



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

선박의 특성을 고려한 계류안전성 평가 기반의
부두 마루높이에 관한 연구

A Study on the Crown Height based on Mooring Safety
Assessment considering Characteristics of Ship's type



指導教授 李 允 石

2018년 8월

韓國海洋大學校 大學院

海洋警察學科

金 昇 軟



工學博士 學位論文

선박의 특성을 고려한 계류안전성 평가 기반의
부두 마루높이에 관한 연구

A Study on the Crown Height based on Mooring Safety
Assessment considering Characteristics of Ship's type



指導教授 李 允 石

2018년 8월

韓國海洋大學校 大學院

海洋警察學科

金 昇 軟

본 논문을 김승연의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 조 익 순



위 원 김 세 원



위 원 공 길 영



위 원 이 홍 훈



위 원 이 윤 석



2018년 08월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vii
Abstract	xii
Nomenclature	xvi

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 방법 및 구성	6

제2장 부두시설 연구 및 현황 분석

2.1 연구 동향 분석	9
2.1.1 계류안전성 평가 및 계류시설 연구	9
2.1.2 해수면 상승에 따른 연안시스템 연구	13
2.2 선박 대형화 및 해수면 상승 현황	15
2.3 국내·외 부두시설 개발 현황	25
2.3.1 국내 부두시설 개발 현황	25
2.3.2 국외 부두시설 개발 현황	28

제3장 부두시설 마루높이 결정요소 분석

3.1 부두 계류시설 및 마루높이	33
3.1.1 계류시설의 정의 및 종류	33
3.1.2 마루높이의 정의 및 연관요소	35
3.2 마루높이 설계기준 분석	38
3.2.1 국내 마루높이 설계기준 및 현황	38
3.2.2 국외 마루높이 설계기준	42
3.3 마루높이 결정요소 선정	48

제4장 선종별 마루높이 민감도 평가

4.1 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가 개요	50
4.1.1 계류안전성 평가 개요	50
4.1.2 계류선박의 운동방정식 및 환경외력	54
4.1.3 계류설비 및 계류라인 배치	66
4.1.4 선종별 그룹화 및 특징 분석	69
4.2 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가	76
4.2.1 대상선박 모델링	76
4.2.2 계류시스템 모델링	78
4.2.3 마루높이 모델링	90
4.2.4 외력조건 및 시나리오 설정	91
4.3 계류안전성 수치 시뮬레이션 결과 분석	94
4.3.1 크루즈선 분석 결과	94
4.3.2 컨테이너선 분석 결과	109
4.3.3 벌크선 분석 결과	124
4.3.4 LNG선 분석 결과	139
4.3.5 선종별 종합평가	154

제5장	마루높이 평가지표 및 설계기준 개발	
5.1	마루높이 평가지표 개발	158
5.1.1	환경평가지표	160
5.1.2	선박평가지표	171
5.1.3	마루높이 평가방법	177
5.2	마루높이 평가지표 적용 결과	181
5.2.1	마루높이 평가지표 적용	181
5.2.2	선종별 적정 마루높이 도출	191
5.3	마루높이 설계기준 제안	192
5.3.1	평가지표를 활용한 설계기준 제안	192
5.3.2	설계기준 적용	195
제6장	결론	198
	참고문헌	202
	감사의 글	208



List of Tables

Table 1 Consideration of mooring facility design criteria	2
Table 2 Berth productivity by ship size(2013)	18
Table 3 Container port volumes handled at top 10 container terminals ...	19
Table 4 Categories of RCP scenario	21
Table 5 State of sea level rise on domestic seas(1989~2016)	24
Table 6 Past and planned port project SLR adaption strategies	30
Table 7 Predicted annual sea level rise and peak levels for 1:200 year and 1:1000 year events	32
Table 8 Mooring facilities	34
Table 9 Standard of crown height(Domestic)	38
Table 10 Overtopping height of major port in domestic port	41
Table 11 Standard of crown heights(Japan)	44
Table 12 Considerations of crown height design criteria in domestic and international standards	48
Table 13 Group of ship depending on the DWT/GT	69
Table 14 Comparison of dimension on tanker and bulker	71
Table 15 Comparison of dimension on Cruise and PCTC	71
Table 16 Comparison of dimension on LNG and LPG ship	72
Table 17 Comparison of container ship's dimension depending on the DWT	72
Table 18 Characteristics of ship's group	73
Table 19 Dimension of 100,000ton ship by Harbour Design Criteria in Korea	75
Table 20 Dimension of target ship	76

List of Tables

Table 21	Longitudinal windage area of target ship	77
Table 22	Comparison between length of pier and L.O.A	79
Table 23	Load, interval and number of Bollard	80
Table 24	Selection of bollard by ship's group	81
Table 25	Characteristics of fender	81
Table 26	Mooring arrangement of cruise ship	83
Table 27	Mooring arrangement of container ship	84
Table 28	Mooring arrangement of bulker	85
Table 29	Mooring arrangement of LNG ship	86
Table 30	Standard of mooring rope by equipment number	88
Table 31	Characteristic of mooring rope	88
Table 32	Classification of crown height	90
Table 33	Correlation of crown height and moored ship	90
Table 34	Windage area of each ship depending on the crown height	92
Table 35	Simulation scenario of mooring safety assessment simulation	93
Table 36	Max. decrement of group depending on the environment condition	154
Table 37	Environment index of crown height(<i>CE</i>)	159
Table 38	Ship index of crown height(<i>CS</i>)	159
Table 39	Spring range and A.H.H.W. on domestic major port(2017)	163
Table 40	Projections of sea level rise for the period(2081~2100)	165
Table 41	Design depth of water depending of ship's type	169
Table 42	Depth of water depending on the ship's speed and swell	170

List of Tables

Table 43 Minimum Breaking Load of synthetic fiber rope	172
Table 44 Safety working load of mooring rope	172
Table 45 Recommended motion criteria for safe working conditions	175
Table 46 Evaluation standards of ship index of crown height	178
Table 47 Risk level evaluation standards of crown height	180
Table 48 Results of risk level evaluation on ship index(Group A)	183
Table 49 Sample of DWT 100,000ton Container ship	184
Table 50 Results of risk level evaluation on ship index(Group B)	185
Table 51 Results of risk level evaluation on ship index(Group C)	188
Table 52 Results of risk level evaluation on ship index(Group D)	190
Table 53 Optimal min. crown height of ship's group	191
Table 54 Projections of sea level rise in domestic coast(2081~2100)	194
Table 55 Suggestion the design criteria of crown height	194
Table 56 Comparison between present and suggested crown height on the domestic major port(Container ship)	196
Table 57 Comparison between present and suggested crown height on the domestic major port(Bulker)	197

List of Figures

Fig. 1	Moored ship on the low crown height	3
Fig. 2	50 years of container ship growth	4
Fig. 3	Flow chart of the study	8
Fig. 4	Ship size development of various ship types(1996~2015)	16
Fig. 5	Development of container ship size	17
Fig. 6	Comparison of the dimension on MOL container ship	17
Fig. 7	Global anthropogenic radiative forcing for the RCP scenario	21
Fig. 8	Global mean sea level rise(2000~2100)	22
Fig. 9	State of sea level rise by regional area(1989~2016)	23
Fig. 10	Construction plan of protective facility in Gunsan harbour	26
Fig. 11	General plan of break water reinforcement	27
Fig. 12	Range of predicted sea level rise through 2100	29
Fig. 13	Projected water surface levels at the port of San Francisco	29
Fig. 14	Flood risk zones in the Port of Southampton area	31
Fig. 15	Definition of crown height	35
Fig. 16	Correlation between crown height and moored ship	36
Fig. 17	Gangway of T/S Hannara in considering crown height	37
Fig. 18	Key elements of solid deck structures(R.O.K)	39
Fig. 19	Key elements of solid type and concrete block construction(U.S.A) ..	43
Fig. 20	Key elements of suspended deck structures(Japan)	44
Fig. 21	Key elements of concrete caisson deck structures(U.K)	45
Fig. 22	Various berth structures(Port Designer's Handbook)	47
Fig. 23	Decisive factors of crown height	49
Fig. 24	Mooring safety assessment simulation program(OPTIMOOR)	51

List of Figures

Fig. 25	Coordinate system and notation(Pier)	52
Fig. 26	Coordinate system and notation(Ship)	53
Fig. 27	6 degrees of freedom ship motion	54
Fig. 28	Wind force coefficients for various ship	58
Fig. 29	Wave spectrum domain analysis	60
Fig. 30	Bretschneider spectrum and JONSWAP spectrum	63
Fig. 31	Current drag force coefficients of all ships	65
Fig. 32	Mooring line plan	67
Fig. 33	Criteria on the vertical angle of mooring line(OCIMF)	68
Fig. 34	Criteria on the vertical angle of mooring line(Harbour Design Criteria in Korea)	68
Fig. 35	Photo of ship on each group	74
Fig. 36	Characteristic curve of fender	82
Fig. 37	Cell type fender	82
Fig. 38	LNG carrier berthing in fixed wharf	86
Fig. 39	Load-Extension curve of mooring rope	89
Fig. 40	Wind direction for the mooring safety assessment	91
Fig. 41	Tension of line (Group A, WD1)	96
Fig. 42	Tension of line (Group A, WD2)	97
Fig. 43	Tension of line (Group A, WD3)	98
Fig. 44	Tension of line depending on wind speed (Group A)	99
Fig. 45	Load of bollard (Group A, WD1)	101
Fig. 46	Load of bollard (Group A, WD2)	102
Fig. 47	Load of bollard (Group A, WD3)	103

List of Figures

Fig. 48	Surge & sway motion (Group A, WD1)	105
Fig. 49	Surge & sway motion (Group A, WD2)	106
Fig. 50	Surge & sway motion (Group A, WD3)	107
Fig. 51	Vertical angle of mooring line (Group A)	108
Fig. 52	Tension of line (Group B, WD1)	111
Fig. 53	Tension of line (Group B, WD2)	112
Fig. 54	Tension of line (Group B, WD3)	113
Fig. 55	Tension of line depending on wind speed (Group B)	114
Fig. 56	Load of bollard (Group B, WD1)	116
Fig. 57	Load of bollard (Group B, WD2)	117
Fig. 58	Load of bollard (Group B, WD3)	118
Fig. 59	Surge & sway motion (Group B, WD1)	120
Fig. 60	Surge & sway motion (Group B, WD2)	121
Fig. 61	Surge & sway motion (Group B, WD3)	122
Fig. 62	Vertical angle of mooring line (Group B)	123
Fig. 63	Tension of line (Group C, WD1)	126
Fig. 64	Tension of line (Group C, WD2)	127
Fig. 65	Tension of line (Group C, WD3)	128
Fig. 66	Tension of line depending on wind speed (Group C)	129
Fig. 67	Load of bollard (Group C, WD1)	131
Fig. 68	Load of bollard (Group C, WD2)	132
Fig. 69	Load of bollard (Group C, WD3)	133
Fig. 70	Surge & sway motion (Group C, WD1)	135
Fig. 71	Surge & sway motion (Group C, WD2)	136

List of Figures

Fig. 72 Surge & sway motion (Group C, WD3)	137
Fig. 73 Vertical angle of mooring line (Group C)	138
Fig. 74 Tension of line (Group D, WD1)	141
Fig. 75 Tension of line (Group D, WD2)	142
Fig. 76 Tension of line (Group D, WD3)	143
Fig. 77 Tension of line depending on wind speed (Group D)	144
Fig. 78 Load of bollard (Group D, WD1)	146
Fig. 79 Load of bollard (Group D, WD2)	147
Fig. 80 Load of bollard (Group D, WD3)	148
Fig. 81 Surge & sway motion (Group D, WD1)	150
Fig. 82 Surge & sway motion (Group D, WD2)	151
Fig. 83 Surge & sway motion (Group D, WD3)	152
Fig. 84 Vertical angle of mooring line (Group D)	153
Fig. 85 Max. decrement on tension of mooring line by crown height ...	155
Fig. 86 Max. decrement on load of bollard by crown height	156
Fig. 87 Max. decrement on sway motion by crown height	157
Fig. 88 Tidal range and level	161
Fig. 89 Embarkation and loading equipment of passenger ship and PCTC	166
Fig. 90 Loading equipment of LNG and Tanker ship	167
Fig. 91 Loading arm operating envelope	168
Fig. 92 Consideration on the depth of water(PIANC)	170
Fig. 93 Bollard and bitt in the Busan international passenger terminal ..	174
Fig. 94 Efficiency of mooring rope by vertical angle of mooring line ...	176

List of Figures

Fig. 95	Results of <i>CH</i> by environment condition (Group A)	182
Fig. 96	Results of <i>CH</i> by environment condition (Group B)	185
Fig. 97	Results of <i>CH</i> by environment condition (Group C)	187
Fig. 98	Results of <i>CH</i> by environment condition (Group D)	189



<영문초록>

A Study on the Crown Height based on Mooring Safety Assessment considering Characteristics of Ship's type

Kim, Seung Yeon

Department of Coast Guard Studies

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In recent years, Korea has selected Twenty-two ports for reinforcement of breakwaters and installation of protection facilities, due to the rise of sea level caused by global warming. In addition, dredging for depth of water for large vessel's berthing and enlargement of berth is under construction due to consistent enlargement of ship size, However, there's no definite construction plan for the reinforcement of crown height, which has close relationship with the safe mooring of ships.

Also, in accordance with the characteristics of ship, length of pier, crown height, bollard, and fender facilities are selected based on the 'Harbour Design Criteria in Korea', length of pier is affected by ship's type and tonnage, bollard is affected by gross tonnage, and lastly, the fender facilities are affected by deadweight tonnage.

However, the design standards of the crown height which has close relationship with the angle of mooring line, windage area, and oscillation of ship motion, only includes depth of water and tidal range factors, and does not take into account of ship's type and size.

