보다 작은 부이 역시 복원성능을 판단하는데 이 기준을 적용하더라도 문제가 없을 것으로 사료된다.

부이는 선체 내에 액체 화물을 적재하고 있지 않아 자유표면 효과는 고려하지 않았으며 운용중에는 장비의 이동이나 추가 적재에 의한 흘수 및 무게중심은 변동되지 않는다.

한국선급에서 요구하는 일반적인 선박의 복원성은 다음의 기준에 적합하여야 한다.

- 1) 복원력 곡선(GZ곡선) 아래의 면적은 횡경사각 $\Theta=30^\circ$ 까지는 0.055m-rad 이상이어야 하며 또한, $\Theta=40^\circ$ 까지 또는 해수유입각이 40° 미만인 경우에는 해수유입각 θ_f 까지는 0.09m-rad 이상이어야 한다. 또한 횡경사각이 30° 와 40° 의 사이에서 또는 θ_f 가 40° 미만의 경우에 있어서 30° 와 θ_f 사이의 복원력곡선 아래의 면적은 0.03m-rad 이상이어야 한다.
- 2) 30° 이상의 횡경사각에서, 복원정 GZ는 0.02m 이상이어야 한다.
- 3) 최대복원정은 30° 를 초과하는 횡경사각에서 나타나는 것이 바람직하고 25° 미만에서 나타나서는 아니 된다.
- 4) 자유표면효과에 의하여 수정된 초기 메타센터높이 G_0M 은 0.15m 이상이어야 한다. 다만, 어선의 경우에는 0.35m 이상이어야 한다.

부이가 바람에 의한 복원성 기준을 만족하기 위해서는 아래 복원선 곡선에서 면적 b는 면적 a 이상이어야 한다.

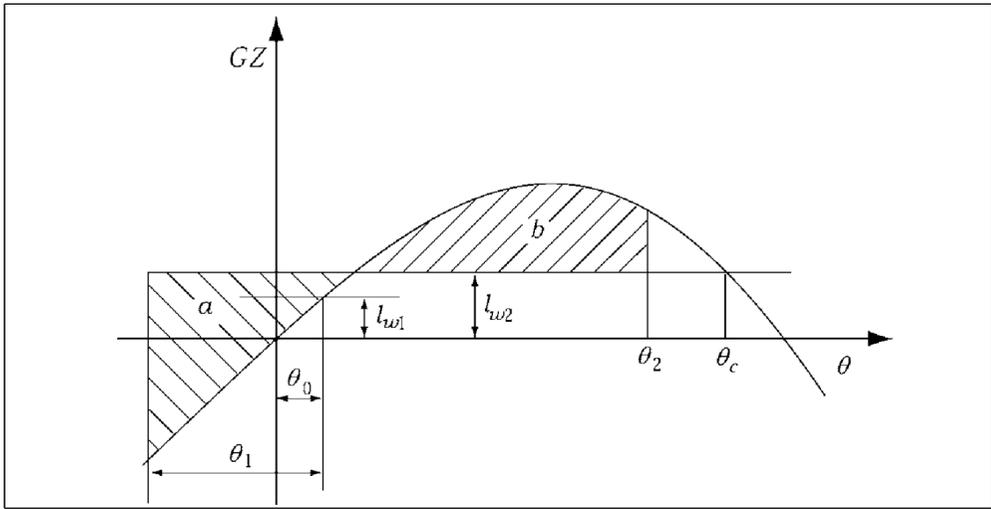


Fig. 2.19 Stability criteria

여기서,

l_{w1} : 바람에 의한 경사우력정(m)

l_{w2} : 돌풍에 의한 경사우력정(m), $l_{w2} = 1.5l_{w1}$

a : 복원력 곡선 상에서 l_{w2} 및 θ_r 에 의하여 둘러싸인 부분의 면적($m \cdot rad$)

b : 복원력 곡선 상에서 l_{w2} 및 θ_2 에 의하여 둘러싸인 부분의 면적($m \cdot rad$)

θ_r : 횡요정지각($^{\circ}$), $\theta_r = \theta_0 - \theta_1$ ($^{\circ}$)

θ_c : 경사우력정 l_{w2} 와 복원력곡선과의 제2차 교차점에서의 경사각($^{\circ}$)

θ_0 : 정상풍에 의한 횡경사각($^{\circ}$)

θ_1 : 파도에 의한 횡경사각($^{\circ}$), $\theta_1 = 0.109X_1X_2k\sqrt{rs}$

θ_2 : 해수유입각($^{\circ}$), 50° 또는 θ_c 중에서 작은값

X_1 : B/d 의 값에 따라 결정되어지는 값

Table 2.5 The value of X_1

B/d'	≤ 2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	$3.5 \leq$
X_1	1.0	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.80

d' : 선박의 평균흘수(m)

X_2 : C'_b 의 값에 따라 결정되어지는 값

Table 2.6 The value of X_2

C'_b	≤ 0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	$0.70 \leq$
X_2	0.75	0.82	0.89	0.95	0.97	1.0

C'_b : 선박의 방형계수, 식 (1)에 의한 값

$$C'_b = \frac{W}{1.025L'Bd'} \quad (1)$$

L' : 선박의 흘수선상의 최대길이(m)

k : 만곡부의 형상과 빌지킬의 유무에 따라 다음에 의한 계수

Table 2.7 The value of k

$100A_k/L'B$	0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	$4.0 \leq$
k	1.0	0.98	0.95	0.88	0.79	0.74	0.72	0.70

A_k : 빌지킬의 전면적 또는 바용골의 측면 투영면적(m^2)

r : 계수로서 식 (2)에 의한 값(1.0 이상일 경우 1.0 적용)

$$r = 0.73 + 0.6 \frac{OG}{d'} \quad (2)$$

OG : 선체 중심으로부터 흘수선까지의 거리(m)

s : T의 값에 따라 결정되어지는 값

Table 2.8 The value of s

T	≤ 6	7	8	12	14	16	18	$20 \leq$
s	0.100	0.098	0.093	0.065	0.053	0.044	0.038	0.035

T : 횡요주기(sec), 식 (3)에 의한 값

$$T = \frac{2B}{\sqrt{G_0M}} \left(0.373 + 0.023 \frac{B}{d} - 0.043 \frac{L'}{100} \right) \quad (3)$$

G_0M : 초기 메타센터높이(m)

바람에 의한 경사우력정은 식 (4)에 의해 계산된다.

$$l_{w1} = \frac{0.514AZ}{W} \quad (4)$$

여기서, l_{w1} : 정상풍에 의한 경사우력정(m)

A : 수선상부 선체 투영면적(m^2)

Z : A 의 중심으로부터 수선하부 선체의 측면적 중심까지의 거리(m)

W : 배수량(ton)

부이의 복원성 평가 항목 중 초기 메타센터높이(G_0M)는 Table 2.9와 같이 2.5m로 계산되며 허용 G_0M 0.15m 이상으로 허용기준을 만족하였다. 부이의 복원성 곡선은 Fig. 2.20과 같으며 복원성 평가 결과는 Table 2.10과 같다. 최대 복원정(GZ) 높이가 횡경사각 40° 에서 0.62m이며, 복원력 곡선 아래의 면적도 일반 복원성 기준의 허용기준을 만족한다. 그리고 면적 b가 면적 a 보다 크므로 바람에 대한 복원성 기준을 만족한다.

Table 2.9 The result of GM calculation of Nomad Buoy

Description	Dimension	Remark
Displacement	30,350kg	
KG	1.308m	
KB	1.6m	
I	65.43m ⁴	
V	29.61m ³	
BM	2.21m	BM = I/V
GM	2.5m	GM= KB+BM-KG
Allowable GM	0.15m	
Stability	OK	

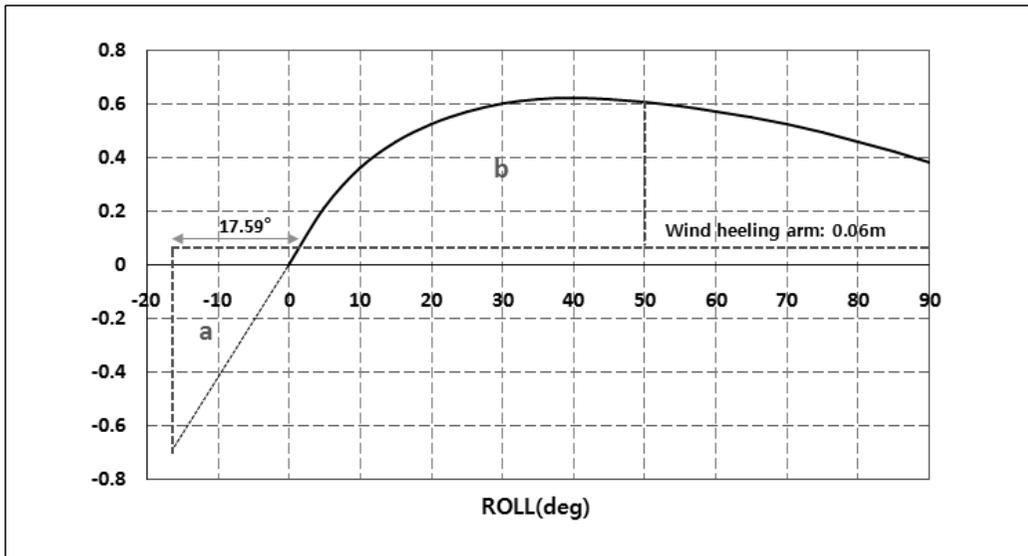


Fig. 2.20 Stability curve of Nomad Buoy(GZ Curve)

Table 2.10 The result of stability of Nomad Buoy

Description	Stability range	Calculation result
G_oM	0.15m or more	2.5m, O.K
GZ	0.02m or moor (When the roll is more than 30°)	0.62m, O.K
Maximum GZ	The roll is 30° or more	40° , O.K
Area under the GZ Curve	Roll(0°~30°) > 0.055m · rad	0.208m · rad, O.K
	Roll(30°~40°) > 0.030m · rad	0.107m · rad, O.K
	Roll(0°~40°) > 0.090m · rad	0.315m · rad, O.K

2.3 계류형식 및 계류선 구성

2.3.1 계류형식 분석

부유체 계류방식에는 크게 일점계류방식(single point mooring system)과 다점계류방식(spread mooring system)이 있다. 일점계류방식은 부유체가 수면에 떠서 바람이나 파도와 같은 외력 방향에 따라 자유롭게 회전하여 계류력을 최소화하는 계류방식으로 카테너리 앵커 레그 계류(catenary anchor leg mooring, CALM), 단일 앵커 레그 계류(single anchor leg mooring, SALM), 터렛(turret) 계류 등이 있다. 다점계류방식은 부유체가 계류선에 직접적으로 구속되어 그 위치를 유지시키는 방법으로 카테나리(catenary) 계류, 토트(taut)/ 반 토트(semi-taut) 계류, 수직 계류 등이 있다.

Nomad형 부이는 파도를 타면서 외력 방향에 자유롭게 회전하고 표류하도록 1점계류 방식을 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에 적용된 nomad형 부이는 배열케이블과 dynamic cable로 구성된 수중케이블과 연결되어 있어 1점 계류를 할 경우 케이블과 계류선이 간섭되거나 꼬일 수 있다. 그럴 경우 케이블에 과도한 인장력이나 마모 및 손상이 발생할 수 있으므로, 케이블과 계류선이 간섭되지 않도록 하기 위해서는 1점계류 보다는 다점계류방식을 적용하는 것이 유리하다.

다점계류 방식 중 토트 계류나 수직 계류 방식은 계류범위가 좁고 부체의 수평이동량이 적어 계류선 길이를 짧게 할 수 있어 경제적이며 해저지형이 급격하게 변하는 지역에도 유리하다. 그러나 높은 파도에서는 부체가 홀수면 이상으로 수면에 잠길 수 있어 잉여부력이 클 경우 장력이 급격하게 증가될 수 있으므로 계류선 사이즈가 커져야 하고 앵커 들림각이 커 수평저항력을 크게 기대할 수 없으므로 앵커 중량이 늘어날 수 있다. 반면 카테너리 계류방식은 계류범위가 넓고 부체의 수평이동량이 커 계류선 길이가 상대적으로 길어지며 해저지형이 평탄한 지역에 유리하다. 그러나 카테너리 형상에 의해 부체가 파도에 순응하며 거동할 수 있으므로 장력 변화가 심하지 않고 앵커 들림각을 작게

할 수 있어 수평저항력을 기대할 수 있다.

본 연구에 적용된 부이형 수중감시체계는 잉여부력이 작고 건현이 낮은 부이의 특성상 catenary mooring 방식이 해수면의 움직임에 대한 대응성을 높여 상부 장비들의 침수 가능성을 줄일 수 있으며, 계류장력을 최소화 하여 앵커를 경량화 할 수 있는 최적의 계류방식으로 판단된다.

2.3.2 계류선 개수의 결정

일반적으로 nomad형 부이는 파도를 타면서 외력 작용방향에 따라 자유롭게 이동하도록 1점계류 방식을 적용한다. 1점계류 방식은 설치 및 회수가 용이하고 외력의 영향을 가장 적게 받을 수 있어 매우 경제적인 계류방식이다. 그러나 본 연구에 적용된 nomad형 부이는 선체 측면으로 dynamic cable이 해저에 포설된 배열케이블과 연결되므로 1점 계류를 할 경우 수중케이블과 계류선이 간섭되거나 꼬일 수 있으며 운동범위가 넓다는 단점이 있다. 그리고 2점 또는 3점의 다점계류를 할 경우에는 1점계류에 비해 설치 및 회수가 번거롭고 경제성이 떨어지긴 하나 부이의 운동범위를 줄일 수 있고 부이의 선수동요(yawing)를 구속할 수 있어 계류선과 케이블의 꼬임이나 간섭을 방지할 수 있다. 하지만 계류선과 dynamic cable 사이의 간격이 충분치 않고 계류선의 초기장력이 적절하지 않으면 파랑 중 부이의 선수동요나 케이블 거동으로 인해 간섭이 발생할 수 있다. 이러한 계류선과 케이블 간 꼬임이나 간섭은 장기적으로는 케이블 손상을 유발할 우려가 있으므로 이러한 문제를 방지할 수 있는 최적의 계류방식에 대한 안정성이 사전에 평가되어야 한다.

따라서 계류선의 적정 개수를 산정하기 위하여 계류 시뮬레이션을 통해 1점, 2점, 3점 계류시의 거동특성에 대한 초기연구를 수행하였다. Fig. 2.21~Fig. 2.29는 계류선 개수에 따른 각각의 계류형상과 계류선과 dynamic cable의 간섭 여부를 보여준다. 1점 계류시에는 부이가 외력의 작용방향에 따라 자유롭게 회전하므로 계류선과 케이블 꼬임이 쉽게 발생하였으며, 3점 계류시에는 계류선과 케이블 사이의 벌림각이 좁아 부체의 과도한 운동시 순간적으로 서로 간섭되는 현상이 발생하였다. 그러나 2점 계류시에는 부이의 선수와 선미가 계류선에 의

해 구속되어 있어 선수동요가 크게 발생하지 않았고 계류선과 케이블 사이의 벌림각이 3점 계류시보다 커 간섭현상은 발생하지 않았다.

2점 계류는 계류선이 선수와 선미에 체결되어 부이를 구속시키므로 선수동요에 대한 안정성을 확보할 수 있었으며 계류선과 케이블의 각도가 90도로 충분히 벌어져 있어 과동요시에도 간섭될 확률이 적다. 그리고 계류선 개수를 최소화 할 수 있어 설치 및 회수시 소요시간을 단축할 수 있다. 또한 계류선 1기가 손상되더라도 나머지 계류선으로 생존이 가능하므로 본 부이형 수중감시체계는 2점 계류방식을 적용하였다.

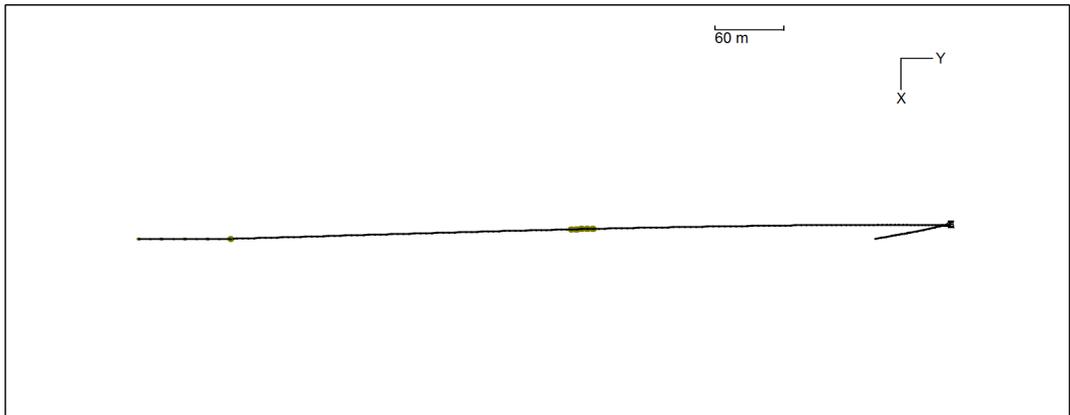


Fig. 2.21 Mooring pattern of 1 point mooring buoy(Plan view)

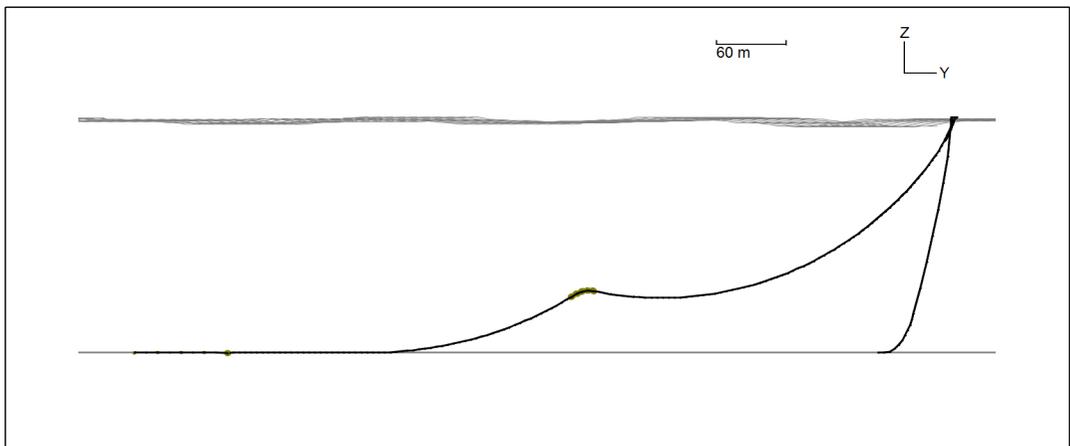


Fig. 2.22 Mooring pattern of 1 point mooring buoy(Side view)

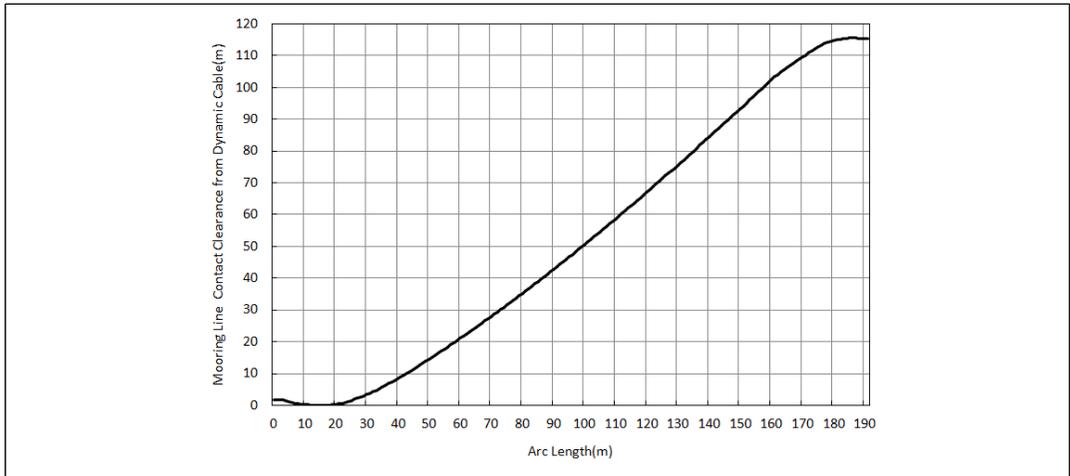


Fig. 2.23 Contact clearance between mooring line and dynamic cable for 1 point mooring buoy

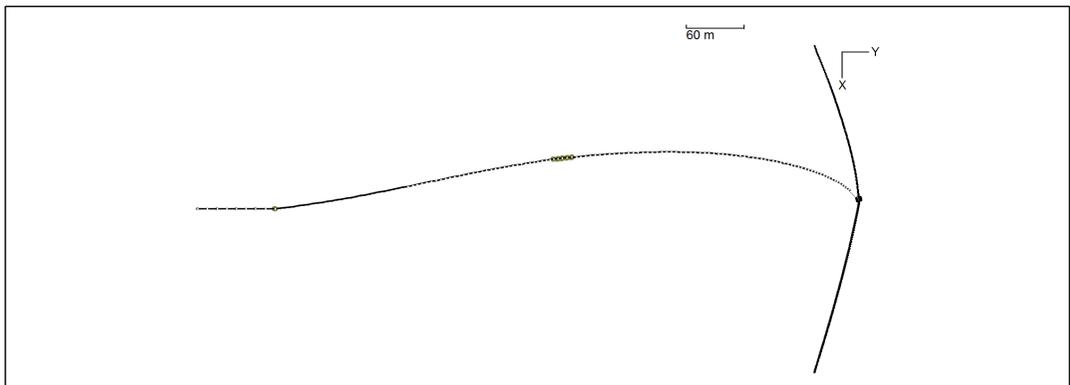


Fig. 2.24 Mooring pattern of 2 point mooring buoy(Plan view)

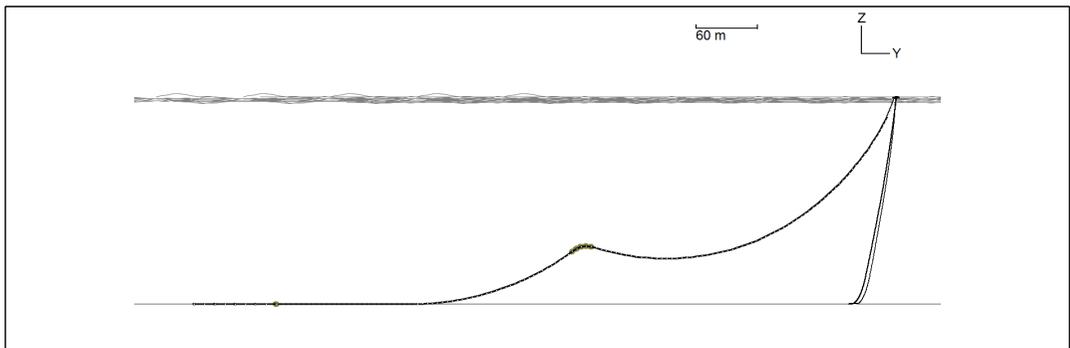


Fig. 2.25 Mooring pattern of 2 point mooring buoy(Side view)

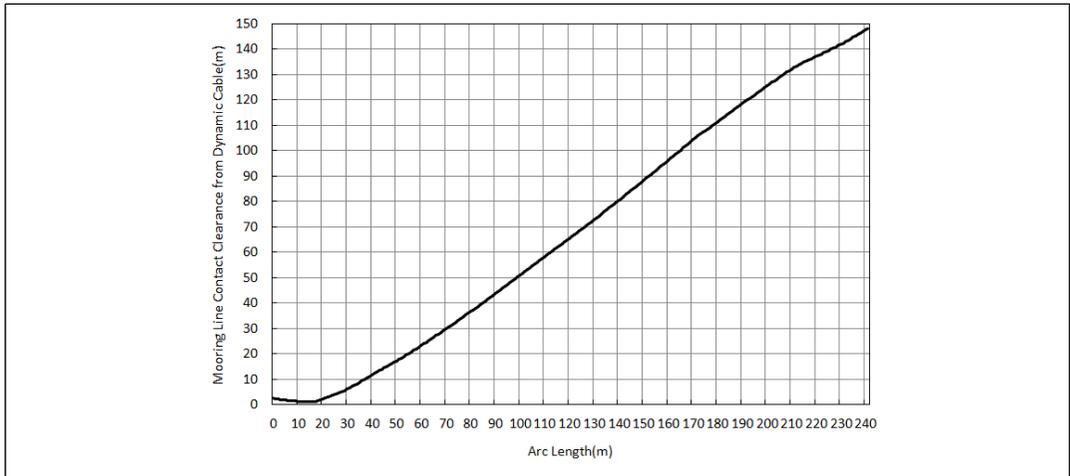


Fig. 2.26 Contact clearance between mooring line and dynamic cable for 2 point mooring buoy

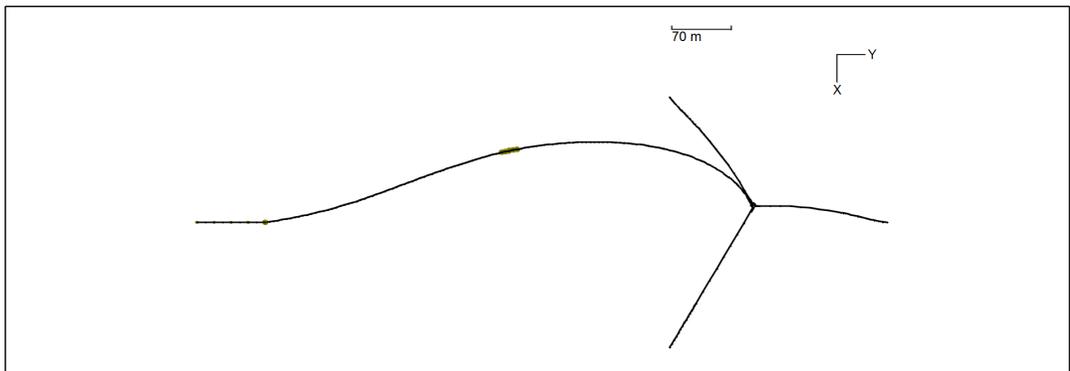


Fig. 2.27 Mooring pattern of 3 point mooring buoy(Plan view)

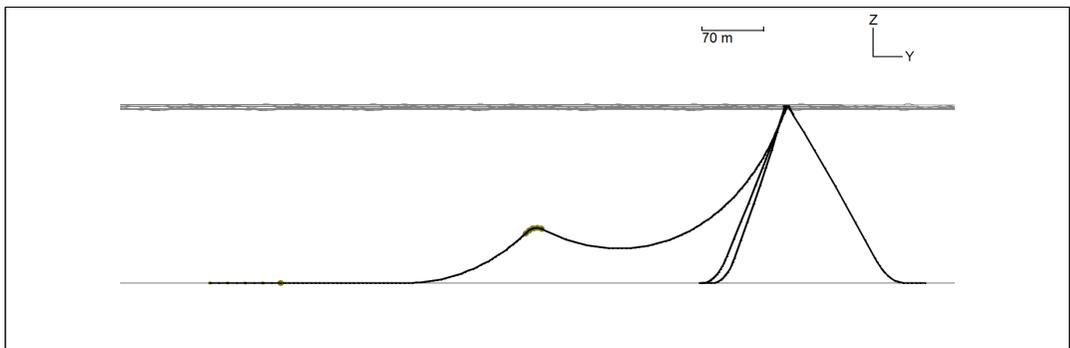


Fig. 2.28 Mooring pattern of 3 point mooring buoy(Side view)

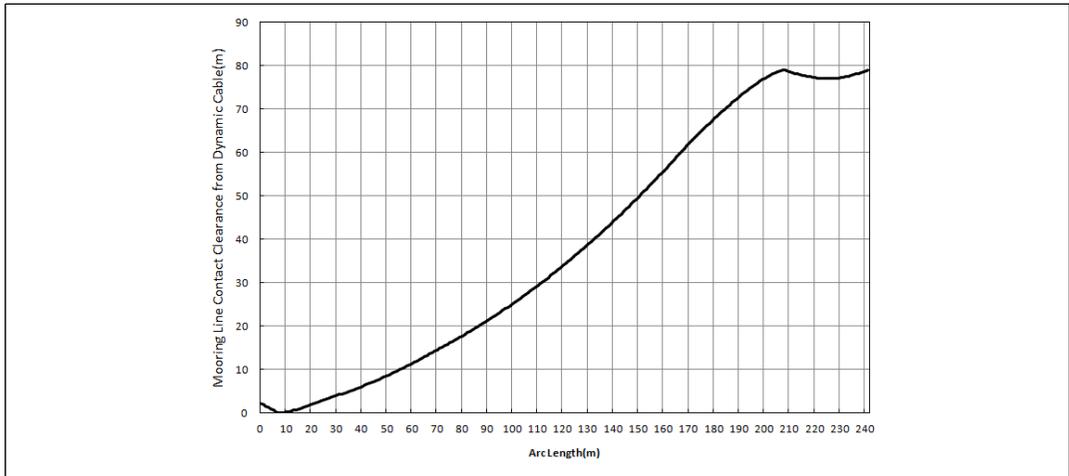


Fig. 2.29 Contact clearance between mooring line and dynamic cable for 3 point mooring buoy

2.3.3 계류선 재질

본 연구에 적용되는 카테너리 계류(catenary mooring) 방식의 계류선은 상부로부터 부이체인(buoy chain), 로프(rope), 앵커체인(anchor chain)으로 구성된다. 부이체인은 비말대에서의 마모 및 부식, 부이의 운동으로 인한 체인 연결부의 마모를 고려하여 길이 10m의 체인을 적용하였다. 앵커체인은 자중에 의한 복원성에 의해 부이의 이동량을 최소화하고 충분한 touch down length를 확보하여 앵커 파주력을 증대시키기 위하여 길이 70m의 중량이 큰 체인을 적용하였다. 그리고 부이체인과 앵커체인 사이의 계류선은 전체 계류선의 중량을 줄이기 위하여 로프를 적용하였다.

일반적으로 해양에서는 계류용으로 와이어 로프와 합성섬유(synthetic fiber) 로프를 주로 사용하며, 합성섬유 로프에는 나일론, 폴리에스터, 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등이 있다. 이 중 폴리에틸렌과 폴리프로필렌은 Table 2.11과 같이 비중이 1.0 보다 작아 수중에서는 물 위로 뜨기 때문에 계류시 카테너리 효과를 감소시킬 수 있으므로 적용성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 와이어, 폴리에스터, 나일론 로프 적용시 계류특성을 평가하여 최적의 계류선 재질을 선정하였다.

Table 2.11 Characteristics of synthetic fiber ropes

Type of Material	Nylon	Polyester	Polyethylene	Polypropylene
Ultimate tensile strength(ton/in)	11.3	9.9	5.6	6.3
Wet strength compared to dry strength	90%	100%	100%	105%
Breaking strength(ton/in)	43.2	32.4	29.7	35.1
Energy absorption (m.ton/m)	6.8	3.2	2.1	4.1
Endurance to cyclic loading	good	excellent	fair	excellent
Dry weight/100ft(kg)	11.8	13.8	8.4	8.4
Specific gravity of fiber	1.14	1.38	0.95	0.91
Buoyancy	Negative	Negative	Positive	Positive
Elasticity elongation at 20% of ultimate strength	17%	7%	6%	10%
Water absorption in % of rope dry weight	9%	1%	0%	0%
Resistance to plastic flow	good	excellent	poor	fair

Fig. 2.30는 로프 재질에 따른 계류특성 분석을 위한 2점 계류 형상을 나타낸다. 수심은 200m, 부이 중심에서 앵커점까지 수평거리는 170m이며 계류선은 부이체인 10m, 앵커체인 70m, 그리고 로프의 경우 계류선 길이와 중량, 신장율에 따라 계류장력의 변화가 상이하므로 길이는 185m, 190m, 195m를 각각 적용하였고, 직경과 중량, axial stiffness는 Table 2.12와 같이 적용하였다. 작용 외력은 파랑, 바람, 조류이며 파랑은 파고 9.0m, 바람은 풍속 42.1m/s, 조류는 유속 1.0m/s를 적용하였다. 그리고 모든 하중이 부이의 선수에서 동시에 작용하는 것으로 가정하였다.

Table 2.13은 로프의 길이, 재질, 직경에 따른 계류선의 최대 장력값 산정 결과이다. Fig. 2.31는 산정된 장력값 중 로프 길이와 재질별 최소 장력값을 비교한 그래프이며 나일론, 폴리에스터, 와이어 순으로 계류장력이 작게 발생하였다. Fig. 2.32~Fig. 2.40은 계류선 길이에 대한 장력 분포를 비교한 그래프이며 와이어와 폴리에스터는 계류선의 앵커부에서 장력이 크게 증가하는 반면 나일론은 앵커부로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이것은 수중케이블의 안정성을 확보하기 위하여 계류선 길이의 제약이 있게 되는데 나일론에 비해 신장율이 작은 와이어와 폴리에스터의 경우 계류선 길이가 충분히 길지 않아 부이의 운동이 고정점인 앵커부에 직접 전달되면서 급격한 장력 증가가 발생기 때문이다. 반면 나일론의 경우 부이의 운동을 흡수할 수 있을 정도로 신장율이 커 장력 변화가 크게 발생하지 않는다. 따라서 와이어나 폴리에스터를 로프 재질로 적용할 경우에는 계류선의 길이가 더 길어져야 하므로 계류범위가 넓어지게 된다. 하지만 나일론 로프를 적용할 경우에는 길이가 짧더라도 장력의 급격한 변화가 발생하지 않으므로 좁은 계류범위 내에서도 안정적인 계류가 가능할 것으로 판단된다.

Table 2.12 Mooring rope material properties applied to mooring analysis

Material	Dia. (mm)	Min breaking load(kN)	Axial stiffness (kN)	Weight(kN/m)		Remark
				in air	in water	
Wire rope	16	253.3	16.160E3	0.016	0.0140	6×19 Wire with wire Core
	24	570.0	36.360E3	0.035	0.0310	
	32	1,013.4	64.640E3	0.063	0.0550	
Polyester rope	34	272.7	1,744	0.013	0.0032	8-Strand multiplait
	43	426.2	2,725	0.020	0.0050	
	52	613.7	3,924	0.028	0.0071	
Nylon rope	34	262.3	188.8	0.010	0.0010	8-Strand multiplait
	42	409.9	295.0	0.016	0.0016	
	51	590.2	424.8	0.023	0.0023	

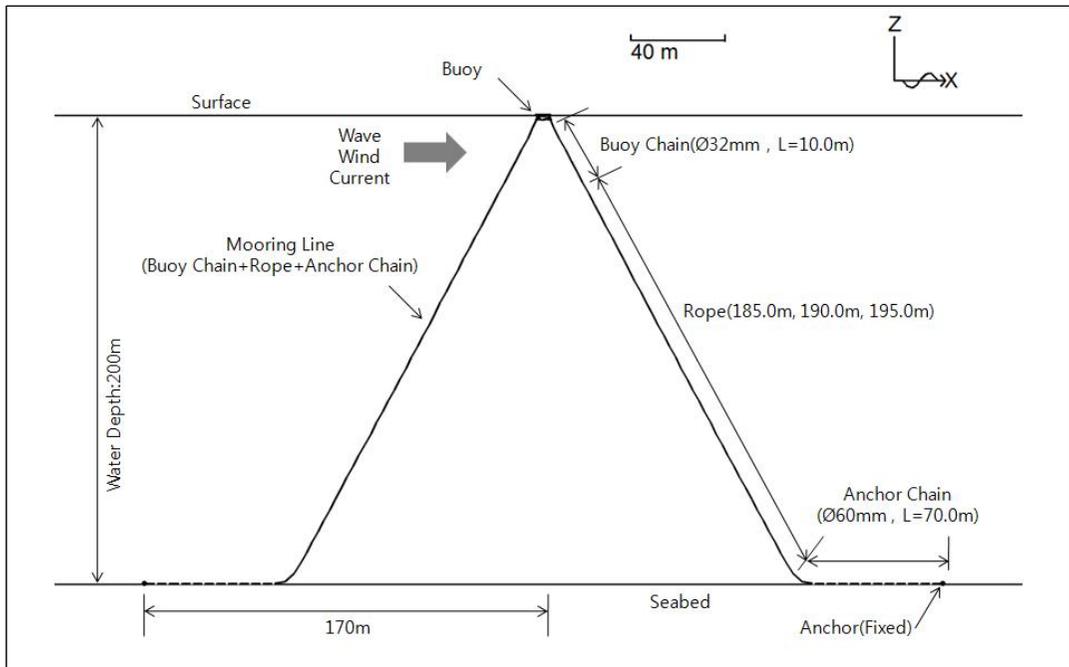


Fig. 2.30 Mooring arrangement(Side view)

Table 2.13 Mooring tension result according to rope material

Description		Wire rope		Polyester rope		Nylon rope	
Mooring line length (m)	Rope length (m)	Dia. (mm)	Max. tension (kN)	Dia. (mm)	Max. tension (kN)	Dia. (mm)	Max. tension (kN)
265	185	16	1,076.3	34	407.0	34	38.0
		24	924.0	43	728.0	42	48.1
		32	3,816.7	52	527.7	51	57.2
270	190	16	562.7	34	1,193.0	34	35.1
		24	950.0	43	447.0	42	43.0
		32	846.0	52	667.0	51	52.5
275	195	16	625.3	34	373.3	34	32.8
		24	970.0	43	477.0	42	39.1
		32	2,865.8	52	447.0	51	47.5

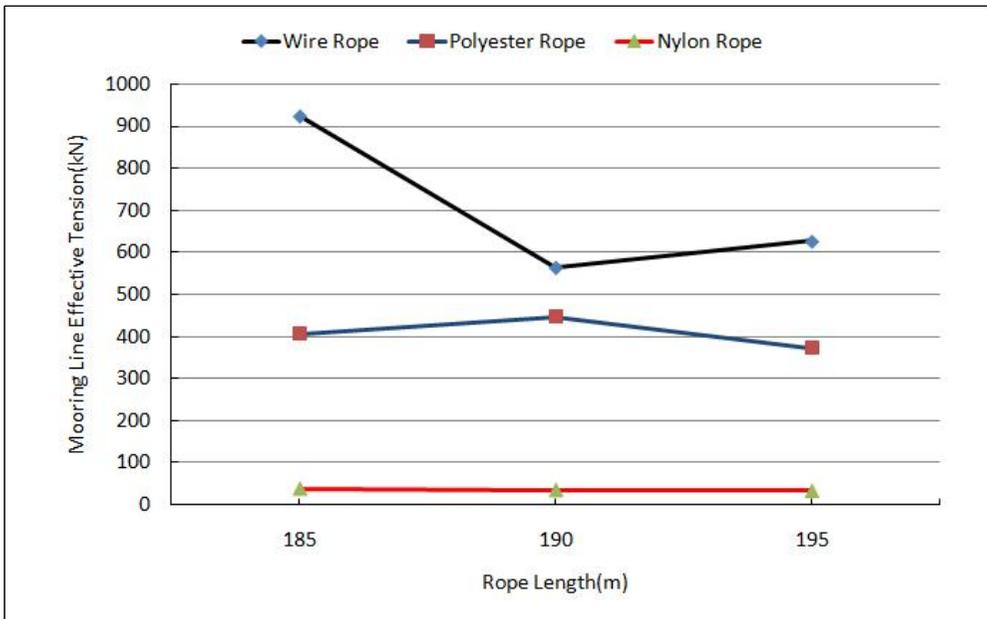


Fig. 2.31 Comparison of mooring tension by mooring rope material

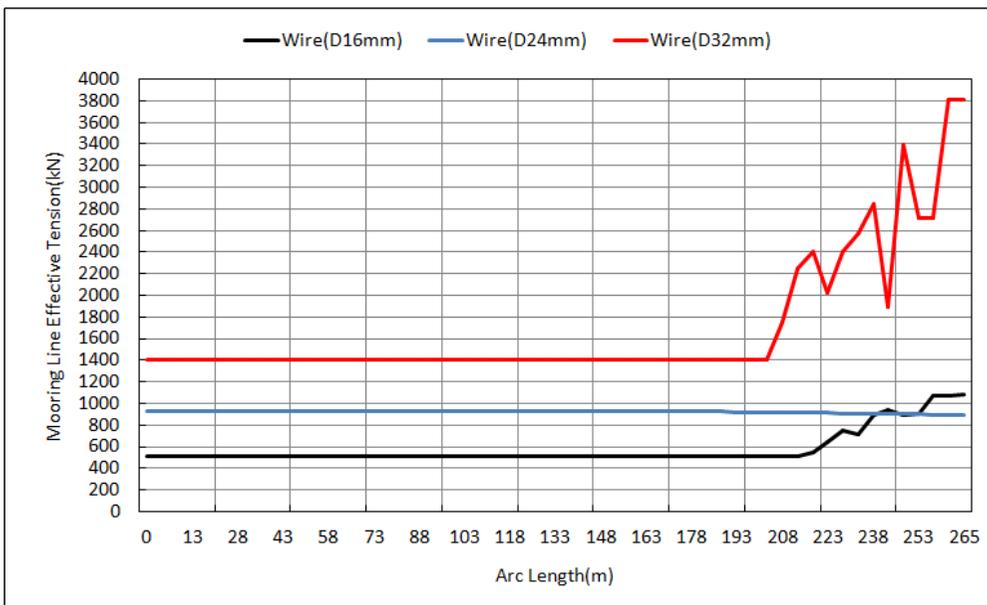


Fig. 2.32 Mooring tension distribution along arc length of wire rope (Rope Length=185m)

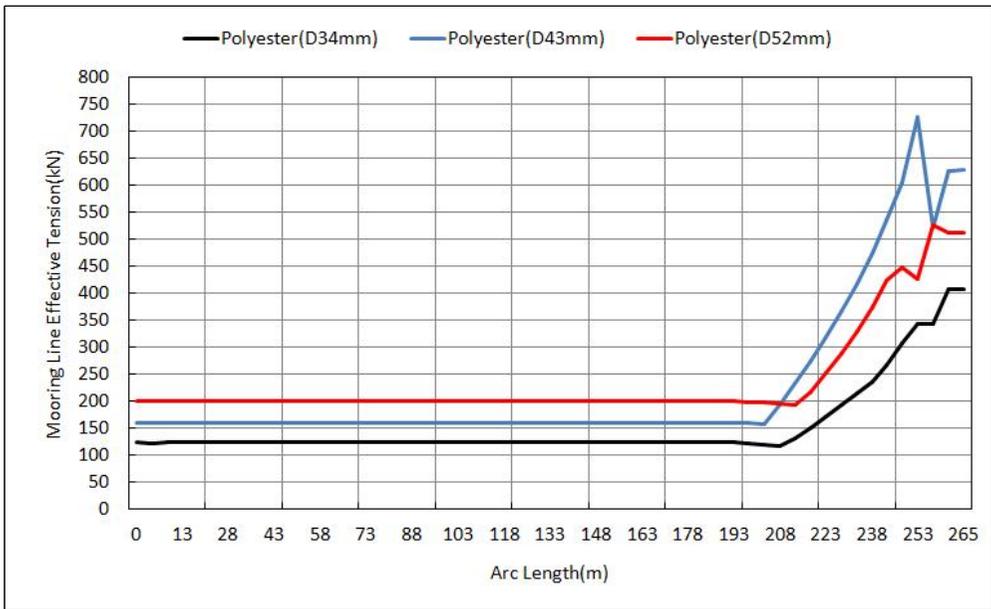


Fig. 2.33 Mooring tension distribution along arc length of polyester rope(Rope Length=185m)