Therefore, the domestic and foreign design standards of the crown height has been researched for the analysis of determinants of crown height, in order to suggest the standard of crown height which considers ship's characteristics. Also, I have classified ship's group based on the ship's characteristics, and carried out simulation of mooring safety assessment as per the increase of crown height. As a result, mooring factors' sensitivity as per ship's characteristics could be analyzed. Furthermore, the evaluation index of crown height has been made by dividing into environment and ship factors, and proposed design standards considering the above.

This research consists of 6 chapters in total, and the composition and contents of each chapter are as follows.

Chapter 1 introduces background and purpose of research, research method and composition of thesis. The purpose of this study is to propose the standard of crown height reflecting characteristics of ship's type considering the increase of sea level due to vessel enlargement and global warming. Especially, I would like to propose a standard of crown height, which has close effect on the mooring safety of moored vessel, by the viewpoint of the ship operator who uses the port facilities.

In chapter 2, analyzed the preliminary studies of mooring safety assessment, improvement of mooring facilities and rising sea level. In addition, the trends and prospects of shipbuilding, sea level rise, which have a direct impact on the improvement of crown height design standards have been considered, and examined the development trends of domestic and foreign port facilities.

Various port facilities should be secured to cope with the increase in the domestic trade volume of ultra-large container ships and the competition in transshipment logistics in East Asia. In addition, due to the global rise in sea level, not only natural systems in coastal areas but also social and economic systems are expected to become more susceptible to natural disasters. Therefore, it is necessary consider sea level rise when designing crown height because if the rising sea level is higher than the crown height of the current pier, the pier may be flooded causing ship's mooring impossible.

In Chapter 3, mooring facilities were classified and domestic standards of crown height were analyzed based on the 'Harbour Design Criteria', and the determinants of crown height were selected by analyzing the crown height design criteria of the US, Japan, UK, Hong Kong, etc. The design standards of crown height in Korea and Japan reflect only environmental characteristics, tide and depth of water. However, the design standards in U.S, U.K, Hong Kong and Port Designer's Handbook consider the berthing vessel, embarkation & loading facilities, elevation of berths, and the height of adjacent areas. In addition, the UK design standards was considered to be concerned with the sea level rise.

In Chapter 4, simulation of mooring safety assessment was performed to analyze the sensitivity of mooring factors according to crown height of each classified ship. The simulation was performed using OPTIMOOR, a mooring safety analysis program developed by TTI(Tension Technology International, Ltd.). The theoretical background are summarized for the simulation of mooring safety assessment, and mooring method which can reduce the hull oscillation was analyzed and applied to this assessment in various documents.

In addition, grouping was performed according to ship's type and characteristics, and selected representative vessels for each group. Then, simulation was carried out under the same environmental conditions according to the change of crown height, and the mooring safety sensitivity of the representative vessels of each group was compared and analyzed.

In Chapter 5, the evaluation index of crown height was developed by dividing into environmental factors and ship elements. Environmental evaluation index are set to four ; tidal level and range, sea level rise, embarkation & loading equipments, and depth of water. Also, the ship evaluation index are set to four ; tension of mooring line, load of bollard, oscillation of ship motion, vertical angle of mooring line. Ship evaluation index was applied and evaluated on the results of simulation in chapter 4, and the appropriate crown height of each group representative ship was derived. In consideration of this, a design standards of crown height including environment and ship evaluation index was proposed.

In this study, the mooring factor sensitivity of moored ships according to elevation of crown height is analyzed through mooring safety numerical simulation, and the evaluation index and design standard of crown height are proposed by domestic and international design standards and research trends.

As the crown height increases, the tension of mooring line, load of bollard, oscillation of ship motion, and the vertical angle of the mooring line decrease, the sensitivity of decrement rate on ship evaluation index is quantitatively shown that there are differences according to ship characteristics. In order to improve mooring safety of the ship, it is proved that the crown height should be set to reflect the characteristics of the ship.

Furthermore, I have grouped the ship's type so that they could reflect the characteristics of various vessels without selecting specific vessels or specific quays in order to simulate the mooring factor sensitivity according to the elevation of the crown height. Also, I have designed a virtual wharf with bollards, fenders, and generalized the mooring type and mooring line layout based on the domestic and international design standards, so it could be expanded the application range of this study.

KEY WORDS: crown height 마루높이; mooring safety assessment 계류안전성 평가; characteristics of ship 선박 특성; mooring facilities 계류 시설; sensitivity analysis 민감도 분석

Nomenclature

M_{ij}	선체 질량 및 관성모멘트
m_{ij}	불변 부가질량 및 모멘트
D_i	감쇠계수
C_{ij}	정적복원력 계수
G_{ij}	계류력 계수
F_{ij}	외력항
$A_{ij}(\sigma)$	각주파수 σ 에 대한 부가질량
$B_{ij}(\sigma)$	각주파수 σ 에 대한 감쇠계수
F_{x_w}	풍하중 합력의 x방향 성분
F_{y_w}	풍하중 합력의 y방향 성분
$M_{x y_w}$	풍하중 합력의 선박 중심축 회전 모멘트
F_{x_c}	조류력의 x방향 성분
F_{y_c}	조류력의 y방향 성분
$M_{x y_c}$	조류력의 선박 중심축 회전 모멘트
C_{x_w}	x방향(선체정면방향)의 풍항력 계수
C_{y_w}	y방향(선체측면방향)의 풍항력 계수
$C_{x y_w}$	선박중심축 회전의 풍압모멘트 계수
C_{x_c}	x방향(선체정면방향)의 조류력 계수
C_{y_c}	y방향(선체측면방향)의 조류력 계수
$C_{x y_c}$	선박중심축 회전의 조류모멘트 계수

Nomenclature

ρ_w	공기의 밀도
ρ_c	해수의 밀도
V_w	풍속
V_c	조류속도
A_L	수면상 선체 측면 투영면적
A_T	수면상 선체 정면 투영면적
LOA	전장
LBP	수선간장
B	폭
T	흘수
C_b	방형계수
Δ	배수량
H_i	약최고고조위(A.H.H.W.)로부터 i m 상향된 마루높이
$CH(H_i)$	마루높이 H_i 일 때 안전성 평가지표
CE	환경평가지표
CS	선박평가지표
VH	환경 및 선박의 특성을 반영한 마루높이 값
VE	환경요소 마루높이 값
VS	선박요소 마루높이 값



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

국내 항만은 우리나라 수출입 화물의 99.7%를 처리하고 있으며, 세계 9위의 무역국으로의 도약을 견인한 국가 기간산업의 요지이다. 또한 국가산업단지 41개 중 20개가 항만을 포함하거나 항만과 인접하여 고부가가치를 창출하고 있으며, 항만 물동량의 지속적인 증가로 항만 물류산업 자체로도 매년 27조원 이상의 부가가치를 창출하고 있다.

그러나 세계 경제가 저성장 시대에 진입하여 교역 성장세가 둔화되고 세계 항만물류산업의 경쟁이 치열해지고 있음에 따라, 해외 주요 항만들은 선박 초대형화 및 경쟁 심화에 선제적으로 대응하기 위해 항만시설 투자를 확대하고 있다. 이에 따라 국내 항만시설 또한 ‘물류와 레저, 문화가 함께하는 고부가가치 항만’이라는 비전을 목표로 전국 항만에 대해 2020년까지 189선석의 접안시설을 확충하고, 140선석의 화물부두를 추가로 확보하고자 총 14.7조원의 투자계획을 진행 중이다(해양수산부, 2016).

국내 항만 및 부두 개발은 2017년에 개정된 ‘항만 및 어항 설계기준(Harbour Design Criteria in Korea)’에 의거하여 이루어지고 있으며, 동 기준에는 설계조건, 재료, 기초공사, 콘크리트 부재의 기준과 항로·정박지·선회장 등의 수역시설, 방파제·갑문·호안 등의 외곽시설, 부두·안벽·돌핀 등의 계류시설, 임항교통시설·하역시설 등의 기타 항만시설, 전문부두, 마리나, 항로표지시설, 해저 파이프 라인 등의 모든 항만 및 부두 관련 시설의 설계기준을 포함하고 있다.

각 항만에서 부두 설계시 일반적으로 접안선박의 선종 및 크기를 우선 선정하고, 항만 및 어항 설계기준에 의거하여 선석, 마루높이(Crown height), 계선

주, 방충설비 등의 종류 및 치수가 선정된다. Table 1은 각 계류시설 설계기준의 고려사항이며, 선석길이 설계기준의 고려사항은 선종, 총톤수 및 재화중량톤수이고, 계선주는 총톤수, 방충재는 선종, 재화중량톤수 및 접안에너지에 의해 결정된다.

그러나 계류라인의 각도, 선박의 풍압면적, 선체동요량에 밀접한 영향을 주는 부두의 마루높이 설계기준은 해당 부두의 환경적 특성에 해당되는 수심 및 조차일 뿐 선종 및 크기 등의 접안선박의 특성은 포함되지 않고 있다. 이로 인하여 대형선박이 그 부두의 환경적 특성만 고려되어 건설된 낮은 마루높이의 부두에 접안하게 되고, 이 때 선박의 계류라인 수직각이 커져 계류삭의 장력 효율성이 감소하게 된다. 이에 따라 선박의 계류안전성을 충분히 확보하지 못하여 갑작스러운 기상악화 및 돌풍(Gust)으로 인한 계류사고의 사고 개연성이 존재한다.

Table 1 Consideration of mooring facility design criteria

Mooring facilities	Consideration
Berth length	Ship's type, Gross tonnage, Deadweight tonnage
Bollard	Gross tonnage
Fender	Ship's type, Deadweight tonnage, Berthing energy
Crown height	Depth of water, Tidal range and level

또한, 여객선의 경우 승하선 설비인 갱웨이(Gangway)의 설치가 어렵거나 부두와의 수직각도가 너무 커서 여객의 이동이 어려울 수 있으며, 벌크선 및 컨테이너선의 하역 크레인>Loading crane), 자동차선의 램프>Ramp)의 설치 및 작동이 불가할 수 있다.

대형선이 낮은 마루높이에 계류하였을 때 접안선박의 계류상태는 Fig. 1과 같으며, 각각의 사진 모두 선박의 계류라인 수직각이 매우 크므로 계류상태가 불안정하며, 이는 갑작스러운 돌풍으로 인해 계류라인 단락, 화물 손상 등의 사고가 발생할 수 있다.



Fig. 1 Moored ship on the low crown height

출처 : www.google.com

또한 대량운송에 따른 운항비용 절감, 선박 건조단가 축소, 운송 경쟁력 강화 등을 이유로 컨테이너선의 대형화는 꾸준히 이루어지고 있다. 1968년부터 2018년까지 50년간 컨테이너선의 크기 변화는 Fig. 2와 같으며, 연도별로 운항된 최대 컨테이너선의 크기는 1997년 8,000 TEU, 2006년 11,000 TEU, 2013년 18,000 TEU급으로 분석되었다. 현재 최대 컨테이너선은 삼성중공업에서 건조되어 2017년부터 운항 중인 21,413 TEU급의 OOCL Hong kong으로 전장은 399.87m, 폭은 58.8m이다(Wikipedia, 2018).

이에 따라 4,000 TEU급 컨테이너선에서 8,000 TEU급 컨테이너선까지의 대형화는 1980년에서 1997년으로 약 17년이 소요되었지만, 1만 TEU급 컨테이너선에서 2만 TEU급 컨테이너선까지의 대형화는 약 12년 정도가 소요되어 컨테이너선 크기의 가속화가 꾸준히 진행되고 있음을 알 수 있다.

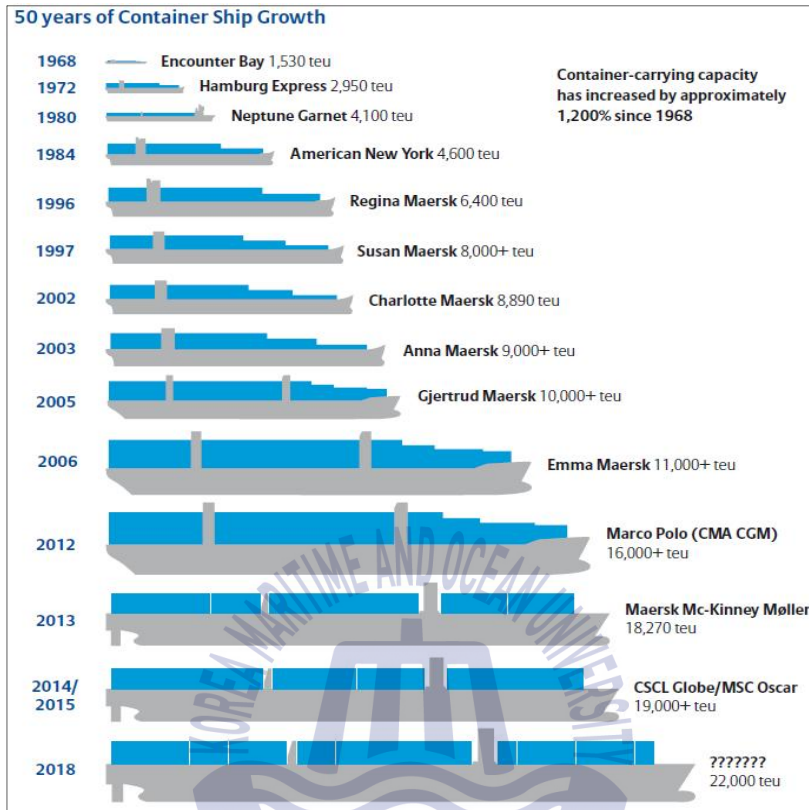


Fig. 2 50 years of container ship growth

출처 : Allianz Global Corporate & Specialty

선박이 대형화됨에 따라 선박이 접안하는 부두 또한 대형화 추세에 대비해야 한다. 먼저 대형선이 원활하게 입항하기 위해서는 항로와 안벽의 수심이 선박의 최대흘수 이상으로 확보되어야 하고, 특히 컨테이너선의 경우 선폭 및 높이가 증가하므로 하역 크레인의 아웃리치(Out reach)와 인양높이를 충분히 확보하여 설치하여야 할 것이다. 또한, 선박 대형화에 따라 전장이 길어지므로 충분한 길이의 선석이 확보되어야 하고, 건현의 높이가 증가함에 따라 부두의 마루높이가 높아져야 하며, 방충설비와 계선주 역시 허용한계를 상향하여 건설해야 한다. 현재 초대형선 입항에 따른 해양수산부의 부두 개발 현황을 보면, 수심 준설, 선석 확대, 계류시설 증강 등은 원활히 이루어지고 있으나, 부두 마루높이의 상향 공사는 체계적으로 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

국내외에서 심각하게 진행되고 있는 지구온난화에 따른 해수면 상승 또한 부두의 마루높이를 포함한 항만시설에 직접적으로 영향을 미치고 있다. 1986~2005년의 관측값을 기준으로 21세기 후반(2081~2100년)의 지구 평균 온도 및 해수면 상승 정도를 예측하였을 때, 현재 추세대로 저감없이 온실가스를 배출하는 RCP(Representative Concentration Pathways) 8.5 시나리오의 경우, 지구의 평균 표면온도는 2.6~4.8℃ 상승할 것으로 예측되었고, 해수면 상승범위는 0.45~0.98m 상승할 것으로 예측되었다(IPCC, 2013).