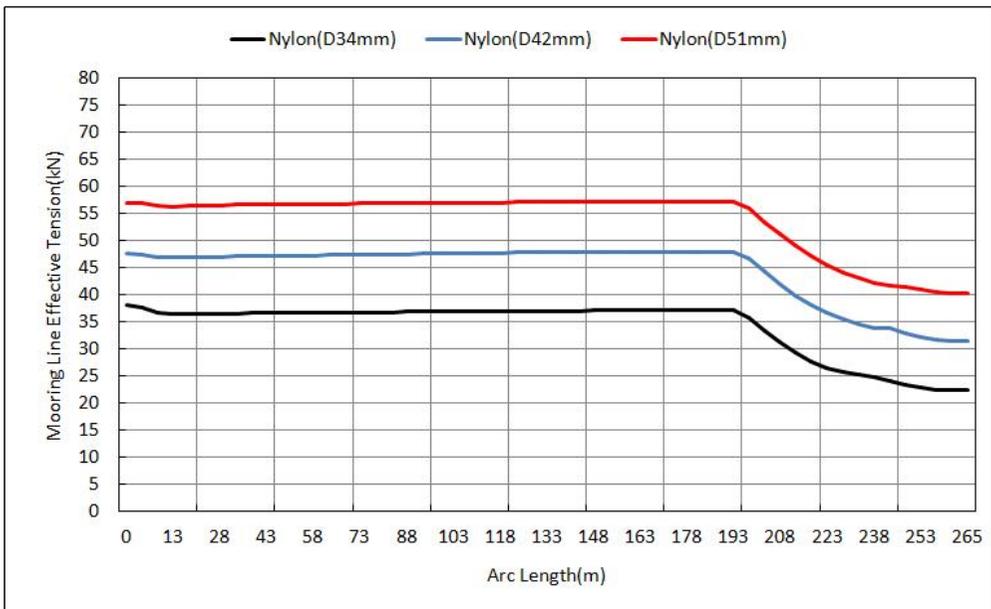


Fig. 2.34 Mooring tension distribution along arc length of nylon rope (Rope Length=185m)

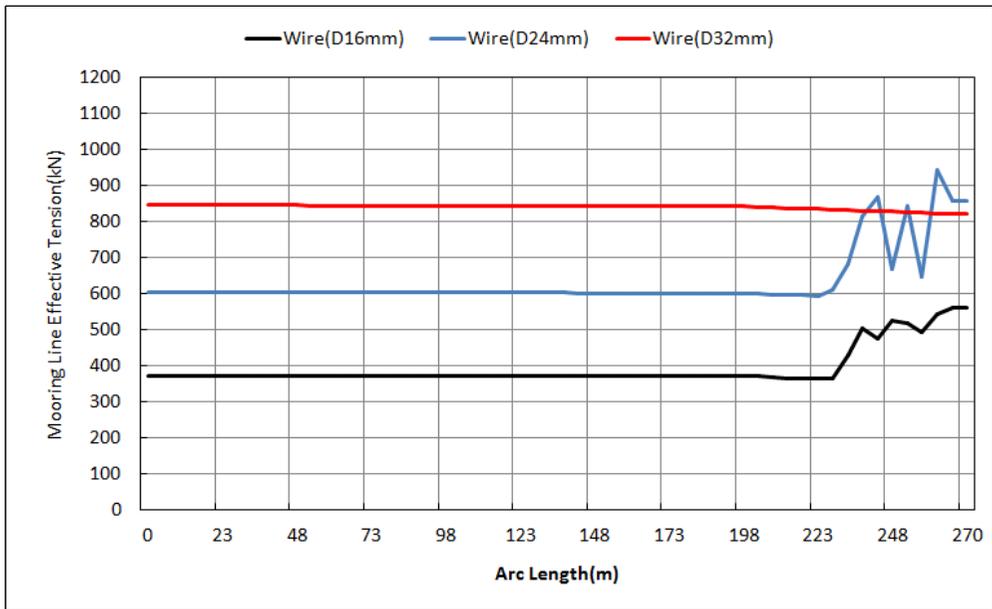


Fig. 2.35 Mooring tension distribution along arc length of wire rope (Rope Length=190m)

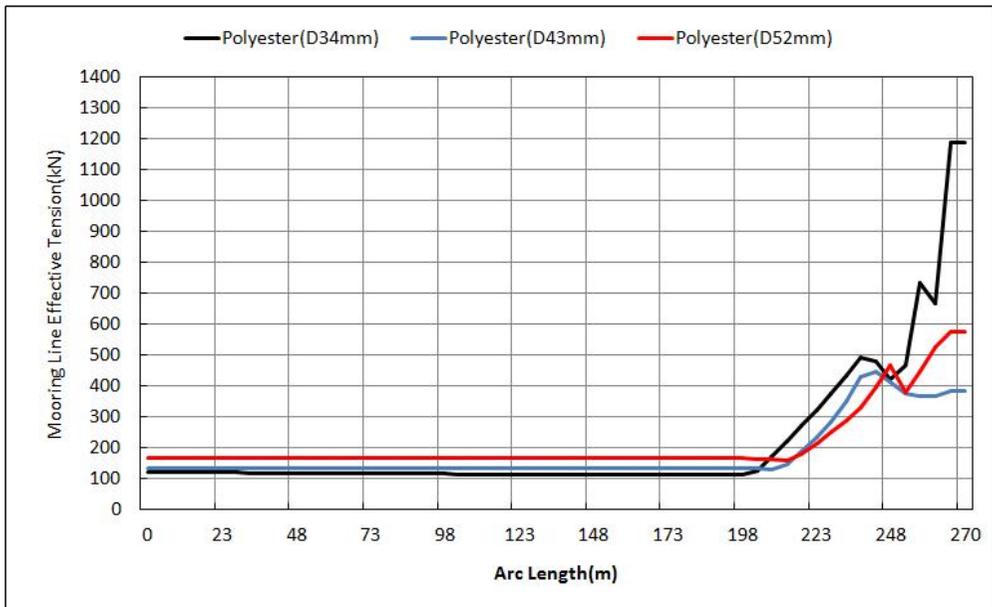


Fig. 2.36 Mooring tension distribution along arc length of polyester rope (Rope Length=190m)

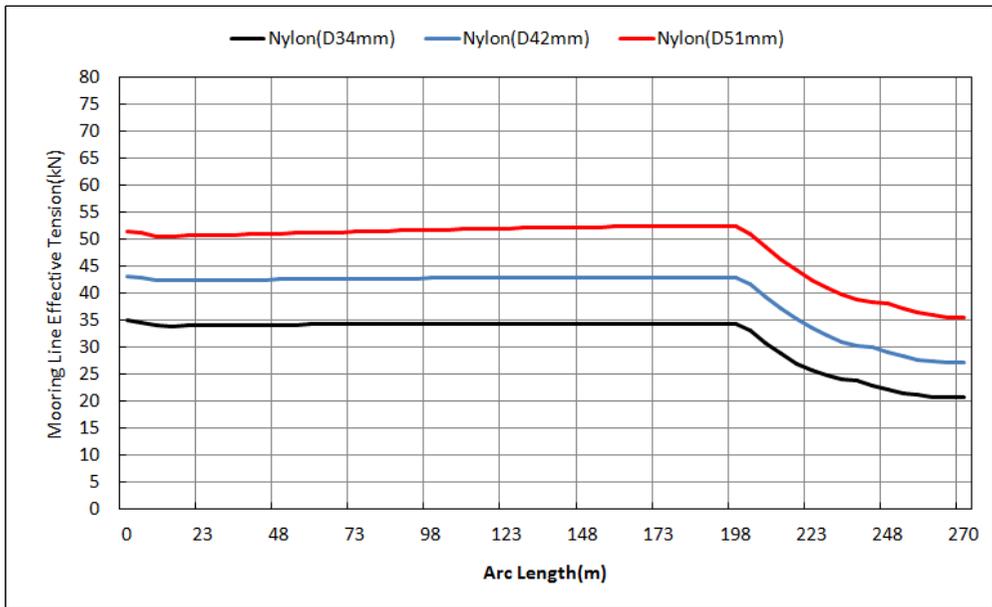


Fig. 2.37 Mooring tension distribution along arc length of nylon rope (Rope Length=190m)

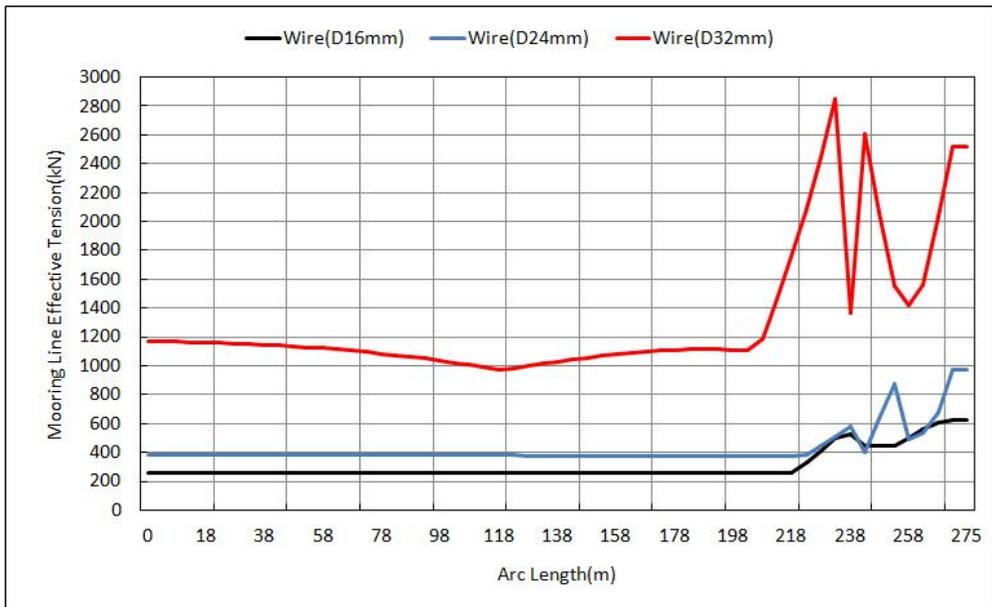


Fig. 2.38 Mooring tension distribution along arc length of wire rope (Rope Length=195m)

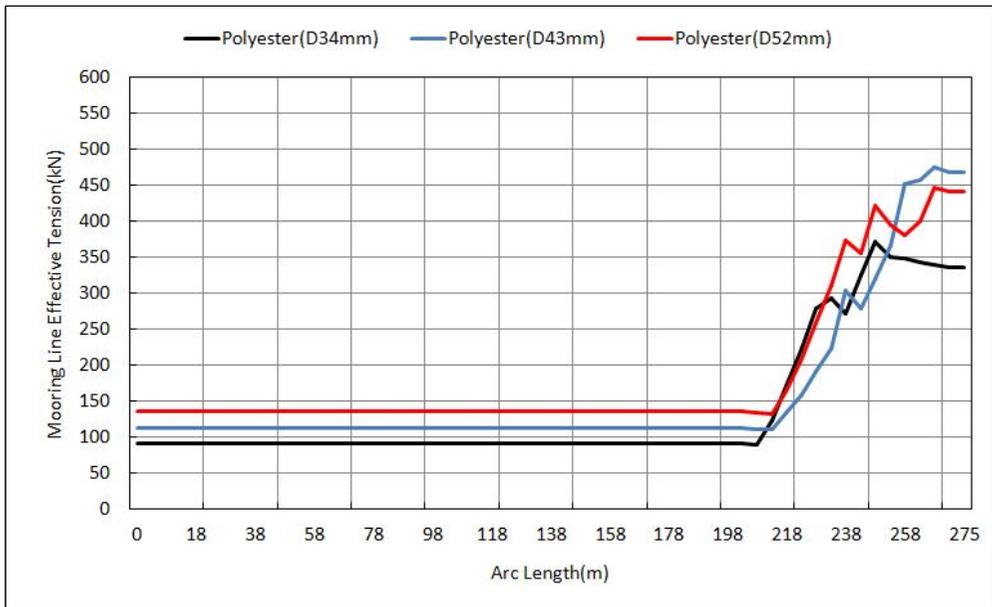


Fig. 2.39 Mooring tension distribution along arc length of polyester rope(Rope Length=195m)

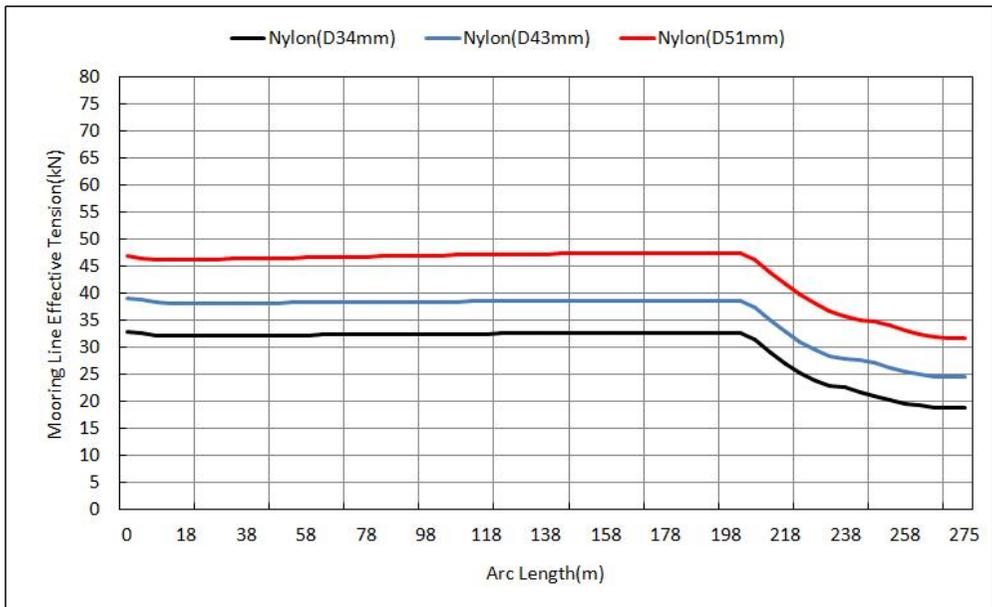


Fig. 2.40 Mooring tension distribution along arc length of nylon rope (Rope Length=195m)

2.3.4 계류형식의 최적화

본 연구에 적용된 카테너리 계류(catenary mooring) 방식의 계류선은 상부에서부터 부이체인(buoy chain), 나일론로프(nylon rope), 앵커체인(anchor chain)으로 구성된다. 부이체인이 위치하는 해수면 부근은 비탈대에서의 마모 및 부식을 고려하여야 하므로 체인을 적용하였다. 중간부분의 나일론로프는 가볍고 신장율이 큰 특성을 갖고 있어 전체 계류선의 중량을 줄이고 부이의 과도한 동요시 인장력이 급격히 증가하는 것을 방지하기 위하여 적용하였다. 그리고 앵커체인은 자중에 의한 복원성에 의해 부이의 이동량을 최소화하고 충분한 touch down length를 확보하여 앵커 파주력을 증대시키기 위하여 중량이 큰 체인을 적용하였다.

수중케이블은 해저에 선형으로 포설되는 배열케이블(길이 80m)과, 부이와 배열케이블을 연결하는 dynamic cable로 구성이 된다. Dynamic cable 중간에는 DBM(distribute buoyancy module)을 부착하여 케이블의 설치형상을 유지시키고 자중에 의해 처지는 것을 방지하며, 부이의 동요에 대한 완충역할을 하도록 하였다. 배열케이블과 dynamic cable 사이에는 부이의 운동에 기인하는 케이블 거동과 인장력이 배열케이블로 직접 전달되지 않도록 싱커(sinker)를 추가되었다.

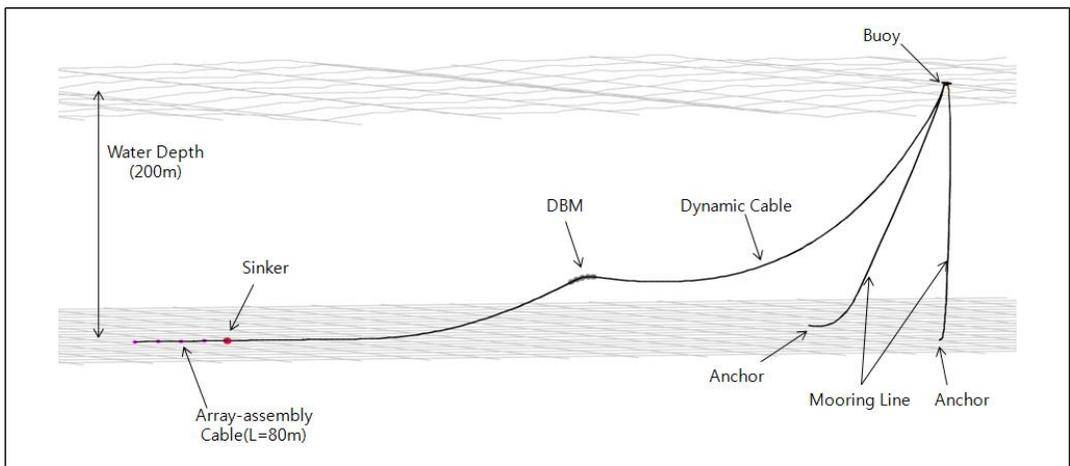


Fig. 2.41 Concept of mooring line and submerged cable

2.4 최적화된 계류시스템의 동적계류안정성 평가

2.4.1 환경조건

부이형 수중감시체계 계류시스템의 계류안정성에 영향을 미치는 환경적 요인으로는 파랑, 바람, 조류, 수심, 해저질 등이 있다. 이 중 설계파랑의 파고는 WMO의 Sea State 7 기준으로 유의파고($H_{1/3}$) 9.0m이며 파주기는 다음과 같은 유의파고와 평균파주기(\bar{T})에 관한 Pierson-Moskowitz식 (5)에 따라 11.58sec를 적용하였다.

$$\bar{T} = 3.86 \sqrt{H_{1/3}} \quad (5)$$

여기서, $H_{1/3}$: 유의파고(m)

\bar{T} : 평균파주기(sec)

불규칙파 재현을 위한 파랑 스펙트럼(Wave Spectrum)은 부이 설치해역이 연안임을 감안하여 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다. JONSWAP 스펙트럼은 완전히 발달된 파도가 아니기 때문에 대양에서의 표준스펙트럼에 비해 스펙트럼의 피크치가 커지고 더 협대역 스펙트럼 형상을 취한다. JONSWAP 스펙트럼식은 식 (6)과 같다.

$$S_{JK}(\omega) = 0.658 C^\alpha S_\zeta(\omega) \quad (6)$$

여기서, $S_{JK}(\omega)$: JONSWAP 스펙트럼

$S_\zeta(\omega)$: ITTC, ISSC 스펙트럼 등 대양(exposed sea)에서의
표준스펙트럼

$C=3.3$

$$\alpha = \exp\left\{-\left(1.296 \bar{T} \cdot \frac{\omega}{2\pi} - 1\right)^2 / 2\gamma^2\right\}$$

단, $\gamma=0.07$; $\omega \leq 2\pi/(1.296 \bar{T})$

$\gamma=0.09$; $\omega > 2\pi/(1.296 \bar{T})$

\bar{T} : 평균과주기

$1.296\bar{T}$: 스펙트럼의 피크 주기(model period)

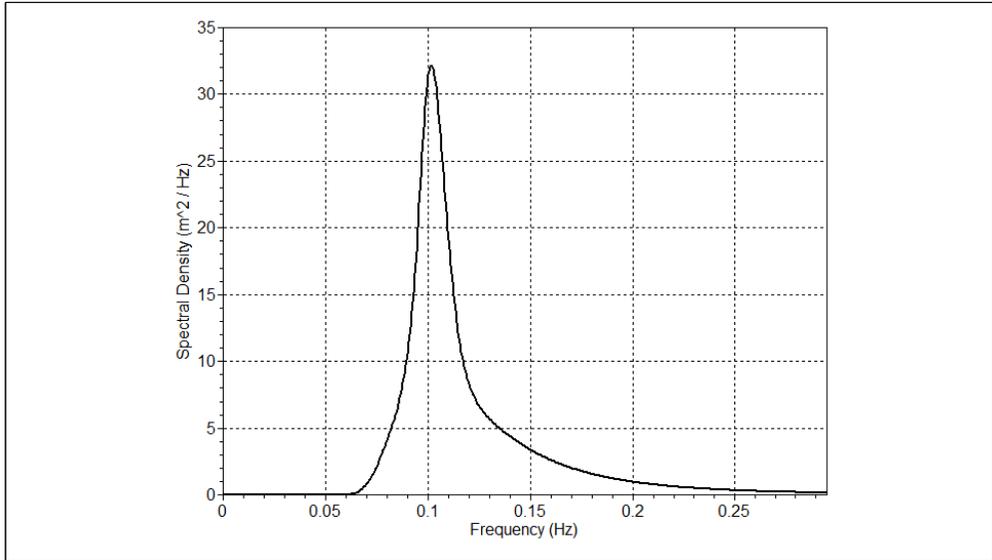


Fig. 2.42 JONSWAP Spectrum

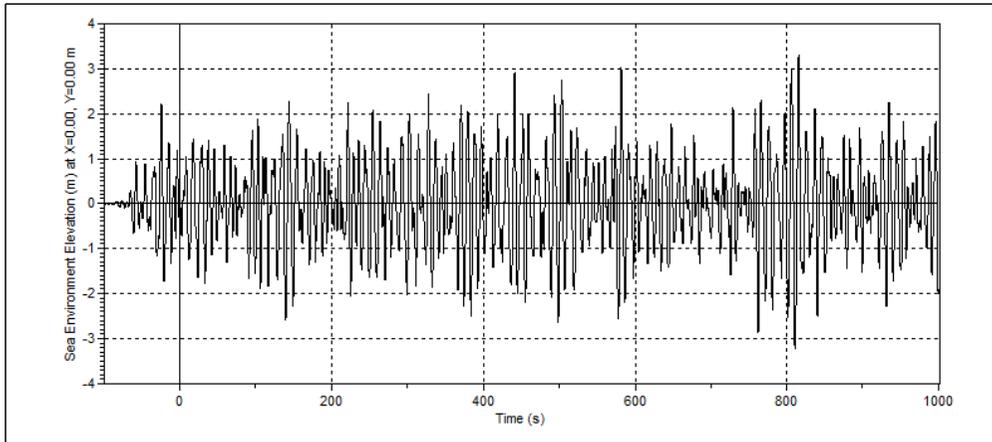


Fig. 2.43 Wave elevation

적용 풍속은 해면상 10m를 기준으로 51.5m/s(100knots) 이지만 부이의 해수면 높이가 2.0m 미만이므로 API(American Petroleum Institute) RP 2SK 3rd

Edition에서 제안하는 바람 프로파일(wind profile)식인 식 (7)에 의해 해수면 상 2.0m를 기준으로 한 42.1m/s를 적용하였다.

$$U(z) = U_0 \left(\frac{z}{z_R} \right)^{0.125} \quad (7)$$

여기서, $U(z)$: 1hr mean wind speed at elevation z above MWL(m/s)

U_0 : 1hr mean wind speed at elevation of 10m above MWL(m/s)

z : Elevation above sea level(m)

z_R : 10m(reference elevation above sea level)

적용 유속은 표층 기준으로 2.0knots(약 1.0m/s)이며, 측정된 수심별 유속값이 없어 개략식(DNV-RP-C205)인 식 (8)에 의해 유속 프로파일을 산정하였다. 해양에서의 유속은 일반적으로 조류와 바람에 의해 발생하며 본 연구에서는 조류에 의해 발생하는 유속값을 적용하였다. 그리고 유향은 표층과 심층이 동일하다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} V_{c,tide}(Z) &= V_{c,tide}(0) \left(\frac{d+z}{d} \right)^\alpha \text{ for } z \leq 0 \\ V_{c,wind}(Z) &= V_{c,wind}(0) \left(\frac{d_0+z}{d_0} \right)^\alpha \text{ for } -d_0 \leq z \leq 0 \\ V_{c,wind}(Z) &= 0 \text{ for } z < -d_0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

- $V_c(z)$ = total current velocity at level z
- z = distance form still water level, positive upwards
- $V_{c,tide}(0)$ = tidal current velocity at the still water level
- $V_{c,wind}(0)$ = wind-generated current velocity at the still water level
- d = water depth to still water level(taken positive)
- d_0 = reference depth for wind generated current, $d_0=50\text{m}$
- α = exponent-typically $\alpha=1/7$

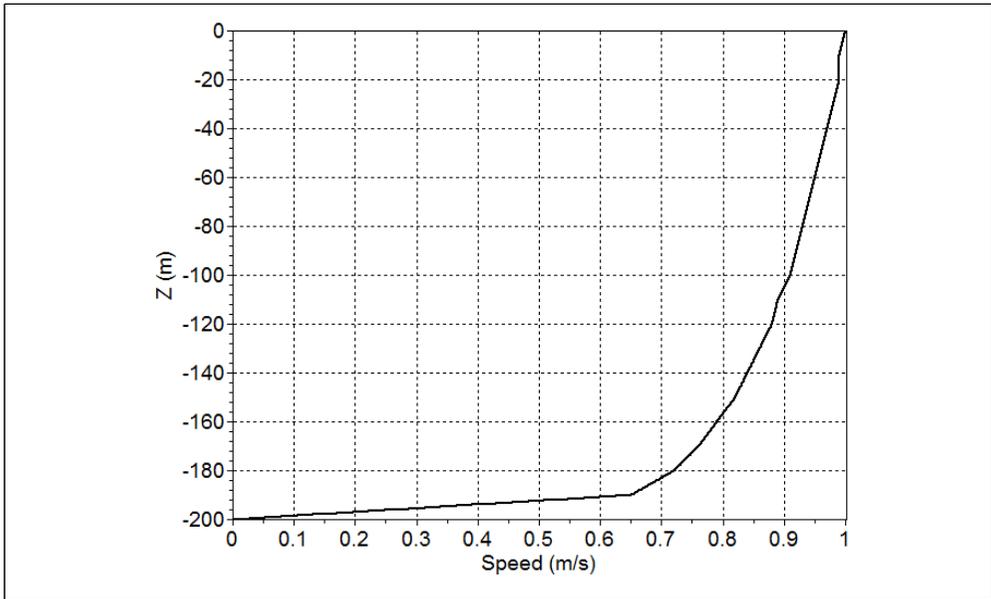


Fig. 2.44 Current Profile

부이 설치 해역의 수심은 200m이고, 조위차는 고려하지 않았으며 해저지형은 평탄한 것으로 가정하였다.

Table 2.14 Environmental condition

Description		Environmental condition	Remark
Wave	Significant wave height(m)	9.0	Sea State 7
	Period(sec)	11.58	
	Wave spectrum	JONSWAP	
Wind velocity(m/s)		51.5	10m above the surface
		42.1	2m above the surface
Current velocity(m/s)		1.0	
Water depth(m)		200	

2.4.2 계류시스템 모델링

계류시스템은 상부로부터 buoy chain, nylon rope, anchor chain으로 이루어진 계류선과 앵커로 구성되며 계류해석시 앵커는 고정점으로 가정하였다. 수중 케이블은 해저면에 선형으로 포설된 길이 80m의 배열케이블과 배열케이블을

고정하는 Sinker, 배열케이블과 부이를 연결하는 dynamic cable, 케이블의 중량 감소와 동요시 완충 역할을 하는 DBM(distribute buoyancy module)으로 구성 된다. 계류시스템과 수중케이블의 제원은 Table 2.15와 같으며, Fig. 2.45, Fig. 2.46과 같이 구성된다.

Table 2.15 Dimension of mooring System and submerged cable

Configuration			Dimension
Mooring system	Mooring line	Buoy chain	∅32mm, G2, L=10m, Weight=22.0kg/m(in air), MBL=583kN
		Nylon rope	∅40mm, L=200m, 8-strand multiplait, Weight=1.0kg/m(in air), MBL=333.5kN
		Anchor chain	∅60mm, G2, L=70m, Weight=79kg/m(in air), MBL=1,940kN
	Anchor	Fixed	
	Pre-Tension	40kN	
Submerged cable	Array-assembly cable	∅45mm, L=80m, Weight=4.12kg/m(in air)	
	Dynamic cable	∅35mm, L=695m, Weight=2.4kg/m(in air)	
	DBM	40kg(Buoyancy) × 10EA	
	Sinker	6.0ton(in seawater)	

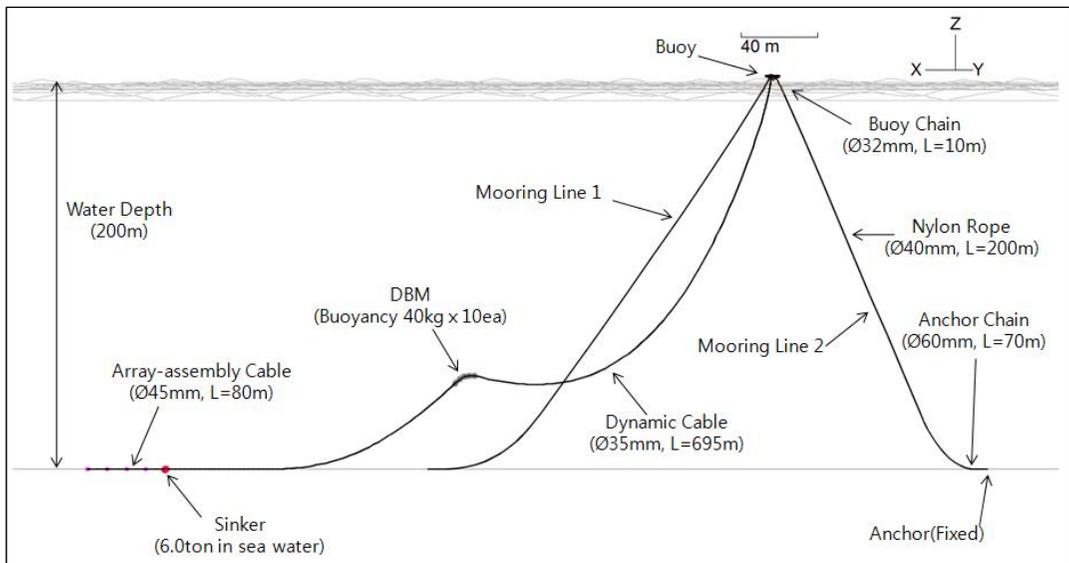


Fig. 2.45 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System(Side view)

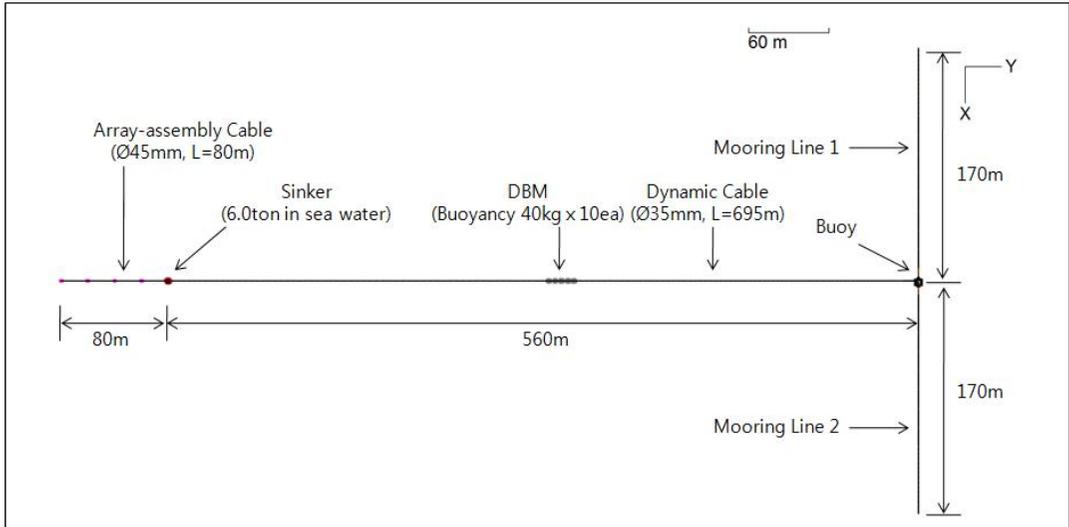


Fig. 2.46 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System(Plan view)

2.4.3 하중조합

계류안정성은 계류선 비손상시(LC1~LC8)와 손상시(LC9, LC10) 조건에 대하여 평가하였으며 계류해석시 하중조합은 Table 2.16과 같다. 계류시스템에 가장 큰 영향을 주는 환경인자는 파랑, 바람, 조류이며 동일한 방향에서 동시에 작용하는 것으로 설정하였다. 비손상시 조건에서의 하중 방향은 부이와 계류시스템, 수중케이블의 비대칭성을 감안하여 45도 각도로 전 방향에 대하여 적용하였다. 그리고 손상시 조건에서는 계류선 Line-1 손상시에는 하중방향이 180도, 계류선 Line-2 손상시에는 0도를 적용하였다.

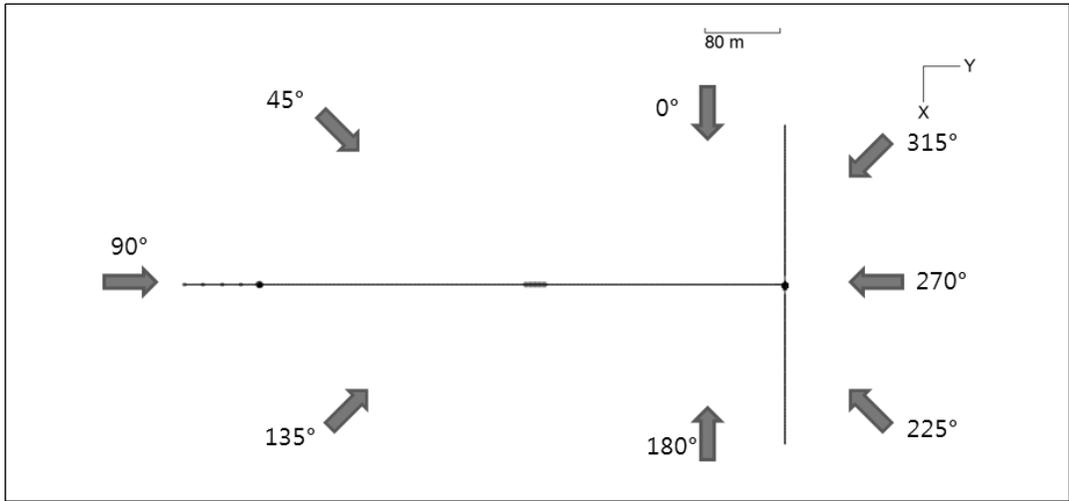


Fig. 2.47 Environmental direction for wave, wind and current

Table 2.16 Combination of environmental load

L/C	Wave				Wind		Current		Analysis condition
	H (m)	T (sec)	Dir. (°)	Wave spectrum	V (m/s)	Dir. (°)	V (m/s)	Dir. (°)	
LC1	9.0	11.58	0	JONSWAP	42.1	0	1.0	0	Intact
LC2	9.0	11.58	45		42.1	45	1.0	45	
LC3	9.0	11.58	90		42.1	90	1.0	90	
LC4	9.0	11.58	135		42.1	135	1.0	135	
LC5	9.0	11.58	180		42.1	180	1.0	180	
LC6	9.0	11.58	225		42.1	225	1.0	225	
LC7	9.0	11.58	270		42.1	270	1.0	270	
LC8	9.0	11.58	315		42.1	315	1.0	315	
LC9	9.0	11.58	0		42.1	0	1.0	0	Line-2 damage
LC10	9.0	11.58	180		42.1	180	1.0	180	Line-1 damage

2.4.4 계류선 인장력 평가

가. 평가 방법

계류선 개수에 따른 최적의 계류배치를 검토한 결과 2점 계류시 계류선과 수중케이블의 간섭 가능성이 가장 적으며 안정적인 거동 특성을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 2점 카테너리 계류된 부이형 수중감시체계에 대한 상세 계류 해석을 수행하였으며 그 결과를 계류시스템 안전성 평가에 반영하였다.

계류해석은 부유체 계류해석 전용 프로그램(Orcaflex)을 사용하였으며, 시간영역에서 동적해석을 수행하였다. 초기장력은 MBL(minimum breaking load)의 약 10%로 설정 하였고, 전체 계류선의 길이는 280m이다. 시뮬레이션 시간은 3,000초이며 초기 계산 시작 시간은 과도영역(transient)을 고려하지 않기 위해 1,000초부터 계산하였다.

각 분석 조건마다 서로 다른 파면(wave phase)을 가진 Seed로 5번의 시뮬레이션을 수행하고, 시계열의 최대계류장력과 Weibull 분포값을 이용한 장기극한 해석값 분석을 통해 3시간 폭풍지속 시간동안 발생할 수 있는 계류장력의 극치 통계값(extreme value statistics)을 얻었다.

해석프로그램에서 계산된 계류장력은 Bureau Veritas의 선급규정(NR 493, 2015)에 의하여 각 시뮬레이션마다 얻은 극치통계값의 평균 및 표준편차를 이용하여 계류선과 앵커 설계를 위한 설계 장력값(T_D)을 산출하였다. 설계 장력 값 산출식은 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} T_M &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_k \\ T_S &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (T_k - T_M)^2} \\ T_D &= T_M + aT_S \end{aligned} \tag{9}$$

여기서,

T_K : 장력 시계열 최대값의 극치통계값(extreme value statistics)

T_M : T_K 의 평균

T_D : 설계장력(design tension)

T_S : 표준편차

a : 시뮬레이션 횟수에 따른 보정계수

Table 2.17 Correction factor(a)

Method of analysis	Number of simulations			
	n=5	n=10	n=20	n= \geq 30
Dynamic	0.6	0.3	0.1	0
Dynamic-1 window	1.2	0.8	0.55	0.45
Quasi-dynamic	1.8	0.9	0.5	0.4

나. 비손상시 계류선 인장력

비손상시 계류선의 장력은 부이와 연결되는 상부 끝단의 fairlead부와 앵커와 연결되는 하부 끝단의 anchor부의 값을 취하여, fairlead부의 장력값은 계류선 안전성 평가에 반영하였으며, anchor부의 장력값은 앵커 안전성 평가에 반영하였다. 일반적으로 카테너리 형상의 계류선은 Fig. 2.48, Fig. 2.49와 같이 fairlead부에서 anchor부로 갈수록 장력이 감소하는 경향을 보였으며, Table 2.18~Table 2.19에 각 하중조건별 계류선의 fairlead부와 anchor부의 최대장력(Max.)과 계류장력의 극치통계값(EVS), 그리고 극치통계값의 평균 및 표준편차와 이에 따른 설계장력값(T_D) 산정 결과를 정리하였다. 산정결과 계류선의 설계장력은 65.8kN, 앵커 설계장력은 53.0kN으로 산정되었다. Fig. 2.50~Fig. 2.53은 fairlead부와 anchor부에 최대 장력이 발생할 때의 장력 시계열이다.