우리나라 연안의 최근 28년간(1989~2016년) 해수면 변동을 분석한 결과, 우리나라의 해수면 높이 평균 상승률은 2.96mm/yr으로, 유엔산하기구인 ‘기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)’이 발표한 전 세계 평균값인 2.0mm/yr보다는 다소 높은 수준인 것으로 나타났다. 지역별 해수면 평균 상승률은 제주항이 6.16mm/yr로 가장 높았으며, 제주 부근은 4.55mm/yr, 동해안 3.78mm/yr, 남해안 2.48mm/yr, 서해안 1.47mm/yr으로 분석되었다(해양수산부, 2017a).

지속적인 해수면 상승에 따른 항만 및 부두시설에 예측되는 주요 영향으로는 설계과고 증가, 외곽시설 구조물 안전성 저하, 월파량 증가 및 월파에 의한 항내 정온도 불량, 야적장 및 배후부지 침수, 잔류수위 상승으로 인한 접안시설 안전성 저하 등이 있다. 그러므로 지구온난화로 인한 해수면 상승과 증가하는 태풍, 해일 등의 자연재해에 대비하기 위해서 부두 설계기준은 기존보다 상향되는 것이 미래지향적이며, 실제로 정부에서는 해수면 상승 및 해일의 항만내습에 대비하여 방파제 보강과 침수취약지구 정비 공사를 추진 중에 있으나, 마루높이 상향 공사 계획은 구체적으로 제시되지 않고 있는 실정이다.

이에 따라 본 연구는 현재의 환경적 요소만 고려된 부두 마루높이 설계기준에서 접안선박의 특징과 선박 대형화, 지구온난화에 따른 해수면 상승 등의 현재 추세를 반영하도록 마루높이 설계기준을 제안하는데 그 목적이 있다. 특히 접안선박의 계류안전성에 직접적인 영향을 미치는 마루높이 설계기준을 부두 개발자의 관점이 아닌 부두를 이용하는 주체인 선박 운항자 관점에서 보완하여 미래지향적이고 계류안전성이 강화된 마루높이 설계기준을 제안하고자 한다.

1.2 연구 방법 및 구성

본 연구의 방법은 먼저 각종 문헌자료를 통하여 계류안전성 평가 및 계류시설의 선행연구 및 연구동향을 살펴보고, 선박 대형화, 해수면 상승, 부두시설 개발 현황을 분석하였다. 또한, 국내·외 마루높이의 설계기준을 조사하여 마루높이 결정요소를 도출하였으며, 국내 마루높이 설계기준의 개선 필요성을 확인하였다.

접안 선박의 특성을 반영한 적정 마루높이 설계기준을 개발하기 위해 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가를 수행하여 선종별 마루높이 상향에 따른 4개 계류요소의 민감도를 분석하고, 이를 바탕으로 부두환경 및 접안선박의 특성을 반영한 마루높이 평가지표를 개발하고 설계기준을 제안하였다. 특히 마루높이 평가지표 중 선박평가지표는 각 계류요소별 국내·외 관련 규정을 근거로 하여 5개의 평가기준을 설정하였으며, 이를 이용하여 4장의 계류안전성 시뮬레이션 결과값을 평가하였다. 최종적으로 마루높이 위험도 평가등급에 환경 및 선박평가지표의 결과값을 대입하여 부두환경 및 접안선박의 특성을 반영한 적정 마루높이를 도출하였다.

본 연구는 총 6장으로 구성되어 있으며, 접안선박의 계류안전성 수치 시뮬레이션을 수행하기 위해 TTI(Tension Technology International, Ltd.)사에서 개발한 계류안전성 분석 프로그램인 OPTIMOOR를 사용하였다. 이에 따른 각 장의 구성 및 주요 내용은 다음과 같으며, 연구 과정의 흐름을 도식화한 것은 Fig. 3과 같다.

제1장에서는 본 연구의 배경 및 목적, 연구 방법 및 논문의 구성에 대하여 기술하였다.

제 2장에서는 계류안전성 평가, 부두 계류시설 및 해수면 상승에 따른 연안시스템 관련 선행연구를 분석하였다. 또한 마루높이 설계기준 개선에 직접적인

영향이 있는 선박 대형화 및 해수면 상승의 현황 및 전망을 살펴보고, 이에 따른 국내·외 부두시설 개발 현황을 조사하였다. 국내에서는 최근 해수면 상승 및 태풍 강도 증가를 고려하여 취약 항만을 지정하여 방파제 보강을 실시하고 있으며, 선박 계류 및 월파 방지에 기본적인 부두 마루높이 상향 공사는 구체적으로 시행되고 있지 않는 실정이다.

제 3장에서는 ‘항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2017년)’을 바탕으로 계류시설을 분류하고 국내 마루높이 설계기준을 분석하였으며, 미국, 일본, 영국, 홍콩 등 국외 마루높이 설계기준을 분석하여 마루높이 결정요소를 도출하였다.

제 4장에서는 선박 특성별 마루높이 상향에 따른 계류요소의 민감도 분석을 위해 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가를 수행하였다. 시뮬레이션 평가를 위한 이론적 배경과 좌표계 및 부호 규약을 정리하고, 실제 선박의 계류형태와 각종 문헌자료의 선체운동을 저감할 수 있는 계류 방법을 분석하여 본 평가에 적용하였다. 또한, 선종 및 선박 특성에 따라 그룹화를 수행하고 각 그룹별 대표선박을 선정하였으며, 이를 마루높이 변화에 따라 동일한 환경조건에서 시뮬레이션을 수행하여 각 선박의 계류요소 민감도를 도출하고 이를 비교·분석하였다.

제 5장에서는 3장에서 분석한 국내외 마루높이 설계기준과 4장의 계류안전성 평가 수치 시뮬레이션을 바탕으로 환경요소와 선박요소로 나누어 마루높이 평가지표를 개발하였다. 이를 4장의 계류안전성 시뮬레이션 결과에 적용 및 평가하여 적정 마루높이를 도출하였다. 또한, 부두환경 및 접안선박을 고려한 마루높이 설계기준을 제안하였다.

제6장에서는 본 연구에 대한 결론과 함께 향후 연구계획 및 발전방향에 대하여 기술하였다.

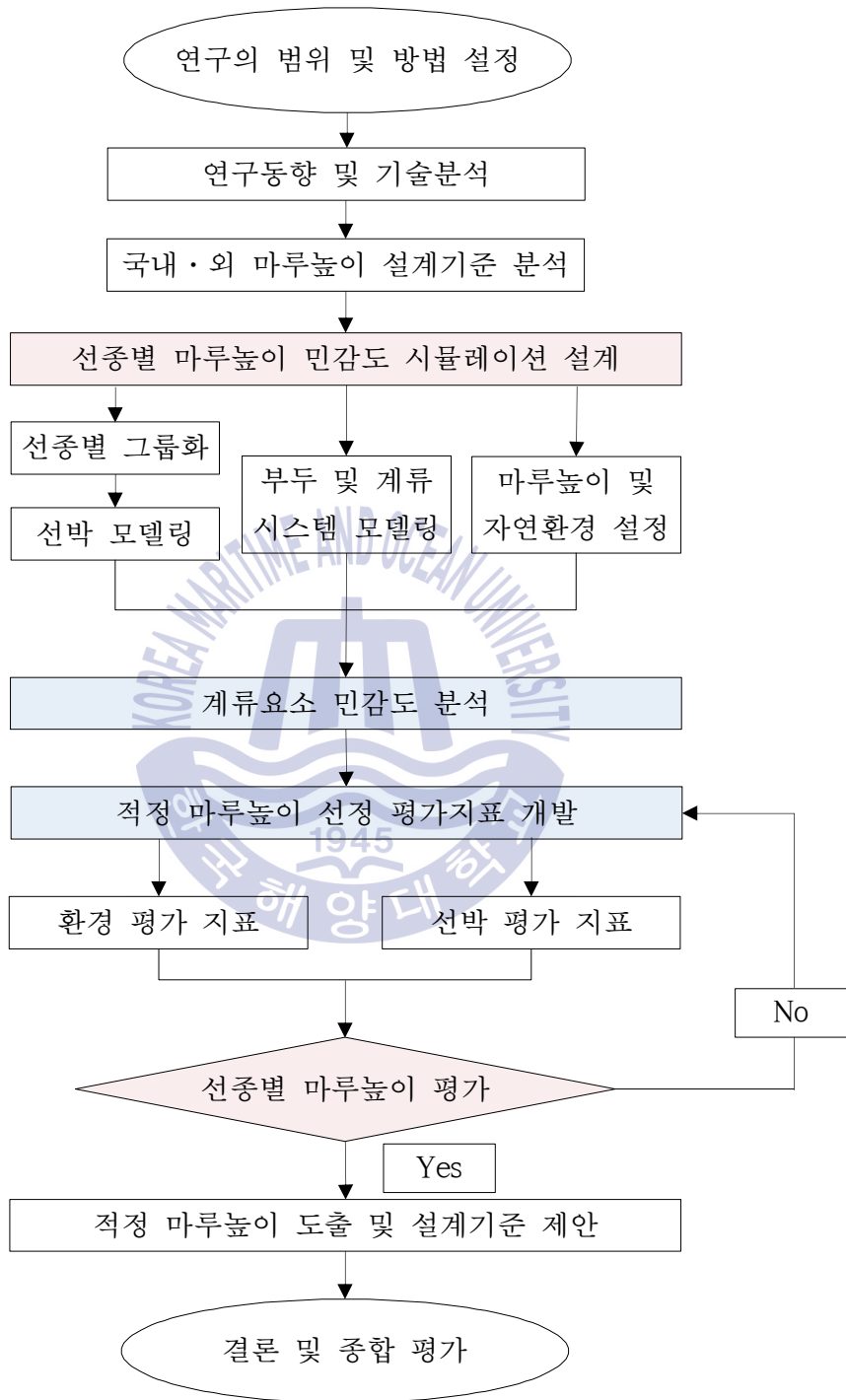


Fig. 3 Flow chart of the study

제 2 장 부두시설 연구 및 현황 분석

2.1 연구 동향 분석

2.1.1 계류안전성 평가 및 계류시설 연구

1) 계류안전성 평가 연구

해양환경 및 선형 변화에 따른 계류선박의 안전성 평가에 관한 연구는 국내·외에서 수조실험 및 계류안전성 평가 프로그램을 사용하여 지속적으로 이루어지고 있으며, 대표적인 해양환경 변화는 장주기의 파랑, 쓰나미, 지진·해일 등을 포함하고 있다.

조익순 등(2006)은 쓰나미의 항만 내 공진주기파를 고려한 계류선박의 영향 및 계류하중을 평가하였다. 수조실험을 통하여 공진현상이 계류선박의 선체동요와 계류하중을 증가시키는 것을 확인하였으며, 쓰나미 성분파 추출을 이용한 수치 시뮬레이션을 통하여 공진주기파가 모든 계류삭의 사용하중을 초과하는 장력을 발생시키고, 방현재에 큰 압축 변형을 일으키는 것을 확인하였다. 또한 쓰나미에 의한 항내선박의 피해 예방을 위하여 선종 및 선형, 계류삭 및 방현재, 쓰나미의 높이 및 파향 등의 영향을 검토한 계류선박의 운동제어 필요성을 제안하였다.

곽문수와 문용호(2014)는 장주기파 내습으로 인한 항만공진 시 하역가능 여부를 판단하기 위해 선박의 크기, 계류 상태, 파랑의 주기 및 파향 등의 영향을 반영하여 계류선박의 동요량을 계산하였고, 그 결과를 이용하여 선석 전면에서 하역한계파고를 산정하는 방법을 제시하였다. 포항신항을 선정하여 산정한 하역한계파고와 하역중단 시의 현지 파랑 관측 자료를 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 이를 토대로 장주기파가 타월할 것으로 예상되는 항만에서는 항만설

계기준에 의한 하역한계파고와 장주기 성분의 항만공진현상이 고려된 계류선박의 동요량으로 결정된 하역한계파고를 함께 검토하여 부두 계획을 수립하는 것이 항만의 정온도를 높이고 항만가동률을 증진시킬 수 있을 것으로 평가하였다.

이리나(2016)는 지진해일의 피해를 최소화하기 위한 대책 마련을 위해 동해안의 삼척항을 대상항만으로 선정하여 해일 발생 시 환경외력 조건에 따른 정박선박 및 접안시설의 계류안전성을 평가하였다. 먼저 선박의 선종, 선형, 계류삭 및 부두의 접안능력, 계선주, 방충재를 고려하여 대상부두를 모델링하였고, 삼척항의 실제 데이터를 적용하여 풍력, 조류, 조위 및 파랑 등의 환경외력 조건을 설정하였다. 이를 바탕으로 계류안전성 평가를 수행한 결과, 일반 환경조건에서는 계류안전성이 확보되었으나, 지진·폭풍해일 조건에서는 계류안전성이 확보되지 않는 것을 확인하였다.

국외에서는 파랑에 의한 계류선박의 선체운동을 수치모델링 및 물리적 모델 테스트로 측정하고, 이를 경감하기 위한 대책으로 항구 배치 변경, 새로운 보호 구조물 건설, 추가적인 계선주, 방충재 및 계류 돌핀 건설 등을 제안하는 연구가 주로 수행되었다.

Sakakibara and Kubo(2008)는 현장 관측 및 수치 시뮬레이션을 통한 계류 시스템의 변경이 선박의 주파수를 제한하고 계류시스템 자체의 안전성을 향상시키는 효과적인 대책임을 확인하여, 계류삭, 방충재의 강도를 변경하고 추가 계류 돌핀 사용을 제안하는 연구를 수행하였다.

Molen and Wenneker(2008)는 파랑의 회절, 굴절, 반사에 상응하는 항내 계류된 선박의 선체운동의 정확한 수치 모델링을 위해 항구의 특성과 수심 측정법 및 접안선박의 선형에 대한 연구를 수행하였다. 특히 Boussinesq 유형의 파랑 모델과 시계열 모델의 조합을 개발 및 적용하여, 2차 표류력을 포함하는 파랑과 계류선박에 미치는 선체운동량을 측정·검증하였다.

Otto et al.(2009)은 LNG선의 안전한 계류를 위한 환경조건을 설정하기 위해 유체역학 스케일 모델 테스트와 컴퓨터시뮬레이션을 결합한 연구를 수행하였

다. 유체역학 스케일 모델 테스트에서 부두의 수심과 파랑조건을 모델링하고 일정한 풍력을 선박에 적용하여 계류선박의 움직임을 분석하였다. 또한, 계류삭과 방현재의 하중을 평가하는 시뮬레이션을 사용하여 테스트 결과를 보정하였고, 수치 모델을 이용하여 부두 유역에서 테스트한 모든 환경 조건과 전체 선박에 대한 바람의 영향을 정량화하였다.

R. Santos(2014)는 외부 해역에 노출된 항구의 터미널에서 접안선박의 선체운동을 최소화하고 터미널 운영 및 보안 상태를 개선하기 위해 계류안전성 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 계류선박과 방층재 간 상호작용의 중요성을 확인하고, 포르투갈의 모델항만 선정 및 수치실험으로 계류선박의 선체응답을 분석하여, 방층재와 접안선박 사이의 마찰력은 계류된 선박의 동적시스템에 추가 감쇠를 제공하는 것으로 확인되었다.

이와 같이 국내·외에서 바람, 파랑, 장주기파, 쓰나미 등 다양한 환경외력에 따른 접안선박의 계류안전성, 선체동요량 및 하역한계과고 등을 산정하고, 계류저감 요소를 분석하여 항만가동률을 향상시키고자 하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 그러나 부두시설 중 마루높이 변화와 지구온난화로 인한 해수면 상승 조건을 반영한 접안선박의 계류안전성 평가 연구는 아직 수행되지 않고 있다.

2) 부두 계류시설 개선 연구

부두 계류시설의 연구는 항만 및 부두 설계 관련 기초 연구를 토대로 국내·외 정부기관에서 설정한 각국의 설계기준에서 자연환경 및 계류선박의 변화에 따른 개선안을 제안하는 방향으로 수행되고 있다. 특히 계류시설 중 선석 길이, 계선주, 방층재, 하역설비 등의 환경외력에 따른 적정성 분석에 관한 연구는 국내·외에서 지속적으로 수행되고 있다.

강석진(2013)은 국내·외 돌핀부두의 설계기준 및 지침을 분석하고, 전 세계에서 운항 중인 탱커의 선형특성을 분석하여 선박계류의 관점에서 국내 돌핀부두의 실태를 조사하였다. 이를 특정 돌핀부두에서 설계에 적용한 사례를 중심

으로 설계기준에 대한 평가와 기존 시설물에 대한 합리적인 운영방안 및 설계의 개선안을 제안하였다.

원승환 등(2015)은 선박이 대형화됨에 따라 부두 및 선석에 요구되는 수심의 확보, 선석 길이의 증가, 하역장비 사양의 변화, 하역 생산성의 향상 등의 문제점을 도출하였다. 또한 최근 부산항에 입항하였던 선박 자료를 조사하여 부산항의 대형 선박 입항 현황을 파악하고 미래의 상황을 추정하여, 부산항의 현재 선박 수용 환경을 토대로 선박 대형화가 보다 가속화될 미래에 대형선박의 수용 가능 여부를 분석하였다. 이를 토대로 컨테이너선 대형화에 따른 부산항의 대응 방안으로 입출항 해협 및 안벽전면의 수심 확보를 통한 접안 조건의 개선, 선박 길이의 증가에 따른 선석의 재배치, 선폭 증가에 따른 하역장비 사양의 변화, 선박의 평균 처리량 증가에 대비한 생산성의 혁신 등을 제시하였다.

조익순(2017)은 외력에 의한 계류선박의 거동해석 및 계류시스템 제어를 위해 대학 내 전용부두에 계류 중인 실습선을 대상으로 계류안전성을 평가하였다. 계선주에 작용하는 최대견인력을 분석한 결과 해당 위치에 설치된 지 약 30년이 넘은 노후화된 소형 계선주에 다수의 계류삭을 체결함으로써 모든 평가 케이스에서 계선주 허용규격을 초과하는 것으로 분석되어 안전을 위해서는 계선주의 용량을 상향 조정할 필요가 있는 것으로 분석되었다. 계류시스템 제어를 위한 판단기준이 되는 풍속, 파고 및 파주기 등의 주요 외력조건별 리스크 매트릭스(Risk Matrix)를 작성하였으며, 이를 통해 본선의 대응매뉴얼 또는 위기관리 데이터베이스로 활용 가능할 것으로 분석되었다.

이와 같이 접안선박의 계류안전성 향상을 위해 계류시설 개선 관련 연구는 지속적으로 수행되고 있으나, 부두 계류시설 중 마루높이를 선정하여 마루높이 상향에 따라 접안선박의 특성별로 계류삭, 계선주 등 계류시스템의 민감도를 분석하고, 마루높이 설계기준의 개선방안을 제안한 연구는 아직 수행되지 않고 있다.

2.1.2 해수면 상승에 따른 연안시스템 연구

해안은 기후변화의 가장 취약한 지대로 평가된 이후(IPCC, 2007) 연안국들은 자국 해안의 자연 및 사회·경제적 지속성을 유지하기 위하여 국가 차원의 취약성 평가 작업과 대응 전략을 수립해 오고 있다. 이에 따라 다양한 해수면 상승 시나리오에 의해 연안시스템 및 항만의 취약성을 분석하고 그 대응책을 수립하고자 하는 연구가 수행되고 있다.

한국환경정책·평가연구원(2015, 2016)은 기후변화에 따른 연안 사회·경제시스템의 리스크 변화를 정량적으로 평가하기 위해 국외 해수면 상승 연구를 바탕으로 기후변화 확률분포 함수를 선정하였으며, 우리나라 해안시스템 영향수를 도출하기 위해 마산만 범람실험을 실시하였다. 또한, 태풍해일 특성, 현재의 태풍 및 조위 상승으로 인한 리스크, 해수면 상승에 따른 태풍해일 빈도 변화에 대한 연구를 통해 기후변화에 따른 연안시스템의 잠재 리스크를 검토하고, 최근 태풍으로 인한 피해가 발생했던 목포시, 통영시, 마산시를 대상으로 주요 연안시스템의 정량적 리스크 평가를 수행하여, 기후변화 리스크 관리 체계를 개발하였다.

박대춘(2016)은 해수면 상승 시나리오를 국내 항만에 대입하여 해수면 상승시 기존 시설물의 마루높이 적정성을 검토하였으며, 이에 따라 전국 무역항 외곽 시설의 약 53%, 연안항 접안시설의 약 65%가 설계기준에 미달하여 보강이 필요한 것으로 분석하였다.

이해미(2017)는 2100년 해수면 상승 시나리오를 선정하여 한국의 전 연안을 대상으로 미래 해수면 상승에 대한 영향평가를 수행하고 범람 예상지역을 산출하여 연안의 취약성을 판단하였다. 산출 결과를 토대로 사례지역을 선정하여 미래 해수면 상승에 대한 지역별 예상 피해를 검토하고, 지역 현황에 맞는 해수면 상승 적응방안을 제시하였다.

국외에서 수행된 해수면 상승 관련 연구 또한 해수면 상승에 따른 해안선 변화와 사회적, 경제적 손실을 추정하고 이에 따른 대응책을 수립하는 연구가 주

로 수행되었다.

Nicolas Chini et al.(2010)은 대기 강제력과 해수면 상승에 대한 기후 변화를 고려하여 1960~2099년의 연안 파랑을 계산하기 위한 수치 모델링과 관련된 간단한 방법론을 구현하였다. 이를 검증하기 위해 영국 앵글리아 동부 해안을 대상해역으로 설정하여 폭풍 해일 및 해상 파도에 대한 선형 해수면 상승 시나리오를 대입하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 연안 지역에서 파랑 분포는 해수면 상승 추세에 민감하며, 기후 변화 시나리오는 극도로 높은 파고를 현저하게 증가시킬 수 있을 뿐 아니라, 높은 파고의 발생 빈도 증가에 영향을 줄 수 있는 것으로 분석되었다.

Masahiko Isobe(2013)는 지구온난화에 의한 해수면 상승은 특히 저수심에 있는 연안 구조물의 안전성에 심각한 영향을 줄 수 있음을 확인하고, 지구 온난화가 해안 외부 환경 및 해안 구조물에 미치는 영향에 대한 대략적인 정량적 추정치를 도출하였으며, 계산식을 기반으로 해수면 상승에 따른 연안구조물을 보호하기 위한 대응 전략을 제안하였다.

미국정부는 기후변화와 관련하여 중앙 정부의 통합적 노력의 필요성에 따라 대통령 및 의회 중심의 미국기후변화프로그램(U.S. Climate Change Science Program, USCCSP)을 진행하고 있으며, 해양을 포함한 모든 분야에서 기후변화 영향에 대한 종합 분석과 평가(Synthesis & Assessment)를 지속적으로 수행하고 있다.

이에 따라 미국해양대기관리청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)(2014)은 미국 전역의 수위를 측정하며 미국본토 및 하와이 대부분 지역의 해수면상승에 대한 명확한 증거를 제시하였다. 또한, 반복적인 연안범람의 영향으로 배수능력의 초과, 도로폐쇄 및 침수, 사회기반시설의 악화 및 부식이 야기될 수 있으며, 연안 계획 수립시 해수면 상승에 따른 사회시스템의 침수 위험성을 인식할 필요가 있음을 제안하였다. 이에 따라 미국 연안지역에서 증가하는 범람의 문제에 대한 지역사회의 인식 고취와 해수면상승의 영향에 대한 대응방안을 모색하였다.

2.2 선박 대형화 및 해수면 상승 현황

1) 선박 대형화 현황

컨테이너 해상운송의 취급 물동량은 지속적으로 증가해 왔고, 향후에도 증가세가 이어질 전망이다. 2004년의 세계 컨테이너 물동량은 3억 6,300만 TEU에 불과하였으나, 2013년에는 2004년보다 약 80% 증가된 6억 4,200만 TEU를 기록하였다. 또한 2018년에는 2004년의 2배가 넘는 약 8억 4,000만 TEU에 이를 것으로 전망되고 있다(Porter, 2014).

물동량의 증가와 함께 컨테이너선의 크기도 점점 대형화되고 있다. 선박 대형화 요인은 크게 3가지로 볼 수 있으며, 먼저 대량수송에 의한 TEU당 수송원가의 인하, 건조단가 인하 및 연료소모량과 선원수 감소 등 규모의 경제효과로 분석된다. 머스크 라인의 초대형 컨테이너선인 18,270 TEU의 맥키니 몰러호의 운항 결과, 기존 13,000 TEU급 선박보다 연료비와 운항비가 29.7% 절감되는 것으로 조사되었다.

또한, 컨테이너선의 신조선의 단위 적재능력당 자본비용은 선박이 대형화될수록 낮아지므로 기술발달에 따른 신조선 단가 인하를 선박 대형화의 이유로 볼 수 있으며, 선박 대형화에 따라 수반되는 단위 운송거리당 소요되는 연료소모량 절감효과, 전체적인 운항비용 절감 등으로 단위비용 감소효과를 기대할 수 있다(조성우 등, 2015).

이에 따라 컨테이너선의 크기는 벌크선, 탱커선, 크루즈선을 비롯한 다른 모든 선종보다 더 빠른 속도로 증가하고 있다. Fig. 4의 1996~2015년의 선종별 선박 크기 변화를 보면, 1996년 대비 2015년의 컨테이너선 크기증가율은 90%였고, 벌크선 55%, 여객선과 크루즈선 28%, 유조선은 21%, 로로선 6%로 나타났다. 반면에, 일반화물선의 평균크기는 약 30% 감소한 것으로 나타났다(International Transport Forum, 2015).