Table 2.18 Result of maximum mooring tension and extreme value statistics(EVS)

Seed	I/C	Tension of fairlead(kN)				Tension of anchor(kN)			
		Line-1		Line-2		Line-1		Line-2	
		Max.	EVS	Max.	EVS	Max.	EVS	Max.	EVS
1,000	1	61.2	61.7	43.1	44.5	41.9	41.9	32.9	35.1
	2	59.8	60.2	49.2	50.1	40.0	40.0	26.0	28.8
	3	55.8	55.8	60.1	60.9	35.2	35.6	39.1	40.0
	4	48.9	49.8	63.8	63.8	25.6	29.1	43.1	43.1
	5	45.6	45.8	59.8	59.8	43.1	52.0	39.9	40.6
	6	50.2	50.2	65.8	65.9	28.6	28.6	45.5	45.5
	7	58.4	58.7	62.5	62.8	37.3	37.4	41.2	41.2
	8	61.8	61.9	50.7	51.0	41.2	41.2	28.2	30.3
2,000	1	60.8	61.2	43.7	44.1	41.2	41.2	37.6	40.6
	2	58.2	58.3	47.8	47.9	38.4	38.4	25.2	28.2
	3	53.9	54.9	58.5	59.4	33.7	33.7	37.7	37.7
	4	47.3	47.8	62.2	62.2	24.5	28.2	41.6	43.3
	5	46.5	46.5	59.4	59.5	44.6	48.5	39.6	39.7
	6	49.2	49.5	64.3	64.3	26.9	30.4	43.5	45.3
	7	57.3	57.4	61.5	61.5	36.3	36.5	40.2	40.4
	8	60.0	61.8	49.6	49.8	39.6	41.9	27.0	30.1
3,000	1	61.6	61.7	44.8	44.8	41.4	41.9	38.9	46.5
	2	60.3	60.9	48.9	49.7	39.9	39.9	26.3	29.1
	3	55.6	56.0	60.1	60.8	34.9	35.0	39.0	39.0
	4	49.3	51.0	63.9	63.9	25.8	29.3	43.2	43.2
	5	46.3	47.1	60.9	60.9	50.7	58.9	40.5	41.0
	6	50.4	51.0	66.4	66.4	27.8	30.6	45.6	45.6
	7	59.0	59.0	63.1	63.1	38.2	38.8	42.2	42.2
	8	61.6	62.1	51.2	52.4	41.4	41.4	27.8	30.5
4,000	1	60.0	60.1	45.7	46.5	40.0	40.1	42.9	50.4
	2	58.7	58.9	48.0	48.5	39.1	39.1	25.4	28.7
	3	54.2	54.2	58.8	58.8	33.9	33.9	38.0	38.0
	4	47.9	48.2	62.9	62.9	24.9	28.6	42.5	42.5
	5	48.4	48.4	59.4	59.4	44.4	44.9	38.6	40.5
	6	50.0	50.3	65.3	65.4	27.6	30.3	44.1	44.2
	7	58.0	58.4	62.2	62.7	37.8	37.8	41.5	41.5
	8	60.9	60.9	49.9	50.1	40.9	41.0	27.8	30.3
5,000	1	60.0	60.1	43.4	44.0	39.8	39.8	29.3	29.6
	2	58.7	58.7	47.9	47.9	39.2	39.2	24.9	28.9
	3	54.3	54.4	58.7	58.7	33.4	35.2	37.6	37.6

	4	47.5	47.6	62.7	62.7	24.9	28.8	42.1	42.1
	5	45.9	46.5	59.1	59.3	44.6	44.7	38.9	38.9
	6	49.5	49.8	64.9	65.0	27.4	30.4	44.0	44.0
	7	57.4	57.5	61.5	61.6	36.4	36.4	40.2	40.3
	8	60.9	61.1	49.7	50.0	40.2	40.2	26.9	30.4

Table 2.19 Result of mooring tension and design tension

Number of simulations (n)	Seed	Tension of fairlead(kN)				Tension of anchor(kN)			
		Line-1		Line-2		Line-1		Line-2	
		Max.	EVS	Max.	EVS	Max.	EVS	Max.	EVS
1	1,000	61.8	61.9	65.8	65.9	43.1	52.0	45.5	45.5
2	2,000	60.8	61.8	64.3	64.3	44.6	48.5	43.5	45.3
3	3,000	61.6	62.1	66.4	66.4	50.7	58.9	45.6	46.5
4	4,000	60.9	60.9	65.3	65.4	44.4	44.9	44.1	50.4
5	5,000	60.9	61.1	64.9	65.0	44.6	44.7	44.0	44.0
T_M		61.6		65.4		49.8		46.3	
T_S		0.472		0.724		5.279		2.180	
$T_D(a=0.6)$		61.8		65.8		53.0		47.6	
Max. T_D		65.8				53.0			

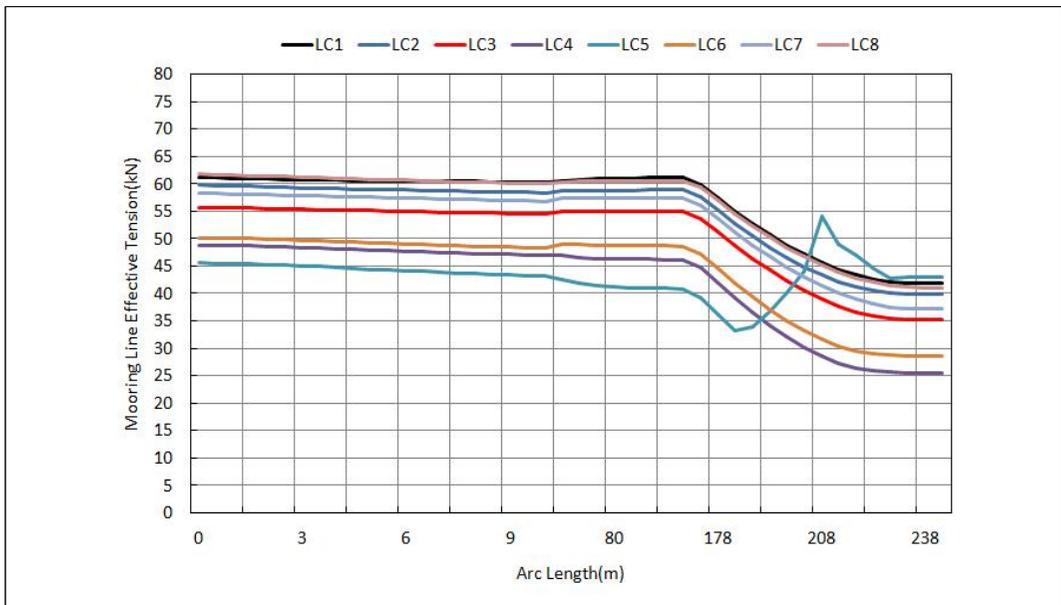


Fig. 2.48 Mooring tension distribution along arc length of Line-1(Seed 1,000)

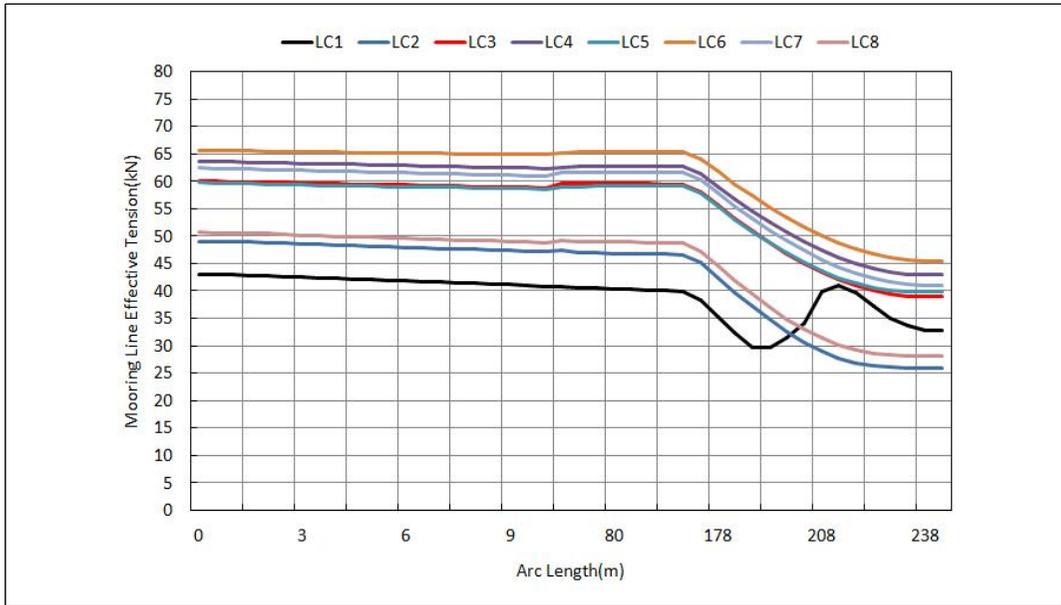


Fig. 2.49 Mooring tension distribution along arc length of Line-2(Seed 1,000)

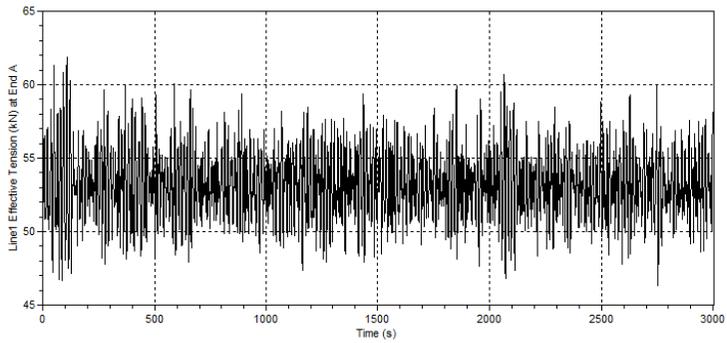


Fig. 2.50 Time history of mooring tension for fairlead point (Line-1, Seed 1,000, LC8)

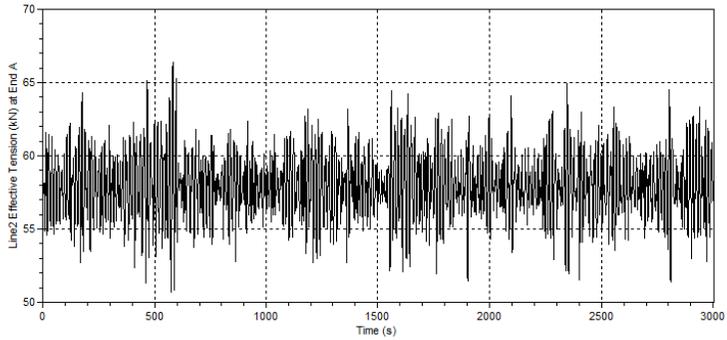


Fig. 2.51 Time history of mooring tension for fairlead point (Line-2, Seed 3,000, LC6)

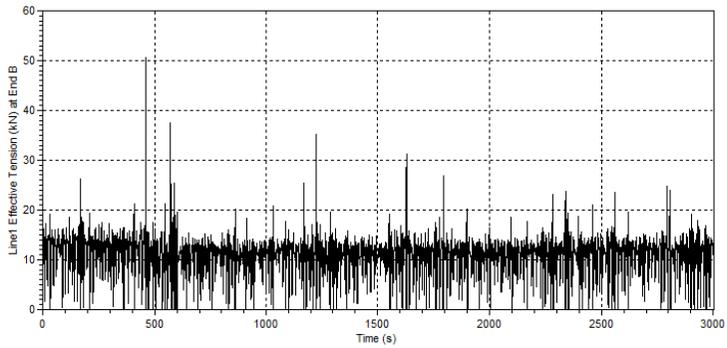


Fig. 2.52 Time history of mooring tension for anchor point (Line-1, Seed 3,000, LC5)

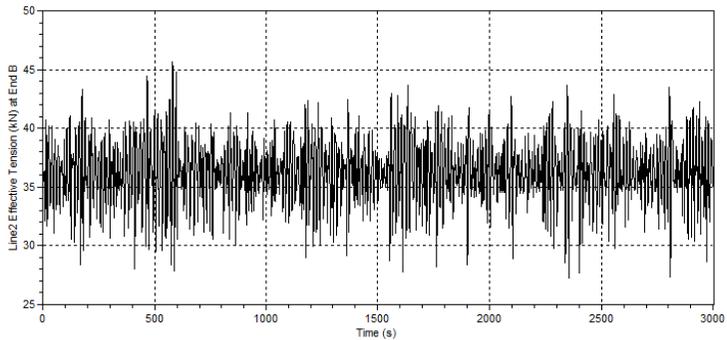


Fig. 2.53 Time history of mooring tension for anchor point (Line-1, Seed 3,000, LC6)

다. 손상시 계류선 인장력

손상시 조건에서는 한 번의 시뮬레이션만 수행하였으며 계류선의 최대장력 산정 결과는 Table 2.20과 같다. 손상시 계류선의 최대장력은 54.0kN으로 산정되었으며 Fig. 2.58과 같이 fairlead부가 아닌 계류선의 197.5m 지점에서 발생하였다. 손상시 조건에서는 1점 계류가 되어 외력의 영향이 최소화 되므로 장력 값이 비손상시보다 작게 발생하였다. Fig. 2.54~Fig. 2.57은 계류선에 최대 장력이 발생하는 지점과 anchor부의 장력 시계열이다.

Table 2.20 Result of maximum mooring tension and extreme value statistics(EVS)

Seed	L/C	Max. Mooring tension(kN)				Tension of anchor(kN)			
		Line-1		Line-2		Line-1		Line-2	
		Max.	EVS	Max.	EVS	Max.	EVS	Max.	EVS
1,000	9	51.8	54.0	-	-	42.8	41.5	-	-
	10	-	-	49.1	51.6	-	-	32.0	32.6
Max. Tension		54.0				42.8			

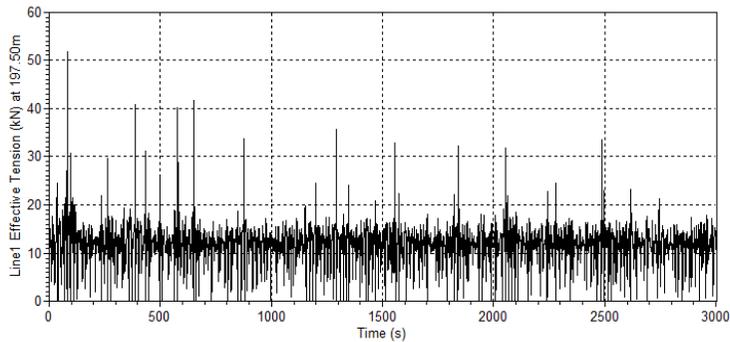


Fig. 2.54 Time history of mooring tension for maximum tension point(Line-1, LC9)

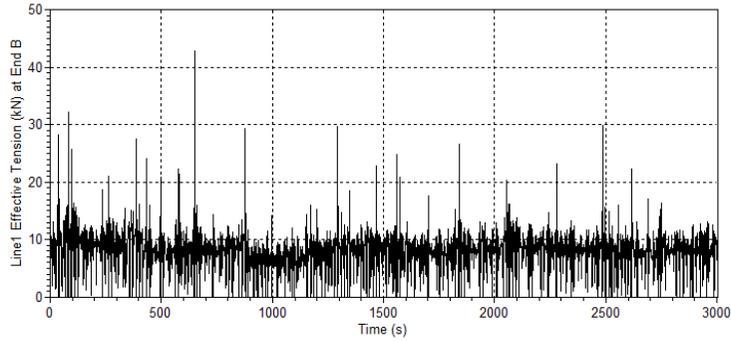


Fig. 2.55 Time history of mooring tension for anchor point (Line-1, LC9)

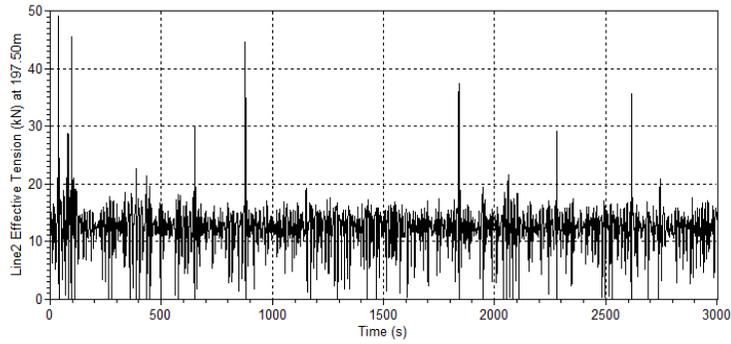


Fig. 2.56 Time history of mooring tension for maximum tension point (Line-2, LC10)

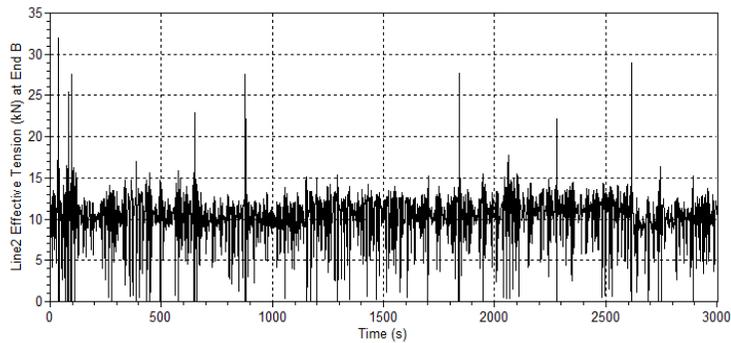


Fig. 2.57 Time history of mooring tension for anchor point (Line-2, LC10)

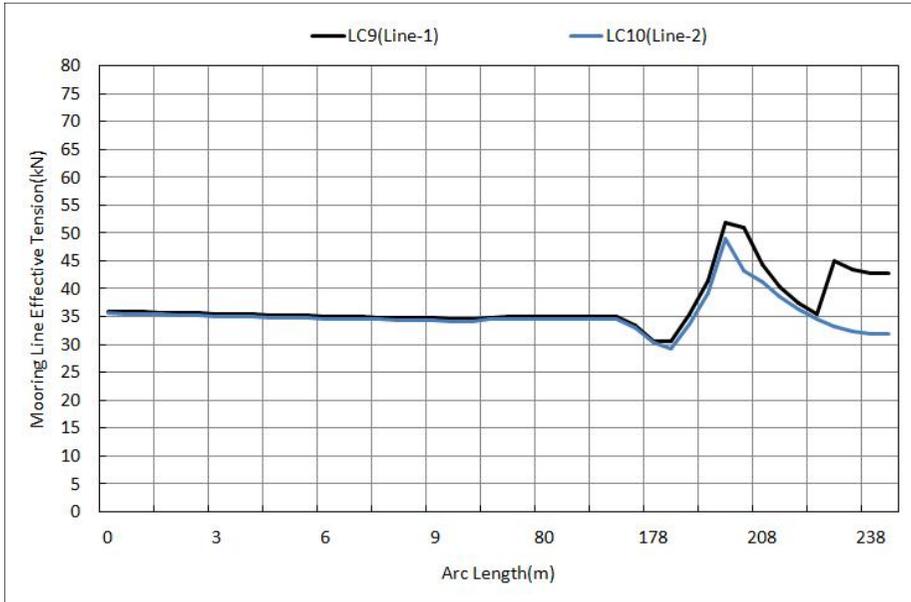


Fig. 2.58 Mooring tension distribution along arc length

2.4.5 계류시스템 안정성 평가

가. 계류선 안전성 및 계류선 구성

안전한 계류시스템 설계를 위해서는 계류장력의 최대값이 계류선의 최소파단 강도(MBL)을 초과하지 않아야 하며 설계기준에 적합한 안전율이 확보되어야 한다. 계류선 파단에 대한 안전기준은 API RP 2SK의 계류선 최소 안전율 기준을 따르며 동해석(dynamic analysis)시 안전율은 비손상시(intact) 1.67, 손상시(damage) 1.25를 적용하였다.

계류선의 안전성 평가 결과는 Table 2.21과 같다. 비손상시 최대 설계장력 (T_D) 65.8kN에 대하여 buoy chain과 나일론로프의 안전율은 8.9와 5.1로 허용안전율 1.67을 크게 초과하는 것으로 평가되었다. 그리고 계류선 손상시 최대 장력은 54.0kN이며 허용안전율 1.25를 초과하여 손상시 조건에서도 계류선의 안전성이 확보되는 것으로 평가되었다.

계류선은 Buoy chain의 경우 비말대(splash zone)에 위치하고 있어 일반적으

로 0.3mm/year의 부식 및 마모를 고려하여야 하고, nylon rope는 마찰과 전단, 화학적인 변형에 따른 강도 감소를 고려하여야 하므로 장기간 사용시에는 충분한 안전율을 확보하는 것이 필요하다.

Table 2.21 Mooring line safety evaluation

Mooring line	Configuration	MBL (kN)	Safety(Intact/Damage)		
			Max. T_D	Safety factor	Safety check (Allow. S.F=1.67/1.25)
Line-1, 2	Buoy chain (Ø32mm, G2)	583	65.8/54.0	8.9/10.8	O.K
	Nylon rope (Ø40mm, 8S/T)	333.5		5.1/6.2	O.K
	Anchor chain (Ø60mm, G2)	1,940		29.5/35.9	O.K

계류선은 부이와 연결되는 상부에서부터 buoy chain, 중간에 nylon rope, 앵커와 연결되는 anchor chain으로 구성하였다. buoy chain은 비말대(splash zone)에 위치하고 있으며 부이의 동요로 인한 연결부 마모가 가장 심한 부분이므로 설계장력보다 더 큰 과단강도를 갖는 체인을 사용하였으며, 체인 중간에 swivel를 달아 부이가 회전하더라도 체인이 꼬이지 않도록 하였다. 중간의 나일론 로프는 체인의 joining shackle과 연결할 수 있도록 말단을 아이스플라이스(eye splice) 가공을 하고 rope protectors를 씌워 마찰로 인한 마모를 방지할 수 있도록 하였다.

Table 2.22 Dimension of mooring line

Description		Configuration		Length(m)	
1	Buoy chain	Ø32mm, G2, L=10m, MBL=583kN	JS+E+SW+EL+C~C+EL+E+JS	10	280
2	Nylon rope	Ø40mm,8-strand Multiplait, MBL=333.5kN	Eye Splice, Rope protector	200	
3	Anchor chain	Ø60mm, G2, MBL=1,940kN	JS+E+EL+C~C+EL+E+AS	70	

※JS:Joining Shackle, E:End Link, EL:Enlarged Link, C:Common Link, SW:Swivel, AS:Anchor Shackle

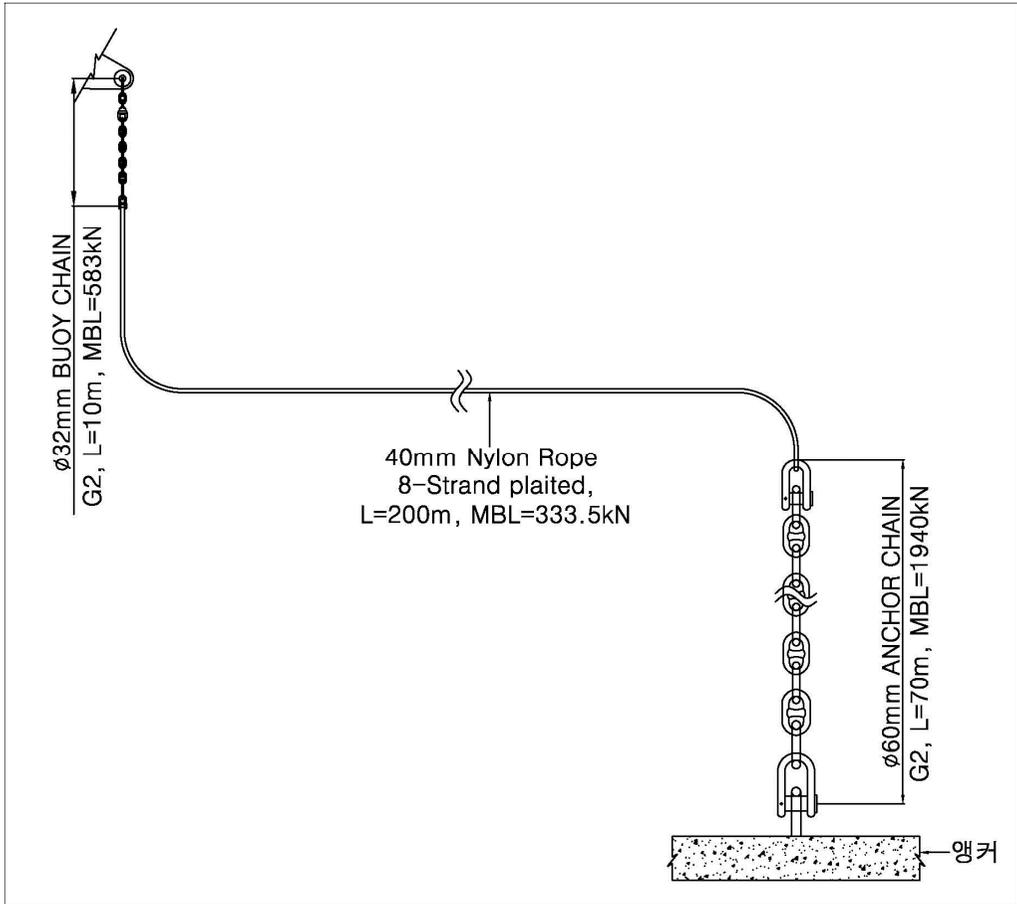


Fig. 2.59 Mooring system arrangement

나. 앵커 안전성

여러 가지 앵커 형식 중 현 계류시스템에 적용 가능한 형식으로는 중력식과 닻가지형이 있다. 중력식 앵커는 자중과 해저면의 마찰저항에 의해 고정하는 방식으로 해저질의 영향을 크게 받지 않고 확실한 계류를 보장할 수 있는 방식이나 앵커 중량이 커질 경우 설치장비가 대형화 될 수 있는 단점이 있다. 반면 닻가지형 앵커는 설치 및 회수가 비교적 쉬운 반면 해저질에 따라 파주력이 크게 차이가 나며 끌림이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 중력식과 닻가지형 두 가지 형식에 대한 제원을 산정하였으며, 중력식 앵커는 콘크리트 블록 타입으로, 닻가지형 앵커는 stockless 앵커 타입을 적용하였다.

콘크리트 블록 타입의 중력식 앵커의 최소 중량 및 체적은 식 (10)에 의해 산정하였다.

$$V = \frac{T_H \times S.F}{f(\rho_c - \rho_w)}, \quad W = V \times \rho_c \quad (10)$$

- 여기서 V : 콘크리트 중력식 앵커 체적(m^3)
- W : 콘크리트 중력식 앵커 육상중량(톤)
- T_H : 앵커에 작용하는 수평장력(5.4톤)
- $S.F$: 앵커 안전율(1.5)
- f : 저면 마찰계수(콘크리트&암반=0.5)
- ρ_c : 콘크리트 단위중량($2.3t/m^3$)
- ρ_w : 해수밀도($1.025t/m^3$)

작용하중은 앵커점에서의 최대 장력인 53.0kN(5.4톤)을 적용하였고, 해저면과 계류선 사이의 각도인 앵커 들림각은 0°로 가정하였다. 해저면은 평탄하고 해저질은 암반으로 토압은 고려하지 않았으며, 마찰계수는 0.5(암반&콘크리트)로 가정하였다. 최소안전율은 API RP 2SK 기준에 따라 동해석(dynamic analysis) 시 안전율 1.5를 적용하였다.

계산 결과 안전성을 확보할 수 있는 콘크리트 블록의 최소 체적은 $12.71m^3$, 공기 중 중량은 약 29.2톤으로 산정되어 Table 2.23과 같이 길이와 폭이 3.0m, 높이 1.5m인 콘크리트 블록을 중력식 앵커로 사용하였다.

Table 2.23 Dimension of gravity anchor

Description	Dimension		Remark
Concret gravity anchor	Length(m)	3.0	
	Breadth(m)	3.0	
	Height(m)	1.5	
	Volume(m^3)	13.5	
	Weight	in air(ton)	31.1
in seawater(ton)		17.2	Density: $1.025t/m^3$

Fig. 2.60 Concrete gravity anchor



닻가지형 앵커에는 스톡(Stock) 앵커, 스톡리스(stockless) 앵커, 고파주력(high holding power) 앵커 등이 있으며, 스톡 앵커는 파주력은 좋으나 스톡(stock) 때문에 취급이 불편하여 어선과 같은 소형선에 주로 사용하며 스톡리스 앵커는 파주력은 스톡 앵커보다 떨어지지만 취급이 용이하여 대형선에서 주로 사용하고 있다. 고파주력 앵커는 파주력이 스톡리스에 비해 2~4배 더 좋으며 비교적 고가이다.

닻가지형 앵커의 파주력은 식 (11)과 같이 앵커의 파주력과 함께 해저면에 깔린 체인의 파주력도 함께 고려할 수 있지만 보수적으로 체인의 파주력은 고려하지 않았다.

$$P_T = P_a + P_c = w_a \lambda_a + w_c \lambda_c l \quad (11)$$

여기서, P_T : 앵커와 체인의 전체 파주력(kN)

P_a : 앵커의 파주력(kN)

λ_a : 앵커의 파주계수

w_a : 앵커의 수중중량(kN)

P_c : 체인의 파주력(kN)

λ_c : 체인의 파주계수

w_c : 체인의 단위 수중중량(kN/m)

l : 체인의 길이(m)

앵커의 파주력과 중량 산정 결과는 Table 2.24와 같다. 앵커의 파주력은 앵커 점의 최대 장력값을 초과하지 않아야 하며 최소 안전율 1.5를 확보하여야 한다. 앵커의 파주력 계수는 해저질에 따라 다르며 해저질이 특정되지 않은 상태에서 최소 파주력 계수를 적용할 경우 앵커는 4.72톤 이상의 육상중량을 확보하여야 충분한 파주력을 발휘할 수 있는 것으로 평가되었다.

Table 2.24 Holding capacity and weight of drag anchor

Description	Mud	Hard soil	Sandy soil	Sand	Fine gravel
Max. Tension of anchor(ton)	5.4				
Safety factor	1.5				
Min. Holding power(ton)	8.1				
Holding power coefficient (KR Rule)	2	2	2	3~4	3~4
Anchor weight in seawater(ton)	4.1			2.7~2.03	
Anchor weight in air(ton)	4.72			3.11~2.34	
Anchor selection	Stockless Anchor(Weight : 4,890kg)				

※Anchor weight in air=Anchor weight in seawater/0.869

다. 계류부이의 수평변위

카테너리 계류된 부이는 계류선 자중에 의해 느슨한 계류를 하고 있으므로 파랑, 바람, 조류에 기인하는 표류력에 의해 수평변위가 크게 발생할 수 있다. 복수의 배열센서를 좁은 지역에 설치할 경우 부이와 부이 또는 계류선 사이에 간섭을 유발할 수 있고 dynamic cable의 형상을 크게 변화시킬 수도 있으므로 cable 길이나 부력재 배치 등에 영향을 줄 수 있다. 따라서 배치 전에 부이의 수평변위에 대한 평가가 필요하다.

하중조건별 시뮬레이션 결과 2점 카테너리 계류된 부이의 최대 수평변위는 Table 2.25와 같으며 최대 수평변위는 78.7m로 산정되어 부이형 수중감시체계

를 복수로 설치할 경우에는 간섭이 발생하지 않도록 부이 사이의 최소 간격을 200m 이상 떨어뜨려 설치하도록 하였다. 그리고 부이의 수평이동에 따라 dynamic cable의 형상도 변하게 되는데 최대 수평이동거리를 고려하여 최적의 케이블 길이와 DBM의 부력 및 설치 위치를 결정하여 케이블이 과도한 인장력을 받지 않고 해저에 닿거나 수면으로 노출되지 않도록 하였다. Fig. 2.61~Fig. 2.63은 부이의 수평이동에 따른 수중케이블의 형상 변화를 보여주며 Fig. 2.64와 Fig. 2.65는 부이의 수평변위에 대한 시계열이다.

Table 2.25 Result of horizontal movement for mooring buoy

L/C	Horizontal movement(m)			
	X	Max.	Y	Max.
LC-1	29.2	29.2	9.6	78.7
LC-2	20.3		45.2	
LC-3	1.7		65.3	
LC-4	-8.0		48.1	
LC-5	-24.3		9.6	
LC-6	-15.6		-61.8	
LC-7	1.9		-78.7	
LC-8	19.5		-59.1	

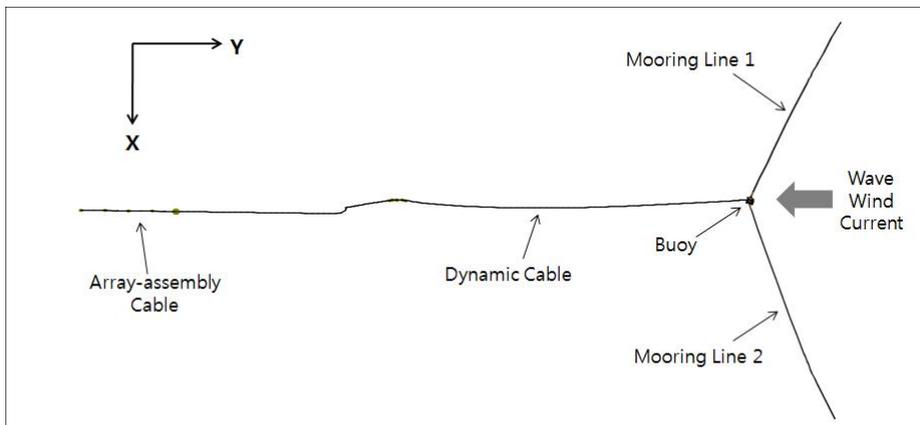


Fig 2.61 Horizontal movement of mooring buoy(Plan view)

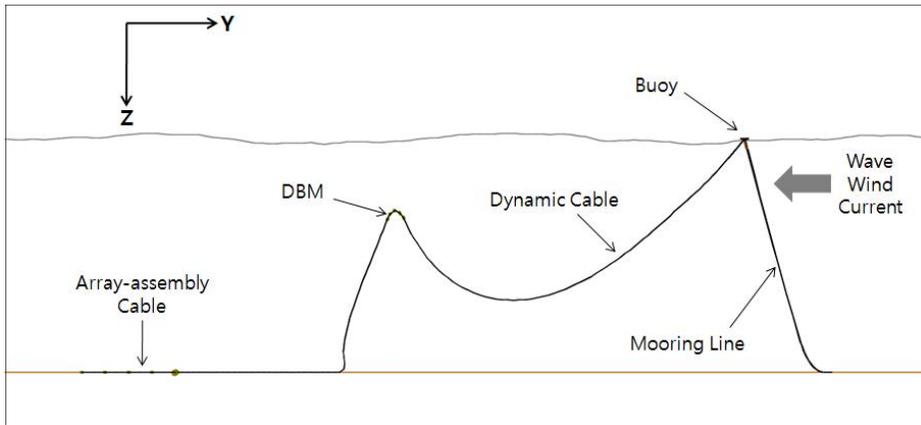


Fig 2.62 Horizontal movement of mooring buoy(Side view-1)

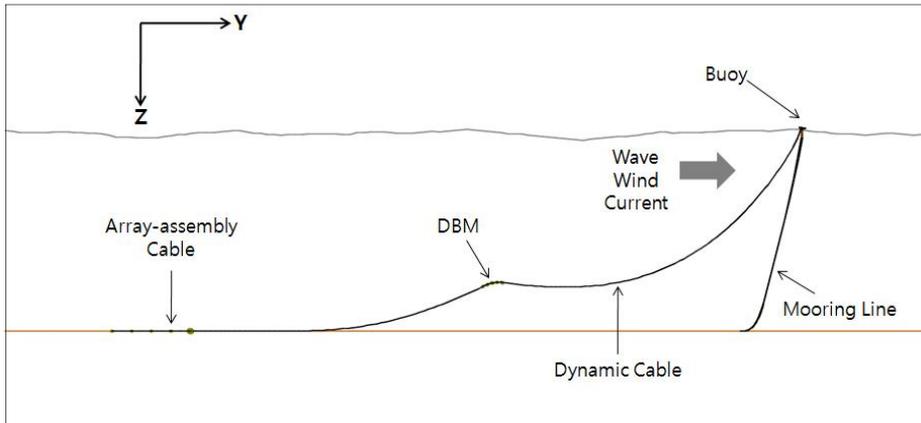


Fig 2.63 Horizontal movement of mooring buoy(Side view-2)

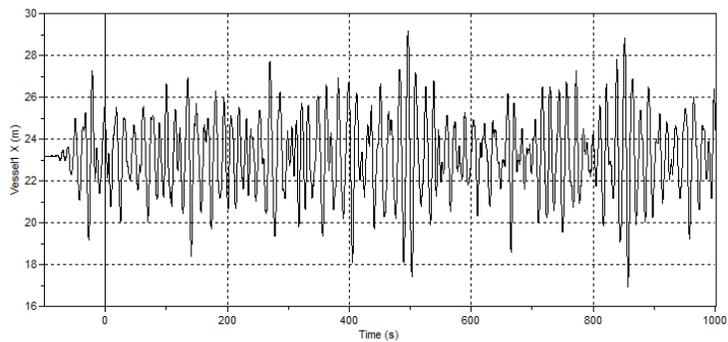


Fig. 2.64 Time history of maximum X-direction horizontal movement for mooring buoy(Load Case : LC-1)

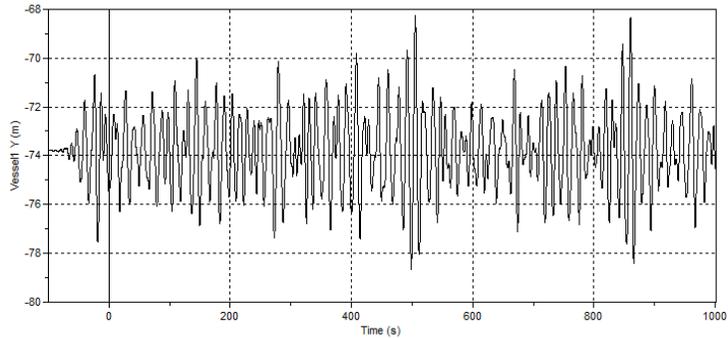


Fig. 2.65 Time history of maximum Y-direction horizontal movement for mooring buoy(Load Case : LC-2)

라. Touch down length

앵커는 중력식이 아닌 닻형 앵커를 적용할 경우 앵커 들림각이 커지면 충분한 파주력을 발휘할 수 없기 때문에 과도한 장력 발생시 앵커가 끌릴 수가 있다. 앵커가 장기간에 걸쳐 끌리게 되면 부이의 초기 설치 위치가 변동되어 부이간 간섭이 발생하거나 배열케이블의 선형이 흐트러져 운용성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 닻형 앵커를 적용하는 경우에는 계류선 설계시 앵커 들림각이 발생하지 않도록 계류선은 충분한 길이를 가져야 하고 앵커체인의 자중을 적절히 키우는 것도 유효한 방법이다.

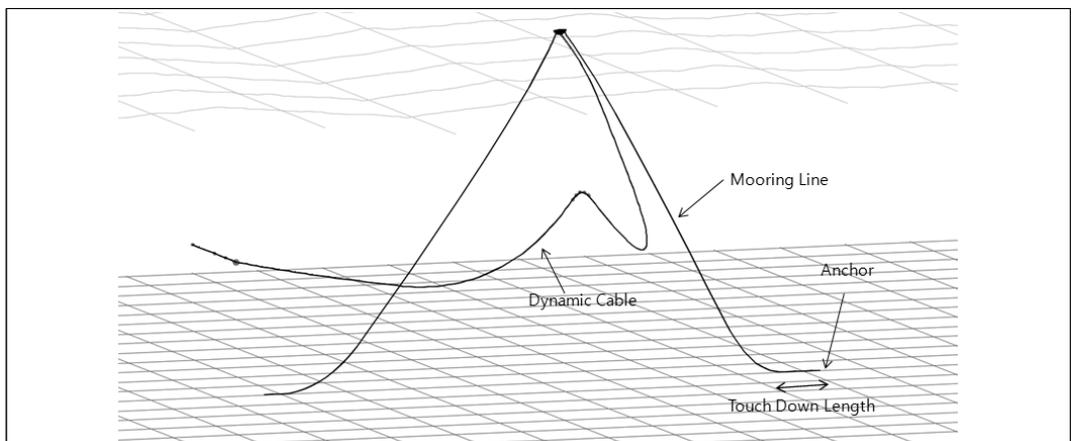


Fig. 2.66 Concept of mooring line touch down length

본 연구에서는 touch down length를 확보하기 위하여 직경 60mm, 길이 70m의 비교적 무거운 앵커체인을 적용하였으며, 모든 하중조건에 대한 시뮬레이션 결과 Table 2.26과 같이 최소 10m 이상의 touch down length가 확보되어 앵커 들림각이 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

Table 2.26 Touch down length of mooring line

L/C	Touch down length(m)		
	Line-1	Line-2	Min
LC-1	12.5	32.5	10.0
LC-2	15.0	25.0	
LC-3	20.0	20.0	
LC-4	25.0	15.0	
LC-5	40.0	15.0	
LC-6	25.0	10.0	
LC-7	15.0	15.0	
LC-8	10.0	25.0	

제 3 장 수중케이블 동적안정성에 대한 연구

3.1 개요

수중감시체계의 수중케이블은 음향센서가 선배열된 배열케이블과 수신된 음향신호를 부이로 전달하는 dynamic cable, 부이와 케이블을 연결하는 연결장치, 케이블의 설치형상을 유지시키기 위한 DBM(distribute buoyance module), 배열케이블의 안정성을 확보하기 위한 싱커 및 중량물로 구성되어 있다.

배열케이블은 해저면에 노출되도록 설치되며 선형이 유지되어야 정확한 음향탐지가 가능하다. 그리고 조류나 파랑 그리고 부이의 거동에 의한 영향으로부터 안정성이 확보되어야 한다. 그러기 위해서 배열케이블에는 일정 간격의 중량물을 달아 조류와 파랑에 의한 안정성을 확보하도록 하였으며 dynamic cable과 연결되는 부분에는 싱커를 달아 부이의 운동과 인장력이 직접 전달되지 않도록 하였다.

Dynamic cable은 부이와 배열케이블을 연결하는 케이블이며 부이의 운동과 파랑 및 조류하중, 와류에 의한 진동 등 외력에 충분히 견딜 수 있어야 하며 조류에 의한 부이의 큰 운동변위에 대응하고 충격을 완화할 수 있는 lazy wave형의 설치형상을 적용하였다.

수중케이블의 거동과 인장력은 조류와 파랑뿐만 아니라 부이의 운동에 의한 영향이 매우 크므로 부이와 계류장치 그리고 수중케이블의 연성을 고려한 동적 해석을 수행하여 수중케이블의 거동특성과 최대로 발생하는 인장력에 대한 dynamic cable 안전성, model 해석에 의한 VIV(vortex induced vibration), 피로해석에 의한 피로수명 산정, 배열케이블의 on bottom stability 등을 평가하였다.

3.2 수중케이블 설치형상에 따른 비교해석

Dynamic cable은 수면에 떠있는 부이와 배열케이블을 연결해주는 케이블이다. 외력에 의해 부이가 거동할 때 발생하는 인장력은 dynamic cable을 따라 배열케이블에 전달되는데 음향센서가 내장되어 있는 배열케이블은 인장력에 의해 센서가 큰 충격을 받거나 선형이 흐트러지지 않도록 하여야 한다. Dynamic cable은 부이의 거동이 배열케이블에 직접 전달되지 않도록 Fig. 3.1과 같은 다양한 형태의 설치형상으로 최적화 되는데 이러한 설치형상은 부이의 동적거동에 대한 완충작용을 함으로써 배열케이블에 전달되는 인장력을 최소화시켜 준다.

Dynamic cable의 설치형상으로는 steep wave, lazy wave, catenary, steep S, lazy S, tethered wave 등이 있으며 이 중 steep wave와 steep S, lazy S, tethered wave형은 케이블 중간에 별도의 중량물이나 구조물이 설치되어야 하므로 설치 및 회수가 용이하지 않은 문제점이 있다. 그리고 2점 카테너리 계류를 하고 있는 부이의 특성상 높은 파도와 강한 유속으로 인해 상하동요와 수평동요에 의해 변위가 크게 발생하므로 배열케이블과의 연결성을 고려할 때 연결부의 굽힘이 최소화되도록 충분한 touch down length를 확보할 수 있는 lazy wave 또는 catenary 형상이 적합해 보인다.

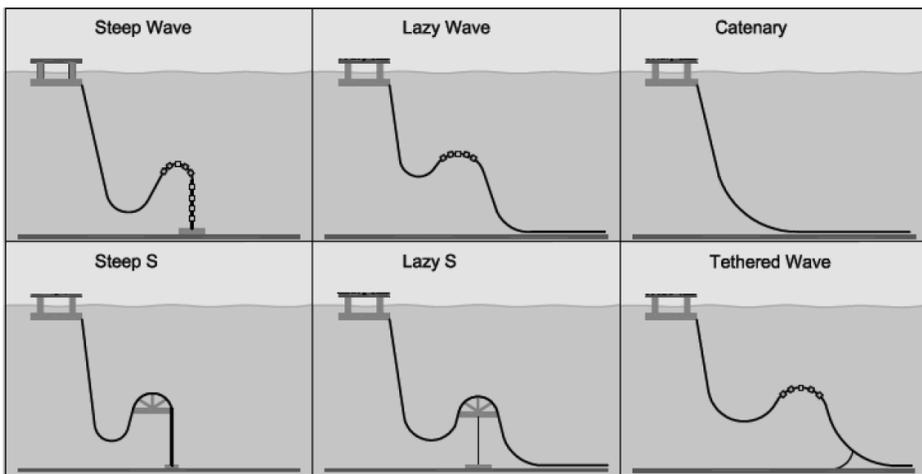


Fig. 3.1 Potential dynamic cable configurations

본 연구에서는 dynamic cable의 최적화된 설치형상을 찾기 위하여 외력과 부이의 동적거동을 고려하여 lazy wave형과 catenary형에 대한 수중케이블 시뮬레이션을 수행하였다. 수중케이블은 부이의 과도한 운동과 계류력이 배열케이블까지 전달되지 않도록 충분한 여유길이가 확보되어야 하며 touch down되는 부분에서 충분한 곡률반경을 확보하여 케이블 굽힘에 의한 손상이 발생하지 않도록 하여야 한다.

Fig. 3.2는 dynamic cable의 catenary 형상에 대한 외력의 작용 방향에 따른 거동특성을 보여준다. 외력이 좌측에서 우측으로 작용할 때 케이블이 충분히 길다면 적절한 catenary 형상이 유지될 수 있으나 부이의 수평변위 만큼의 충분한 길이를 확보하지 못한다면 부이의 계류력을 계류선과 함께 분담하게 되므로 배열케이블에 과도한 인장력이 전달될 수 있다. 외력이 우측에서 좌측으로 작용할 때에는 catenary 형상이 유지되지 않으며 touch down 되는 부분이 급격히 꺾이는 거동특성을 보여 장시간 이러한 현상이 발생할 경우 굽힘에 의한 손상 확률이 커질 수 있다.

Lazy wave 형상은 케이블 중간에 DBM(distribute buoyance module)을 부착하여 형상을 유지시키며, 부이에서 배열케이블까지 거리에 비해 dynamic cable 길이를 충분히 길게 유지할 수 있으므로 부이의 운동변위 만큼의 여유길이를 확보할 수 있다. Fig. 3.3은 dynamic cable의 lazy wave 형상에 대한 거동특성을 보여주며 외력에 의해 부이의 변위가 크게 발생하더라도 케이블의 여유길이가 충분하고 DBM이 케이블 처짐을 방지하므로 touch down되는 부분의 굽힘이 발생하지 않았다.

수중케이블에 대한 시뮬레이션 결과 catenary형은 케이블 길이가 짧을 경우 과도한 인장력이 발생할 수 있고 길이가 길어지게 되면 touch down되는 부분의 손상이 우려된다. 반면 lazy wave형은 케이블 길이를 충분히 길게 유지할 수 있고 DBM이 처짐을 방지하여 touch down되는 부분의 굽힘이 발생하지 않는다. 따라서 dynamic cable의 설치형상으로 lazy wave형이 가장 적합한 것으로 판단된다.