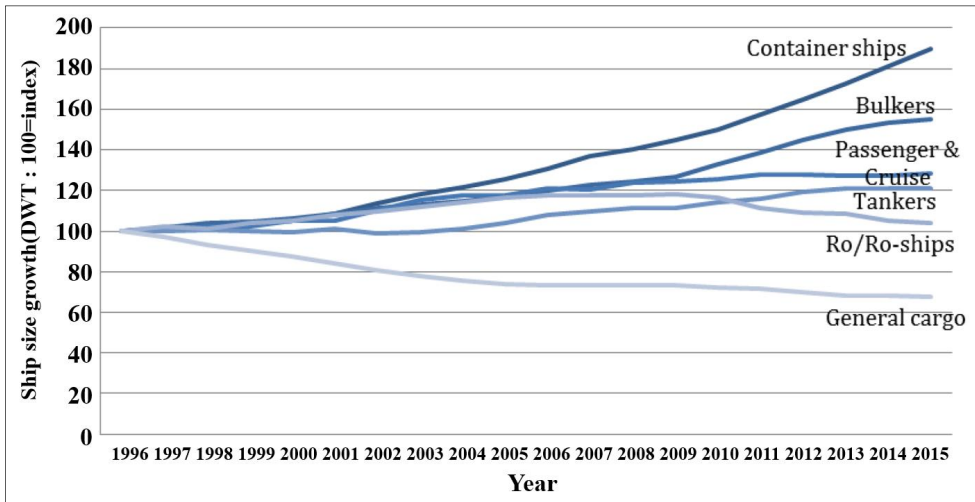


Fig. 4 Ship size development of various ship types(1996~2015)

출처 : International Transport Forum

선종별 선박 크기 변화가 가장 큰 컨테이너선의 연도별 크기변화는 Fig. 5와 같으며, 최대 크기의 컨테이너선 도입은 대표적으로 1977년 3,126 TEU, 1990년 4,816 TEU, 1997년 8,160 TEU, 2006년 15,550 TEU, 2017년 21,100 TEU이다. 또한, 컨테이너선의 크기 뿐 아니라, 새로 건조되는 평균 컨테이너선의 크기와 전체 컨테이너선의 크기 또한 거의 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 2018년 기준 전 세계에서 최대 컨테이너선은 중국 해운 회사인 Orient Overseas Container Line의 OOCL Hong Kong으로 2017년 5월에 인도되어 운항 중이며, 그 크기는 전장 399.87m, 폭 58.8m, 깊이 32.5m의 초대형 컨테이너선으로 21,413 TEU의 수송 능력을 갖추고 있다.

Ocean Shipping Consultants와 Lloyds Register는 2020년 도입을 목표로 선박 길이 430m, 폭 62m의 24,000 TEU 선박에 대한 타당성 조사를 실시하고 있다 (International Transport Forum, 2015).

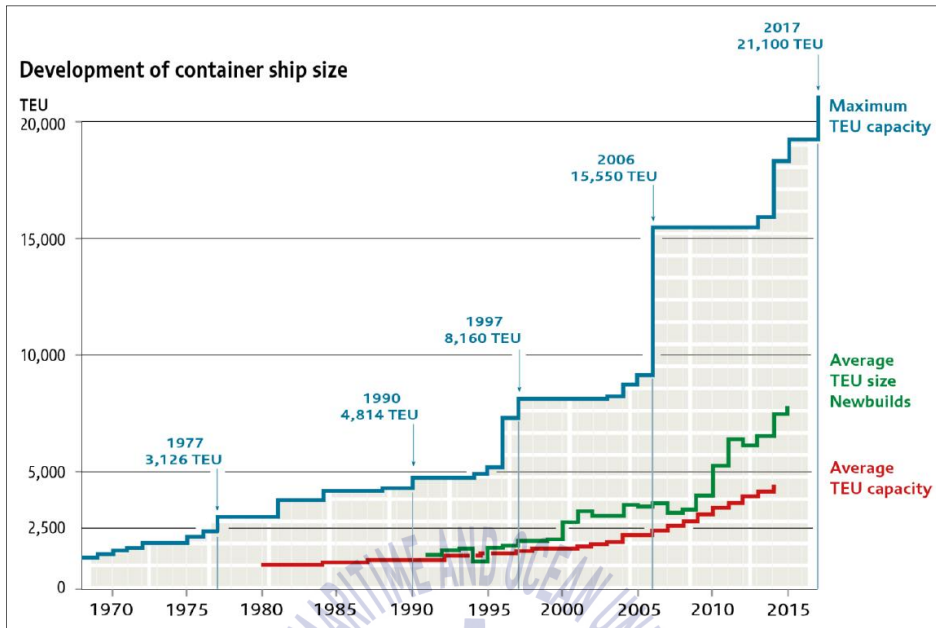


Fig. 5 Development of container ship size

출처 : International Transport Forum

선박 대형화에 따라 선박의 길이와 폭 이외에 깊이도 증가하고 있으며, Fig. 6의 Mitsui O.S.K. Lines(MOL) 선사가 발표한 컨테이너선 크기별 선박 치수 변화 중 마루높이와 밀접한 연관성이 있는 깊이의 변화를 보면, 8,000 TEU급 컨테이너선은 25.0m, 14,000 TEU급은 29.85m, 20,000 TEU급은 32.8m로 증가한 것을 알 수 있다(The Maritime Executive, 2015).

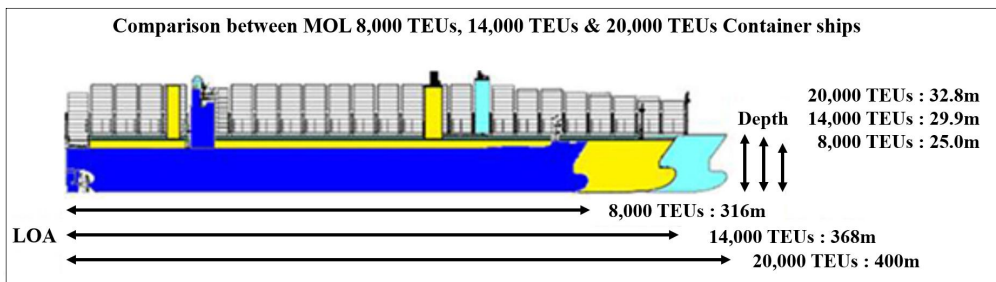


Fig. 6 Comparison of the dimension on MOL container ship

출처 : The Maritime Executive

국내 대표 컨테이너 항만이자 선박 입출항량 및 항만물동량 1위인 부산항의 초대형 컨테이너선의 접안을 위한 부두 및 터미널의 대응을 보면, 2013년 기준 부산항의 선석당 생산성은 105 move/hour로 세계 9위 수준을 나타내고 있다. 그러나 부산항의 생산성에 대한 경쟁력은 Table 2와 같이 선박의 크기에 따라서 매우 다른 양상을 보였다. 부산항은 8,000 TEU 이하 선박의 생산성 순위에서는 3위(98 move/hour)를 차지하였지만, 8,000 TEU 이상 선박의 생산성 순위에서는 10위 내에 들지 못하였다(JOC Group Inc., 2014).

Table 2 Berth productivity by ship size(2013)

Less than 8,000 TEU			8,000 TEU vessels and larger		
Port	Country	Berth Productivity (move/hour)	Port	Country	Berth Productivity (move/hour)
Qingdao	China	107	Yokohama	Japan	191
Jebel Ali	U.A.E	103	Khor al Fakkan	U.A.E	179
Busan	R.O.K	98	Jebel Ali	U.A.E	157
Tianjin	China	94	Tianjin	China	150
Shanghai	China	93	Ningbo	China	147
Ningbo	China	93	Balboa	Panama	146
Nansha	China	91	Qingdao	China	142
Nhava Sheva	India	89	Xiamen	China	125
Mawan	China	88	Yantian	China	119
Salalah	Oman	88	Dalian	China	118

출처 : JOC Group Inc.

또한, 국제연합무역개발협의회(United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD)의 2016년 기준 전 세계 항만별 컨테이너 물동량 순위를 보면 Table 3과 같이 부산항은 6위에 해당하고 있으며, 10위까지의 항만 중 6위인 부산항과 9위인 두바이를 제외하면 중국 6개 항만, 싱가포르, 홍콩으로 아시아 항만의 강세가 이어지고 있다.

Table 3 Container port volumes handled at top 10 container terminals

Port	Country	2016 (20TEU Units)	2015 (20TEU Units)	2016 (Rank)
Shanghai	China	37,135,000	36,537,000	1
Singapore	Singapore	30,930,000	30,962,000	2
Shenzhen	China	23,980,000	24,204,000	3
Ningbo	China	21,565,000	20,593,000	4
Hong Kong	Hong Kong	19,580,000	20,114,000	5
Busan	R.O.K	19,378,000	19,296,000	6
Guangzhou	China	18,859,000	17,457,000	7
Qingdao	China	18,050,000	17,465,000	8
Dubai	U.A.E	14,772,000	15,592,000	9
Tianjin	China	14,523,000	14,109,000	10

출처 : UNCTAD

부산항은 글로벌 해상운송 접근성이 뛰어나기 때문에 세계적인 해상운송 물동량 증가에 따라 보다 많은 물동량을 유치할 것으로 기대된다. 그러나 부산항은 최근 중국 항만의 성장에 따라서 그 위상을 강력하게 위협받고 있으며, 대형 선박에 대한 운영 효율이 소형 선박에 비해 떨어지는 현상을 나타내고 있다. 따라서 최근 컨테이너 해상운송 환경의 가장 핵심적인 요인 중 하나인 선박 대형화에 대한 적극적인 대응이 절실한 상황이다.

현재 컨테이너선의 발주잔량은 초대형선에 집중되어 있으며, 2014년 말 기준으로, 전 세계의 1만 TEU 이상 선박은 265척이었고, 총 선복량으로는 344만 4,875 TEU에 해당한다. 이를 전 세계 선박에 대한 비중으로 보면 선박 수 기준 5.3%, 선복량 기준 18.7%에 해당하는 수준이다. 2015년 1월까지의 주문을 기준으로 한 2015~2018년의 선박 인도 계획을 고려하면 2018년 말까지 1만 TEU 이상 선박의 비중은 선박 수 기준 7.3%, 선복량 기준 24.9%로 증가할 것으로 예상된다(원승환 등, 2015).

이와 같이 초대형 컨테이너선의 국내 물동량 증가 및 동아시아 환적 물류 경

쟁에 대처하기 위한 각종 부두 시설을 확보하여야 하며, 기존의 부두 또한 대형선박의 안전한 정박을 위해 초대형 컨테이너선의 깊이 증가에 맞추어 마루높이 상향을 포함한 선석 정비가 필요할 것이다.

2) 해수면 상승 현황

기후는 지속적으로 변화하며 인간사회는 변화하는 기후에 다양한 형태로 적응해오고 있다. 특히 연안시스템은 해양 기후변화, 태풍해일, 파랑, 이상 고조 등의 피해에 대하여 적응해 오고 있으며, 20세기 과학·기술의 발달과 병행하여 기후변화 대응을 위하여 과거 기후에 기반을 둔 빈도 분포의 기후 통계적 리스크 체계를 구축해 왔다. 최근 온실가스 증가로 인한 기후변화의 가속화는 과거기후에 기반한 리스크 체계의 한계를 초과하고 있으며, 이로 인하여 미래 기후변화를 반영할 수 있는 정량적 리스크 체계의 필요성이 강조되고 있다.

이에 따라 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 제5차 평가보고서(the 5th Assessment Report, AR5)의 미래 기후변화 예측은 온실가스 4종의 배출시나리오, 즉 RCP 시나리오를 정의하고, 이를 사용한 다양한 기후모델을 통하여 산출하고 있다. 이 시나리오는 Table 4, Fig. 7과 같이 총 4종(2.6 / 4.5 / 6.0 / 8.5)으로 분류되며, RCP 시나리오의 숫자는 온실가스와 같은 지구의 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 나타내는 복사강제력을 의미한다. 이 시나리오들은 RCP 2.6의 $2.6W/m^2$, RCP 4.5의 $4.5W/m^2$, RCP 6.0의 $6.W/m^2$, RCP 8.5의 $8.5W/m^2$ 로 각각 1750년을 기준으로 한 2100년의 총복사강제력으로 정의하며, 매우 낮은 강제력 수준에 도달하는 1개의 완화시나리오(RCP 2.6), 2개 안정화 시나리오(RCP 4.5, RCP 6.0), 1개의 고농도 온실가스 배출시나리오(RCP 8.5)로 구성되어 있다(한국환경정책·평가연구원, 2015).

기상청에 의하면, RCP 2.6은 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우, RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우, RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실행되는 경우, RCP 8.5는 온실가스가 현재 추세로 저감없이 배출되는 경우로 정의된다.

Table 4 Categories of RCP scenario

Category	Pathway	Radiative forcing
RCP 2.6	Peak and decline	3 W/m ² before 2100, declining to 2.6 W/m ² by 2100
RCP 4.5	Stabilization without overshoot	4.5 W/m ² post 2100
RCP 6.0	Stabilization without overshoot	6.0 W/m ² post 2100
RCP 8.5	Rising	8.5 W/m ² post 2100

출처 : IPCC

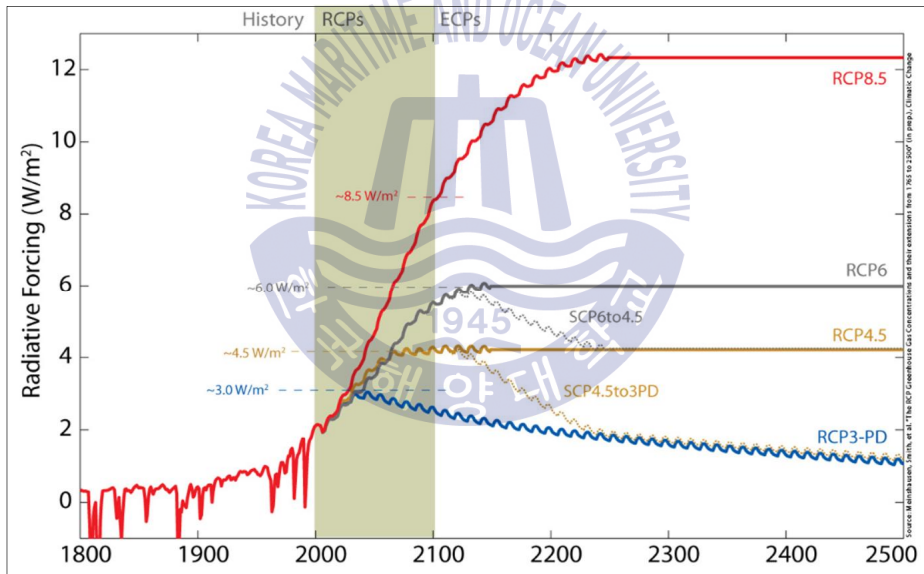


Fig. 7 Global anthropogenic radiative forcing for the RCP scenario

출처 : IPCC

IPCC의 제5차 평가보고서에 의거하면, 21세기 말까지 해양 면적의 약 95% 이상에서 해수면 상승이 예상되며, RCP 시나리오 해수면 상승률은 해양온난화 증가와 빙하·빙상의 질량 감소로 1971~2010년의 관측된 범위를 초과할 것으로 평가하였다.

1986~2005년 기준 대비 2081~2100년 기간의 평균 해수면 상승은 Fig. 8과 같이 중간신뢰도 0.26~0.55m(RCP 2.6), 0.32~0.63m(RCP 4.5), 0.33~0.63m(RCP 6.0), 0.45~0.82m(RCP 8.5) 범위로 예측되었다. RCP 8.5 시나리오 하에서 2100년 해수면 상승폭은 0.52~0.98m인 것으로 평가하였다(기상청, 2014; IPCC, 2013).

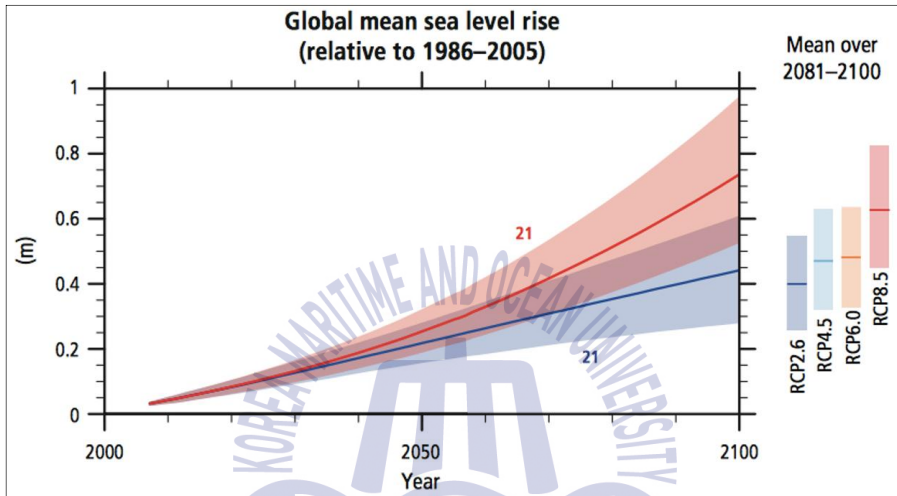


Fig. 8 Global mean sea level rise(2000~2100)

출처 : IPCC

더불어 국립해양조사원의 18개 조위관측소에서 관측한 해수면 자료를 바탕으로 Fig. 9와 같이 국내 연안의 해수면 상승정도를 분석한 결과를 보면, 우리나라의 최근 28년간(1989~2016년) 연평균 해수면 상승속도는 2.96mm/yr으로, 2013년 IPCC에서 발표한 전 세계 해수면의 연평균 상승속도인 2.0mm/yr 보다 높은 수준인 것으로 나타났다.

해당 기간 동안 연평균 해수면 상승속도는 제주부근이 4.55mm/yr로 가장 높았으며, 동해안 3.78mm/yr, 남해안 전체 3.17mm/yr, 남해안 2.48mm/yr, 서해안 1.47mm/yr 순으로 분석되었으며, 대체적으로 서해안 및 남해안에 비해 동해안에 위치한 항구(울릉도 5.79mm/yr, 포항 4.47mm/yr, 속초 3.00mm/yr 등)의 해수면 상승속도가 빠른 것으로 분석되었다(해양수산부, 2017a).

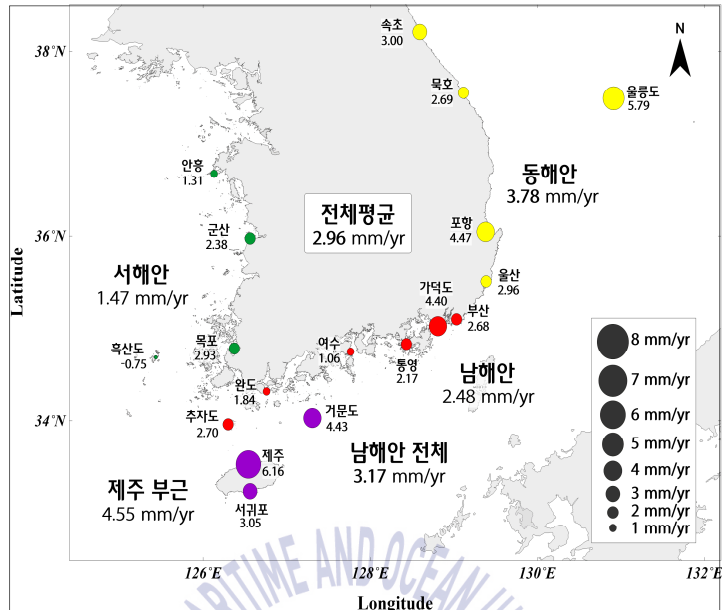


Fig. 9 State of sea level rise by regional area (1989~2016)

출처 : 기상청

국내 해역을 포함한 전 지구적인 해수면 상승으로 인해 연안 저지대는 침수, 홍수, 침식과 같은 부정적인 영향이 점점 더 심해질 것이고, 연안지역의 자연시스템 뿐만 아니라 항만을 비롯한 사회·경제시스템 모두 자연재해에 대한 취약성이 더욱 높아질 것으로 전망된다(IPCC, 2014).

또한, 항만은 기후변화 및 해수면 상승의 영향에 가장 직접적으로 노출되어 있으므로, 항만이 국내 무역의존도에서 차지하는 역할을 고려할 때 체계적인 대응방안을 신속히 수립해야 할 필요가 있다. 기후변화로 인해 태풍, 바람, 범람 등이 발생하는 경우에는 여러 경로를 통해 그 영향이 항만에 전달되고, 가장 먼저 항만의 운용능력에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 그리고 항만의 보안과 접근성에 영향을 주게 되며, 시설물의 보호에도 문제가 야기될 수 있다(한국환경정책·평가연구원, 2011).

그러므로 상승한 해수면이 현재 부두의 마루높이보다 높아지게 되면 부두가

침수되어 선박 접안 자체가 불가능해질 수 있으므로, 마루높이 설계시 해수면 상승정도를 반영할 필요가 있다.

Table 5의 국내 세부지역별 연평균 해수면 상승속도를 보면, 제주항이 6.16mm/yr로 가장 높았으며, 그 다음 울릉도(5.79mm/yr), 포항(4.47mm/yr), 거문도(4.43mm/yr), 가덕도(4.40mm/yr) 순으로 나타났다(해양수산부, 2017a).

Table 5 State of sea level rise on domestic seas(1989~2016)

Coast	Observatory	Sea level rise increase rate(mm/yr)	Increase rate fluctuation(mm/yr ²)
West coast	Anheung	1.31	0.05
	Gunsan	2.38	0.20
	Mokpo	2.93	0.09
	Heuksando	-0.75	0.08
Average of west coast		1.47	0.11
South coast	Chujado	2.70	0.13
	Wando	1.84	0.10
	Yeosu	1.06	0.10
	Tongyeong	2.17	0.14
	Gadeokdo	4.40	0.22
	Busan	2.68	0.07
	Jeju	6.16	-0.10
	Seogwipo	3.05	-0.12
	Geomundo	4.43	-0.07
Average of south coast		3.17	0.05
East coast	Ulsan	2.96	0.13
	Pohang	4.47	0.21
	Mukho	2.69	0.06
	Sokcho	3.00	0.11
	Ullungdo	5.79	0.33
Average of east coast		3.78	0.17
Average of South Korea		2.96	0.10

출처 : 기상청

2.3 국내·외 부두시설 개발 현황

2.3.1 국내 부두시설 개발 현황

국내 항만시설은 변화하는 국제적 항만물류의 흐름에 따라 10년 단위로 수립되는 항만기본계획에 의해 개발되고 있으며, 항만기본계획은 항만법 제6조에 따라 항만의 지정 및 변경, 항만의 관리·운영 계획, 항만시설의 장래 수요, 항만시설 공급, 항만시설 규모와 개발 시기, 항만시설 기능개선 및 정비 등의 내용을 포함하고 있다.

제1차 항만기본계획은 1992~2001년에 적용되었으며, 지속적인 항만시설 부족과 해상화물량 급증에 따라 권역별로 특화하여 종합화물 유통기능으로서의 충분한 항만시설을 확충하였다. 제2차 항만기본계획은 2002~2011년에 적용되었으며, 컨테이너 운송이 발달되어 한반도의 지리적 장점을 이용한 수요창출형 허브항을 육성하였고, 지역별 거점항만 개발을 추진하였다. 제3차 항만기본계획은 2011~2020년에 적용되고 있으며, 동북아 경제의 중요성 증가와 항만 기능 다양화 요구에 따라 물류, 제조, 상업, 친수, 재해방지 등 항만 기능을 다양화하였다. 현재는 제3차 항만기본계획 수정계획을 수립하여 2016~2020년까지 7개의 세부 추진 과제에 따라 항만시설을 개발하고 있다. 특히 세계 경제가 저성장 시대에 진입되고 주요 항만간 허브항 경쟁이 치열해짐에 따라, 지속가능한 친환경 항만 시스템과 자연재해로부터 안전한 항만을 구축하고자 한다.

우리나라는 지난 100년간 연강수량이 19% 증가하였으며, 세계 평균과 비교하여 기온은 100년간 2배 빠르게 상승하였고, 해수면은 40년간 3배 빠르게 상승하고 있다. 또한, 우리나라는 항만 배후에 생활권이 밀집되어 있고, 제철·석유화학·자동차 등 국가기간산업시설이 항만에 위치해 있어 항만 방재기능 강화가 시급한 것으로 분석되었다.

이에 따라 기후변화에 대비한 항만 방재기능을 강화하고 항만 및 배후권역의 상습적인 침수피해 방지의 일환으로 상습침수 지역이나 대규모 피해예상지역 등을 재해 취약 지구로 선정하고, 피해가 반복되는 지역에 대해서는 방재언덕

등 재해방지 인프라 및 해수유입을 차단하는 선진 방재시설 도입을 추진하고 있다. 그러므로 2011년부터 2030년까지 마산항, 부산항, 삼척항, 목포항, 군산항 등 22개항에 방재언덕 등 침수방지시설을 설치하고 있으며, 그 예산규모는 약 1.2조원 정도이다(해양수산부, 2016).

대표적으로 군산항은 기후변화로 인한 해수면 상승 및 폭풍해일에 대비하고 연안 시설물을 보호하기 위한 선제적 대응으로 총 공사비 174억원을 투입하여 2020년 2월 준공을 목표로 Fig. 10과 같이 방호시설(방호벽)을 설치하고 있다. 설치범위는 방호벽 7.92km, 방호문 23개소, 매립 9,192m² 으로 침수방지 대비 방호벽 설치와 기존 물양장 기능을 유지하기 위해 매립 부지 전면에 신규 물양장을 설치하고 연안 유희부지 및 매립지를 연계하는 다목적 친수공간을 제공할 수 있도록 계획하고 있다(해양수산부, 2015).



Fig. 10 Construction plan of protective facility in Gusan harbour

출처 : 해양수산부

또한, 최근 해수면 증가에 따라 태풍 강도 또한 증가하게 되므로 이를 고려하여 연안시설의 안전성 확보를 위한 방파제 보강 및 선박 피항 여건 확보를 위한 외곽시설을 확충하기 위해, 2011년부터 2020년까지 약 1.3조원을 투자하여 울산항, 부산항, 삼천포항 등 71개소에 방파제 보강을 실시하고 있다. 2017년 6월에 개최된 2017 항만분야 투자설명회 기준, 71개소 중 28개소는 준공되었고, 24개소는 추진 중이며 19개소는 계획 중이다.

이에 따라 Fig. 11과 같이 현재 부산항은 조도방파제 700m, 오륙도 방파제

1,004m로 북항 방파제 총 1,704m를 보강 중에 있으며, 울산항은 울산분항 방파제 646m, 울산신항 방파제 2,100m로 총 2,746m를 보강 중에 있다(해양수산부, 2016). 그러나 해수면 상승에 따른 선박 계류 및 월파 방지에 기본적인 부두 마루높이 상향공사는 구체적으로 시행되고 있지 않는 실정이다.



Fig. 11 General plan of break water reinforcement

출처 : 해양수산부

2.3.2 국외 부두시설 개발 현황

1) 미국 샌프란시스코

미국 샌프란시스코시의 기획부 및 공공사업부에서 주도한 해수면 상승 행동 계획(Sea Level Rise Action Plan)은 샌프란시스코의 미래 해수면 상승 및 연안 범람에 대한 예측과 완화방안을 수립하기 위하여 기후 조사, 관련 정책 및 규정, 현재까지 수행된 연안시스템의 취약성 및 위험 정도를 평가하였다. 또한, 단기적 및 장기적 해수면 상승 적응 조치 방안의 로드맵을 제공하여, 추가 평가, 적응 계획 및 이행을 위한 체제를 수립하였다.