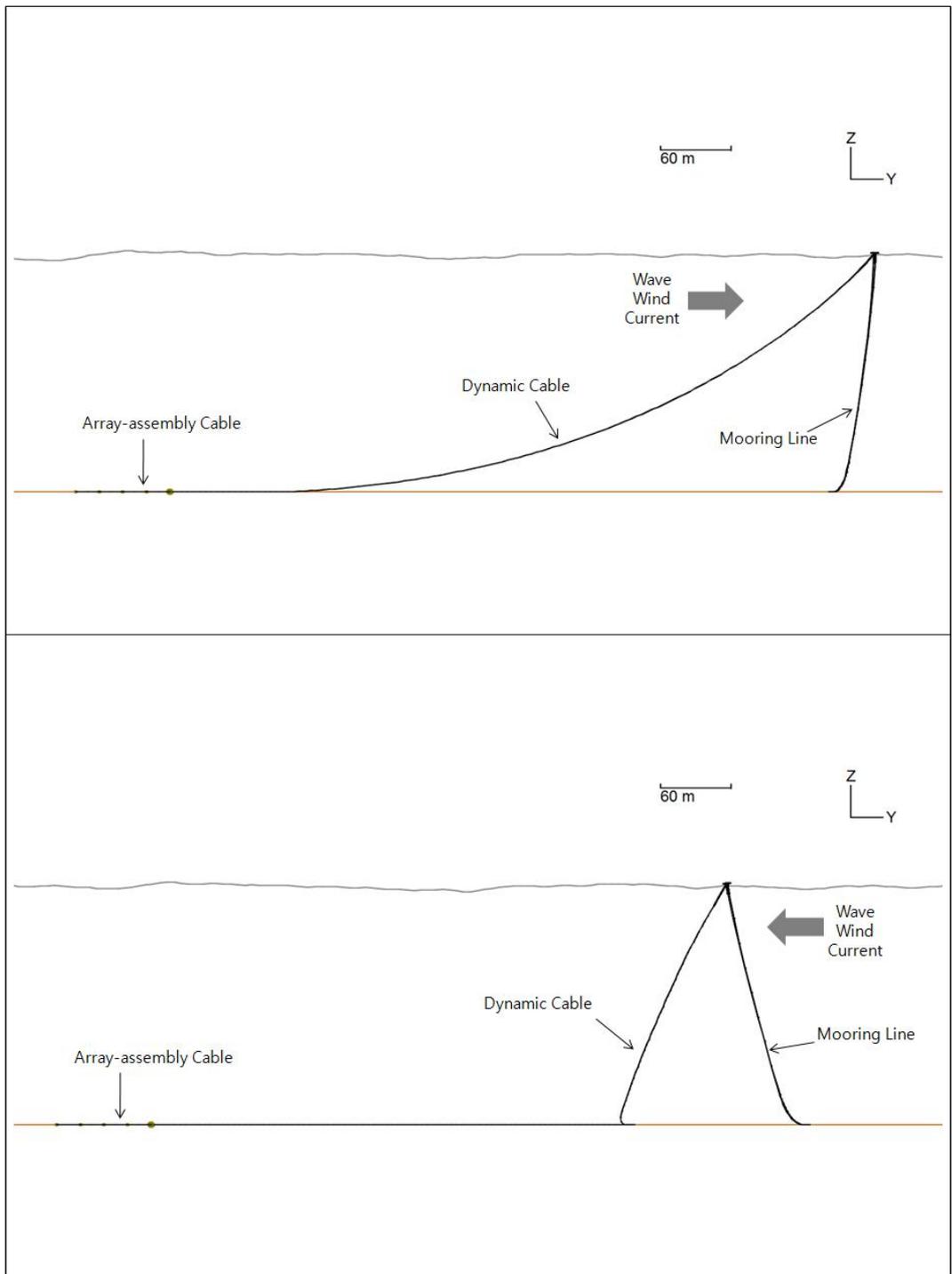


Fig. 3.2 Behavior characteristics of catenary type dynamic cable

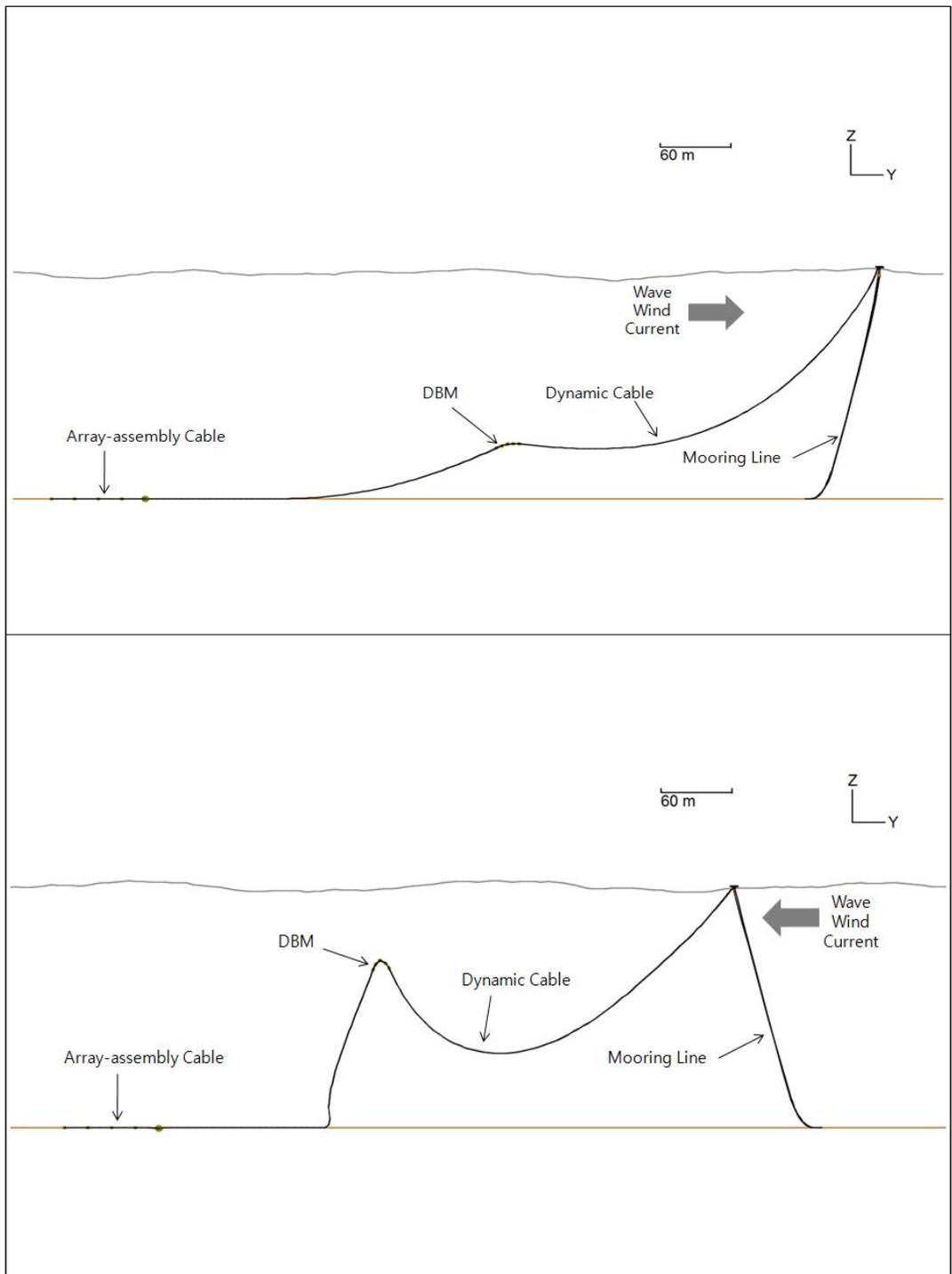


Fig. 3.3 Behavior characteristics of lazy wave type dynamic cable

3.3 Lazy Wave 형상의 수중케이블 구성 및 연결

수중케이블은 해저에 노출된 채로 선배열된 배열케이블과 부이와 배열케이블을 연결해주는 dynamic cable로 구성되어 있다. 배열케이블은 수중음향센서와 송수신선이 내장되어 있으며 총 길이는 80m로 해저면 상부에 노출되어 선형으로 설치된다. 배열케이블에는 수중중량 20kg의 중량물을 19.5m 간격으로 5기를 달아 파랑과 조류 하중에 대한 on bottom stability를 만족할 수 있도록 하였다.

Dynamic cable의 시단부는 hang off와 I-tube, bend stiffener로 구성된다. Hang off는 케이블을 부이에 고정하는 역할을 하며, I-tube는 수중으로 내려가는 케이블을 비말대에서 보호하는 역할을 한다. I-tube의 재질은 일반적으로 SS400이나 SM490 등 일반적인 구조강재로 제작되며, 주로 해상과 수중의 비말대에 위치하므로, 부식 방지를 위해 아연도금을 하거나 또는 희생양극물(anode)을 부착한다. Bend stiffener는 높은 신장율과 강한 탄성을 가지고 있어 케이블의 굽힘을 방지하기 위한 목적으로 사용된다. Bend stiffener의 원추형 몸체(conical body)는 주로 폴리머 계열의 재질로 제작되며, 일반적으로 폴리우레탄을 주로 사용한다.

Dynamic cable의 중간 지점에는 DBM(distribute buoyance module)을 부착하여 케이블이 자중에 의해 쳐지는 것을 방지하고, 케이블의 설치형상이 lazy wave형을 유지할 수 있도록 한다. DBM의 부력과 부착위치, 배치간격 등은 중심과 부이의 운동범위, 케이블 중량, 설치형상 등을 고려하여 결정된다.

Dynamic cable의 종단부는 케이블 형상이 흐트러지거나 수중음향센서를 손상시키지 않도록 싱커를 달아 부이의 거동과 케이블 인장력이 배열케이블로 전달되는 것을 방지하였다. 케이블 종단부는 반복적으로 들러 허용곡률을 초과할 경우 굽힘에 의해 손상될 우려가 있으므로 최대한 완만한 경사를 유지하며 touch down length가 확보될 수 있도록 하였다.

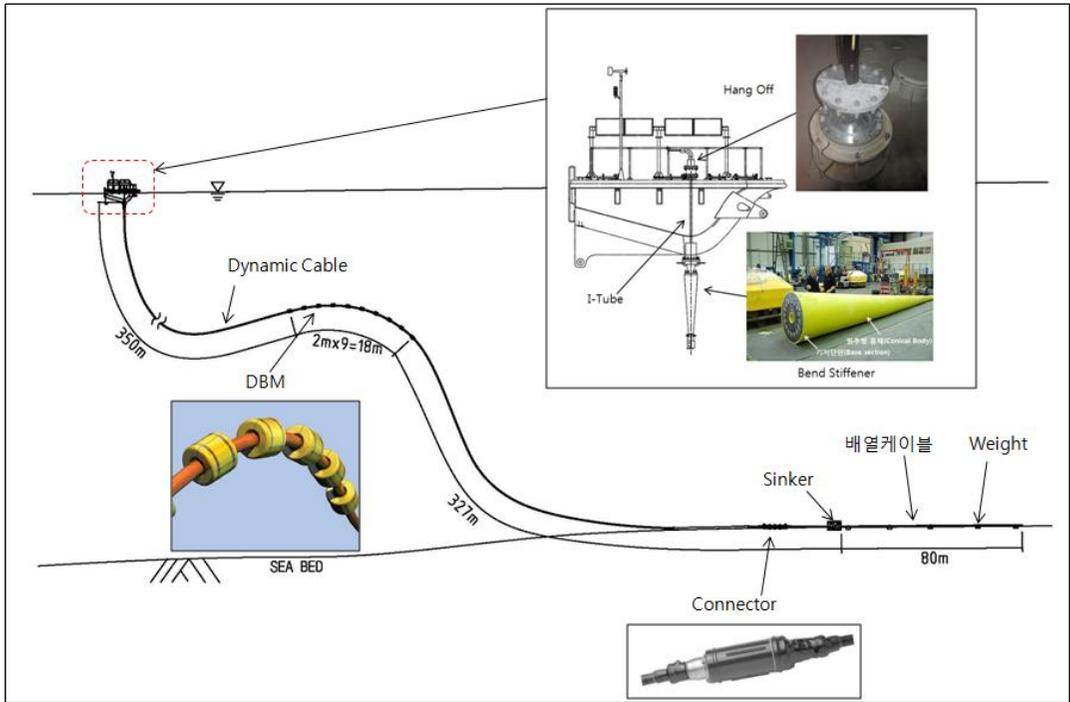


Fig. 3.4 Conceptual design of submerged cable

3.4 최적화된 Lazy Wave형 수중케이블 동적해석

3.4.1 수중케이블 배치 및 제원

최종 선정된 수중케이블 배치형상은 Fig. 3.5와 같다. 설치형상은 Lazy wave 형이며 높은 파도와 강한 조류에서 넓은 운동범위를 가지나 부이의 과동요에 따른 급격한 인장력과 충격을 완화할 수 있으며, 충분한 touch down length를 확보할 수 있는 것이 특징이다. Dynamic cable의 총 길이는 695m이고 중간에 적절한 부력을 갖는 DBM을 부착하여 케이블이 바닥에 닿거나 수면 위로 뜨지 않도록 하였으며 wave형의 설치형상을 유지시키는 역할을 한다. 그리고 dynamic cable의 종단부에는 수중중량 6.0톤의 싱커를 달아 배열케이블이 들리거나 끌리는 것을 방지하였다. 해석시 적용된 수중케이블 제원은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Properties of submerged cable

Description		Dynamic cable	Array-assembly cable
Length(m)		695.0	80.0
Diameter(m)		0.035	0.045
Mass per Unit(kg/m)	in air	2.4	4.12
	in seawater	1.629	2.35
MBL(kN)		388.0	98.0
Bend radius(mm)		500.0	500.0
Bending stiffness(kN· m ²)		0.129	0.264
Axial stiffness(kN)		50.4E3	64.08E3
Torsional stiffness(kN· m ²)		1.28	1.28
Drag coefficient		0.47	0.47
Inertia coefficient		2.0	2.0
Seabed friction coefficient		0.4	0.4

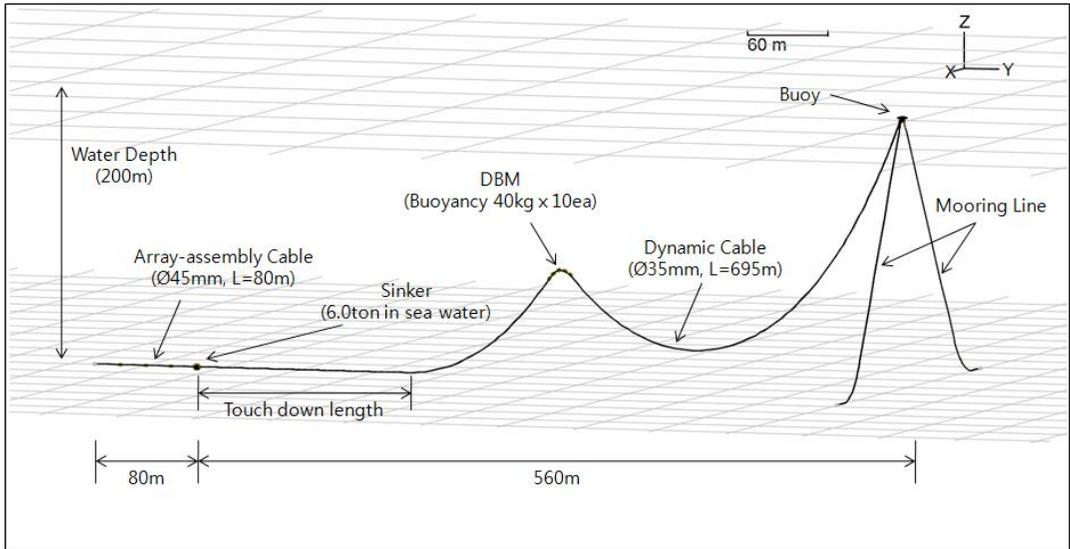


Fig. 3.5 Submerged cable arrangement

3.4.2 수중케이블 동적해석 결과 분석

수중케이블 동적해석은 계류시스템 계류해석과 동일한 하중조건을 적용하였으며 부이와 계류시스템의 연성효과를 함께 고려하였다. 하중조건별 수중케이블 최대 인장력 값은 Fig. 3.6의 케이블 node점의 값을 취하였으며, 해석 결과는 Table 3.2와 같다. Dynamic cable의 최대 인장력은 상단이 24.6kN, 하단이 21.8kN으로 계산되었다. 그리고 배열케이블은 dynamic cable과의 사이에 싱커가 설치되므로 인장력이 발생하지 않았다. Fig. 3.16~Fig. 3.31은 dynamic cable의 node A와 node B에서 계산된 케이블 인장력의 시계열이다.

수중케이블에서 발생하는 인장력의 최대값은 케이블의 최소파단강도(MBL)를 초과하지 않아야 하며 설계기준에 적합한 안전율을 확보하여야 한다. 수중케이블 파단에 대한 안전기준은 계류선과 마찬가지로 API RP 2SK의 계류선 최소 안전율 기준에 따라 동해석(dynamic analysis)시 1.67을 적용하였다. 평가 결과 최대 인장력 24.6kN에 대한 안전율은 15.8로 허용안전율 1.67을 크게 초과하여 기준을 만족하는 것으로 평가되었다. 수중케이블 안전성 평가 결과는 Table 3.3과 같다.

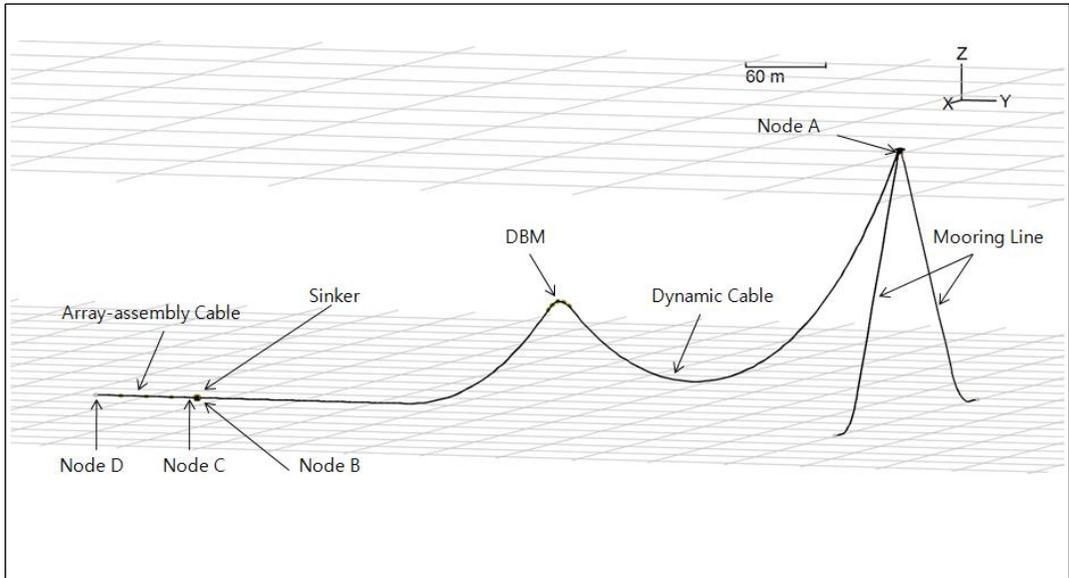


Fig. 3.6 Cable tension calculation point

Table 3.2 Result of cable tension for submerged cable

L/C	Dynamic cable(kN)				Array-assembly cable(kN)			
	Node A	Max.	Node B	Max.	Node C	Max.	Node D	Max.
LC-1	14.4	24.3	3.2	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0
LC-2	15.4		10.0		0.0		0.0	
LC-3	24.6		21.8		0.0		0.0	
LC-4	14.5		11.1		0.0		0.0	
LC-5	16.6		3.6		0.0		0.0	
LC-6	17.1		0.9		0.0		0.0	
LC-7	16.4		0.8		0.0		0.0	
LC-8	15.2		0.9		0.0		0.0	

Table 3.3 Maximum cable tension and safety evaluation of dynamic cable

Dynamic cable			Safety	
Dia.	MBL(kN)	Max. Tension(kN)	Safety Factor	Safety check (Allow. S.F=1.67)
Ø35mm	388.0	24.6	15.8	O.K

Fig. 3.7은 하중 조건별로 dynamic cable의 상단에서 하단까지의 인장력 분포를 나타내는 그래프이며, 케이블 상단은 부이의 동요로 인해 인장력이 큰 값을 보이고 있으며 점점 줄어들다 DBM이 설치된 곳에서 부력에 의해 다소 상승하다 다시 점점 줄어드는 경향을 보인다.

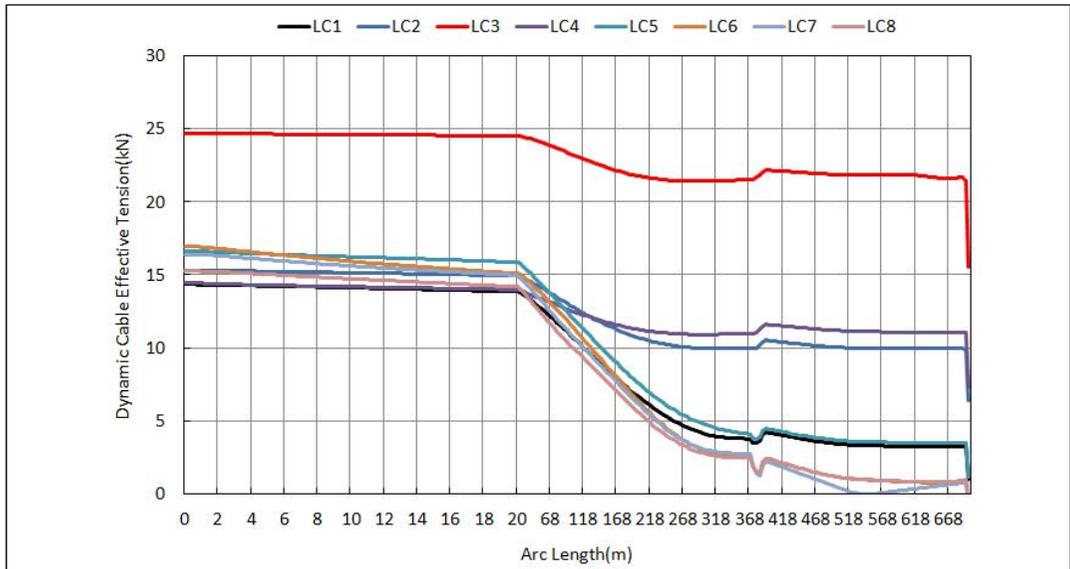


Fig. 3.7 Cable tension distribution along arc length of dynamic cable

Fig. 3.8~Fig. 3.15는 각 하중조건별 수중케이블의 거동특성을 보여준다. 하중 방향에 따라 부이는 강한 조류로 인해 초기위치에서 최대 70~80m까지 수평이동 하며 수면변동에 따라 과도한 6자유도 운동이 발생하지만 케이블은 lazy wave형의 설치형상을 잘 유지하고 있으며 인장력이 크게 발생하지 않음을 알 수 있다. 이것은 케이블의 설치형상(lazy wave)이 부이가 조류에 밀리거나 수직동요하는 거리만큼의 여유길이를 충분히 확보하고 있기 때문에 어떤 위치에서도 케이블이 긴장하지 않고 느슨한 연결이 가능하여 급격한 인장력이 발생하는 것을 방지하였기 때문인 것으로 판단된다. Table 3.4와 Table 3.5는 수중케이블의 곡률반경과 touch down length 계산결과로 허용기준을 만족하며 충분한 touch down length가 확보되어 완만한 경사를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.4 Minimum bend radius and safety evaluation of dynamic cable

L/C	Min. Bend radius(m)	Allowable bend radius(m)	Safety
LC-1	5.36	0.5	O.K
LC-2	6.16		
LC-3	4.29		
LC-4	7.33		
LC-5	9.19		
LC-6	5.82		
LC-7	4.31		
LC-8	5.87		

Table 3.5 Touch down length of dynamic cable

L/C	Touch down length(m)	Min.(m)
LC-1	131	60.0
LC-2	105	
LC-3	60	
LC-4	105	
LC-5	133	
LC-6	149	
LC-7	155	
LC-8	149	

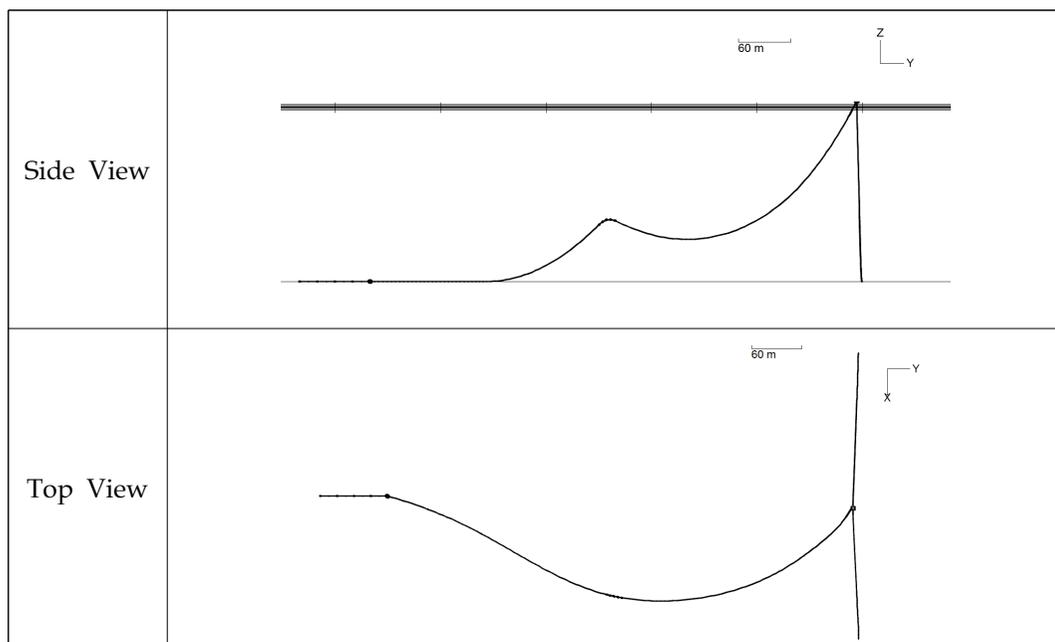


Fig. 3.8 Behavior characteristics of submerged cable(LC1)

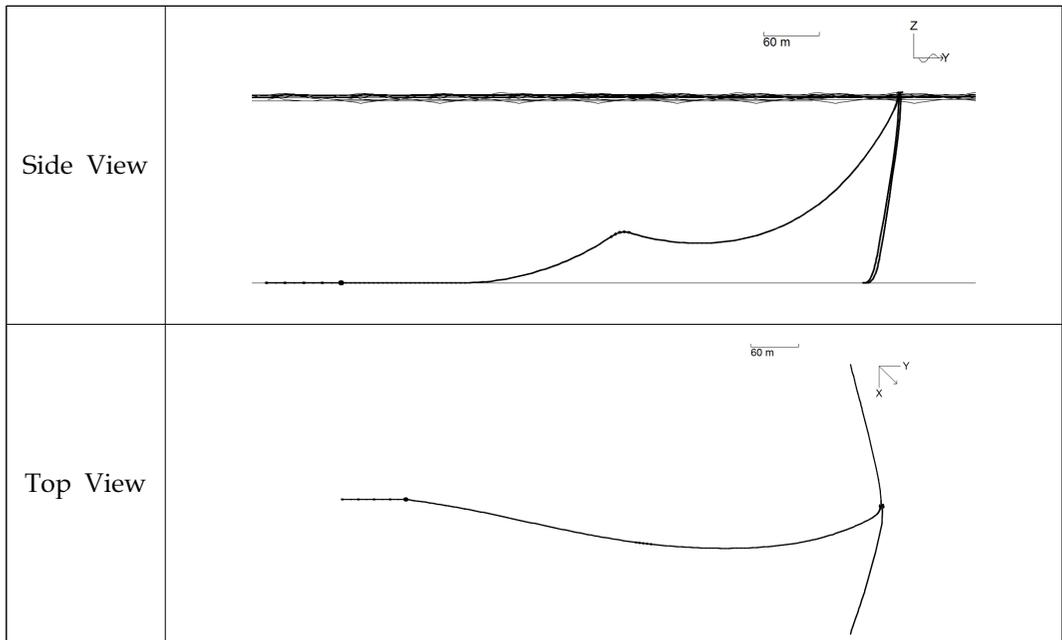


Fig. 3.9 Behavior characteristics of submerged cable(LC2)

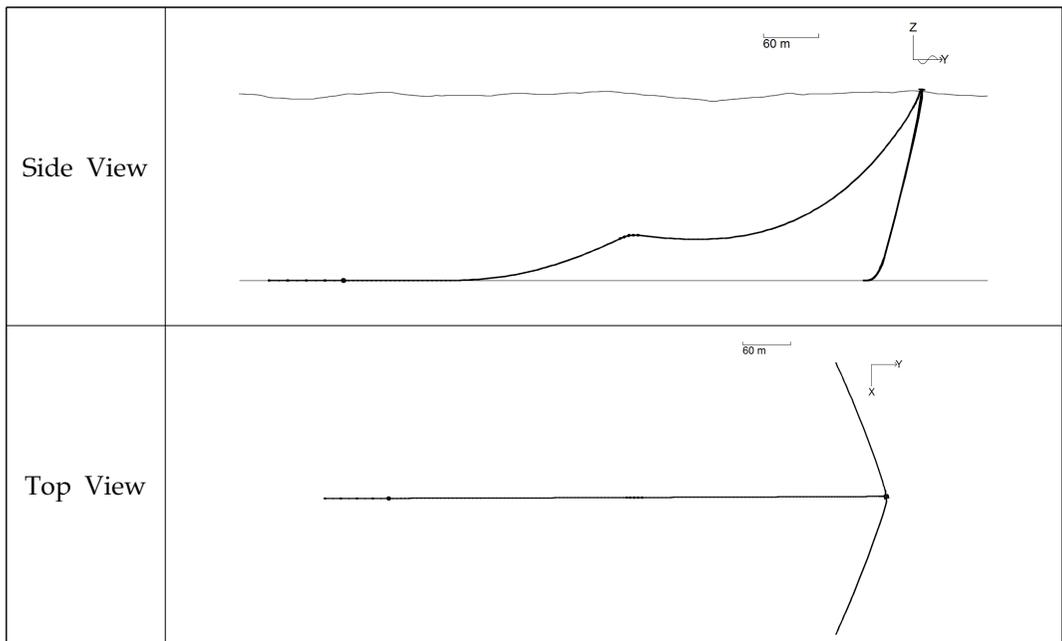


Fig. 3.10 Behavior characteristics of submerged cable(LC3)

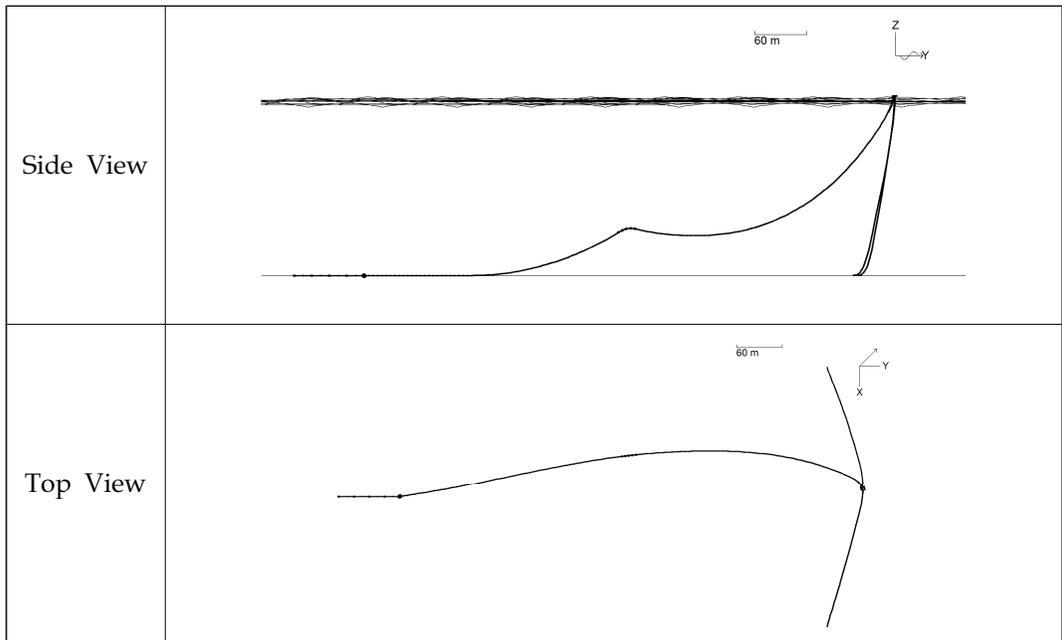


Fig. 3.11 Behavior characteristics of submerged cable(LC4)

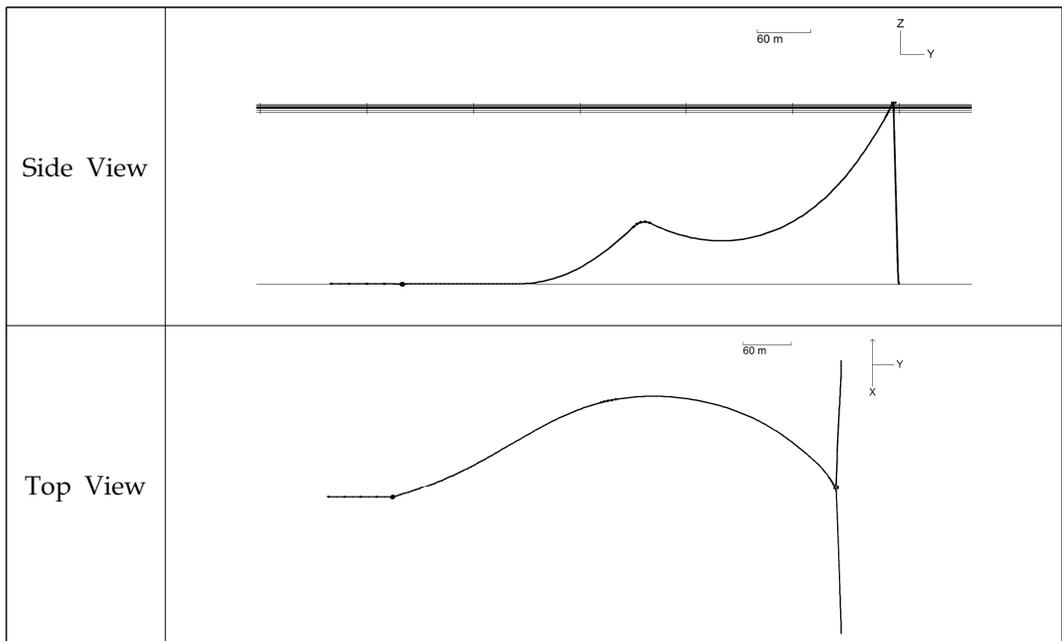


Fig. 3.12 Behavior characteristics of submerged cable(LC5)

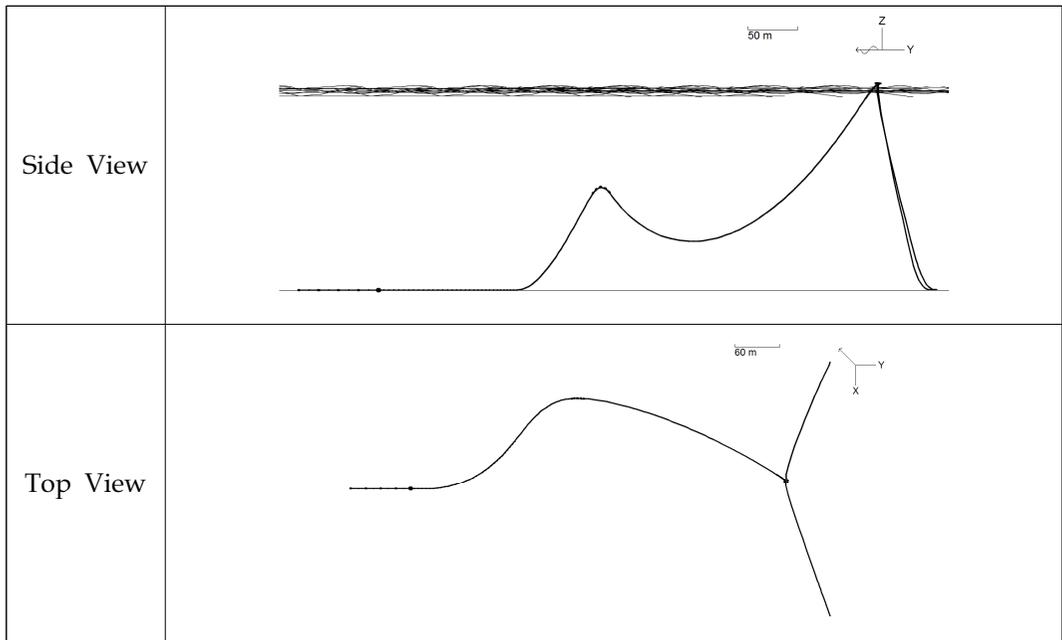


Fig. 3.13 Behavior characteristics of submerged cable(LC6)

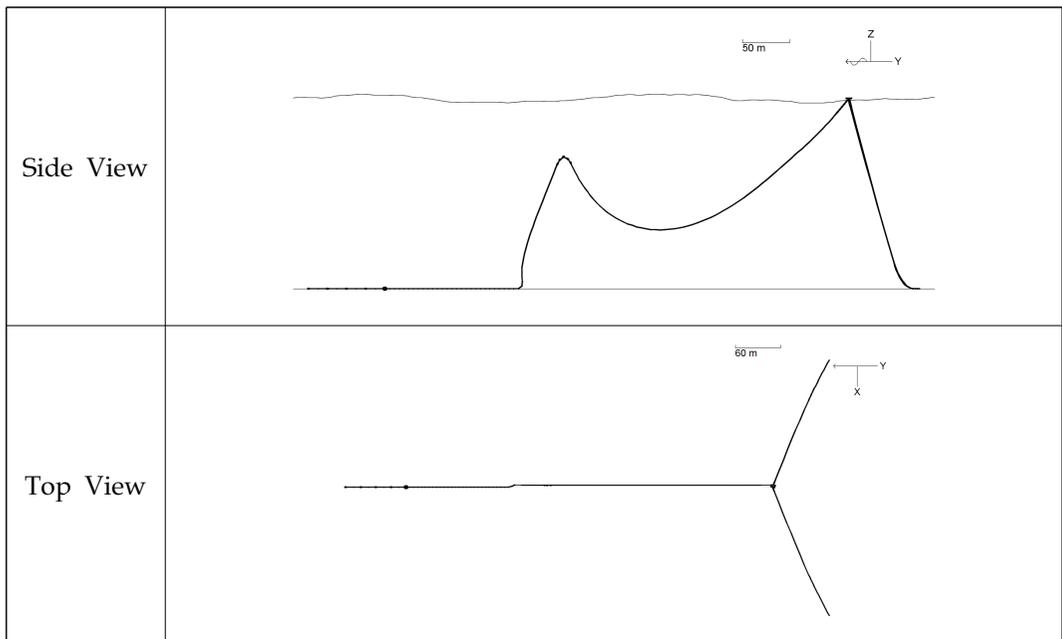


Fig. 3.14 Behavior characteristics of submerged cable(LC7)

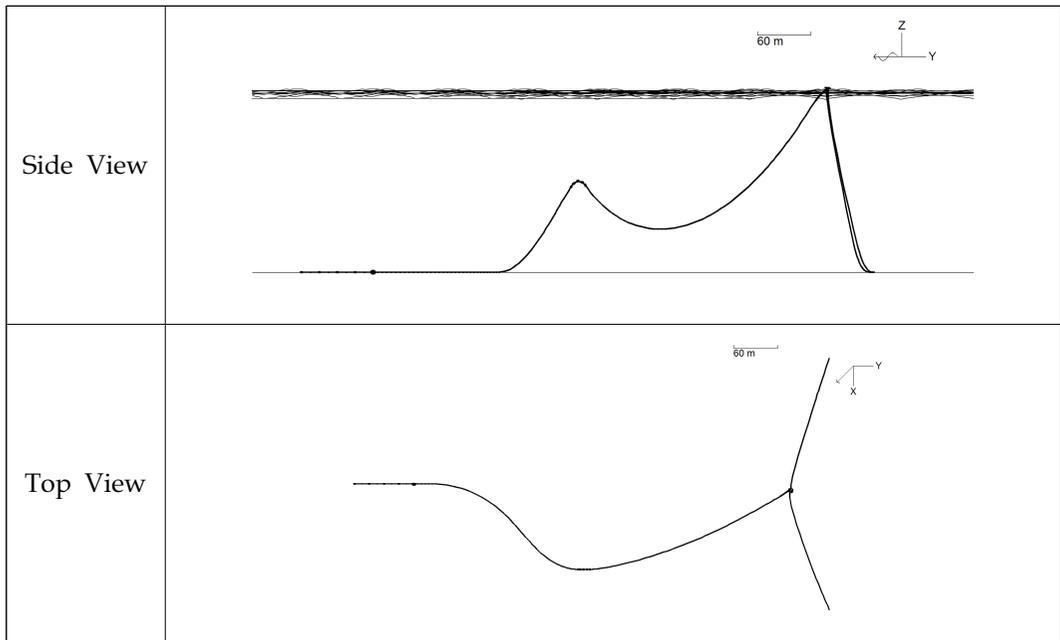


Fig. 3.15 Behavior characteristics of submerged cable(LC8)

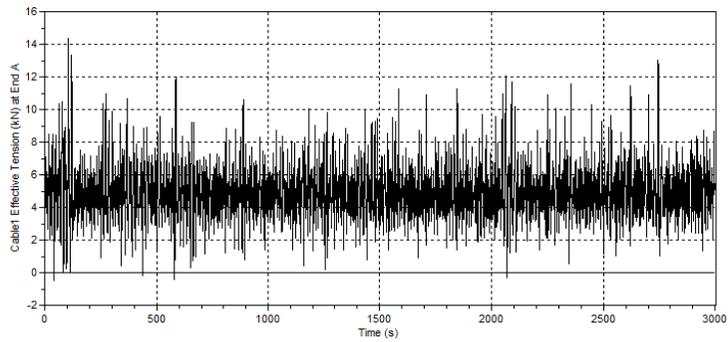


Fig. 3.16 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC1)

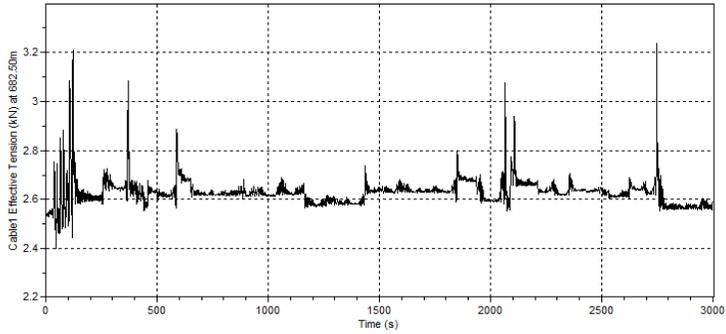


Fig. 3.17 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC1)

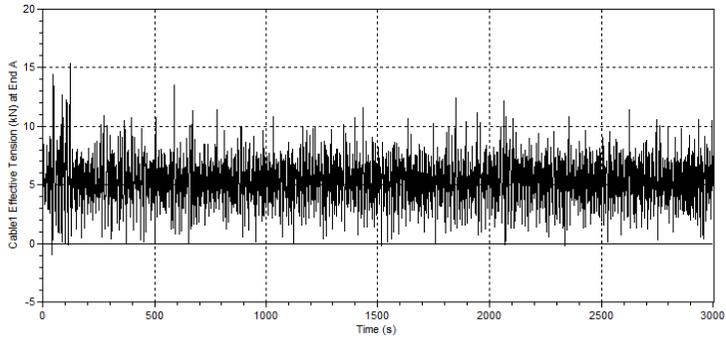


Fig. 3.18 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC2)