특히 샌프란시스코만 지역에서의 해수면 상승에 의한 영향평가를 위해 미국 지질 조사국(United States Geological Service)은 해수면 상승 범람지도를 작성하고 GIS 데이터를 이용하여 해수면 상승으로 인한 침수 취약 지구를 선정한 후, 항만 및 내륙 시설 보호를 위해 연도별로 부두 및 인근지역의 높이를 상향하는 항만 프로젝트를 수행하고 있다.

해수면 상승 범람지도를 이용하여 샌프란시스코 전체 부두의 취약성을 분석한 결과, Fig. 12와 같이 2030년에는 6~12inch(15.2~30.5cm), 2050년에는 11~24inch (27.9~60.9cm), 2100년에는 36~66inch(91.4~167.6cm)의 해수면이 상승할 것으로 예측되었다. 일부 항구지역이 다른 지역보다 낮은 고도에 위치해있기 때문에 취약 정도에 따른 부두 높이에 적정 조치가 이루어지지 않는다면, 미래 해수면 상승 및 폭풍해일 발생시 부두 침수 및 범람의 위험이 있을 것으로 평가하였다. 또한, 적정 계획을 준비하고 이행하지 않는다면 해수면 상승 및 폭풍해일로 인해 2100년까지 약 750억 달러의 자산이 침수 피해에 노출될 것이라는 예비 추정치를 제공하였다.

또한, Fig. 13은 해수면 상승에 따른 샌프란시스코항의 부두 높이를 예측한 값으로, 현재 샌프란시스코항의 부두 높이가 10.5~13.1feet(320.0~399.3cm)임을 고려하였을 때, 지구온난화가 가속화되어 2075년에는 샌프란시스코항의 부두가 해수면에 잠겨 사용이 불가할 것으로 평가하였다(City and County of San Francisco, 2016).

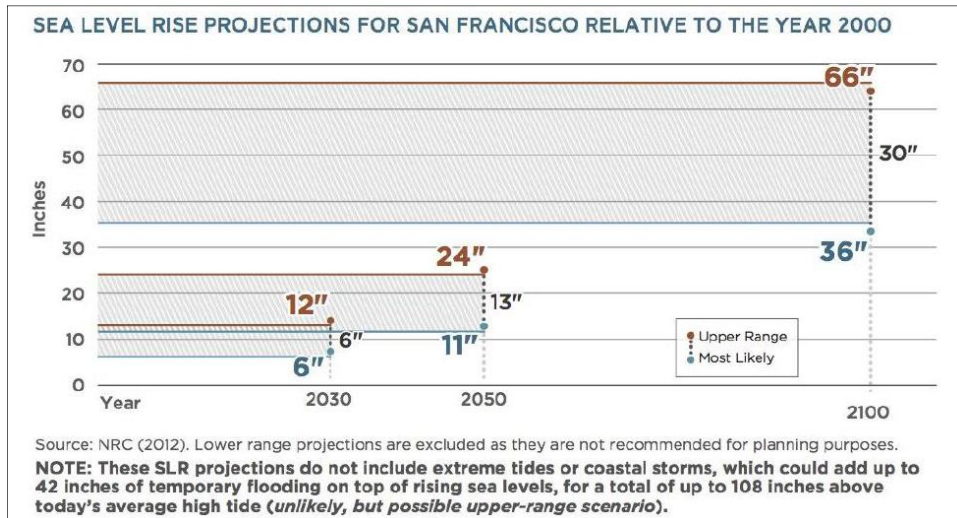


Fig. 12 Range of predicted sea level rise through 2100

출처 : City and County of San Francisco

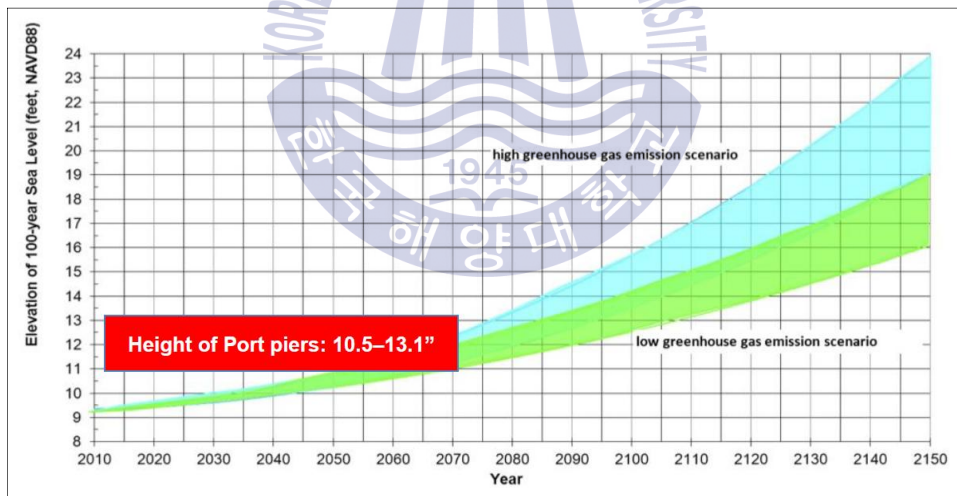


Fig. 13 Projected water surface levels at the port of San Francisco

출처 : City and County of San Francisco

이에 따라 해수면 상승에 따른 샌프란시스코 항만 프로젝트의 적응전략은 Table 6과 같다. 대표적으로 Brannan Street Wharf 프로젝트는 2013년에 완료되었으며, 16inch 정도의 해수면 상승에 대비하여 월파를 방지할 수 있도록 부

두를 보강하였으며, 66inch의 해수면 상승에서 파도 및 조류의 힘에 적응할 수 있는 부두 구조를 설계하였다. 또한, Downtown Ferry Terminal은 2016년 건설을 시작하였으며, 2065년에서 2100년까지의 해수면 상승에 적응하기 위하여 Ferry Terminal의 바닥 마감재 높이를 11.5feet에서 14.5feet로 상향하여 설계하였다(City and County of San Francisco, 2016).

Table 6 Past and planned port project SLR adaption strategies

Project	SLR Adaptation strategies
Bayfront Park	- Raise shoreline with rip rap edge to adapt to 16” of sea level rise
Brannan Street Wharf	- No wave overtopping 16” of sea level rise; design deck supporting park for wave and current forces for 66” of sea level rise w/adaptive capacity
Downtown Ferry Terminal	- Elevate to 14.5’ NAVD 88 to address sea level rise through 2065 (50 year design life) with adaptive capacity through 2100
Crane Cove Park	- Redesigned shoreline to accommodate 28” of sea level rise with occasional flooding through 2065
Pier 1	- Pier deck elevation remains the same; tenant assumes responsibility for flood safety including interventions including raising utilities and short flood walls.
Pier 70 Waterfront Site	- Raise site to accommodate 66” of sea level rise; Bay Trail will flood earlier. Includes adaptive management funding measures.
Seawall Lot 337	- Raise building pads and streets to accommodate 55” of sea level rise plus 100 Year Flood, with grading down to existing elevations along 3rd Street and Terry Francois Boulevard. Examine near term improvements to Pier 48 and adaptation strategies

출처 : San Francisco Sea Level Rise Action Plan

2) 영국 사우샘프턴

영국 정부는 지구온난화로 인한 환경보호를 위해 영국의 저탄소 변화 계획 (Low Carbon Transition Plan)을 수립하여 2020년까지 온실가스 배출량을 1990년 수준의 34%로 감축시키고자 하며, 2050년까지 80% 감축을 목표로 설정하였다. 이는 지구온난화로 인한 항만산업이 직면한 범람과도 직접적인 연관성이 있으며, 그 외에 해수면 상승, 조석 증가, 극도의 파고, 도시 범람 등을 야기할 수 있다. 항만의 범람은 배수 시설, 지표수 배수 및 하수도 시스템을 포함한 배수 시설의 용량을 압도함으로써 생길 수 있으며, 사우샘프턴 항구의 범람 위험 지역은 Fig. 14와 같다(Associated British Ports, 2007).

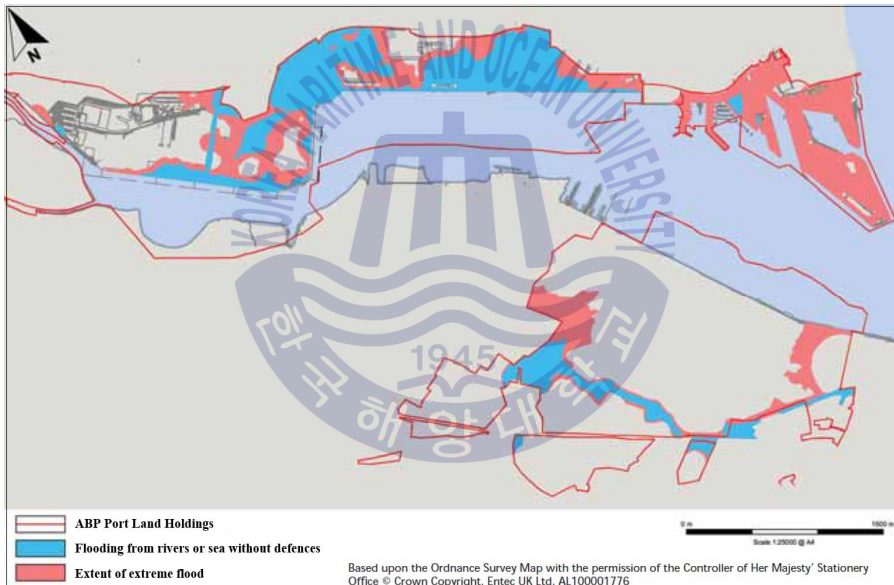


Fig. 14 Flood risk zones in the port of Southampton area

출처 : Associated British Ports

사우샘프턴 항구의 현재 부두 높이는 3.5mAOD(Above Ordnance Datum, 평균해면 기준)이며, 이는 해도상 기준지점보다 6.25m 더 높다. 사우샘프턴항의 평균고조위(Mean high water level)는 약 1.35mAOD이며, 기록된 가장 높은 수위는 2008년 2.85mAOD이다(Associated British Ports, 2007).

매년 상승하는 해수면 상승정도는 연평균 -0.8mm의 수직적 육지 운동(land movement)을 기반으로 하며, 200년에 1번, 1,000년에 1번 평균적으로 발생하는 극한 해수면은 Table 7과 같다. 이는 2035년까지 기존 항만 운영 지역이 200년에 1번에서 1,000년에 1번 사이의 확률로 범람할 위험이 있음을 알 수 있다 (Associated British Ports, 2016).

Table 7 Predicted annual sea level rise and peak levels for 1:200 year and 1:1000 year events

Years	Annual rise (mm)	1:200 year peak level(m)	1:1,000 year peak level(m)
1990	-	3.0	3.2
1990~2025	4.0	-	-
2025	-	3.1	3.3
2025~2055	8.5	-	-
2055	-	3.4	3.6
2055~2085	12.0	-	-
2085	-	3.8	4.0
2085~2115	15.0	-	-
2115	-	4.2	4.4

출처 : Associated British Ports

이에 따라, 미래 항만 시설을 위한 투자 결정은 폭풍해일과 극도의 기상조건에서 온실가스 배출을 최소화하기 위한 에너지 사용 및 적절한 기술과 같은 기후변화의 조정사항을 고려하여 결정한다. 또한, 기존의 항만 등 인프라가 에너지 사용을 최소화하고 기후 변화 예측에 적용할 수 있는지의 여부는 항만관리팀과 기후변화 정책을 담당하는 부서에 의해 지속적으로 검토되어 결정되고 있다(Associated British Ports, 2007).

제 3 장 부두시설 마루높이 결정요소 분석

3.1 부두 계류시설 및 마루높이

3.1.1 계류시설의 정의 및 종류

‘항만 및 어항 설계기준’은 국내 항만시설, 어항시설, 연안보전시설 등의 조사, 계획 및 설계에 필요한 기술적 기준을 정한 것으로 항만관련 시설에 관계되는 건설기술과 방법을 체계화하고 새로운 기술의 보급과 향상에 기여하는 것을 목적으로 한다. 본 기준은 건설기술 진흥법, 항만법, 어촌·어항법, 연안관리법 등에서 규정하는 각 시설물별로 설계자가 설계업무를 보다 체계적이고 효과적으로 수행하도록 하고, 품질·강도·안전·성능 등을 유지하기 위한 설계조건의 한계(최저한계)를 규정하는 기준으로써 대상시설물의 설계업무를 수행하는데 법령을 제외한 기준 중 최우선되는 기준이다.

대상항만시설은 항만법 제29조와 동법 시행령 제25조에 의한 항만시설, 어촌·어항법 제2조 제5호에 의한 어항시설, 연안관리법 제24조와 제25조 및 동법 시행령 제13조와 제14조에 의하여 해일, 파랑, 지반의 침하 등으로부터 연안을 보전하고 훼손된 연안을 정비, 개선하거나 친수공간을 조성하는 등의 연안정비사업 대상시설 등은 해당시설의 목적과 항만시설의 기술기준에 적합하도록 설계, 건설, 개량 또는 유지해야 한다.

항만법에서 규정하는 항만관련 시설은 수역시설, 외곽시설, 연안보전시설, 계류시설, 어항시설, 마리나시설 등을 총칭하며, 항만법 제2조 제5호의 기본시설은 수역시설, 외곽시설, 임항교통시설, 계류시설로 분류된다. 수역시설은 항로·정박지·선유장·선회장 등이고, 외곽시설은 방파제·방사제·파제제·방조제

· 도류제 · 갑문 · 호안 등을 포함한다. 임항교통시설은 도로 · 교량 · 철도 · 궤도 · 운하 등이고, 계류시설은 안벽 · 소형선 부두 · 잔교 · 부잔교 · 돌핀 · 선착장 · 램프 등을 포함한다(해양수산부, 2017b).