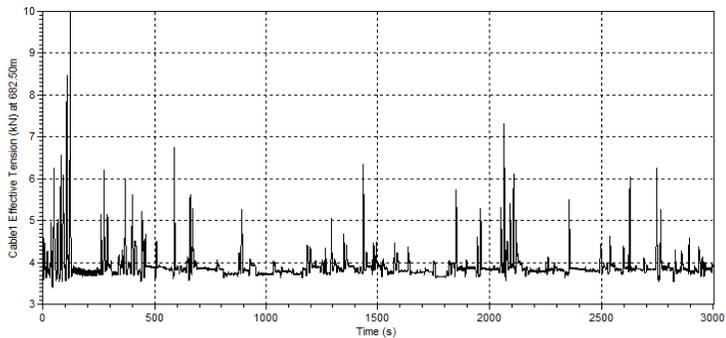


Fig. 3.19 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC2)

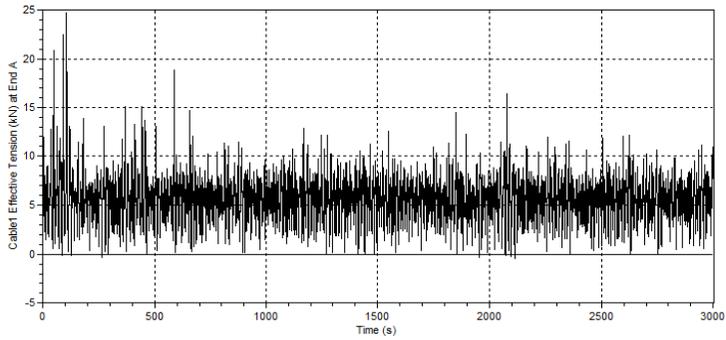


Fig. 3.20 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC3)

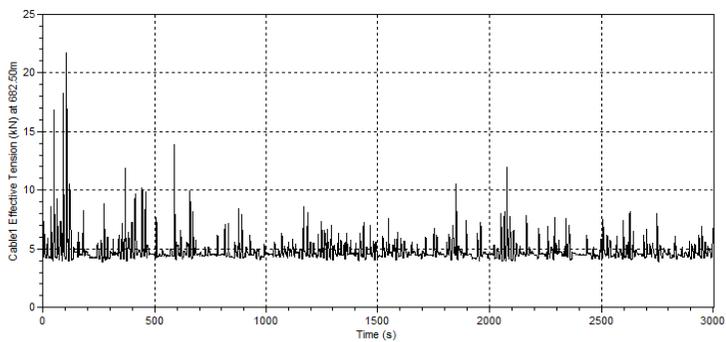


Fig. 3.21 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC3)

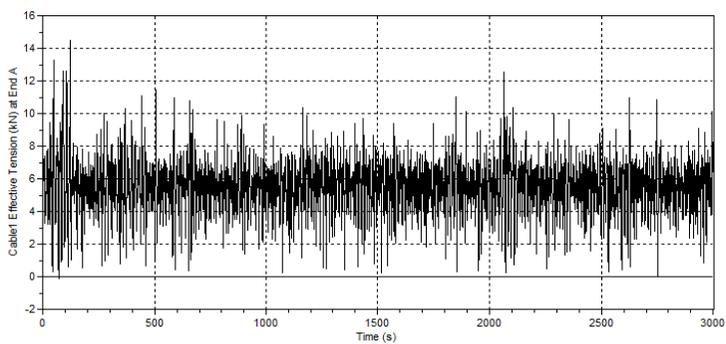


Fig. 3.22 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC4)

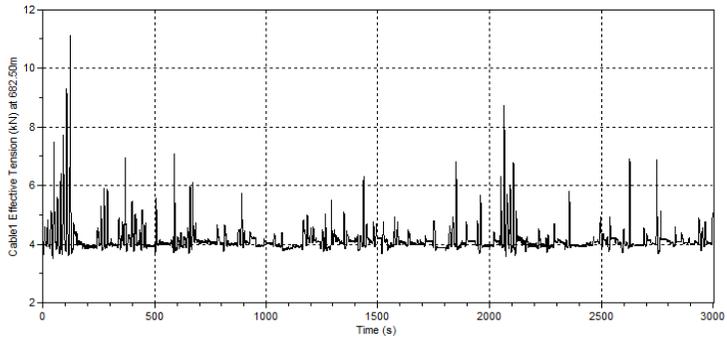


Fig. 3.23 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC4)

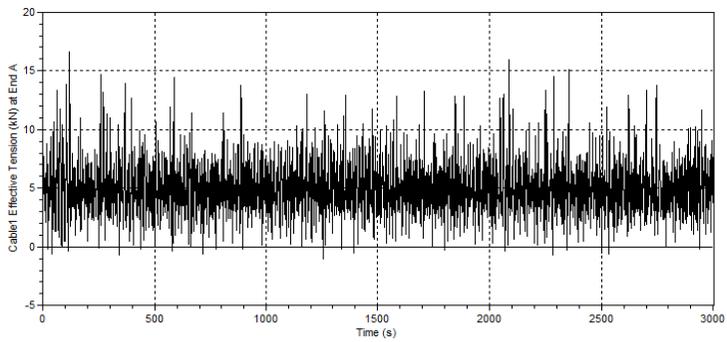


Fig. 3.24 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC5)

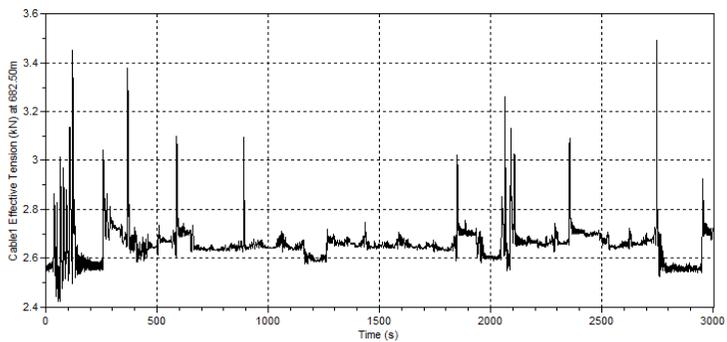


Fig. 3.25 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC5)

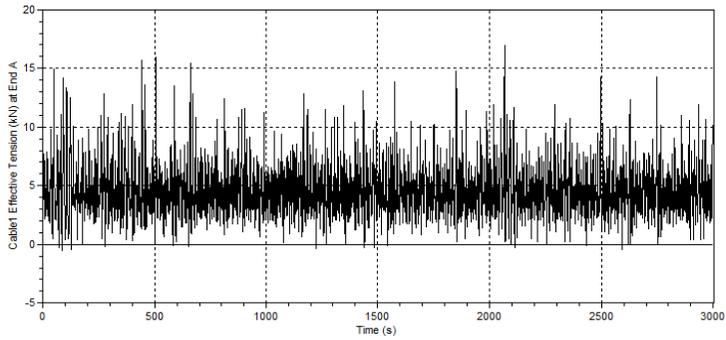


Fig. 3.26 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC6)

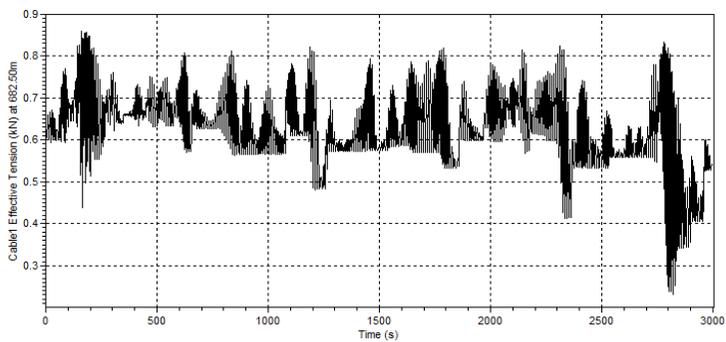


Fig. 3.27 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC6)

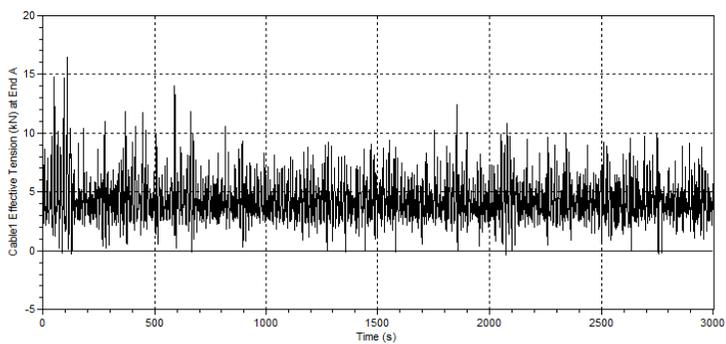


Fig. 3.28 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC7)

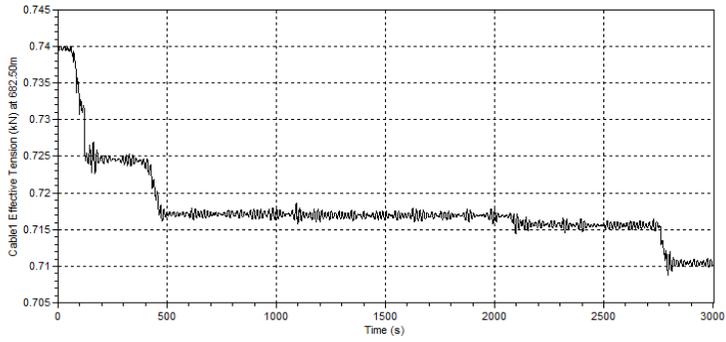


Fig. 3.29 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC7)

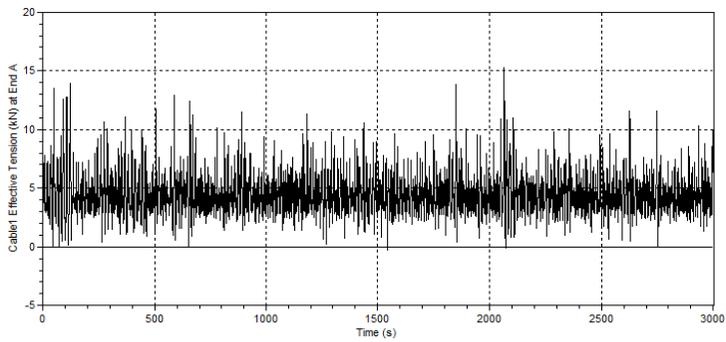


Fig. 3.30 Time history of cable tension for dynamic cable node A(LC8)

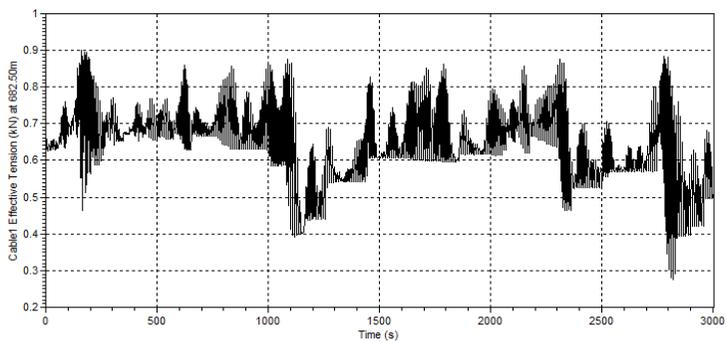


Fig. 3.31 Time history of cable tension for dynamic cable node B(LC8)

3.5 Lazy Wave형 수중케이블 안정성

3.5.1 VIV(Vortex Induced Vibration)

조류가 수중케이블을 지날 때 케이블 후류에는 난류에 의한 소용돌이가 생겨서 케이블 배후를 불안정하게 한다. 배후 소용돌이는 케이블에 작용하는 동압을 주기적으로 변화시켜, 케이블의 경간을 진동시키는데 이는 케이블 직경과 유속에 관계된다. 스트로울 진동(strouhal frequency)이 케이블 경간의 고유진동과 일치하면 공진현상이 발생하는데 이는 케이블 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 검토가 필요하며, VIV에 의한 공진 가능성은 DNV-OS-F201 기준에 따라 평가하였다.

Vortex shedding frequency는 식 (12)에 의해 계산된다.

$$f_s = S_t \frac{U}{D} \quad (12)$$

여기서, f_s : vortex shedding frequency

U : local tangential flow velocity(1.0m/s)

D : outer cable diameter(0.035m)

S_t : strouhal number(Typically $s_t=0.14$ to 0.25)

위 식에 따른 vortex shedding frequency 계산 결과는 다음과 같으며, 공진 주파수는 4.0~7.1Hz로 계산되었다.

Table 3.6 Calculation result of vortex shedding frequency(f_s)

U(m/s)	D(m)	St	fs(Hz)
1.0	0.035	0.14~0.25	4.0~7.1

케이블의 고유주기는 modal 해석을 통하여 산정하였으며 산정 결과는 Table 3.7과 같다. 케이블의 고유주파수는 1차 모드에서 0.035Hz이며 20차 모드에서

0.372Hz로, 1차~20차까지의 고유주파수 범위는 0.035~0.372Hz로 나타났다. 따라서 vortex shedding에 의한 공진주파수가 4.0~7.1Hz이고 케이블의 고유주파수가 0.035~0.372Hz로 서로 일치하지 않으므로 공진 가능성은 크지 않은 것으로 평가되었다.

Table 3.7 Calculation result of natural period for dynamic cable

Mode	Period (s)	Frequency (Hz)
1	28.470	0.035
2	23.012	0.043
3	14.531	0.069
4	12.502	0.080
5	9.598	0.104
6	9.106	0.110
7	7.237	0.138
8	6.233	0.160
9	5.803	0.172
10	5.291	0.189
11	4.817	0.208
12	4.491	0.223
13	4.144	0.241
14	3.664	0.273
15	3.641	0.275
16	3.626	0.276
17	3.218	0.311
18	3.010	0.332
19	2.905	0.344
20	2.690	0.372

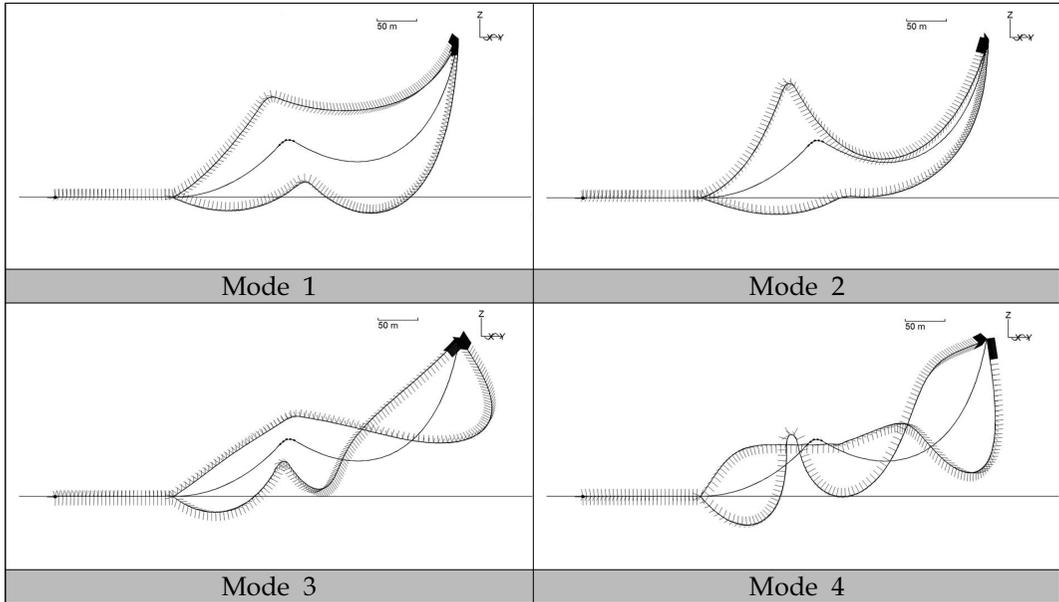


Fig. 3.32 Modal analysis result of dynamic cable

3.5.2 Dynamic Cable 피로해석

Dynamic cable은 설치 후 설계수명 동안 교체되지 않고 사용하므로 강도뿐만 아니라 적절한 피로성능이 확보되어야 한다. Dynamic cable에 작용하는 하중은 주로 환경외력과 계류시스템과 연성된 부이의 불규칙파랑 중 동적 거동에 의한 인장력이며 이 중 부이 거동에 의한 영향이 지배적이다.

케이블의 피로손상을 평가하는 방법으로는 Spectral법, Rain flow counting법, 규칙파법 등이 있으며 모두 케이블에 작용하는 동적 응력의 장기분포를 예측하는 방법으로 본 연구에서는 Spectral법을 사용하였다. Spectral법은 케이블의 장력 응답 스펙트럼(stress response spectrum)의 분산(0차 모멘트)을 각 해상 상태별로 계산한 후 short-term 기간 동안 stress range의 확률 분포를 Rayleigh 혹은 Dirlik's로 가정하여 피로 손상을 추정하는 방법이며, 본 연구에서는 Dirlik's 분포를 적용하였다.

적용된 T-N 선도는 BV NR493의 multi-strand wire rope($m=4.09$, $K=231$)를 사용하였으며 Fig 3.10과 같다. 파랑의 연간 빈도수는 제주도 강정항 전면 해상

의 24년간(1979~2020년) 장기 파랑산출자료(출처: 국립해양조사원)를 사용하였으며 Table 4.8과 같다.

피로해석 결과는 Table 3.9와 같다. Dynamic cable은 부이 거동에 의해 장력 변화가 큰 부이 연결부에서 가장 큰 피로손상을 나타내었다. 피로수명은 약 10.3년으로 계산되었으며 케이블 교체주기를 결정하기 위한 기준으로 활용하였다.

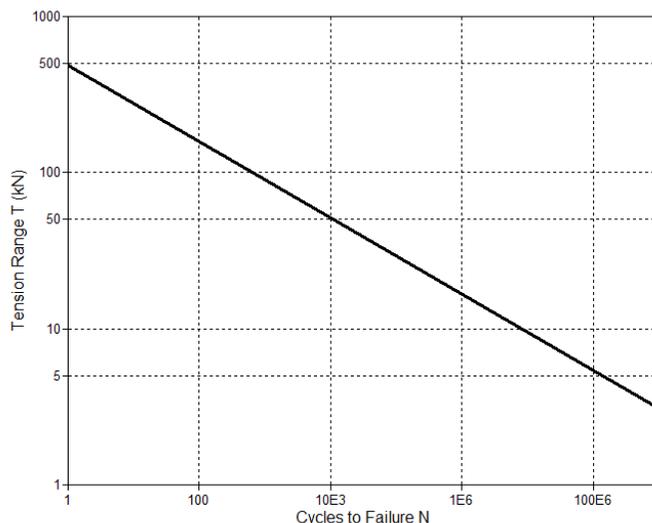


Fig. 3.33 T-N Curve of dynamic cable
(BV NR 493, multi-strand wire rope)

Table 3.8 Wave occurrence rate(South sea of Seogwipo, KHOA)

Wave height (m)	Wave period (sec)	Occurrence rate(%)	Exposure time (hours)
1.0	3.86	58.32	5,108.8
2.0	5.46	34.96	3,062.5
3.0	6.69	5.4	473.0
4.0	7.72	0.95	83.2
5.0	8.63	0.25	21.9
6.0 이상	11.58	0.12	10.5
합계		100	8,760

Table 3.9 Result of fatigue analysis

Worst damage	
Damage over total exposure	0.09725
Total exposure time (years)	0.9993
Life (years)	10.2759
Arc length (m)	0.0

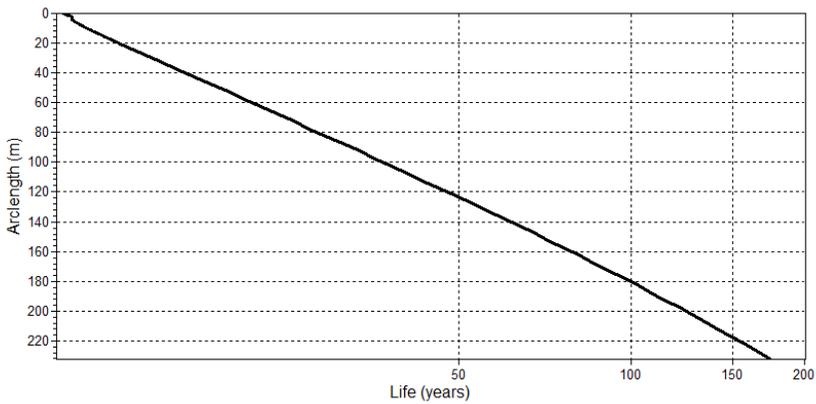


Fig. 3.34 Result of fatigue life evaluation along arc length for dynamic cable

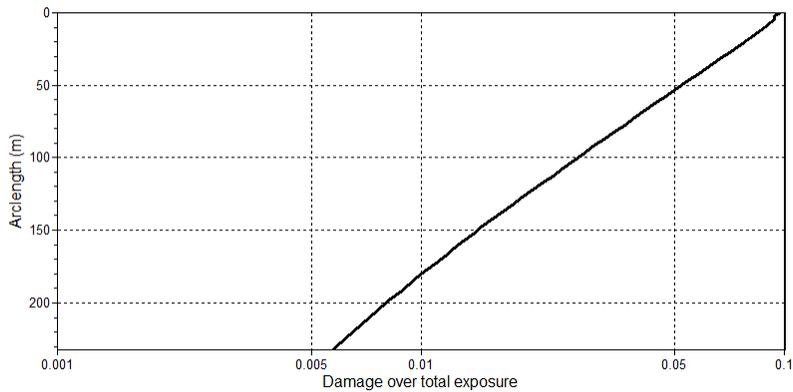


Fig. 3.35 Result of fatigue damage evaluation along arc length for dynamic cable

3.5.3 배열케이블의 On-Bottom Stability

수중음향센서가 선배열된 배열케이블은 해저에 선형으로 포설되며 매설하지 않고 해저면상에 노출시키게 되므로 파랑과 조류에 의한 직접적인 영향을 받는다. 수중에 노출된 배열케이블은 파랑의 파입자 속도와 가속도에 의한 항력(drag force)과 양력(lift force), 그리고 관성력(inertia force)을 받고, 조류에 의한 항력과 양력을 받는다. 이 때 관성력과 항력은 하중 방향과 같은 방향으로, 그리고 양력은 연직 방향으로 작용하며 배열케이블은 이러한 외력으로부터 충분한 안정성을 확보하여야 한다.

일반적으로 해저케이블을 보호하는 방법으로 매설 또는 상부를 보호공으로 뒷채움하는 방법 등이 있으나 배열케이블은 설치와 회수가 용의하여야 하고 수중음향센서가 수중에 직접 노출되는 것을 원칙으로 하므로 이러한 방법은 적절치 않다. 또 다른 방법은 케이블에 일정한 간격으로 중량물을 부착하여 안정성을 확보하는 방법으로 세굴로 인한 구조적인 문제만 없다면 설치와 회수가 매우 간편한 방법이다.

해저면에 설치된 배열케이블이 파랑과 조류에 의해 발생하는 외력으로부터 안정성을 유지하기 위해서 총 길이 80m의 배열케이블에 19.5m 간격으로 중량물(weight block)을 설치하였으며 DNV-RP-F109 기준의 on-bottom stability 평가 절차에 따라 중량물 중량의 적절성을 검증하였다.

배열케이블 직경은 45mm이며 수중에서의 중량은 2.35kg/m이다. 중량물은 수중에서의 중량이 20kg이고 19.5m 간격으로 5기가 설치되었다. 배열케이블과 중량물 제원은 Table 3.10과 같으며 배치도는 Fig. 3.36과 같다.

Table 3.10 Dimension of array-assembly cable and weight block

Description		Dimension	Remark
Array-assembly cable	Dia.(D)	45mm	
	Weight	in air(w_{air})	4.12kg/m
		in seawater(w_{sea})	2.35kg/m
Weight of weight block		20kg×5EA@19.5m	in seawater

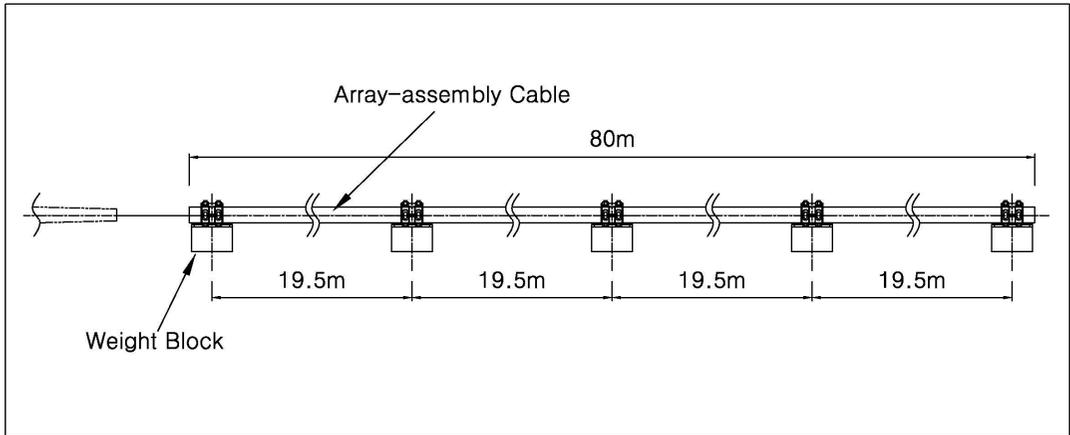


Fig. 3.36 Weight block arrangement of array-assembly cable

배열케이블이 설치되는 해역의 수심은 200m이며 on-bottom stability 평가를 위한 해상조건은 파고 9.0m, 조류속 1.0m로 파랑과 조류는 케이블의 횡방향(90°)으로 입사되어 들어오는 것으로 가정하였다. On-bottom stability 평가 조건은 Table 3.11과 같다.

Table 3.11 Evaluation condition of On-Bottom Stability

Description		Dimension	Remark
Water depth(d)		200m	
Density(ρ_s)		1,025kg/m ³	seawater
Wave conditions	Height(H_s)	9.0m	
	Period(T)	11.58sec	
	Angle between wave direction and pipe(θ_w)	90°	
Current conditions	Velocity(v)	1.0m/s	
	Angle between current direction and pipe(θ_c)	90°	
	Reference measurement height over sea bed(z_r)	200m	

가. Current Condition

해수면에서의 조류속은 수심에 따라 감소하며 배열케이블 설치 수심에서의 조류속은 식 (12)에 의해 산정된다. 해저질을 평균입경(d_{50}) 0.5mm의 medium sand로 가정하여 bottom roughness parameter(z_0)를 적용하였을 때 해수면에서의 유속 1.0m/s에 대하여 배열케이블이 설치되는 수심 200m에서의 조류속(V^*)은 식 (13)에 의해 0.391m/s로 계산되었다.

$$V^* = V_c(z_r) \cdot \left\{ \frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{z_0 + 1}\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right\} \cdot \sin\theta_c \quad (13)$$

- 여기서, V^* : 설치위치의 조류속도(m/s)
 $V_c(z_r)$: 측정위치에서의 조류속도(1.0m/s)
 z_0 : 설치지반의 Bottom Roughness Parameter(0.00004m)
 D : 케이블 지름(0.045m)
 z_r : 조류속도 측정높이(200m)
 θ_c : 조류의 입사각도(90°)

Table 3.12 Seabed roughness(Reference: DNV-RP-F109_On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines)

Seabed	Grain size d_{50} (mm)	Roughness z_0 (m)
Silt and clay	0.0625	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	0.5	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	4.0	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	25	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	125	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	500	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

나. Wave Condition

(1) JONSWAP peak-enhancement factor

JONSWAP peak-enhancement factor는 식 (14)에 의해 계산된다.

$$\gamma = \begin{cases} 5.0, & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi), & 3.6 < \varphi < 5.0 \\ 1.0, & \varphi \geq 5.0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (14)$$

- $\varphi = 3.86$
- $\gamma = 3.71$

여기서, γ : JONSWAP peak-enhancement factor

H_s : 유의파고(9.0m)

T_p : 파랑주기(11.58sec)

(2) Significant flow velocity(U_s)

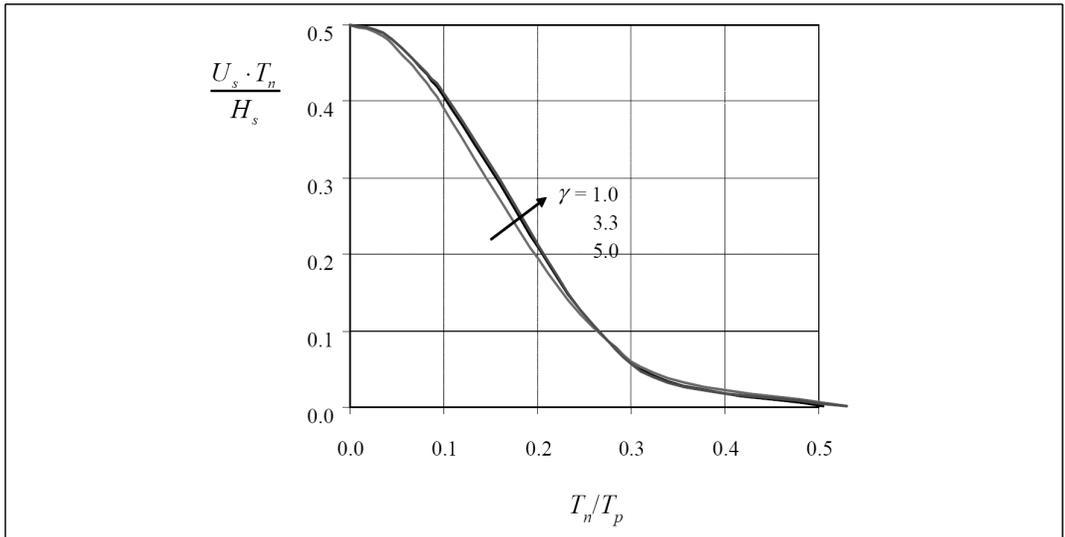


Fig. 3.37 Significant flow velocity amplitude U_s at seabed level

$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (15)$$

여기서, T_n : 참조주기(4.515sec)
 d : 수심(200m)
 g : 중력가속도(9.8m/s²)
 U_s : 파랑에 의한 흐름속도(m/s)
 T_p : 파주기(11.58sec)

위 그래프에 따르면 significant flow velocity(U_s)는 0.026m/s로 산정된다

(3) Mean zero up-crossing period(T_u)

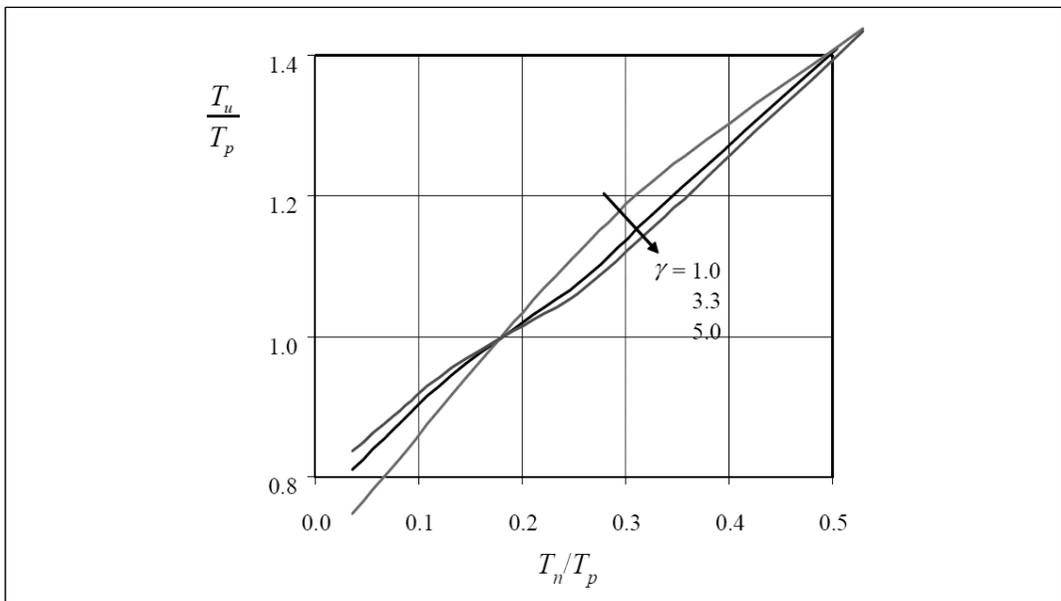


Fig. 3.38 Mean zero up-crossing period of oscillating flow T_u at seabed level

위 그래프에 따르면 mean zero up-crossing period(T_u)는 14.614sec로 산정된다.

(4) 진동속도(U^*)

해저 케이블에 작용하는 파랑에 의한 진동 속도는 식 (16)에 의해 계산되어진

다.

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) = 1.897 \quad (16)$$

여기서, τ : 저면 속도 스펙트럼의 진동횟수($\frac{T}{T_u}=739.017$)

T : Sea states의 지속시간(3시간)

$$U^* = 0.026 \times 1.897 = 0.049\text{m/s}$$

(5) 진동속도 주기(T^*)

해저 케이블에 작용하는 파랑에 의한 진동 속도 주기는 식 (17)에 의해 계산되어진다.

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{for } T_n/T_u \leq 0.2 \\ 1 & T_n/T_u > 0.2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{여기서, } k_t = \begin{cases} 1.25 & \text{for } \gamma = 1.0 \\ 1.21 & \text{for } \gamma = 3.3 \\ 1.17 & \text{for } \gamma = 5.0 \end{cases}$$

$$T_n / T_u = 0.30895$$

$$k_t = 1.20$$

$$T^* / T_u = 1.0$$

$$T^* = 14.614\text{sec}$$

다. 하중감소 요소

해저케이블의 on-bottom stability 평가시 하중의 감소 조건은 다음과 같다.

(1) 해저면의 투수성에 의한 하중감소 계수

해저면의 투수성에 따라 케이블에 작용하는 수직하중은 감소하게 되며 해저면을 불투수성으로 가정할 경우 감소 계수는 0.7을 적용한다.

$$r_{perm,z} = 0.7$$

(2) 케이블의 지반 침투에 의한 하중감소 계수

케이블의 해저면 지반 침투에 따라 케이블에 작용하는 하중은 감소한다.

$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4 \cdot \frac{z_p}{D} \quad \text{however } \geq 0.3$$

$$r_{pen,z} = 1.0 - 1.3 \cdot \left(\frac{z_p}{D} - 0.1 \right) \quad \text{however } \geq 0.0$$

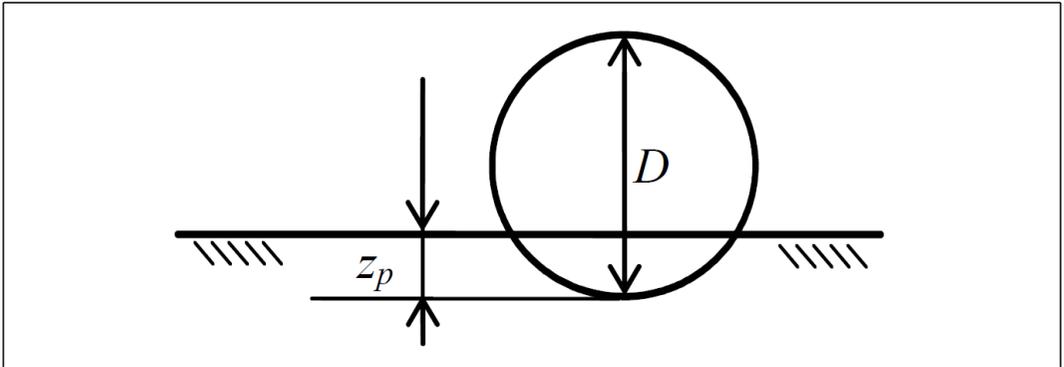


Fig. 3.39 Definition of penetration

z_p 를 0m로 가정하면 케이블의 해저면 침투에 따른 수평하중 감소계수 $r_{pen,y}$ 와 수직하중 감소계수 $r_{pen,z}$ 는 다음과 같이 산정되어진다.

$$r_{pen,y} = 1.0, \quad r_{pen,z} = 1.13$$

(3) 해저면 굴착 깊이에 따른 하중감소 계수

해저면의 굴착 깊이에 따라 케이블에 작용하는 하중은 감소하며 다음과 같이 적용 되어진다.

$$r_{tr,y} = 1.0 - 0.18 \cdot (\theta - 5)^{0.25} \cdot \left(\frac{z_t}{D} \right)^{0.42} \quad 5 \leq \theta \leq 45$$

$$r_{tr,z} = 1.0 - 0.14 \cdot (\theta - 5)^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D} \right)^{0.46} \quad 5 \leq \theta \leq 45$$

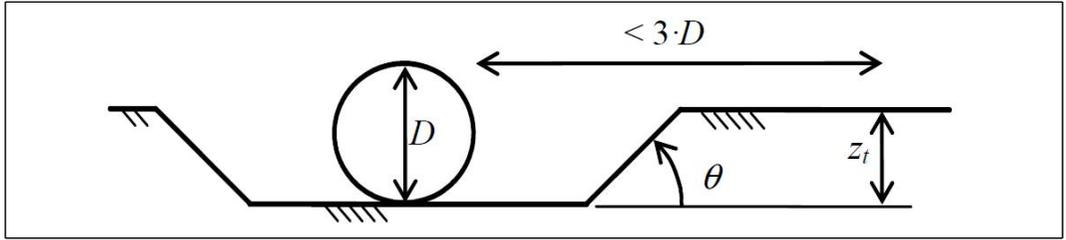


Fig. 3.40 Definition of trench parameters

해저면의 굴착 깊이는 0m이므로 $r_{tr,y}$ 와 $r_{tr,z}$ 는 모두 1.0으로 산정된다.

$$r_{tr,y} = 1.0, r_{tr,z} = 1.0$$

(4) 총하중 감소계수

총하중 감소계수는 다음과 같다.

$$r_{tot,y} = r_{perm,y} \cdot r_{pen,y} \cdot r_{tr,y} = 1.0 \quad (\text{수평방향 하중감소계수})$$

$$r_{tot,z} = r_{perm,z} \cdot r_{pen,z} \cdot r_{tr,z} = 0.791 \quad (\text{수직방향 하중감소계수})$$

라. 배열케이블 작용하중

배열케이블에 작용하는 최대수평하중(F_Y^*)과 최대수직하중(F_Z^*)은 식 (18)과 식 (19)에 의해 산정된다.

$$F_Y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (18)$$

여기서, F_Y^* : 최대수평방향 하중(0.004kN/m)

$r_{tot,y}$: 수평방향 하중감소계수(1.0)

ρ_w : 해수밀도(1,025kg/m³)

D : 케이블 지름(0.045m)

C_Y^* : 하중계수(1.0)

U^* : 파랑에 의한 흐름속도(0.049m/s)

V^* : 조류에 의한 흐름속도(0.391m/s)

$$F_Z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_z^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (19)$$

여기서, F_Z^* : 최대수직방향 하중(0.003kN/m)

$r_{tot,z}$: 수직방향 하중감소계수(0.791)

ρ_w : 해수밀도(1,025kg/m³)

D : 케이블 지름(0.045m)

C_z^* : 하중계수(0.91)

U^* : 파랑에 의한 흐름속도(0.049m/s)

V^* : 조류에 의한 흐름속도(0.391m/s)

하중계수 C_Y^* 와 C_z^* 는 Table 3.13에 의해 산정되며 K^* 와 M^* 는 식 (20)과 같다.

$$K^* = U^* T^* / D, M^* = V^* / U^* \quad (20)$$

Table 3.13 Load coefficients

C_Y^*	K^*											
	2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥140	
M^*	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52	1.30
	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33	1.22
	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18	1.14
	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14	1.09
	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10	1.05
	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08	1.00
	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05	1.00
	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01	1.00
	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.20	1.08	1.03	1.00	1.00	1.00
	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

C_z^*	K^*											
	≤2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥140	
M^*	0.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	0.1	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97
	0.2	3.16	3.45	3.74	2.60	1.86	1.45	1.26	1.16	1.09	1.00	0.90
	0.3	3.01	3.25	3.53	2.14	1.52	1.26	1.10	1.01	0.99	0.95	0.90
	0.4	2.87	3.08	3.35	1.82	1.29	1.11	0.98	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.6	2.21	2.36	2.59	1.59	1.20	1.03	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.8	1.53	1.61	1.80	1.18	1.05	0.97	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	1.0	1.05	1.13	1.28	1.12	0.99	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	2.0	0.96	1.03	1.05	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	5.0	0.91	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
10	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	

For $K^* < 2.5$ the peak horizontal load coefficient can be taken as $C_{Y,K=2.5}^* \cdot 2.5 / K^*$ where $C_{Y,K=2.5}^*$ is the relevant value in Table 3-9 under $K^* = 2.5$.

다. 배열케이블 안정성 평가

(1) Safety factor

케이블 안정성 평가시의 safety factor(γ_{sc})는 다음과 같이 DNV-RP-F109를 따르며 배열케이블에 대한 on-bottom stability 평가에서는 보수적으로 최대값인 2.54를 적용하였다.

Table 3.14 Safety factor(γ_{sc})

Description		Low	Normal	High
Winter storms in North Sea	Sand and rock	0.98	1.32	1.67
	Clay	1.00	1.40	1.83
Winter storms in Gulf of Mexico and Southern Ocean	Sand and rock	0.95	1.41	1.99
	Clay	0.97	1.50	2.16
Cyclonic conditions North West Shelf	Sand and rock	0.95	1.50	2.16
	Clay	0.95	1.56	2.31
Cyclonic conditions Gulf of Mexico	Sand and rock	0.95	1.64	2.46
	Clay	0.93	1.64	2.54

(2) On-Bottom Stability 평가

수평하중에 대한 on-bottom stability 평가 결과는 식 (21)과 같다.

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1.0 \quad (21)$$

여기서, γ_{sc} : Safety factor(2.54)

F_Y^* : 최대수평방향 하중(0.004kN/m)

F_Z^* : 최대수직방향 하중(0.003kN/m)

μ : 마찰계수(0.6 적용, 모래지반)

w_s : 케이블과 중량물의 수중중량(0.0353kN/m)

F_R : 토질에 의한 저항(0으로 가정)

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} = 0.62 \leq 1.0, \quad \therefore \text{OK}$$

수직하중에 대한 On-Bottom Stability 평가 결과는 식 (22)와 같다.

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Z^*}{w_s} \leq 1.0 \quad (22)$$

여기서, γ_{sc} : Safety factor(2.54)

F_Z^* : 최대수직방향 하중(0.003kN/m)

w_s : 케이블과 중량물의 수중중량(0.0353kN/m)

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Z^*}{w_s} = 0.14 \leq 1.0, \quad \therefore \text{OK}$$

검토결과 배열케이블은 20kg의 중량물(weight block) 5기를 19.5m 간격으로 배치시 파랑 및 조류하중에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

제 4 장 수리모형 실험 및 이론계산과의 비교해석

4.1 개요

부이형 수중감시 시스템의 계류 및 케이블 안정성에 대한 수치해석 결과값의 신뢰성 검증을 목적으로 축소모형에 대한 수리모형 실험을 2차원 조파수조에서 수행하였다. 불규칙파랑 중에서 부이의 운동응답과 계류장력 그리고 수중케이블의 설치형상에 대한 거동특성을 고찰하기 위하여 수리모형 실험을 통해 부이의 surge, heave, pitch 동요량, 계류선과 수중케이블의 장력을 측정하였으며, 파랑과 조류에 변화하는 수중케이블의 설치형상을 육안으로 관찰하였다.

수조는 한국해양대학교 해양시스템공학부에 있는 2차원 조파수조를 사용하였으며, 실험 시설의 규격을 고려하여 부이 축소모형의 축적은 1:43을 적용하였다. 그리고 수조의 수심과 길이, 폭에 의한 제약과 계류시스템 및 수중케이블 재질에 대한 정확한 상사가 불가능하여 수치해석의 계류시스템 및 수중케이블 모델을 수조실험과 최대한 유사한 조건으로 설정하여 재해석을 수행한 후 수리모형 실험 결과와 비교하였다.

4.2 실험방법 및 모형

4.2.1 실험방법

본 연구에서 대상으로 하는 부이형 수중감시 시스템의 불규칙파랑 중 부이의 운동응답은 3차원 모션 측정기를 사용하였다. 3차원 모션 측정기는 부이의 운동응답(surge, heave, pitch)을 측정하기 위한 장비로, 수중을 이동하는 계측 대상의 표면에 고정된 마커의 3차원 운동을 실시간으로 계측한다. 그리고 파고는

서보(servo)식 파고계를 이용하여 측정하였으며, 계류선과 수중케이블의 장력을 계측하기 위하여 수중에서 사용할 수 있는 방수형 1축 로드셀을 사용하였다.

본 실험에서 사용된 수조는 Fig. 4.1과 Table 4.1에 나타난 바와 같이 길이 25.0m, 폭 1.0m, 높이 1.3m의 조파수조로 조파기는 피스톤 형식이며 파고 20cm 까지 발생 가능하고 양방향 조류발생장치도 겸비하고 있다.

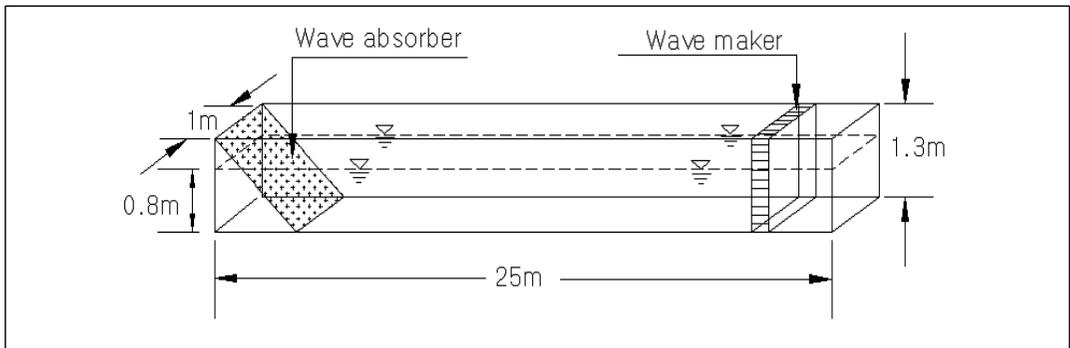


Fig. 4.1 Schematic of 2-Dimensional Ocean Engineering Basin

Table 4.1 Dimensions of 2-Dimensional Ocean Engineering Basin

Description	Dimension
Length	25.0m
Width	1.0m
Height	1.0m
Depth	0.8m
Wave generation range	Wave height : 30cm or less, Period : 0.5~3.0sec
Current generation range	Current velocity : 1.0m/s or less



Fig. 4.2 2-Dimensional Ocean Engineering Basin



Fig. 4.3 Tensiometer



Fig. 4.4 Wave-height meter

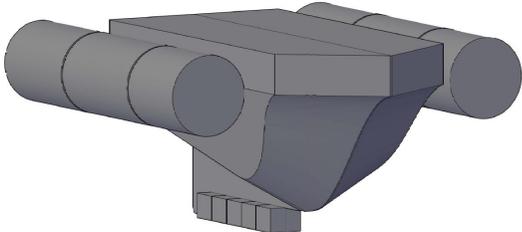


Fig. 4.5 3D position sensitive detector

4.2.2 실험모형

부이는 기하학적 상사법칙에 따라 길이(m)로 축척하여 상사하였으며, 실험시설의 규격을 고려하여 축소모형 축척은 1:43으로 선정하였다. 부이의 실제 제원과 실험모형의 제원 그리고 모형의 형상과 제작 과정은 Table 4.2와 Fig. 4.6과 같다.

Table 4.2 Experimental model data of the buoy(Scale : 1:43)

Description	Proto	Model	Model
Length	6.40m	0.15m	
Breadth	5.05m	0.12m	
Depth	2.48m	0.06m	
Draft	2.08m	0.05m	
Freeboard	0.4m	0.01m	
Center of gravity	1.05m	0.02m	

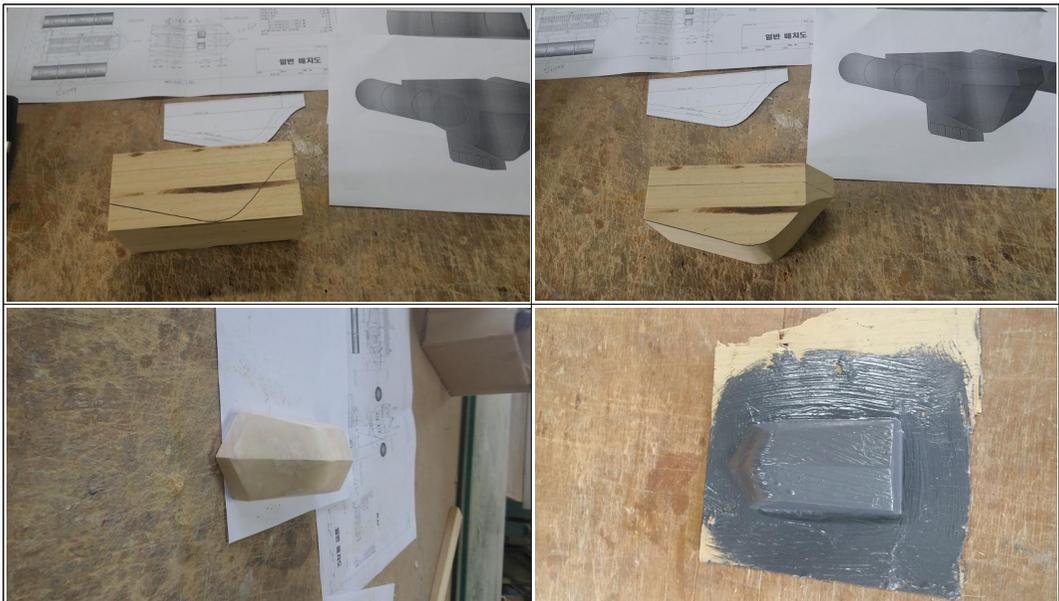




Fig. 4.6 Experimental model of buoy

본 실험에 적용된 계류시스템은 buoy chain, rope, anchor chain으로 구성되며 재질은 buoy chain과 anchor chain은 체인을, rope는 wire를 사용하였다. 수중케이블은 dynamic cable과 배열케이블 그리고 dynamic cable 중간에 부착되는 DBM으로 구성된다. Dynamic cable은 wire를, 배열케이블은 체인을 사용하였으며 DBM은 0.3kg의 부력을 갖는 부력재를 사용하였다. 축소모형에 사용된 계류선의 중량 및 강성값은 추정된 값이며 계류시스템 및 수중케이블 제원은 Table 4.3과 같다. 계류선 및 수중케이블 배치, 수조 내 설치 모습은 Fig. 4.7과 같다.

Table 4.3 Mooring line material properties applied to numerical analysis and model test

Configuration			Numerical analysis (Real scale)	Model test
Mooring system	Mooring line -1, 2	Pre-Tension	40kN	0.52N(Real scale : 40kN)
		Buoy chain	Chain, \varnothing 65mm, L=2.0m, Weight=0.907kN/m(in air), Axial Stiffness : 426.7kN	Chain, \varnothing 1.5mm, L=4.7cm, Weight=48E-9kN/m(in air), Axial stiffness : 0.023kN
		Rope	Wire, \varnothing 43mm, L=35.0m, Weight=0.012kN/m(in air), Axial stiffness : 218.2kN	Wire, \varnothing 1.0mm, L=81.0cm, Weight=3.9E-9kN/m(in air), Axial stiffness : 0.004kN
		Anchor chain	Chain, \varnothing 65mm, L=70.0m, Weight=0.907kN/m(in air), Axial stiffness : 426.7kN	Chain, \varnothing 1.5mm, L=163.0cm, Weight=48E-9kN/m(in air), Axial stiffness : 0.023kN
	Anchor		Fixed	Fixed
Under water cable	Dynamic cable	-	Wire, \varnothing 1.0mm, L=372.0cm, Weight=3.9E-9kN/m(in air), Axial stiffness : 0.004kN	
	Array-assembly cable	-	Chain, \varnothing 1.5mm, L=186.0cm, Weight=48E-9kN/m(in air), Axial stiffness : 0.023kN	
	DBM	-	0.3kg(buoyancy) \times 8EA	



Fig. 4.7 Model installation in Ocean Engineering Basin

4.2.3 실험조건

본 실험에 적용된 수심 및 외력조건은 Table 4.4와 같다. 2차원 조파수조에
 서 재현 가능한 최대 수심이 80cm이므로, 상사법칙에 따라 축척비 1/43을 적
 용할 경우 실제 수심은 34.4m까지 가능하다. 따라서 본 실험에서는 실제 수심

을 30m로 가정하며 이에 따른 조파수조 수심은 70cm를 적용하였다. 불규칙파에 대한 제원으로 실스케일 파고 5.0m, 파주기 11.0sec에 대하여 파고 0.12m, 파주기 1.68sec를, 그리고 유의파고($H_{1/3}$, significant wave height)와 평균주기(T , mean period)에 대한 두가지 변수를 적용한 ISSC 스펙트럼을 목적 스펙트럼으로 사용하였다. 조류속은 실제 스케일 1.0m/s에 대하여 0.15m/s를 적용하였다.

Table 4.4 Environmental condition of numerical analysis and model test

Description		Numerical analysis(Real scale)	Model test	Scale
Water depth		30m	0.7m	1/43
Wave	Hs	5.0	0.12	
	T	11.0sec	1.68sec	
	Wave spectrum	ISSC	ISSC	
Current velocity		1.0m/s	0.15m/s	

실험 조건은 부이의 운동응답과 계류선 장력 측정을 위한 Case-1과 수중케이블의 설치형상 관찰을 위한 Case-2로 나누어 수행하였다. 실험 Case-1은 부이의 운동응답(surge, heave, pitch)과 계류선의 장력을 계측하기 위한 실험조건으로 부이의 종방향으로 선수와 선미부에 2점 계류를 하고, 계류선의 장력 계측을 위하여 계류선 상단에 각각 장력계를 설치하였으며, 수중케이블은 따로 고려하지 않았다. 실험 Case-2는 수중케이블의 장력 계측과 설치형상 변화 관찰을 위한 실험조건으로 부이의 종방향으로는 부이를 고정시키기 위한 가계류를 하고, 부이의 횡방향으로 수중케이블을 연결하였으며, 케이블의 장력 계측을 위하여 dynamic cable 상단과 하단에 각각 장력계를 설치하였다.

수리모형 실험 Case-1과 Case-2 배치형상은 Fig. 4.8과 Fig. 4.9와 같으며 Case-1의 수치해석시 계류배치는 Fig. 4.10과 같다. 실험조건은 Table 4.5와 같다.

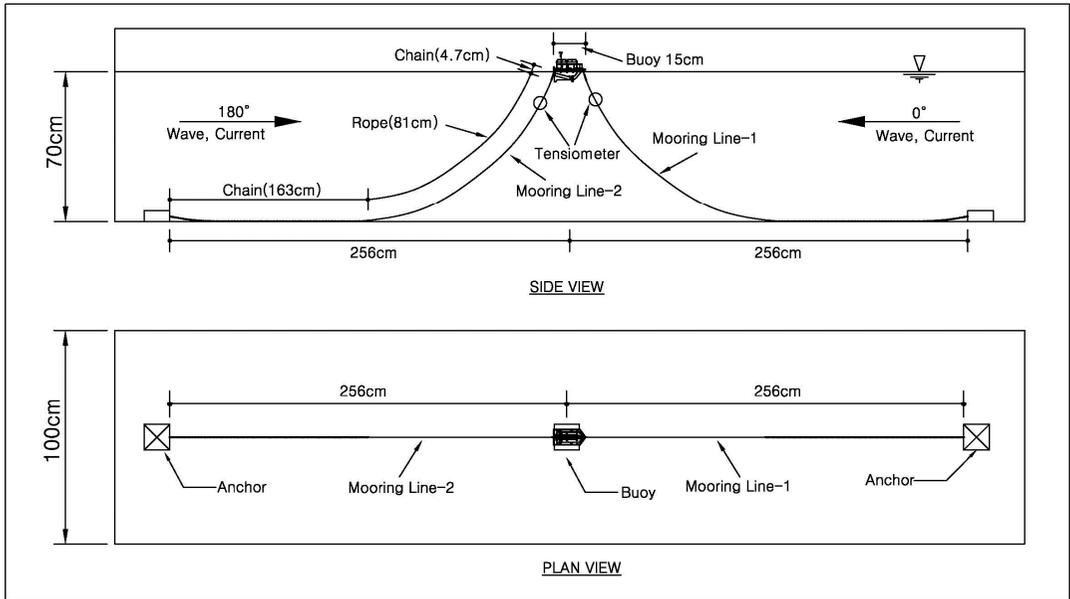


Fig. 4.8 Configuration of model installation(Case-1)

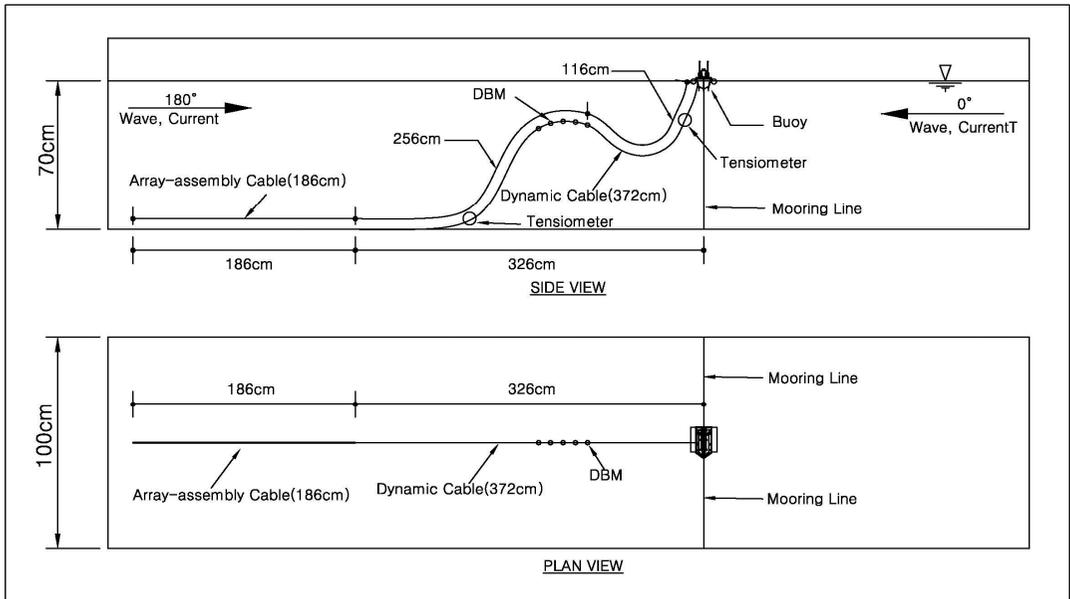


Fig. 4.9 Configuration of model installation(Case-2)

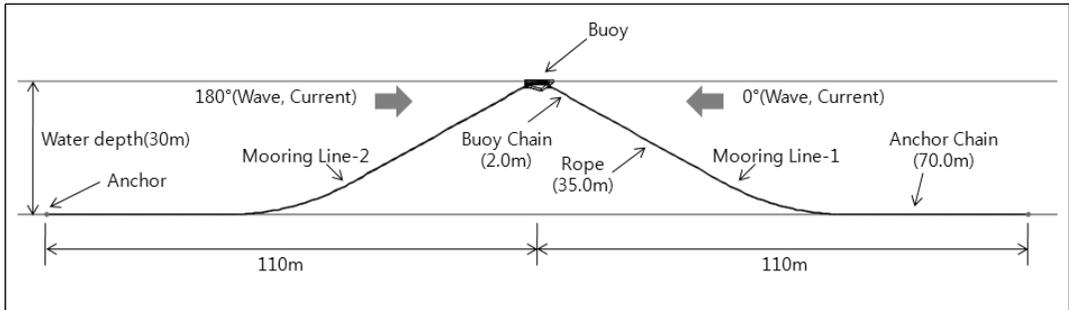


Fig. 4.10 Configuration of numerical analysis(Case-1)

Table 4.5 Load Case(Numerical analysis/Model test)

Description	Load Case	Irregular wave			Current		Water depth (m)
		Hs(m)	T(sec)	Direction (°)	V (m)	Direction (°)	
Case-1	LC1	5.0/0.12	11.0/1.68	0	-	-	30/0.7
	LC2	5.0/0.12	11.0/1.68	180	-	-	
	LC3	5.0/0.12	11.0/1.68	0	1.0/0.15	0	
	LC4	5.0/0.12	11.0/1.68	180	1.0/0.15	180	
Case-2	LC1	-/0.12	-/1.68	0	-	-	-/0.7
	LC2	-/0.12	-/1.68	180	-	-	
	LC3	-/0.12	-/1.68	0	-/0.15	0	
	LC4	-/0.12	-/1.68	180	-/0.15	180	

4.3 실험결과 및 이론계산과 비교

4.3.1 실험 Case-1

가. 불규칙파중의 부이 운동응답

본 실험에서는 불규칙파랑 중의 부이 운동응답 특성을 축소모형에 대한 수리 모형실험과 실제 스케일에서의 수치해석을 통해 비교하였다. 부이의 surge, heave, pitch 운동에 대한 수리모형실험 계측값과 그 계측값을 실제 스케일로 변환한 값, 그리고 실제 스케일에서의 수치해석 계산 값의 극값과 진폭은 Table 4.6~Table 4.8과 같다. 그리고 Fig. 4.11~Fig. 4.13에 수리모형실험과 수치 해석 결과를 비교하였으며, Fig. 4.14~Fig. 4.37은 수리모형 실험 계측값의 시계

열과 수치해석 계산값의 시계열이다.

부이 동요량에 대한 수리모형실험과 수치해석의 차이는 Surge 동요량이 10.1%~22.1%이며 조류하중이 없는 LC1, LC2 하중조건에서는 수치해석 값이 크게 평가되나, 조류하중이 있는 LC3, LC4 하중조건에서는 수리모형실험 값이 크게 평가되었다. Heave 동요량은 19.7%~44.8%이며 모든 하중조건에서 수치해석 값이 크게 평가되었다. Pitch 동요량은 0.7%~33.5%이며 수리모형실험 값이 대체적으로 크게 평가되었다.

실험값과 해석값은 대체적으로 잘 일치하나 일부 값에서 차이를 보였으며 특히 Heave 동요량의 경우 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이것은 점성에 의한 유체력 차이에 기인하며 수치해석시 점성감쇠의 영향이 충분히 고려된다면 두 값의 차이는 줄어들 수 있을 것으로 판단된다. 또한 축소모형 제작시 부이의 형상과 배수량, 무게중심, 계류선의 특성 등이 정확히 상사되지 못하였고 중량이 배수량의 약 15%에 달하는 로드셀과 반사파의 영향도 한 요인으로 판단된다.

Table 4.6 Result of model test and numerical analysis(Surge motion)

Description		Surge			Experiment/ numerical (%)
		Experiment		Numerical (m)	
		Model test (mm)	Real scale (m)		
LC1	Max.	93.9	4.04	3.87	22.1
	Min.	-60.6	-2.61	-4.65	
	Amplitude	77.3	3.32	4.26	
LC2	Max.	148.5	6.39	4.49	14.8
	Min.	-19.9	-0.86	-4.00	
	Amplitude	84.2	3.62	4.25	
LC3	Max.	109.5	5.23	3.84	13.0
	Min.	-179.4	-4.34	-4.63	
	Amplitude	144.5	4.79	4.24	
LC4	Max.	126.0	4.49	4.50	10.1
	Min.	-112.7	-4.87	-4.00	
	Amplitude	119.4	4.68	4.25	

Table 4.7 Result of model test and numerical analysis(Heave motion)

Description		Heave			Experiment/ numerical (%)
		Experiment		Numerical (m)	
		Model test (mm)	Real scale (m)		
LC1	Max.	86.8	3.73	4.68	19.7
	Min.	-76.6	-3.29	-4.05	
	Amplitude	81.7	3.51	4.37	
LC2	Max.	55.9	2.40	4.72	44.8
	Min.	-55.0	-2.37	-3.94	
	Amplitude	55.5	2.39	4.33	
LC3	Max.	76.3	3.28	4.66	28.5
	Min.	-68.3	-2.94	-4.04	
	Amplitude	72.3	3.11	4.35	
LC4	Max.	57.3	2.46	4.72	37.6
	Min.	-69.0	-2.97	-4.00	
	Amplitude	63.2	2.72	4.36	

Table 4.8 Result of model test and numerical analysis(Pitch motion)

Description		Pitch			Experiment/ numerical (%)
		Experiment		Numerical (m)	
		Model test (mm)	Real scale (m)		
LC1	Max.	10.77	10.77	7.95	0.7
	Min.	-5.40	-5.40	-8.08	
	Amplitude	8.08	8.08	8.02	
LC2	Max.	4.25	4.25	7.89	10.5
	Min.	-14.50	-14.50	-9.09	
	Amplitude	9.38	9.38	8.49	
LC3	Max.	12.71	12.71	7.79	33.5
	Min.	-8.59	-8.59	-8.17	
	Amplitude	10.65	10.65	7.98	
LC4	Max.	6.13	6.13	7.79	19.2
	Min.	-13.99	-13.99	-9.09	
	Amplitude	10.06	10.06	8.44	

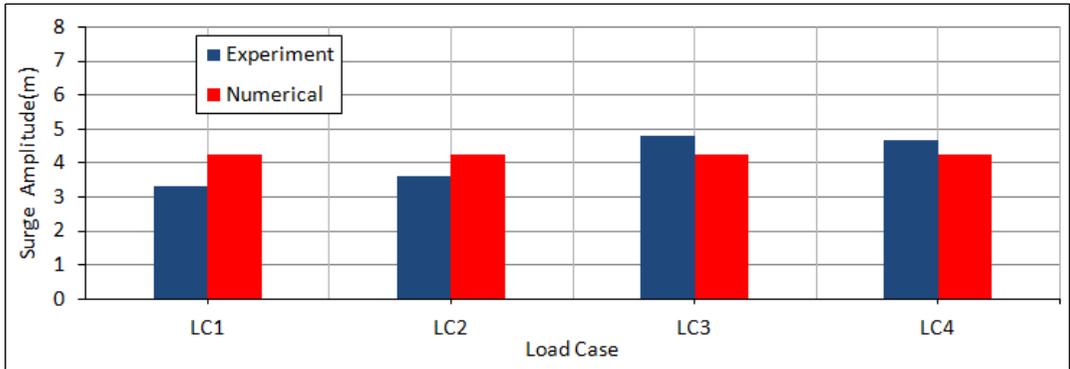


Fig. 4.11 Comparison of experiment and numerical(Surge motion)

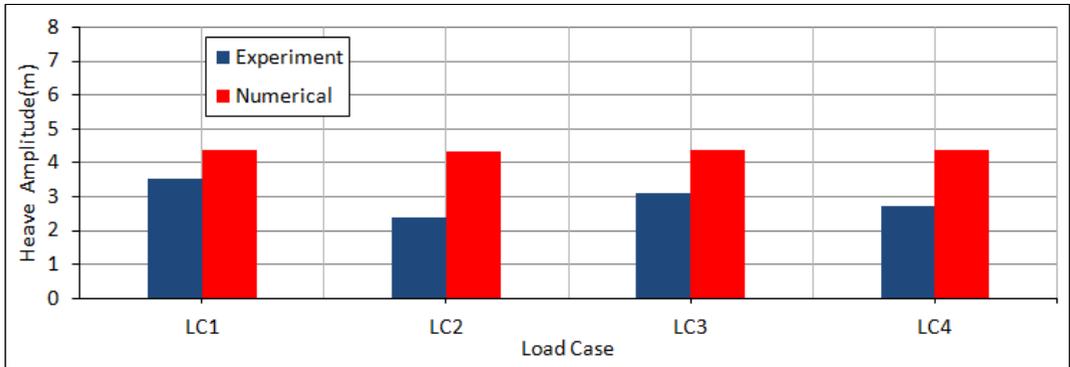


Fig. 4.12 Comparison of experiment and numerical(Heave motion)

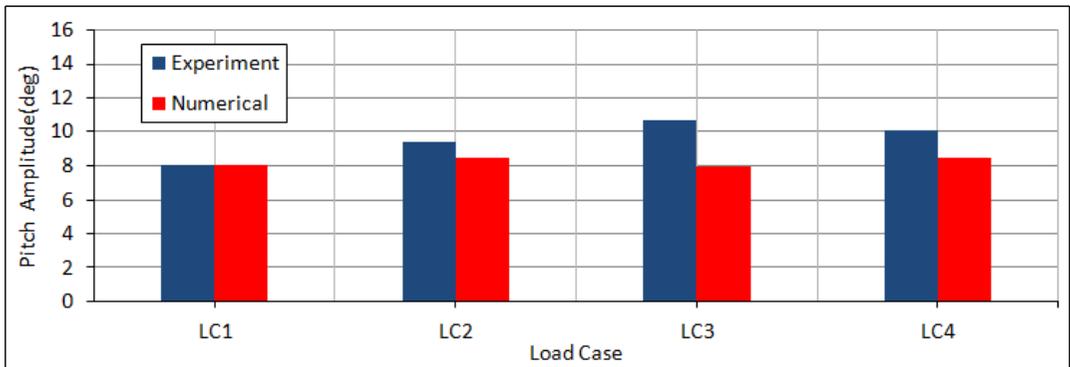


Fig. 4.13 Comparison of experiment and numerical(Pitch motion)

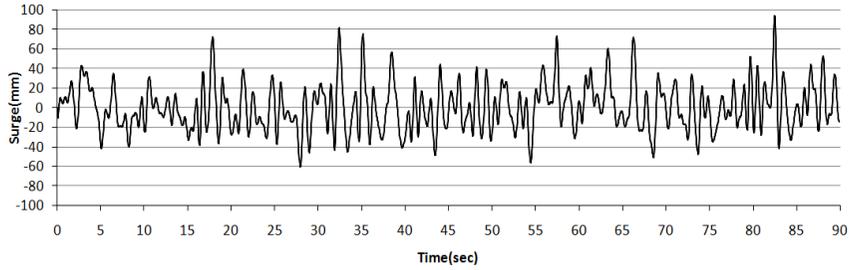


Fig. 4.14 Time history of measured surge response in experiment(LC1)

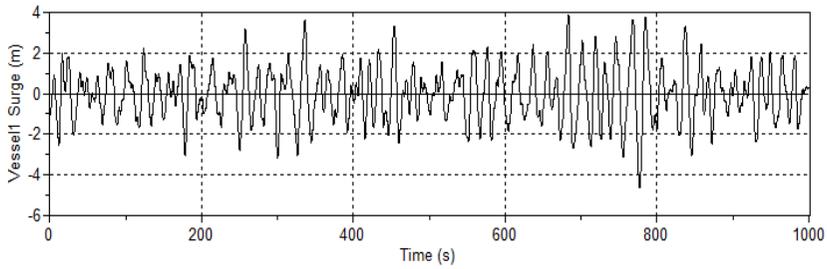


Fig. 4.15 Time history of surge response in numerical analysis(LC1)

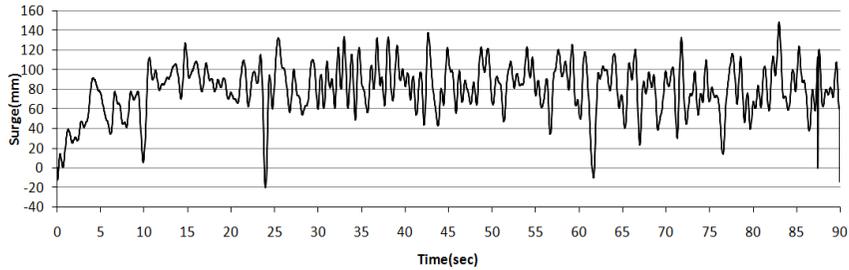


Fig. 4.16 Time history of measured surge response in experiment(LC2)

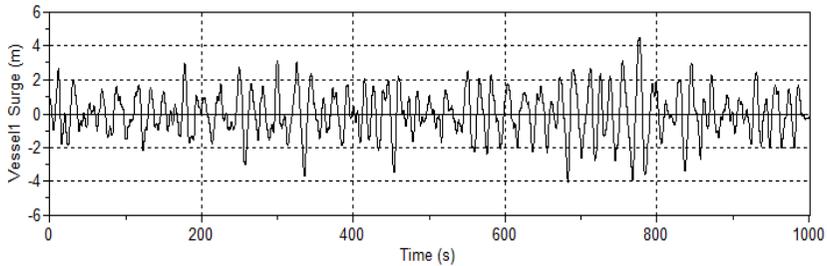


Fig. 4.17 Time history of surge response in numerical analysis(LC2)

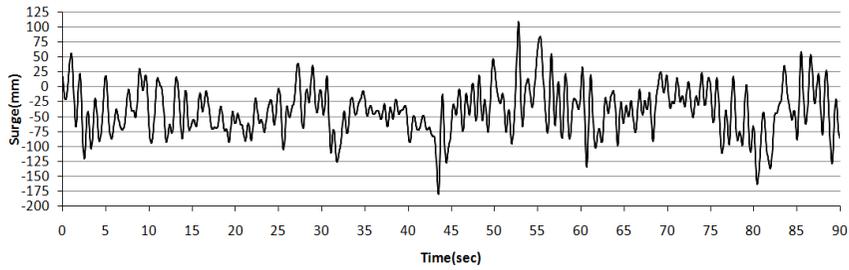


Fig. 4.18 Time history of measured surge response in experiment(LC3)

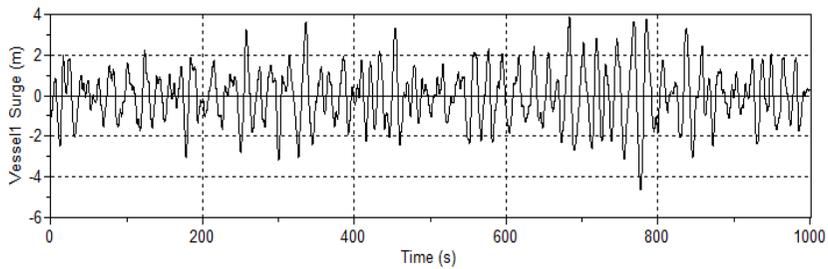


Fig. 4.19 Time history of surge response in numerical analysis(LC3)

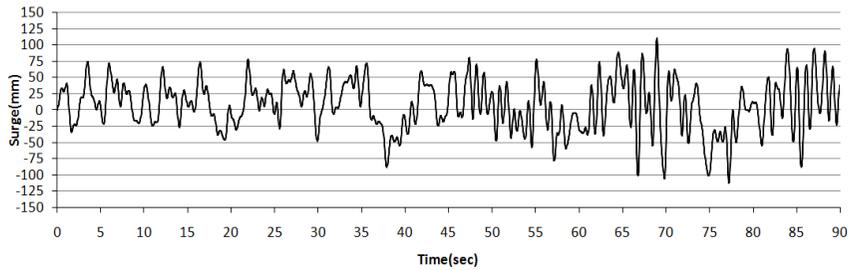


Fig. 4.20 Time history of measured surge response in experiment(LC4)

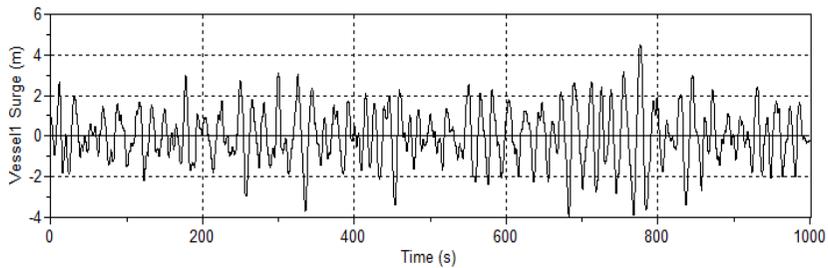


Fig. 4.21 Time history of surge response in numerical analysis(LC4)

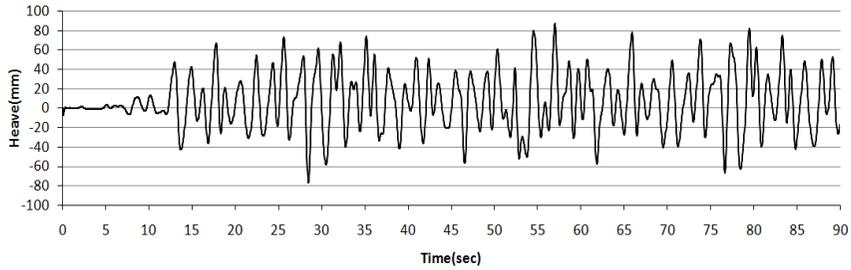


Fig. 4.22 Time history of measured heave response in experiment(LC1)

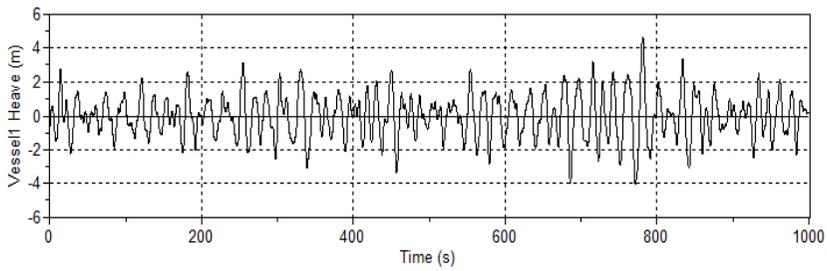


Fig. 4.23 Time history of heave response in numerical analysis(LC1)

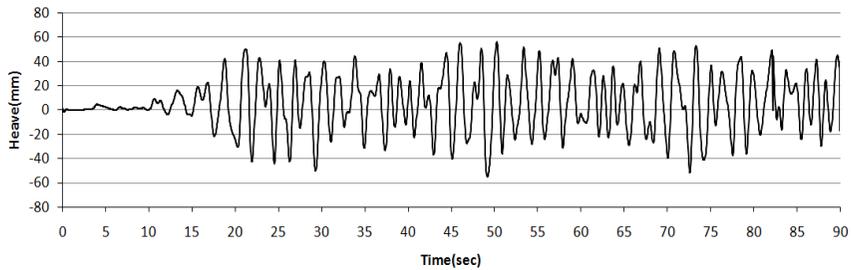


Fig. 4.24 Time history of measured heave response in experiment(LC2)

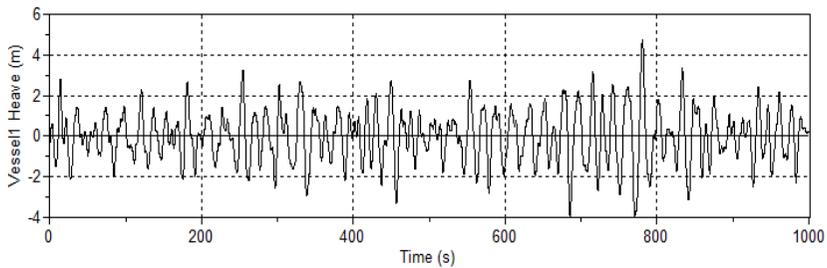


Fig. 4.25 Time history of heave response in numerical analysis(LC2)

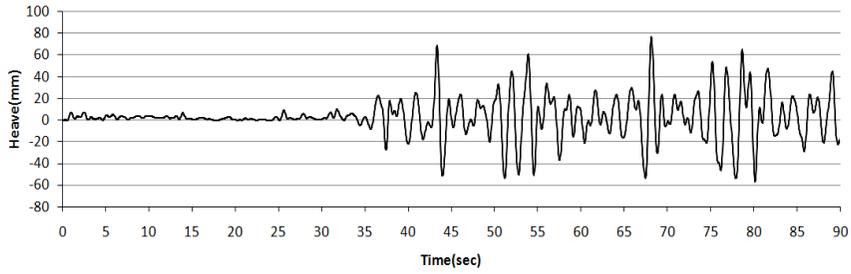


Fig. 4.26 Time history of measured heave response in experiment(LC3)

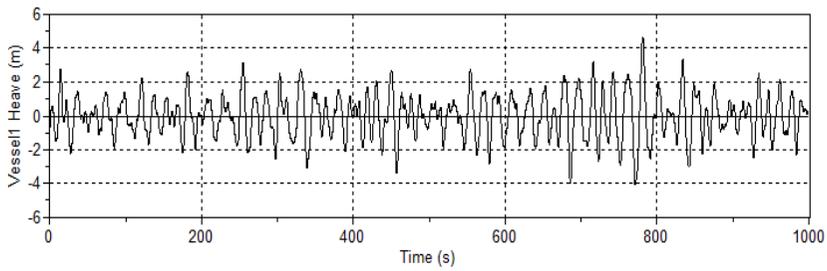


Fig. 4.27 Time history of heave response in numerical analysis(LC3)

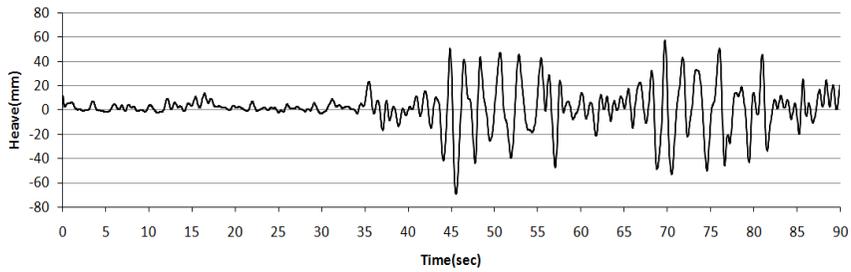


Fig. 4.28 Time history of measured heave response in experiment(LC4)

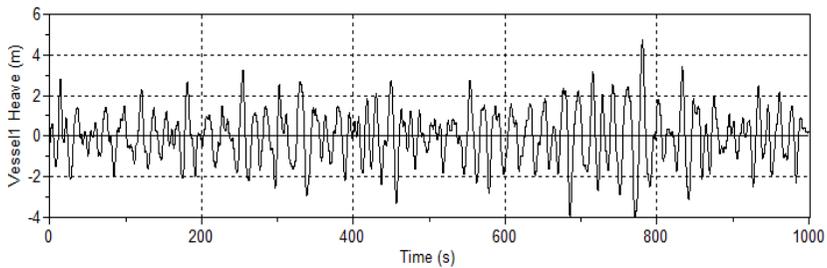


Fig. 4.29 Time history of heave response in numerical analysis(LC4)

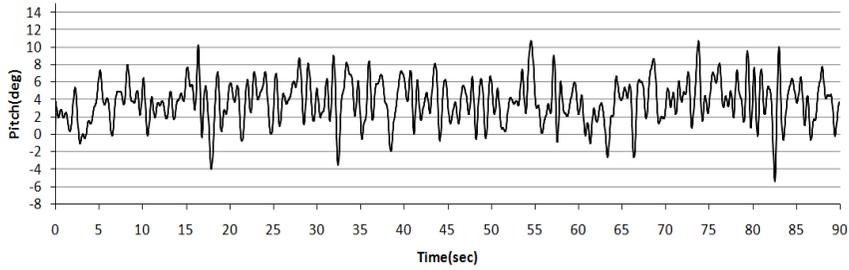


Fig. 4.30 Time history of measured pitch response in experiment(LC1)

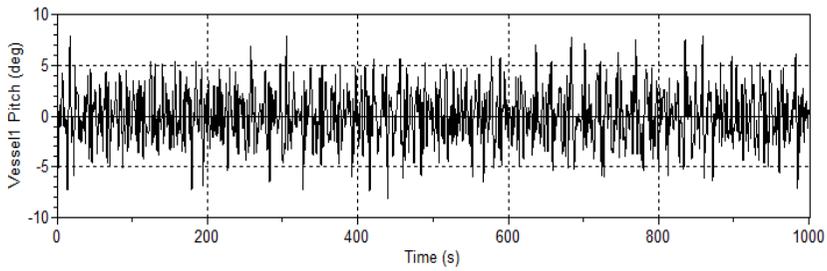


Fig. 4.31 Time history of pitch response in numerical analysis(LC1)

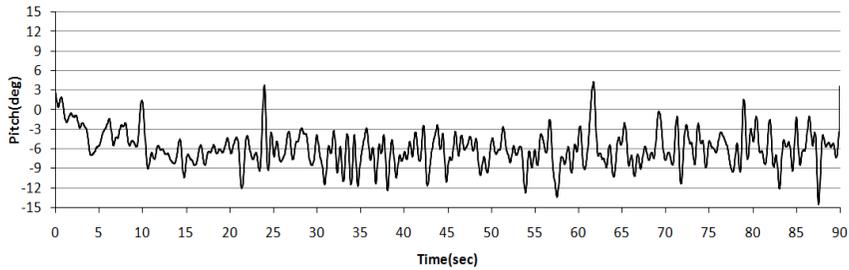


Fig. 4.32 Time history of measured pitch response in experiment(LC2)

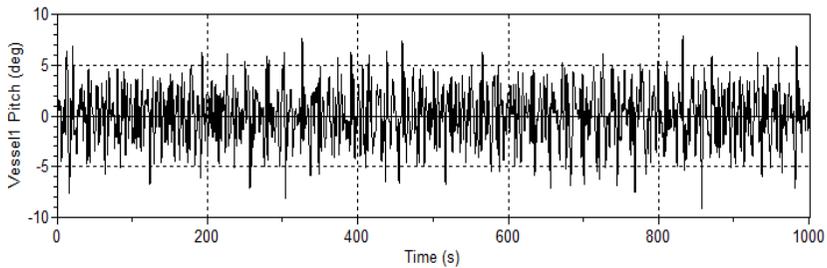


Fig. 4.33 Time history of pitch response in numerical analysis(LC2)

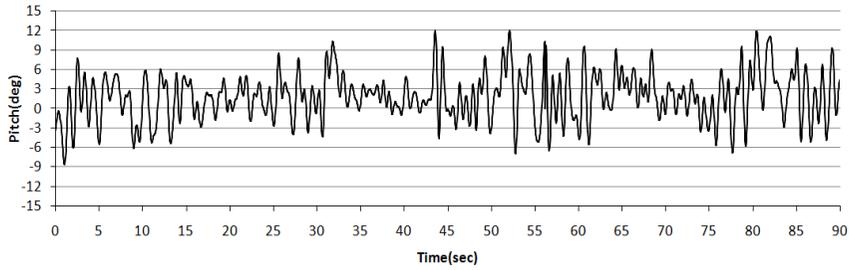


Fig. 4.34 Time history of measured pitch response in experiment(LC3)

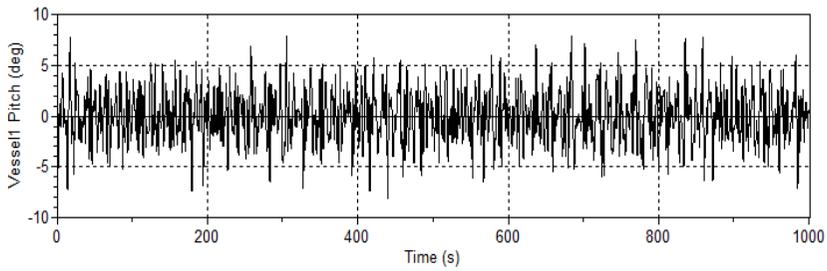


Fig. 4.35 Time history of pitch response in numerical analysis(LC3)

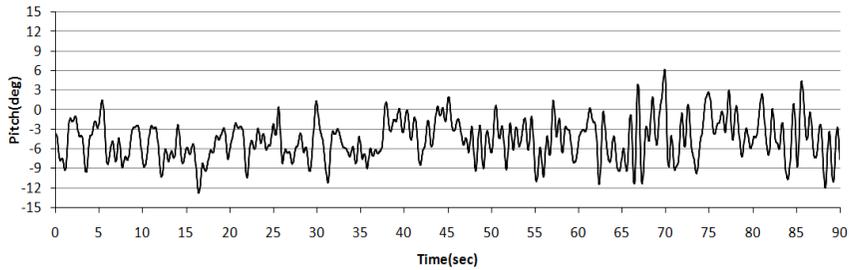


Fig. 4.36 Time history of measured pitch response in experiment(LC4)

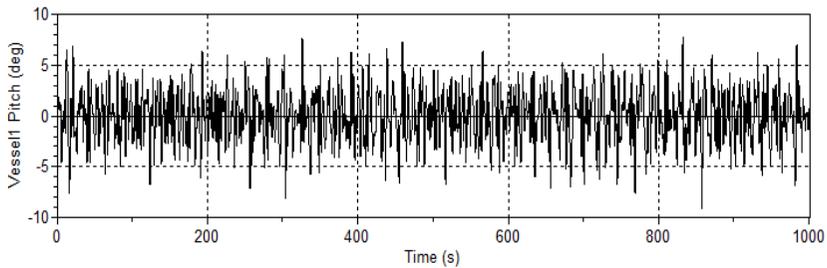


Fig. 4.37 Time history of pitch response in numerical analysis(LC4)

나. 불규칙파중의 계류선 장력

불규칙파랑 중의 계류선 장력을 축소모형에 대한 수리모형실험과 실제 스케일에서의 수치해석을 통해 비교하였다. 계류선 장력에 대한 수리모형실험 계측값과 그 계측값을 실제 스케일로 변환한 값, 그리고 실제 스케일에서의 수치해석 계산 값의 극값과 진폭은 Table 4.9와 같으며 Fig. 4.38에 수리모형실험과 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 4.39~Fig. 4.54는 수리모형 실험 계측값의 시계열과 수치해석 계산값의 시계열이다.

계류선 장력에 대한 수리모형실험과 수치해석의 차이는 Mooring Line 1이 14.2%~28.2%, Mooring Line 2가 14.0%~26.7%로 대체적으로 잘 일치하나 해석값이 크게 나타나는 경향을 보였다. 이것은 부이의 동요 결과와 마찬가지로 수치해석시 점성의 영향이 적절히 고려되지 않아 Heave 동요량이 다소 크게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4.9 Result of model test and numerical analysis(Mooring tension)

Description	Mooring line-1 / Mooring line-2			Experiment/ numerical(%)
	Experiment		Numerical(kN)	
	Model test(N)	Real scale(kN)		
LC1	0.731/0.610	56.7/47.2	70.74/64.40	19.8/26.7
LC2	0.606/0.716	47.0/55.5	65.43/70.74	28.2/21.5
LC3	0.779/0.677	60.4/52.5	73.48/61.58	17.8/14.7
LC4	0.695/0.816	53.9/63.2	62.84/73.48	14.2/14.0

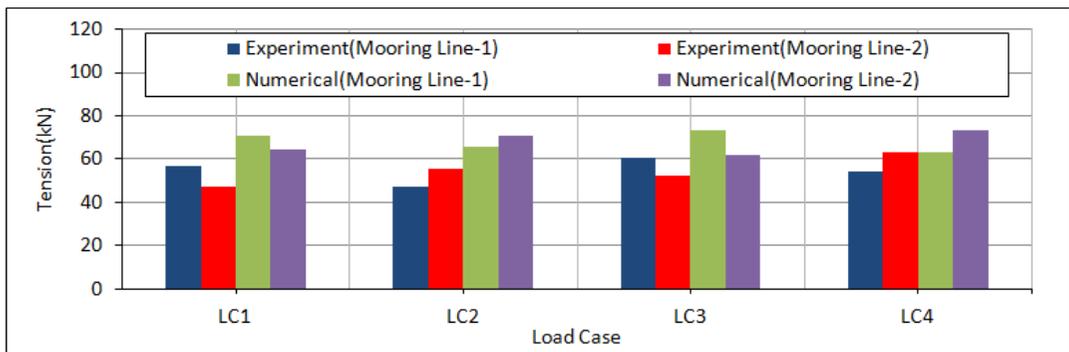


Fig. 4.38 Comparison of experiment and numerical(Mooring tension)

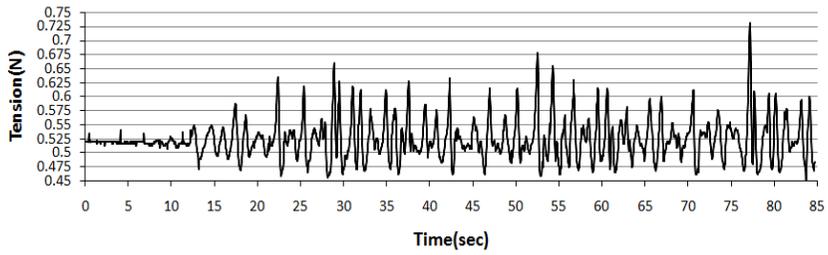


Fig. 4.39 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC1)

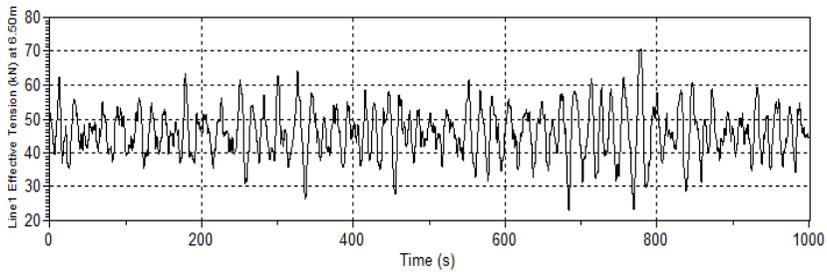


Fig. 4.40 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC1)

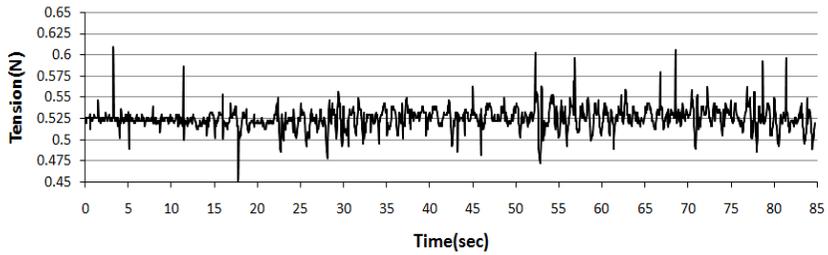


Fig. 4.41 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC1)

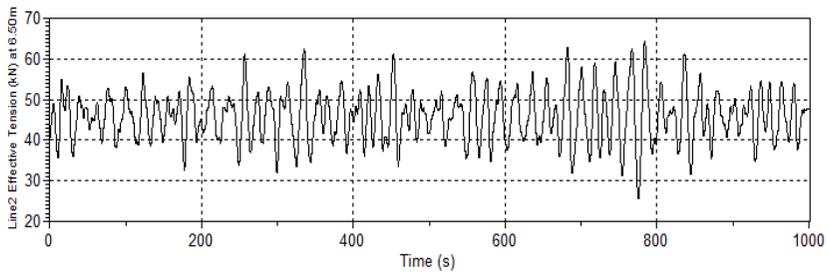


Fig. 4.42 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC1)

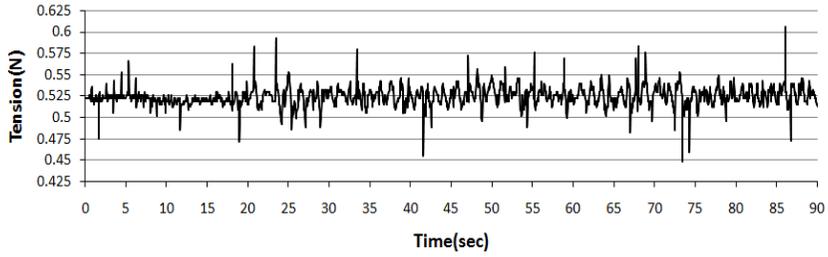


Fig. 4.43 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC2)

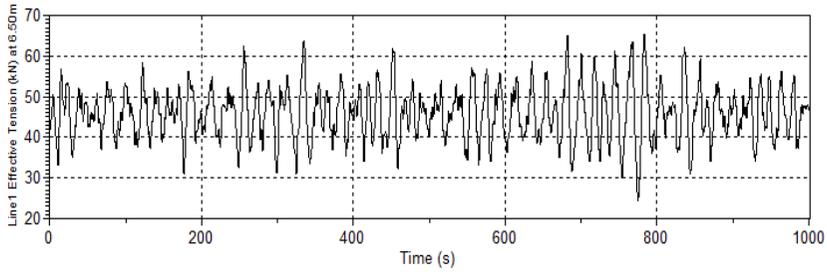


Fig. 4.44 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC2)

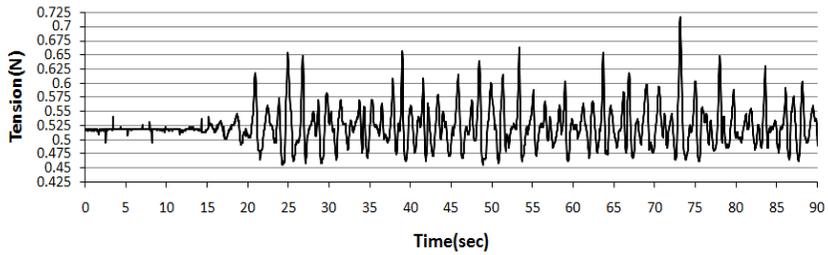


Fig. 4.45 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC2)

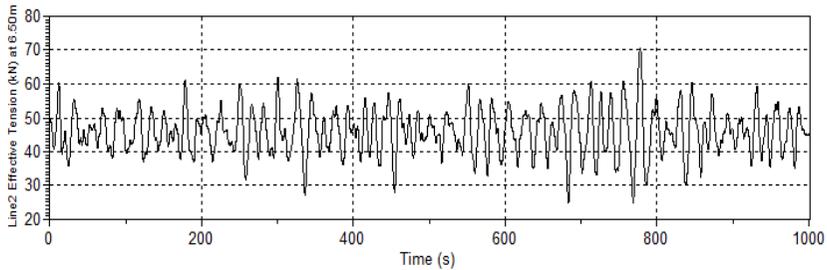


Fig. 4.46 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC2)

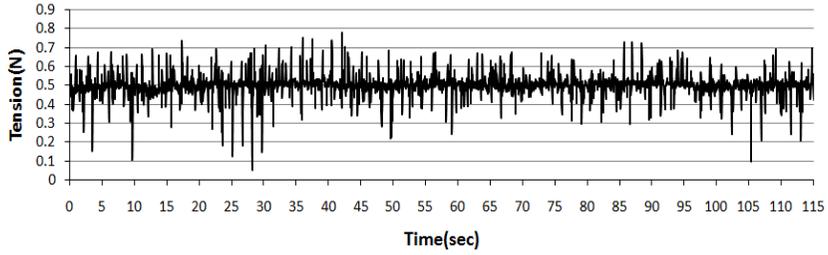


Fig. 4.47 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC3)

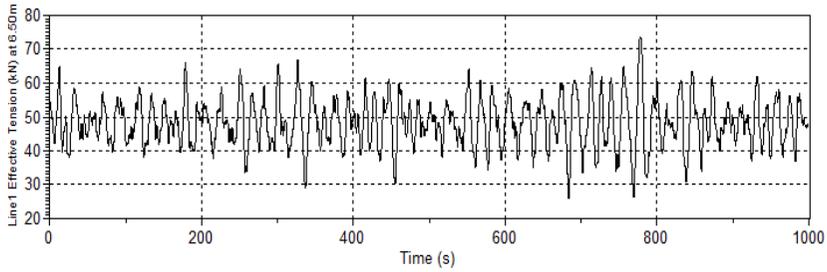


Fig. 4.48 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC3)

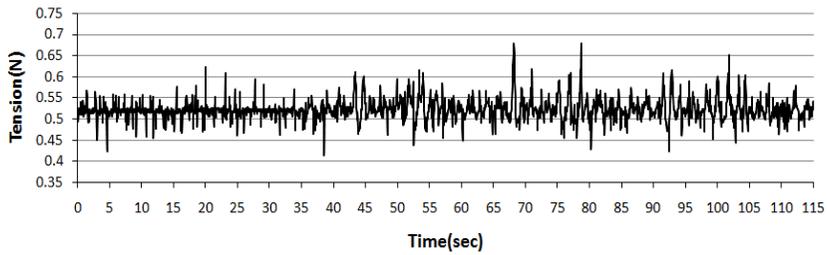


Fig. 4.49 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC3)

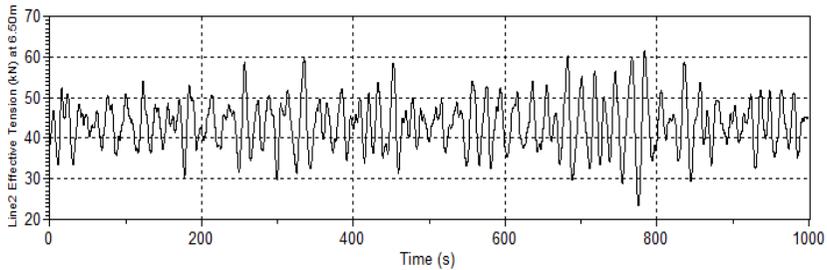


Fig. 4.50 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC3)

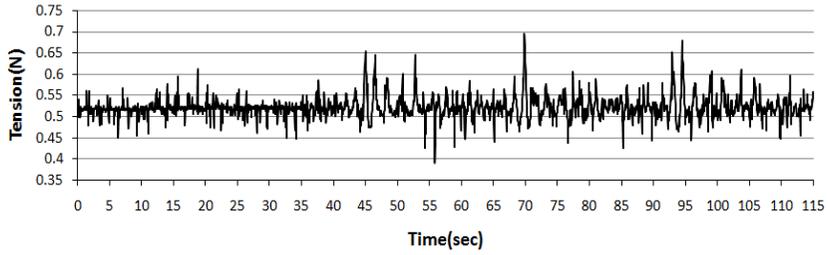


Fig. 4.51 Time history of measured tension in experiment(ML-1, LC4)

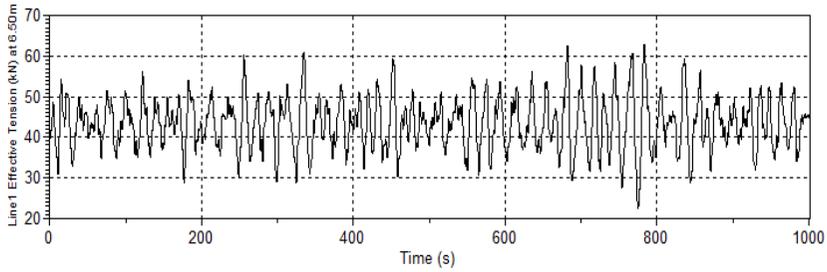


Fig. 4.52 Time history of tension in numerical analysis(ML-1, LC4)

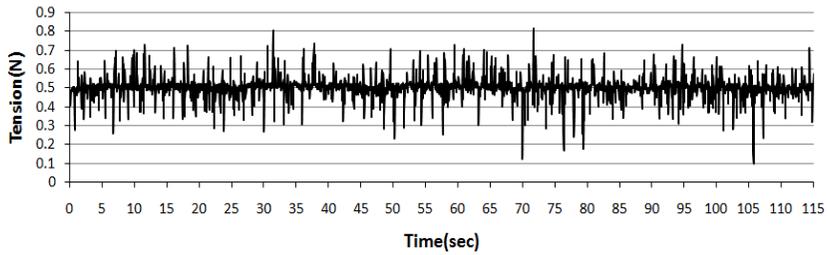


Fig. 4.53 Time history of measured tension in experiment(ML-2, LC4)

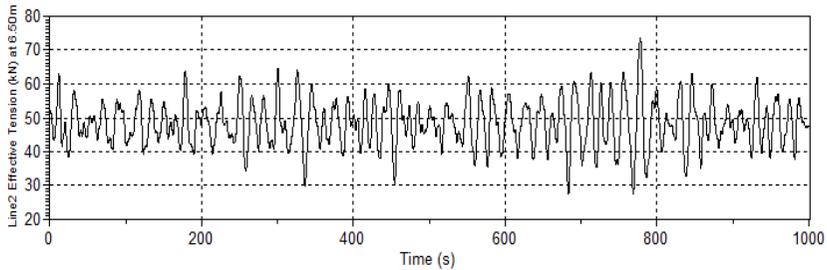


Fig. 4.54 Time history of tension in numerical analysis(ML-2, LC4)

4.3.2 실험 Case-2

가. 수중케이블의 설치형상

수중케이블의 설치형상은 높은 파도와 강한 조류에서도 부이의 과동요에 따른 급격한 인장력 발생과 충격을 완화할 수 있으며, 충분한 touch down length를 확보할 수 있는 lazy wave형의 설치형상을 채택하였다. 본 실험에서는 파랑과 조류 발생 조건에서 이러한 수중케이블 설치형상이 적절한 lazy wave형을 적절히 유지할 수 있는지 육안 관찰을 통하여 검증하였다.

Fig. 4.55~Fig. 4.62는 2차원 조파수조에서의 수중케이블 형상 변화를 관찰하기 위한 실험장면이며 이 중 Fig. 4.55~Fig. 4.58은 파랑발생 조건, Fig. 4.59~Fig. 4.62는 파랑과 조류를 동시에 발생시킨 조건에서의 실험 장면이다. 파랑 발생조건에서는 파랑 발생 전과 후를 비교할 때 부이의 수평변위가 크지 않으며 원운동을 하므로 수중케이블 형상에 큰 변화가 없이 lazy wave 형상을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다. 파랑과 조류를 동시에 발생시키는 조건에서는 파랑만 발생시켰을 때보다 부이의 수평변위가 커져 DBM이 더 올라가거나 내려가면서 lazy wave 형상은 굴곡이 더 뚜렷해지거나 직선에 가까운 형태로 완만해지는 것을 알 수 있다. 하지만 모든 조건에서 설치형상이 잘 유지되었고 불규칙파랑 중 부이의 운동이 dynamic cable을 따라 배열케이블로 전달될 때 크게 감소되는 것을 관찰할 수 있었다.



Fig. 4.55 Behavior characteristics of dynamic cable (LC1, Before wave generation)



Fig. 4.56 Behavior characteristics of dynamic cable (LC1, After wave generation)



Fig. 4.57 Behavior characteristics of dynamic cable
(LC2, Before wave generation)



Fig. 4.58 Behavior characteristics of dynamic cable
(LC2, After wave generation)



Fig. 4.59 Behavior characteristics of dynamic cable (LC3, Before wave and current generation)



Fig. 4.60 Behavior characteristics of dynamic cable (LC3, After wave and current generation)



Fig. 4.61 Behavior characteristics of dynamic cable (LC4, Before wave and current generation)



Fig. 4.62 Behavior characteristics of dynamic cable (LC4, After wave and current generation)

나. 수중케이블 장력

Dynamic cable의 상단과 하단에 장력계를 설치하여 불규칙파랑 중 부이의 운동과 외력에 의해 발생하는 장력을 계측하였다. Table 4.10은 장력계로 계측한 각 하중조건별 최대 장력값과 실제 스케일로 변환한 장력값이며, Fig. 4.63은 케이블 상단과 하단의 장력값을 하중조건별로 비교한 그래프이다. 그리고 Fig. 4.64~Fig. 4.71은 장력계로 계측한 장력의 시계열을 보여주고 있다.

Dynamic cable 상단에서 계측된 장력값보다 하단의 장력값을 비교해보면 하단의 장력값이 매우 작게 나타나므로 케이블 하단으로 갈수록 장력이 감소하는 것을 알 수 있으며 특히 유속에 의해 수평변위가 가장 크게 발생하는 LC4 하중조건에서는 상단의 장력이 79.3kN이고 하단의 장력이 10.2kN으로 하단의 장력값이 상단에 비해 약 87% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험을 통해 부이의 거동과 인장력이 배열케이블까지 전달되는 것이 최소화됨을 확인할 수 있으며 수중케이블의 lazy wave 형상은 배열케이블의 안정성을 확보할 수 있는 최적의 설치형상인 것으로 판단된다.

Table 4.10 Result of dynamic cable tension

Description	Top		Bottom	
	Model test(N)	Real scale(kN)	Model test(N)	Real scale(kN)
LC1	0.135	10.4	0.043	3.3
LC2	0.326	25.3	0.034	2.6
LC3	0.173	13.4	0.049	3.8
LC4	1.023	79.3	0.131	10.2

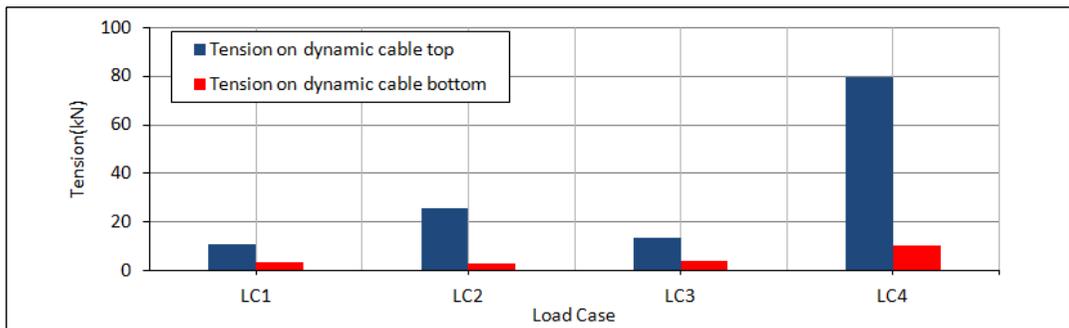


Fig. 4.63 Comparison of tension on dynamic cable top and bottom

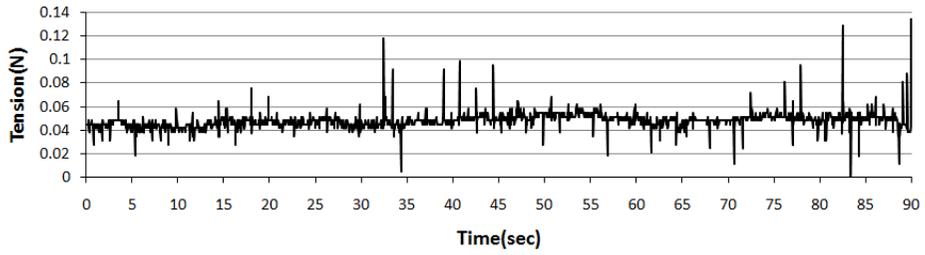


Fig. 4.64 Time history of tension on dynamic cable top(LC1)

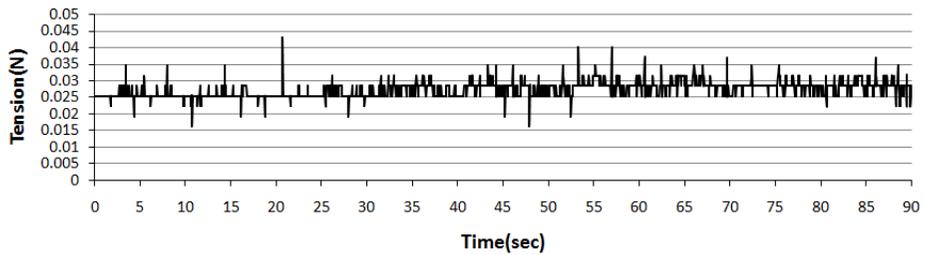


Fig. 4.65 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC1)

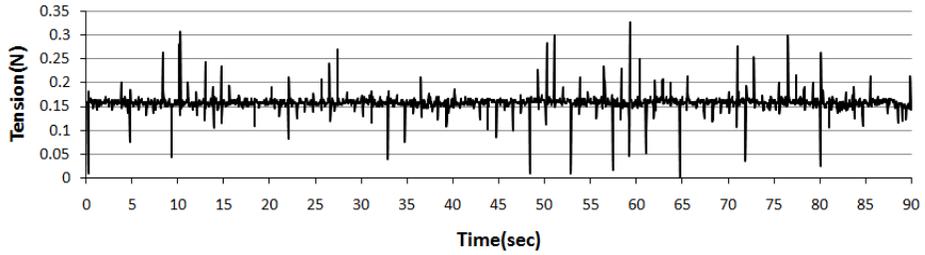


Fig. 4.66 Time history of tension on dynamic cable top(LC2)

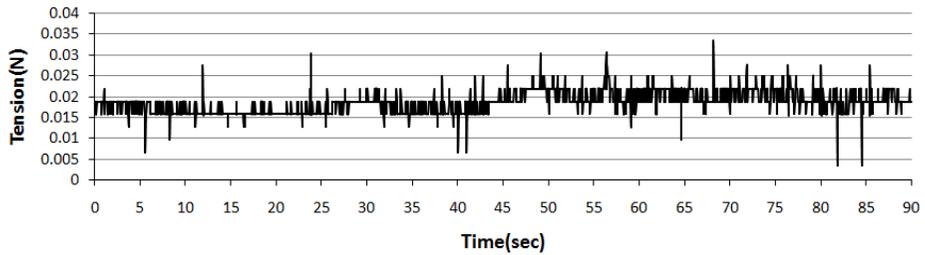


Fig. 4.67 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC2)

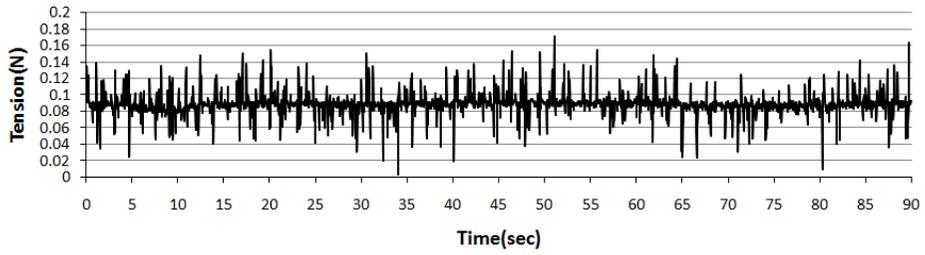


Fig. 4.68 Time history of tension on dynamic cable top(LC3)

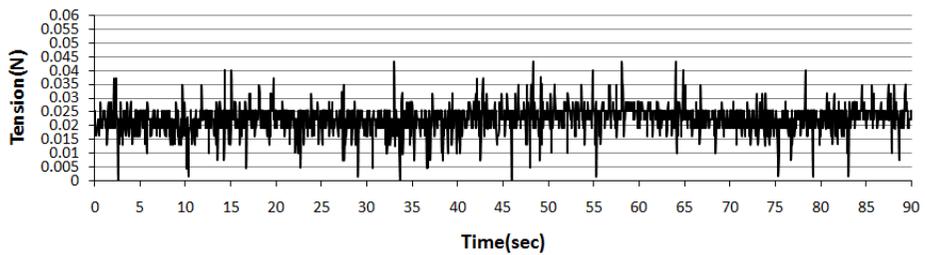


Fig. 4.69 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC3)

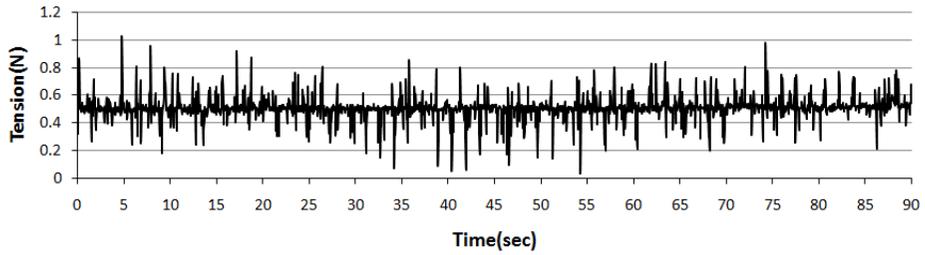


Fig. 4.70 Time history of tension on dynamic cable top(LC4)

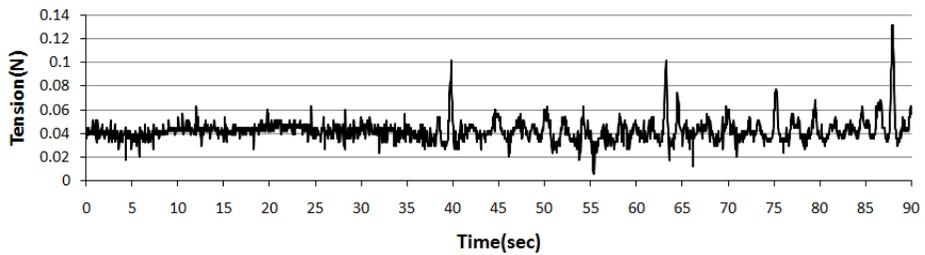


Fig. 4.71 Time history of tension on dynamic cable bottom(LC4)

제 5 장 실증테스트를 통한 부이형 수중감시체계의 동적안정성 검증

5.1 개요

본 연구에서는 부이형 수중감시체계의 부이 계류시스템과 수중케이블의 안정성을 검증하기 위하여 수치해석 기법을 적용하였으며 수치해석에 대한 신뢰성은 수리모형실험을 통해 입증하였다. 또한 최종 단계에서는 실제 해상에서의 설치, 회수 및 운용성을 검증하기 위하여 실험역 실증테스트를 수행하였다.

설치해역은 거제 지심도에서 동남쪽으로 약 2.0km 떨어진 해상이며 2018년 8월 1일~2018년 10월 3일까 약 2개월간 설치 운용하였다. 설치해역의 평균 수심은 47m, 조류속은 평균 0.34m/s, 최대 0.68m/s이며 해저지형은 대체로 평탄하고 해저질은 중간 실트 및 중간 모래가 우세하였다.

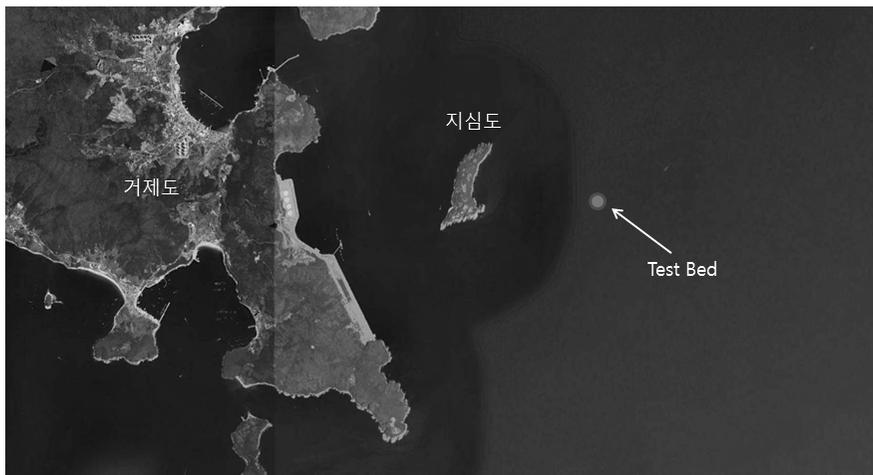


Fig. 5.1 Location of test bed

앞서 수심 200m에서 최적화 된 부이형 수중감시체계의 부이 계류시스템 및 수중케이블은 실험역 실증테스트를 위하여 설치해역의 수심과 조류속에 맞게 계류선과 수중케이블 길이 및 DBM의 부력과 개수 등을 조정하였다. 그리고 설치 전에 수치해석 기법을 통해 안정성에 대한 재검증을 수행한 후 실증테스트를 실시하였다.

5.2 실증테스트용 부이형 수중감시체계 계류시스템 및 수중케이블 최적화

5.2.1 최적화된 계류시스템 및 수중케이블 구성

수심 200m에서 최적화 된 부이형 수중감시체계의 부이 계류시스템 및 수중케이블은 실험역 실증테스트를 위하여 설치해역의 수심과 조류속에 맞게 계류선과 수중케이블 길이 및 DBM의 부력과 개수 등을 조정하였다. 계류선과 수중케이블의 제원 및 구성은 기존과 동일하나 계류선의 nylon Rope 길이를 200m에서 110m로 줄였으며 dynamic cable 길이도 695m에서 210m로 줄였다. 그리고 DBM은 27kg의 부력을 갖는 부력재 5기를 dynamic cable 중간에 부착하였으며 배열케이블의 안정성을 유지하기 위하여 케이블 양 끝단에 수중중량 6톤의 sinker를 설치하였다. 실증테스트에 적용된 계류선과 수중케이블 제원은 Table 5.1과 같으며 배치도는 Fig. 5.2, Fig. 5.3과 같다.

Table 5.1 Dimension of mooring System and submerged cable

Configuration		Dimension
Mooring system	Mooring line	Buoy chain ∅32mm, G2, L=10m, Weight=22.0kg/m(in air), MBL=583kN
		Nylon rope ∅40mm, L=110m, 8-strand multiplait, Weight=1.0kg/m(in air), MBL=333.5kN
		Anchor chain ∅60mm, G2, L=70m, Weight=79kg/m(in air), MBL=1,940kN
	Anchor	Fixed
	Pre-Tension	20kN
Submerged cable	Array-assembly cable	∅45mm, L=80m, Weight=4.12kg/m(in air), MBL=98.0kN

	Dynamic cable	$\varnothing 35\text{mm}$, $L=210\text{m}$, $\text{Weight}=2.4\text{kg/m}$ (in air), $\text{MBL}=388.0\text{kN}$
	DBM	$27\text{kg}(\text{buoyancy}) \times 5\text{EA}$
	Sinker	$6.0\text{ton}(\text{in seawater}) \times 2\text{EA}$

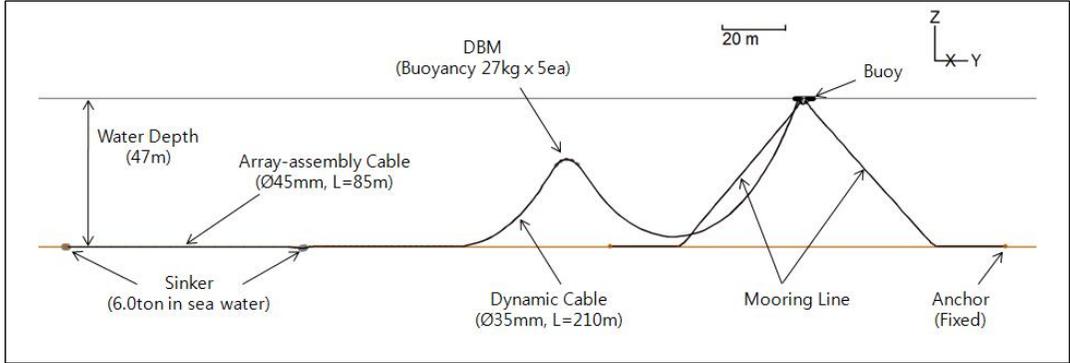


Fig. 5.2 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System (Side view)

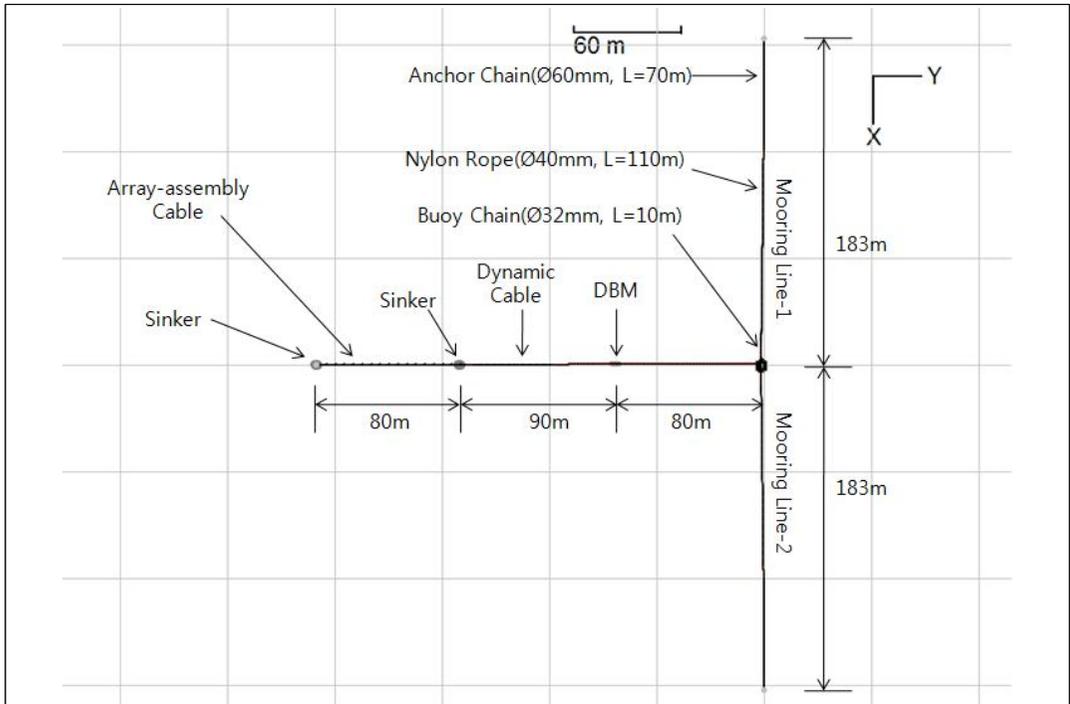


Fig. 5.3 Mooring arrangement of Floating Underwater Surveillance System (Plan view)

5.2.2 실증테스트용 부이형 수중감시체계 동적안정성 해석

실증테스트용 부이형 수중감시체계의 동적안정성 해석시 해상조건은 Table 5.2와 같다. 파랑 및 바람은 기존 해석조건과 동일하며 설치해역 여건을 고려하여 수심 47m, 조류속 0.68m/s를 적용하였다.

계류선의 장력 산정 결과는 Table 5.3과 같으며 계류선의 최대장력은 89.5kN, 앵커부 최대장력은 80.7kN으로 산정되었다. 계류선의 안전성 평가 결과는 Table 5.4와 같으며 허용치 이상으로 안전기준을 만족하는 것으로 평가되었다. Fig. 5.4, Fig. 5.5는 하중조건 별 계류선의 장력분포 그래프이며 Fig. 5.6, Fig. 5.7은 최대장력 발생 지점의 장력 시계열이다.

수중케이블의 장력 산정 결과는 Table 5.5와 같으며 수중케이블의 최대장력은 8.6kN으로 산정되었다. 수중케이블의 안전성 평가 결과는 Table 5.6과 같으며 허용치 이상으로 안전기준을 만족하는 것으로 평가되었다. Fig. 5.8은 하중조건 별 수중케이블의 장력분포 그래프이며 Fig. 5.9~Fig. 5.16은 각 하중조건별 수중케이블의 거동특성을 보여준다. 모든 하중조건에서 수중케이블은 lazy wave형의 기하학적 형상이 잘 유지되었으며, 계류선 장력과 비교할 때 매우 미미한 값을 보여 부이의 계류력과 운동에 의한 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

Table 5.2 Environmental condition

Description		Environmental condition	Remark
Wave	Hs(m)	9.0	Sea State 7
	T(sec)	11.58	
	Wave spectrum	JONSWAP	
Wind velocity(m/s)		51.5	10m above the surface
		42.1	2m above the surface
Current velocity(m/s)		0.68	
Water depth(m)		47.0	
Seabed condition		Silt & Sand	

Table 5.3 Result of maximum mooring tension and extreme value statistics(EVS)

Seed	I/C	Max. Mooring tension(kN)		Tension of anchor(kN)	
		Line-1	Line-2	Line-1	Line-2
1,000	1	89.5	49.7	77.2	34.6
	2	73.1	56.5	70.0	44.9
	3	63.8	67.9	58.3	62.3
	4	59.0	79.6	48.0	75.3
	5	53.6	77.0	38.7	64.4
	6	63.6	84.9	53.1	80.7
	7	68.2	69.8	62.6	64.2
	8	76.5	58.9	71.5	47.6
Max. Tension		89.5		80.7	

Table 5.4 Mooring line safety evaluation

Mooring line	Configuration	MBL (kN)	Safety(Intact)		
			Max. T	Safety factor	Safety check (Allow. S.F=1.67)
Line-1, 2	Buoy chain (Ø32mm, G2)	583	89.5	6.5	O.K
	Nylon rope (Ø40mm, 8S/T)	333.5		3.7	O.K
	Anchor chain (Ø60mm, G2)	1,940		21.7	O.K

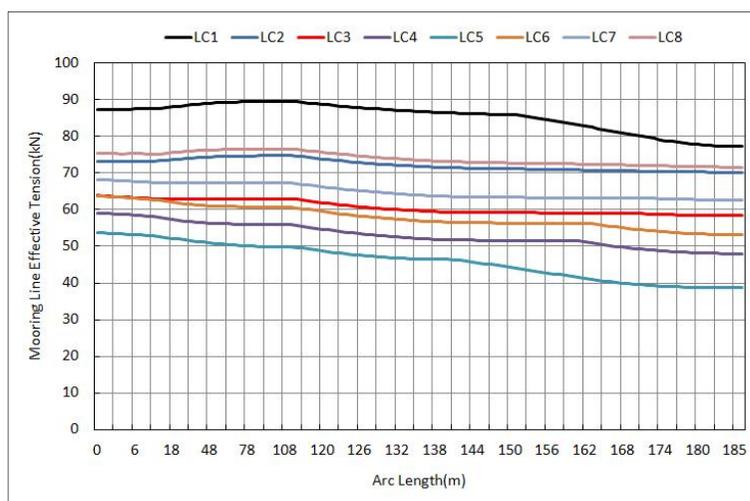


Fig. 5.4 Mooring tension distribution along arc length of Line-1

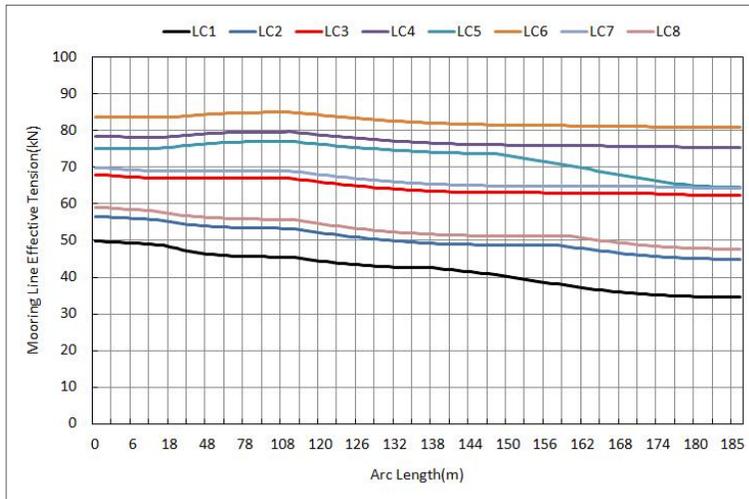


Fig. 5.5 Mooring tension distribution along arc length of Line-2

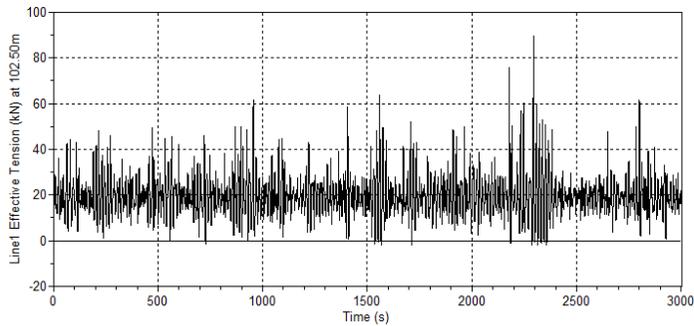


Fig. 5.6 Time history of mooring tension for fairlead point(Line-1, LC1)

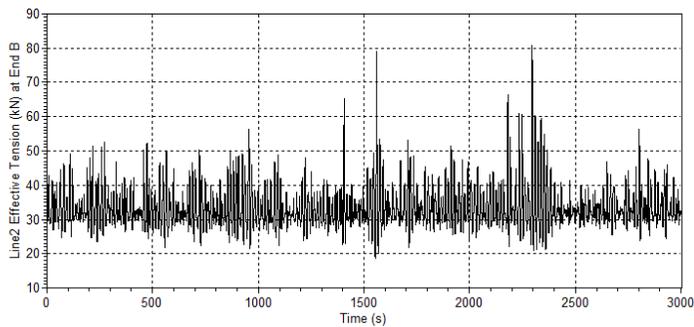


Fig. 5.7 Time history of mooring tension for anchor point(Line-2, LC6)

Table 5.5 Result of cable tension for submerged cable

L/C	Dynamic cable(kN)				Array-assembly cable(kN)			
	Node A	Max.	Node B	Max.	Node C	Max.	Node D	Max.
LC-1	6.3	8.6	2.0	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0
LC-2	7.9		6.3		0.0		0.0	
LC-3	8.4		7.2		0.0		0.0	
LC-4	8.6		7.3		0.0		0.0	
LC-5	6.9		2.4		0.0		0.0	
LC-6	5.7		0.5		0.0		0.0	
LC-7	5.7		0.5		0.0		0.0	
LC-8	5.8		0.5		0.0		0.0	

Table 5.6 Maximum cable tension and safety evaluation of dynamic cable

Dynamic cable			Safety	
Dia.	MBL(kN)	Max. tension(kN)	Safety factor	Safety check (Allow. S.F=1.67)
Ø35mm	388.0	8.6	45.1	O.K

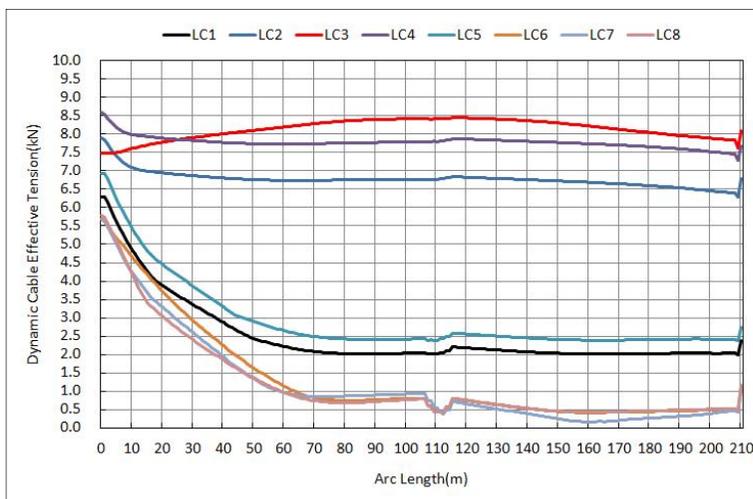


Fig. 5.8 Cable tension distribution along arc length of dynamic cable

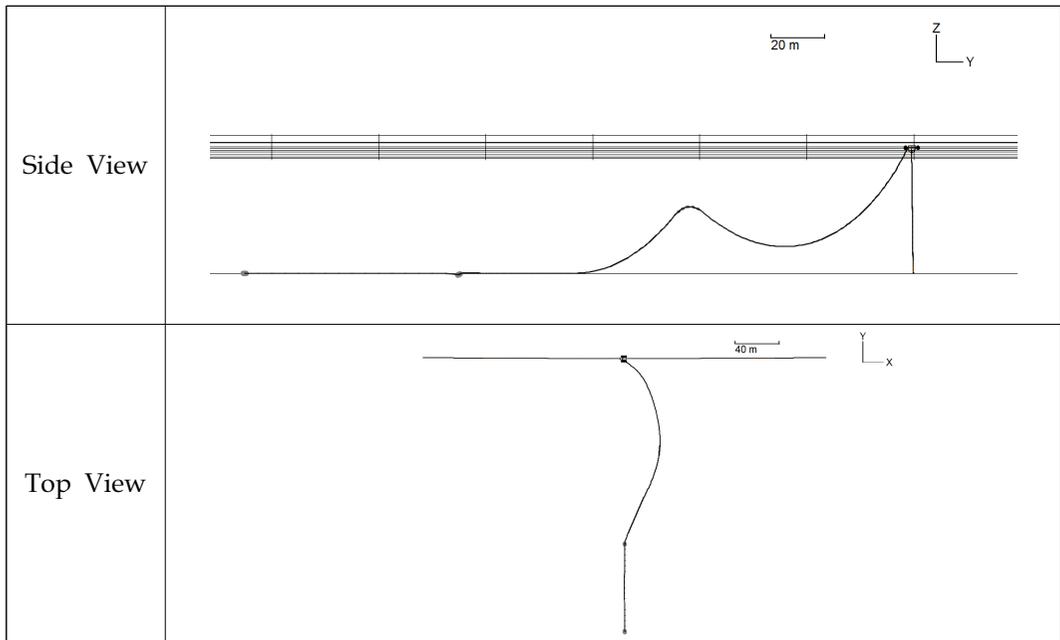


Fig. 5.9 Behavior characteristics of submerged cable(LC1)

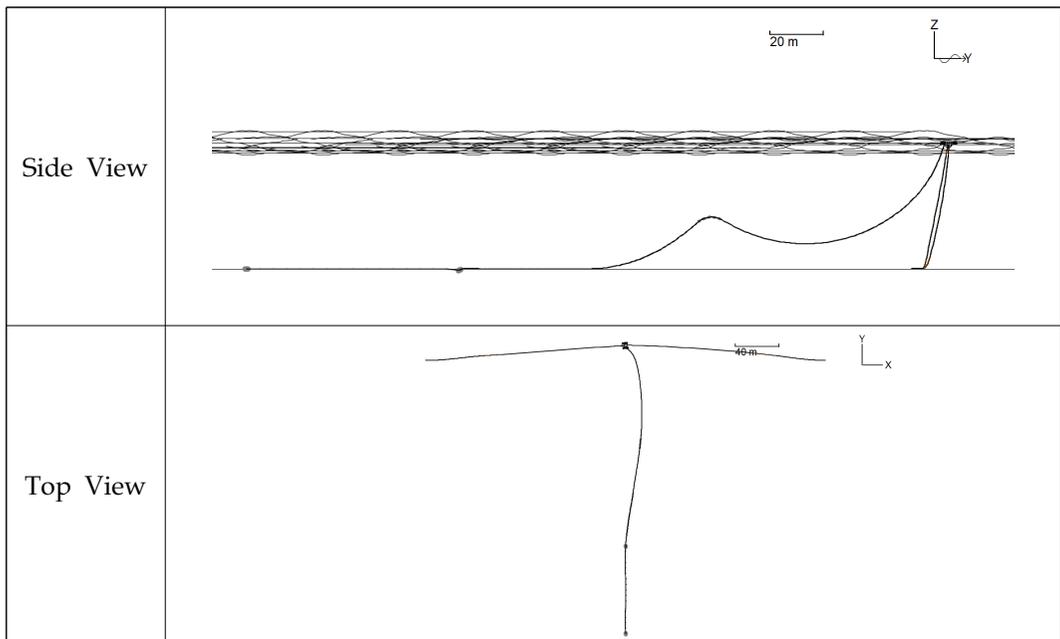


Fig. 5.10 Behavior characteristics of submerged cable(LC2)

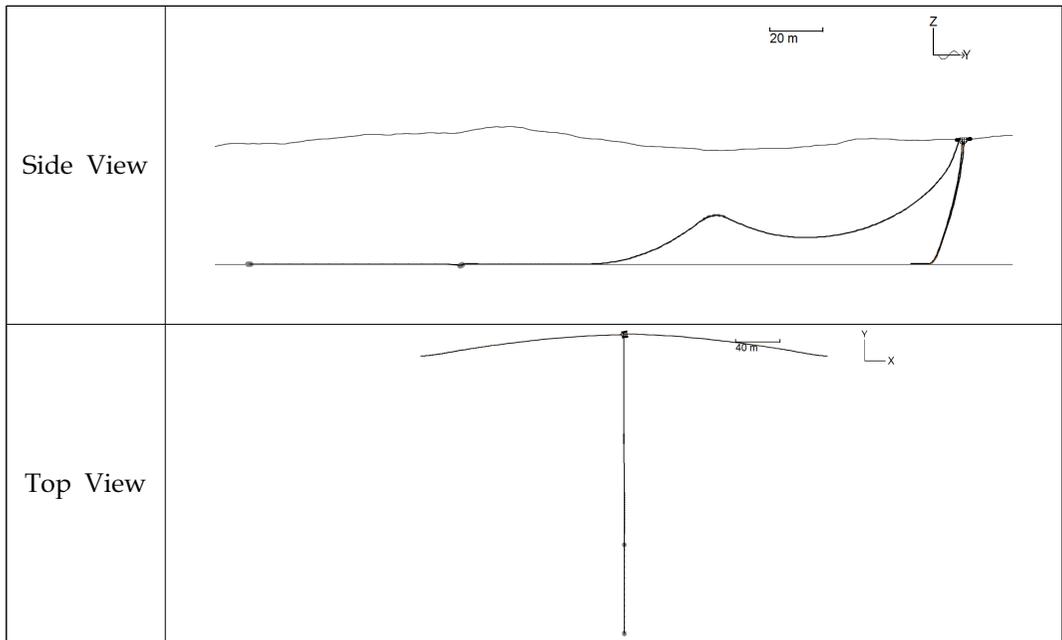


Fig. 5.11 Behavior characteristics of submerged cable(LC3)

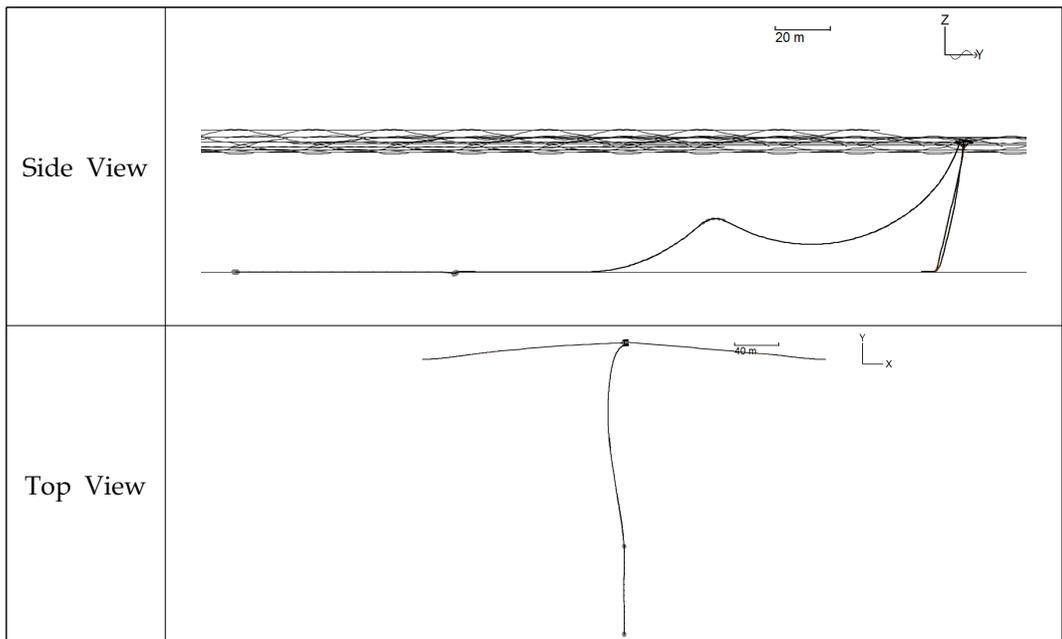


Fig. 5.12 Behavior characteristics of submerged cable(LC4)

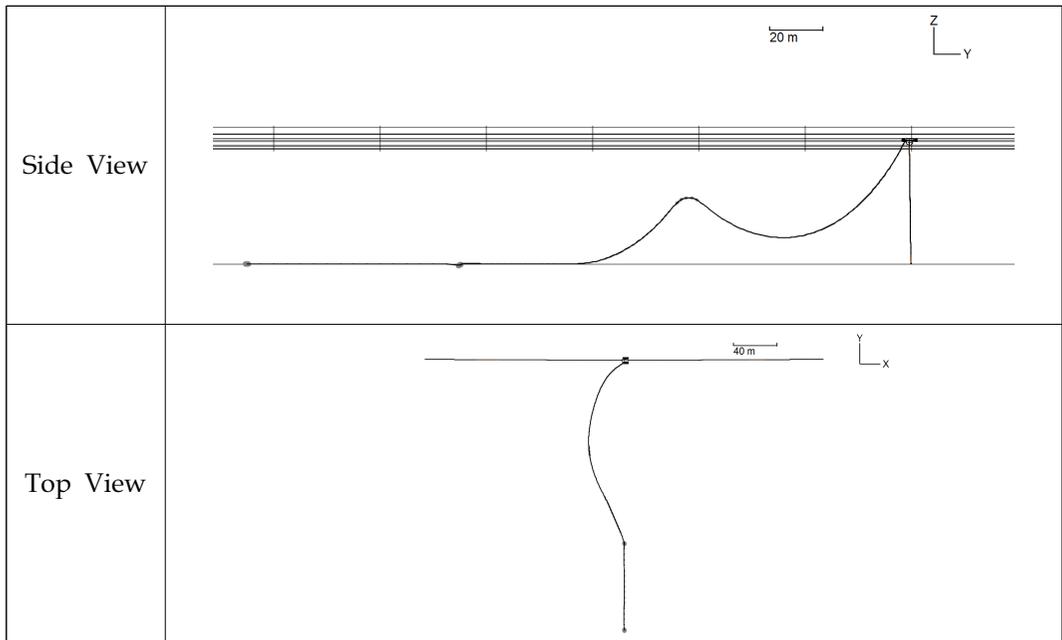


Fig. 5.13 Behavior characteristics of submerged cable(LC5)

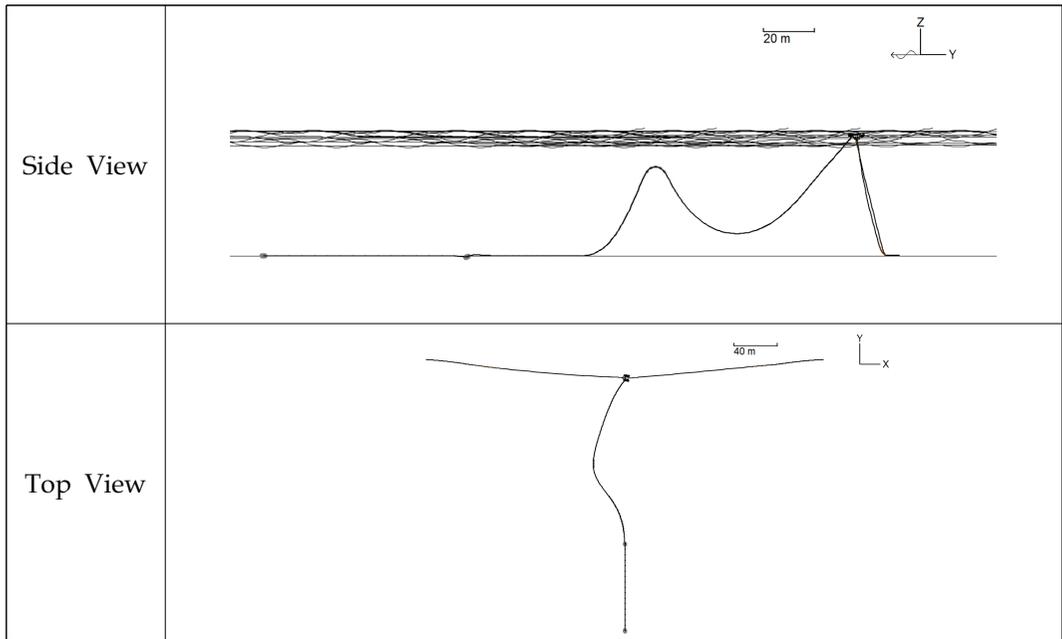


Fig. 5.14 Behavior characteristics of submerged cable(LC6)

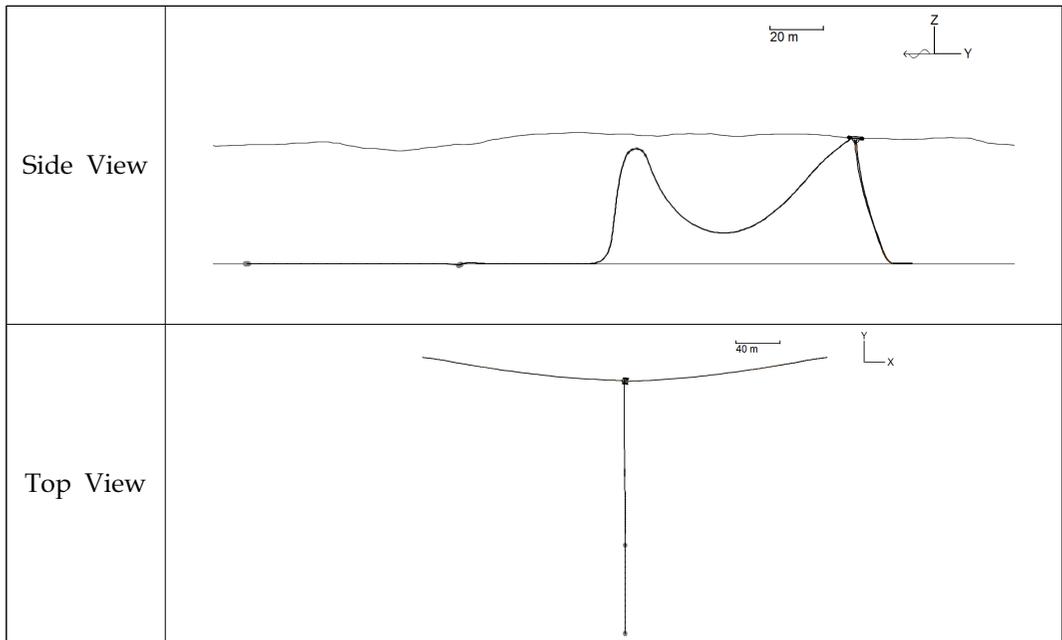


Fig. 5.15 Behavior characteristics of submerged cable(LC7)

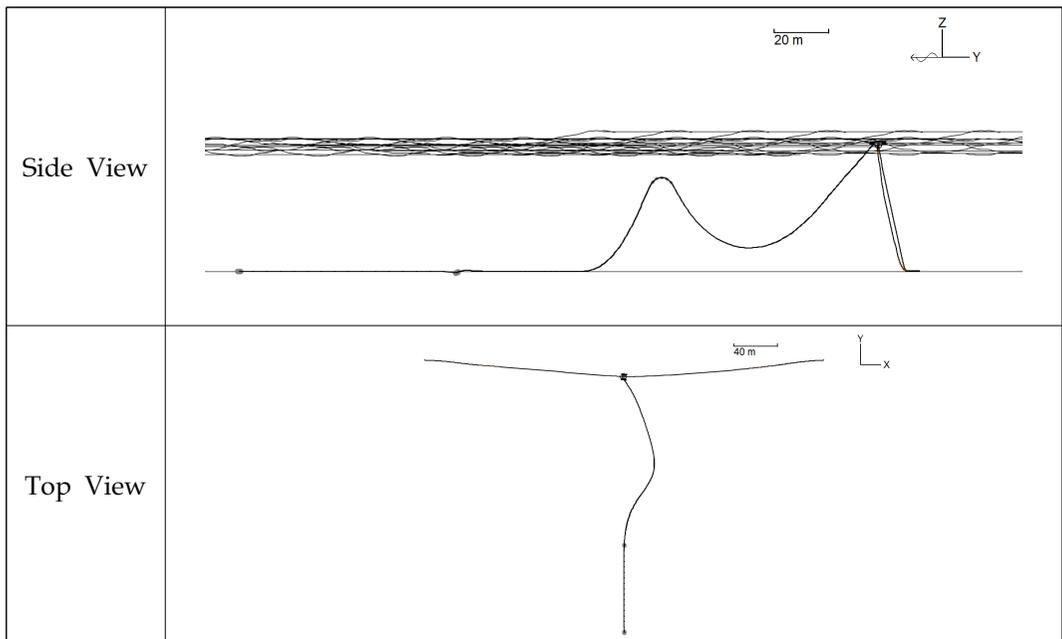


Fig. 5.16 Behavior characteristics of submerged cable(LC8)

5.3 실증테스트용 부이형 수중감시체계의 실효역 설치 및 운용

5.3.1 실효역 설치 및 운용시 해상조건

부이형 수중감시체계 설치 및 회수 작업은 sea state 3 이하의 정온한 상태에서 수행되었고 설치 후 운용 기간 중에는 두 차례의 태풍이 발생하였다. 제19호 태풍 솔릭(2018년 8월 10일~8월 25일)은 제주 남부에서 진도로 상륙한 후 서부 내륙을 관통하여 빠져나가 설치해역인 거제 지심도 인근 해상에는 직접적인 영향을 주지는 않았다. 그러나 거제도 해상기상부이 관측자료에 의하면 그 당시 설치해역에는 순간최대풍속 22.7m/s의 바람과 유의파고 4.2m의 높은 파랑이 발생한 것으로 분석되었다. 제 25호 태풍 콩레이(2018년 9월 29일~10월 7일)는 제주 서부로 북상하여 통영쪽으로 상륙하면서 설치해역에 직접적인 피해가 예상되어 10월 3일 경 급히 부이와 수중케이블을 회수한 후 지세포 항내로 피항하여 직접적인 태풍 영향권에서의 시스템 검증을 할 수 없었다.

운용기간 동안 발생하였던 파랑 중 최대 파랑은 유의파고 4.2m로 sea state 6에 해당되며 설계기준인 sea state 7보다 한 단계 낮은 해상상태에 해당되나 충분히 거친 해상상태에서 운용성 검증이 수행된 것으로 사료된다. 그리고 관측된 최대 유속은 1.15m/s였으며 설계기준 1.0m/s를 초과하는 것으로 분석되었다.

Table 5.7 Environmental condition of site(Geoje-do Ocean Data Buoy)

Description	Environmental condition	Remark
Installation location	Near sea of Geoje Island	
Operating time	2018. 8.1~2018. 10.3	
Wave	Hs:4.2m, T:9.1sec	sea state 6
Current velocity	1.15m/s	
Wind velocity	17.8m/s(average wind velocity), 22.7m/s (maximum instantaneous wind velocity)	

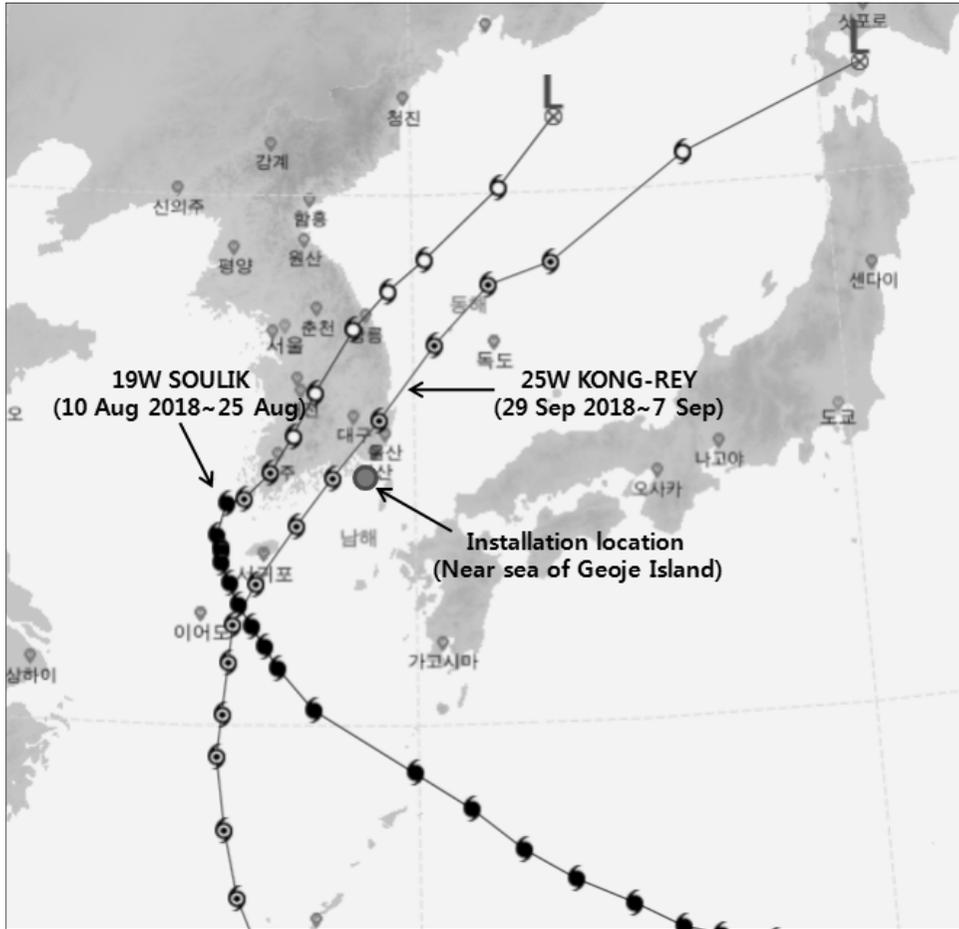


Fig. 5.17 Installation location and typhoon route

5.3.2 실해역 설치 및 운용 과정

부이형 수중감시체계는 2기가 함께 설치되며 선적 및 설치해역으로의 이동, 앵커 및 계류선 설치, 수중케이블 포설 및 선형화 작업, 부이에 계류선과 수중케이블 연결, 부이 진수의 순서로 진행되었다. 선적 및 이동에 1일, 앵커 및 계류선 설치 1일, 수중케이블 포설 및 부이 진수에 1일이 소요되어 선적 및 이동을 뺀 총 설치시간은 2일이 소요되었다. 부이형 수중감시체계 설치 과정은 Fig. 5.18~Fig. 5.22와 같다.



Fig. 5.18 Loadout and transportation

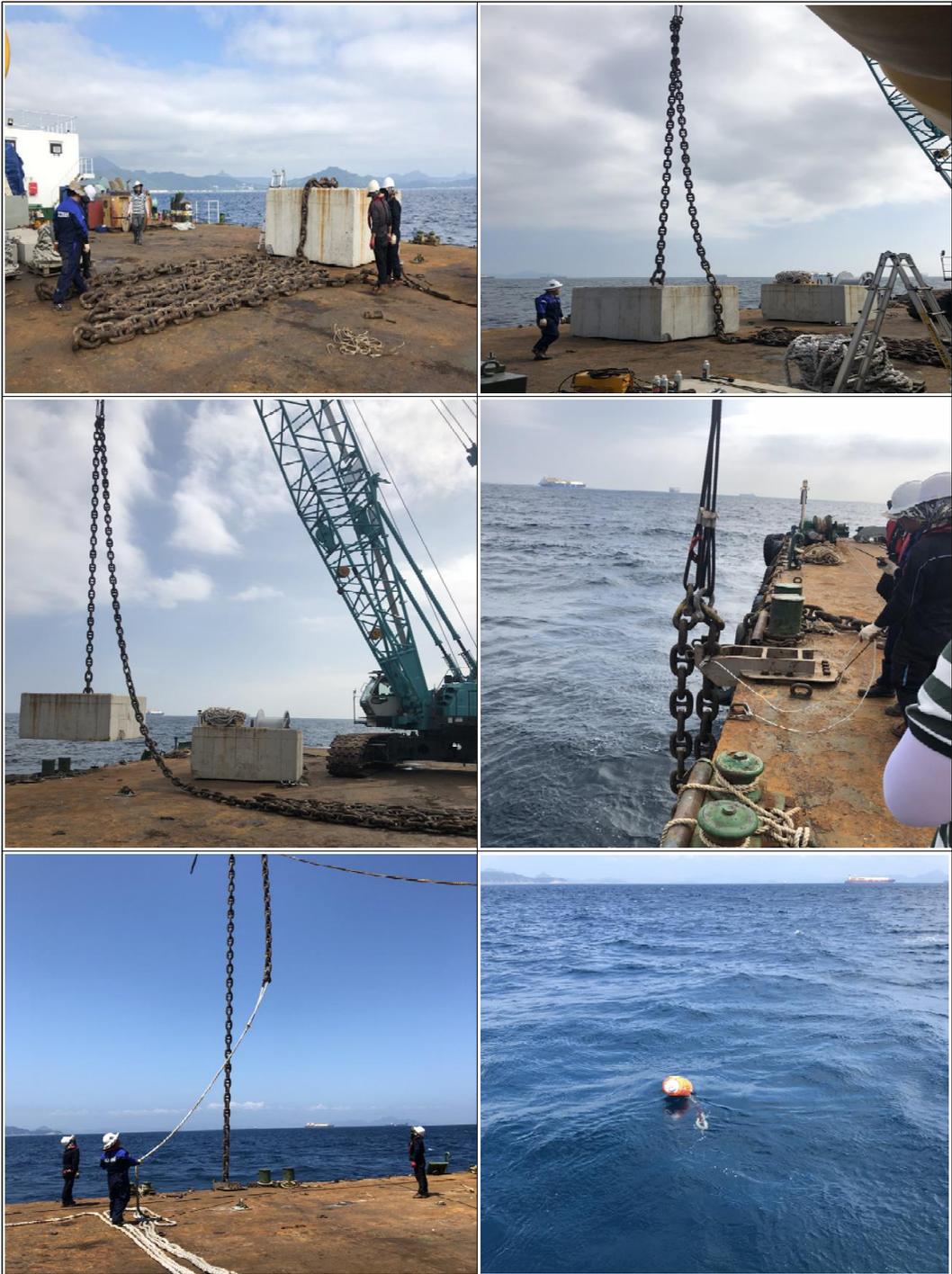


Fig. 5.19 Installation of anchor and mooring line



Fig. 5.20 Submerged cable laying



Fig. 5.21 Mooring line and submerged cable connection and lifting



Fig. 5.22 Launching

5.4 실증테스트 결과 및 분석

부이형 수중감시체계는 이동형 감시체계로서 원하는 장소에 신속하게 설치되어야 하며 기존 고정식 수중감시체계에 비해 설치, 회수 및 유지보수의 용이성이 뛰어나 매우 경제적이다. 하지만 일부 시스템이 해상에 노출되어 있어 파랑과 바람, 조류의 직접적인 영향을 받게 되므로 운용시 이에 대한 생존성이 확보되어야 한다.

본 연구를 통해 개발된 부이형 수중감시체계는 1차로 수치해석 기법과 수리모형 실험에 의해 안정성을 검증하였으며 최종적으로 실험역에서 설치, 운용, 회수의 전 과정에 대한 실증테스트를 수행하여 안정성을 검증하였다.

본 시스템이 기존 고정식 수중감시체계에 비해 경제성을 확보하기 위해서는 신속한 설치 및 회수를 용이하게 하고 유지보수가 간단하여야 한다. 따라서 본 시스템은 계류선의 개수를 2개로 최소화 했음에도 안정성을 유지할 수 있도록 하였으며 카테너리 계류방식을 적용하여 앵커 중량을 경량화 시켰다. 그리고 수중케이블 설치형상은 lazy wave형을 적용하여 부이의 과도한 운동에도 손상 가능성을 줄였다.

부이형 수중감시체계 설치 및 회수 작업은 sea state 3 이하의 정온한 상태에서 수행되었다. 설치시 소요시간은 앵커 및 계류선 설치에 1일, 수중케이블 포설 및 선형화 작업, 부이 연결 및 진수 작업에 1일이 소요되어 2일 내에 모든 설치작업이 완료되었다. 회수 작업은 이보다 더 빨리 이루어져 설치 및 회수작업의 신속성과 용이성이 검증되었다.

운용기간은 총 2개월이었으며 운용 중 태풍 솔릭의 간접적인 영향으로 설치해역에는 유의파고 4.2m의 파랑과 순간최대풍속 22.7m/s의 바람이 발생하였으며 이러한 해상조건은 sea state 6에 해당된다. 또한 관측된 최대 유속은 1.15m/s로 설계기준 1.0m/s를 초과하는 것으로 분석되었다.

본 실험역 실증테스트 기간 중 설치와 회수 그리고 부이와 계류시스템, 수중케이블의 안정성에 대한 특별한 문제점은 발생하지 않았다. 본 시스템이 운용

되었던 해상조건이 sea state 6으로 설계기준 해상조건 sea state 7에는 미치지 못하였으나 실제 부이와 계류시스템, 수중케이블의 거동특성이 수치해석과 수리모형실험 결과와 상이하지 않음을 보여주었다. 따라서 실험역 실증테스트를 통하여 부이형 수중감시시스템의 설치 및 회수의 편리성과 신속성, 운용시 안정성이 충분히 검증됨으로써 본 시스템은 고정식 수중감시체계보다 더 효율적이고 경제성이 우수할 것으로 판단된다.

제 6 장 결론

부이형 수중감시체계는 해상으로 침투하는 표적을 음향센서를 이용하여 감시하는 기술로써 이동형 수중감시체계이며, 기존 고정형 수중감시체계에 비해 설치, 회수, 유지보수가 용이하여 설치기간 단축 및 비용 측면에서 매우 효율적인 감시체계라 할 수 있다. 본 연구에서는 부이형 수중감시체계 중 부이와 계류시스템 그리고 수중케이블 상호간의 연성효과와 환경외력을 고려한 동적해석 및 수리모형실험, 실험실 실험을 통해 새로 개발된 부이형 수중감시체계의 안정성 및 운용성을 검증하였다.

부이형 수중감시체계는 고정형 수중감시체계 설치가 어려운 감시공백 지역에서 일정기간 설치하여 운용할 수 있는 이동형 수중감시체계로 부이와 계류시스템, 수중케이블로 구성되며 sea state 7의 해상상태에서 계류안정성과 운용성이 확보되어야 한다. 따라서 부이는 예인 안정성이 우수하여야 하며, 앵커 증량이 권장되도록 계류장력을 최소화 시킬 수 있는 계류시스템을 적용하여야 설치 및 회수가 용이해질 수 있다. 수중케이블은 계류선과 간섭되지 않아야 하며, 부이의 운동에 의해 발생하는 인장력과 dynamic cable의 거동이 배열케이블에 직접 전달되지 않도록 적절한 설치형상으로 설계되어야 한다. Dynamic cable은 VIV에 의한 공진 가능성에 대한 평가와 반복적인 파랑하중에 의해 손상이 발생하지 않도록 케이블 교체주기에 대한 피로수명이 적절히 평가되어야 한다. 그리고 배열케이블은 파랑과 조류하중에 의한 안정성(on bottom stability)을 확보하여야 한다.

부이는 예인 안정성이 우수한 nomad형 부이를 적용하였다. 탑재장비 중량 증가에 따라 부력과 복원성을 향상시킬 수 있도록 양쪽 선측에 원통형의 보조 부력탱크를 설치하였으며 선급기준에 따라 복원성 기준을 만족할 수 있도록 하

였다.

Nomad형 부이는 일반적으로 외력의 영향을 최소화 할 수 있는 1점 계류 방식을 적용한다. 하지만 1점 계류는 부체가 외력의 방향에 따라 자유롭게 거동할 수 있으므로 부이의 측면에 설치되는 수중케이블과 계류선이 간섭될 가능성이 매우 크다. 따라서 간섭 가능성을 최소화 할 수 있는 계류선의 적정 개수를 산정하기 위하여 1점, 2점, 3점 계류시의 거동특성에 대한 초기연구를 수행하였으며 2점 카테너리 계류방식을 부이형 수중감시체계의 최적 계류시스템으로 채택하였다. 2점 계류방식은 계류선이 선수와 선미에 체결되어 부이를 구속하므로 선수동요에 대한 안정성을 확보할 수 있으며 계류선과 케이블의 각도가 90도로 충분히 벌어져 있어 과동요시에도 간섭 확률이 상대적으로 적었다. 그리고 계류선 개수를 최소화 할 수 있어 설치 및 회수시 소요시간을 단축할 수 있고 계류선 1기가 손상되더라도 나머지 계류선으로 생존이 가능하다.

본 연구에 적용되는 카테너리 계류(catenary mooring) 방식의 계류선은 상부에서부터 부이체인(buoy chain), 로프(rope), 앵커체인(anchor chain)으로 구성된다. 부이체인은 비탈대에서의 마모 및 부식을 고려하여 길이 10m의 체인을 적용하였다. 앵커체인은 자중에 의한 복원성에 의해 부이의 이동량을 최소화하고 충분한 touch down length를 확보하여 앵커 파주력을 증대시키기 위하여 길이 70m의 중량이 큰 체인을 적용하였다. 그리고 부이체인과 앵커체인 사이의 계류선은 전체 계류선의 중량을 줄이기 위하여 로프를 적용하였다.

로프는 재질에 따른 신장율 차이에 의해 부이의 계류특성이 크게 달라질 수 있다. 따라서 최적의 로프 재질 선정을 위하여 와이어, 폴리에스터, 나일론 로프에 대한 계류특성을 평가하였다. 평가 결과 나일론 로프의 계류장력이 가장 작았으며 폴리에스터, 와이어 순으로 작게 발생하였다. 그리고 와이어와 폴리에스터는 계류선의 앵커부에서 장력이 크게 증가하는 반면 나일론은 앵커부로 갈수록 크게 감소하는 경향을 보였다. 이것은 수중케이블의 안정성을 확보하기 위하여 계류선 길이의 제약이 있게 되는데 나일론에 비해 신장율이 작은 와이어와 폴리에스터의 경우 계류선 길이가 충분히 길지 않아 부이의 운동이 고정점인 앵커부에 직접 전달되면서 급격한 장력 증가가 발생기 때문이다. 반면 나

일론의 경우 부이의 운동을 흡수할 수 있을 정도로 신장율이 커 장력 변화가 크게 발생하지 않는다. 따라서 와이어나 폴리에스터를 로프 재질로 적용할 경우에는 계류선의 길이가 더 길어져야 하므로 계류범위가 넓어지게 된다. 하지만 나일론 로프를 적용할 경우에는 길이가 짧더라도 장력의 급격한 변화가 발생하지 않으므로 좁은 계류범위 내에서도 안정적인 계류가 가능할 것으로 판단된다.

계류시스템에 대한 계류안정성은 부유체 계류해석 전용 프로그램(Orcaflex)을 사용하였으며, 시간영역에서 동적해석을 수행하였다. 각 분석 조건마다 서로 다른 파면(wave phase)을 가진 seed로 5번의 시뮬레이션을 수행하고, 시계열의 최대 계류장력과 Weibull 분포값을 이용한 장기극한해석값 분석을 통해 3시간 폭풍지속 시간동안 발생할 수 있는 계류장력의 극치통계값(extreme value statistics)을 얻었다. 해석프로그램에서 계산된 계류장력은 Bureau Veritas의 선급규정(NR 493, 2015)에 의하여 각 시뮬레이션마다 얻은 극치통계값의 평균 및 표준편차를 이용하여 계류선과 앵커 설계를 위한 설계 장력값(T_D)을 산출하였다.

수중감시체계의 수중케이블은 음향센서가 선배열된 배열케이블과 수신된 음향신호를 부이로 전달하는 dynamic cable, 그리고 부이와 케이블을 연결하는 연결장치, 케이블의 설치형상을 유지시키는데 필요한 DBM(distribute buoyance module), 배열케이블의 안정성을 확보하기 위한 싱커 및 중량물로 구성되어 있다.

배열케이블은 해저면에 노출되도록 설치되며 선형이 유지되어야 정확한 음향탐지가 가능하다. 그리고 조류나 파랑 그리고 부이의 거동에 의한 영향으로부터 안정성이 확보되어야 한다. 그러기 위해서 배열케이블에는 일정 간격의 중량물을 달아 조류와 파랑에 의한 안정성을 확보하도록 하였으며 dynamic cable과 연결되는 부분에는 싱커를 달아 부이의 운동과 인장력이 직접 전달되지 않도록 하였다.

Dynamic cable은 부이와 배열케이블을 연결하는 케이블이며 부이의 운동과

파랑 및 조류하중, 와류에 의한 진동 등 외력에 충분히 견딜 수 있어야 하며 조류에 의한 부이의 큰 운동변위에 대응하고 충격을 완화할 수 있는 lazy wave형의 설치형상을 적용하였다.

수중케이블의 거동과 인장력은 조류와 파랑뿐만 아니라 부이의 운동에 의한 영향이 매우 크므로 부이와 계류장치 그리고 수중케이블의 연성을 고려한 동적 해석을 수행하여 수중케이블의 거동특성과 최대로 발생하는 인장력에 대한 dynamic cable 안전성, model 해석에 의한 VIV(vortex induced vibration), 피로해석에 의한 피로수명 산정, 배열케이블의 on bottom stability 등을 평가하였다.

부이형 수중감시 시스템의 계류 및 케이블 안정성에 대한 수치해석 결과값의 신뢰성 검증을 목적으로 축소모형에 대한 수리모형 실험을 2차원 조파수조에서 수행하였다. 불규칙파랑 중에서 부이의 운동응답과 계류장력 그리고 수중케이블의 설치형상에 대한 거동특성을 고찰하기 위하여 수리모형 실험을 통해 부이의 surge, heave, pitch 동요량, 계류선과 수중케이블의 장력을 측정하였으며, 파랑과 조류에 변화하는 수중케이블의 설치형상을 육안으로 관찰하였다. 부이 동요량과 계류선 장력에 대한 수리모형실험과 수치해석 결과값은 대체적으로 잘 일치하였으며 수중케이블 설치형상은 안정적으로 거동하는 것을 확인하였다.

최종 단계에서는 실제 해상에서의 설치, 회수 및 운용성 검증을 위한 실험역 실증테스트를 수행하였다. 설치해역은 거제 지심도에서 동남쪽으로 약 2.0km 떨어진 해상이며 2018년 8월 1일~2018년 10월 3일까지 약 2개월간 설치 운용되었다. 부이형 수중감시체계 설치 작업은 sea State 3 이하의 정온한 상태에서 수행되었으며 sea state 6의 해상상태에서 설치 및 운용시 안정성을 검증하였다.

본 실험역 실증테스트 기간 중 설치와 회수 그리고 부이와 계류시스템, 수중케이블의 안정성에 대한 특별한 문제점은 발생하지 않았다. 본 시스템이 운용되었던 해상조건이 sea state 6으로 설계기준 해상조건 sea state 7에는 미치지

못하였으나 실제 부이와 계류시스템, 수중케이블의 거동특성이 수치해석과 수리모형실험 결과와 상이하지 않음을 보여주었다. 따라서 실험역 실증테스트를 통하여 부이형 수중감시시스템의 설치 및 회수의 편리성과 신속성, 운용시 안정성이 충분히 검증됨으로써 본 시스템은 고정식 수중감시체계보다 더 효율적이고 경제성이 우수할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] DNV-RP-F109 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines, 2010
- [2] DNV-OS-F201, Dynamic Risers, 2010
- [3] API RP 2SK, Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, 2005
- [4] API RP 2-WSD, 부유식 해양구조물 기준, 미국석유협회, 2014
- [5] ABS Guide for Drilling and Classing, Subsea Riser systems, 2006
- [6] Bureau Veritas NR 493 Classification of Mooring Systems for Permanent and Mobile Offshore Units, 2015
- [7] Bureau Veritas Rule(Rules for Classification of Offshore Units, 2013), 계류시스템의 설계 및 환경하중의 계산
- [8] Bureau Veritas NI 605 Geotechnical and Foundation Design, 2014
- [9] 해양구조물 규칙, 한국선급, 2014
- [10] 항만 및 어항설계 기준, 해양수산부, 2014
- [11] Resolution A.749, 국제해사기구, 이동식 해양시추구조물을 포함한 선박형 구조의 손상시 및 비손상시 복원성 기준(MODU Code), 1993
- [12] BS 6349 Part6, 앵커를 포함한 계류설비의 손상시 및 비손상시 복원성 기준, 1989
- [13] MODU Code, International Maritime Organization, 손상시 및 비손상시 복원성 기준, 2009
- [14] Dr. Ir, Johan Wichers, Guide to Single Point Moorings