계류시설은 선박이 접안해서 화물을 적하하고 승객이 승강을 하는 접안설비로 정의되며, 계류된 선박과 부두의 안전성에 영향을 미치는 시설로 항만 및 어항 설계기준 : KDS 64 55 10에서 설계기준을 제시하고 있다. 계류시설에 해당되는 시설은 Table 8과 같이 ① 부두 형태, ② 부두의 규모 및 치수, ③ 마루높이, ④ 안벽의 구조형식 및 축조한계, ⑤ 설계 수심, ⑥ 방충설비, ⑦ 계선설비, ⑧ 하역설비, ⑨ 조명설비, ⑩ 인명구조설비, ⑪ 부두뜰, ⑫ 급수설비, ⑬ 배수설비, ⑭ 여객승선설비, ⑮ 연료공급설비, ⑯ 전력공급설비 등이 있다(해양수산부, 2017c).

Table 8 Mooring facilities

Mooring facilities			
①	Structural type of wharves	⑨	Lighting facilities
②	Dimensions of wharves	⑩	Lifesaving facilities
③	Crown height	⑪	Aprons
④	Type of quaywall	⑫	Water supply facilities
⑤	Depth of water	⑬	Drainage facilities
⑥	Fender equipment	⑭	Passenger boarding facilities
⑦	Bollard facilities	⑮	Fueling facilities
⑧	Cargo handling equipment	⑯	Electric power supply facilities

출처 : 해양수산부

본 연구의 3장에서는 부두 계류시설 건설시 고려사항 중 접안선박의 풍압면적, 계류안전성, 선체운동, 승하선설비 및 하역장비에 밀접한 영향을 줄 수 있는 마루높이를 선정하여, 마루높이의 정의와 국내 · 외 설계기준을 분석하고 마루높이 결정요인을 도출하고자 한다.

3.1.2 마루높이의 정의 및 연관요소

계류시설의 마루높이는 Fig. 15와 같이 기본수준면(Datum level)인 약최저저조위(Approximate Lowest Low Water : A.L.L.W.)에서 부두 끝단까지의 수직높이로 정의되며, 이는 접안선박의 안전한 계류에 밀접한 연관성이 있는 계류시설로 평가된다. 항만 및 어항 설계기준에서 마루높이는 대상선박의 주요치수, 이상조위, 파랑 등의 자연 상황과 지반 침하, 인근지역의 적용사례 등을 고려하여 하역에 지장이 없고 부두시설물이 침수되지 않도록 적절하게 결정하여야 한다고 명시되어 있다. 마루높이의 설정기준이 되는 조위는 일반적으로 약최고고조위(Approximate Highest High Water : A.H.H.W.)이나, 구조물의 설치목적 및 중요도에 따라 설계고조위를 적용할 수도 있다(해양수산부, 2017c).

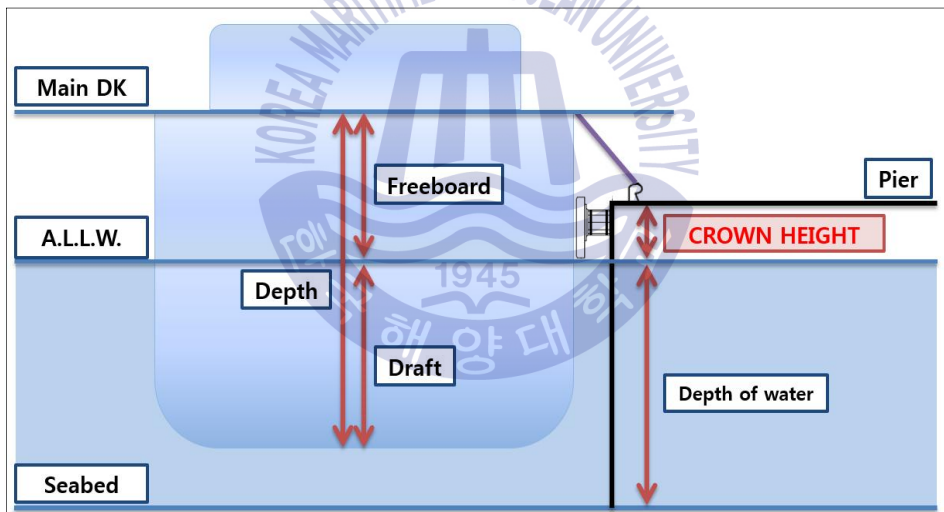


Fig. 15 Definition of crown height

Fig. 16은 마루높이와 접안선박의 연관요소를 도출하기 위해 Case 1은 마루높이가 비교적 낮을 때, Case 2는 마루높이가 비교적 높을 때를 가정하여 비교·분석하였다. 먼저 ① 바람외력으로 인한 풍압면적이 달라질 수 있으며, ② 계류라인의 길이, 수직각도, 장력이 영향을 받을 수 있다. 또한 풍압력과 계류력 계수인 계류라인의 변화로 ③ 계선주의 견인력, ④ 선체 6자유도 운동값이 영향을 받게 된다.

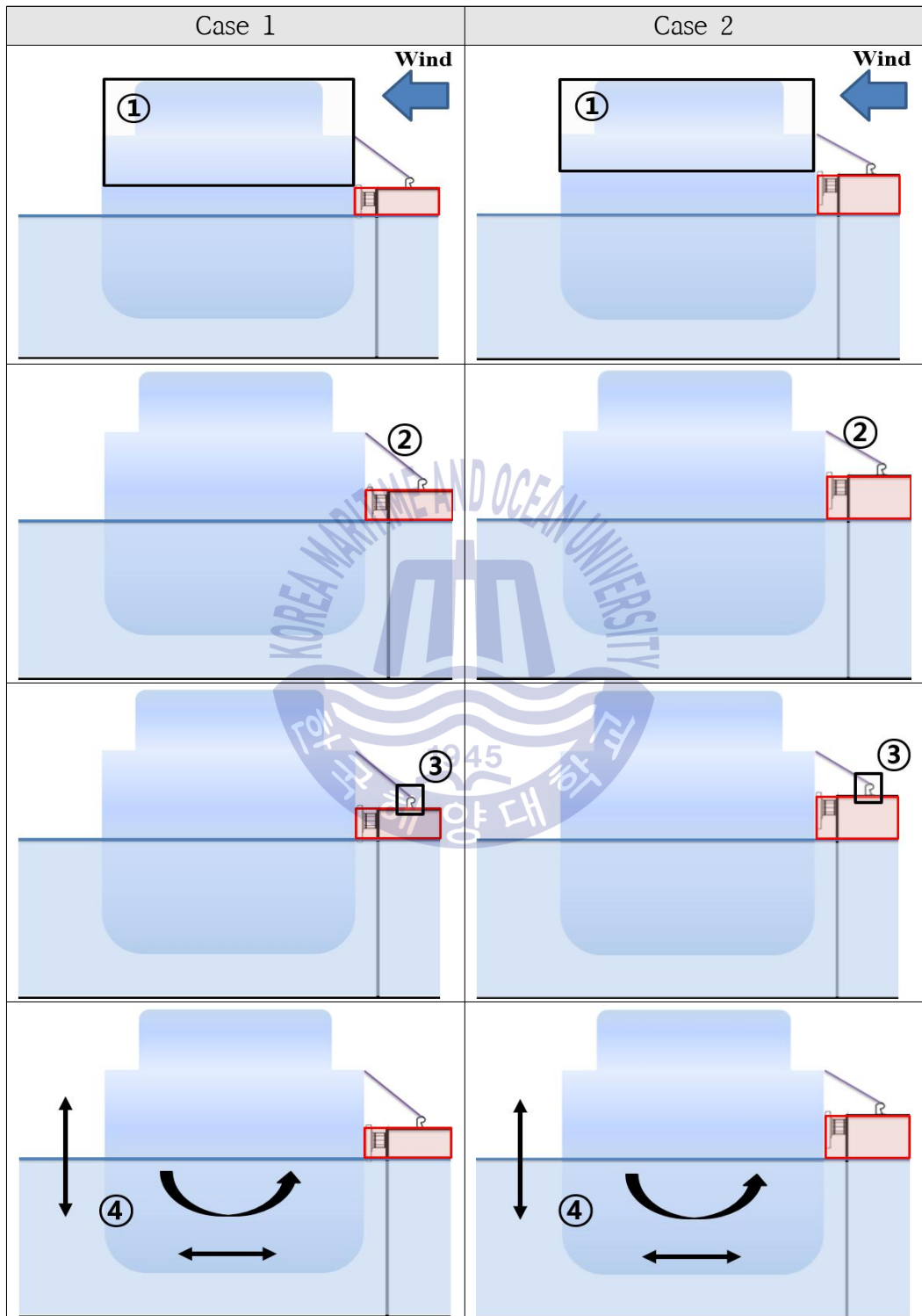


Fig. 16 Correlation between crown height and moored ship

또한, 마루높이에 의해 갠웨이(Gangway), 램프(Ramp) 등의 육상 승하선설비의 배치 및 각도와 컨테이너선의 크레인 등 하역설비의 높이에 영향을 주게 된다. 약최고고조위 상태에서 (a) 우리나라 마산항과 (b) 대만基隆항에서 한국해양대학교 실습선 한나라호의 부두 마루높이에 따른 갠웨이 설치 모습은 Fig. 17과 같다. 이를 통해 각 부두의 마루높이에 따라 갠웨이의 수직각과 안전성이 달라질 수 있음을 알 수 있다.

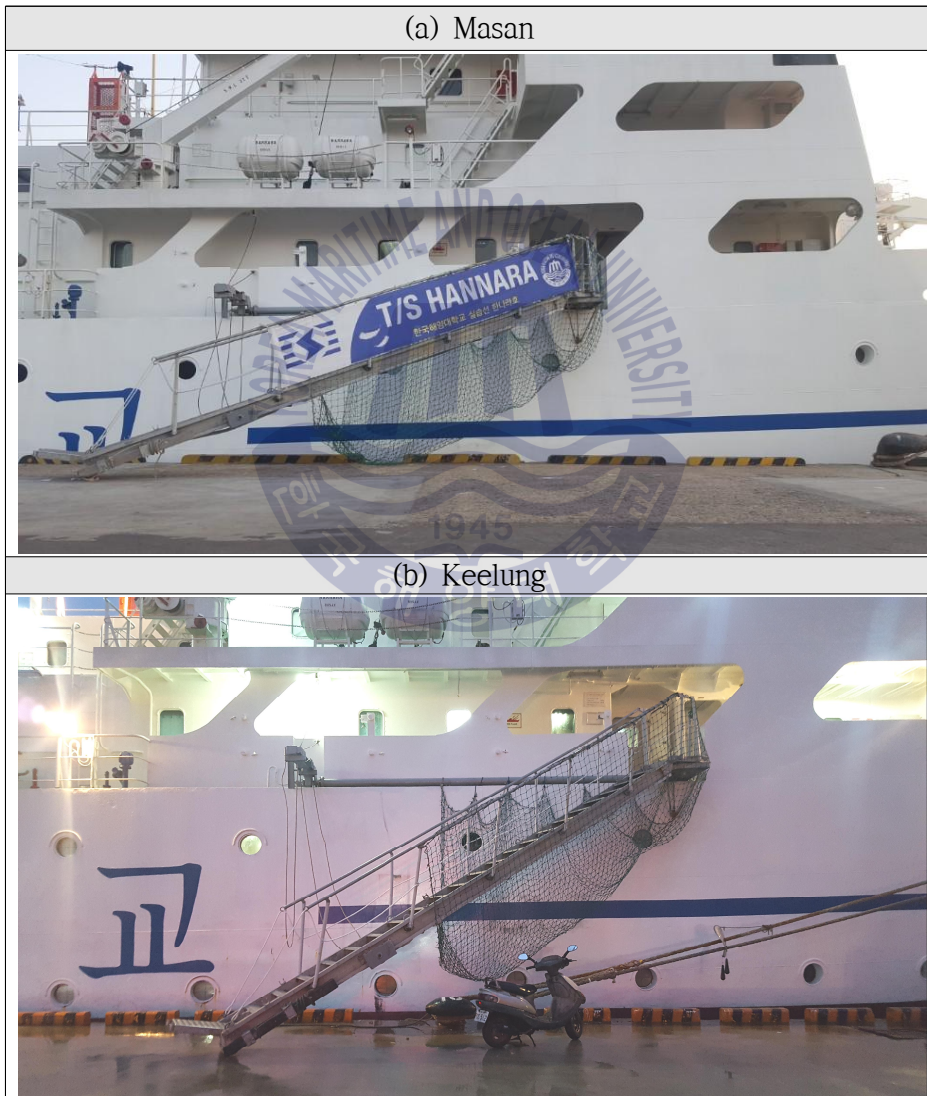


Fig. 17 Gangway of T/S Hannara in considering crown height

3.2 마루높이 설계기준 분석

3.2.1 국내 마루높이 설계기준 및 현황

1) 국내 마루높이 설계기준

계류시설의 마루높이는 낮을수록 공사비가 적게 드나, 대상항만의 조차, 폭풍해일, 파랑 및 계류된 선박과 부두시설물의 안전성 확보를 고려한다면 일반적으로 높은 것이 좋으며, 하역에 지장이 없고 부두시설물이 침수되지 않도록 신중히 결정하여야 한다.

대상선박이 특별히 정해지지 않은 경우에 있어서는 일반적으로 Table 9의 마루높이 설계기준이 주로 사용되며, 파랑의 영향을 비교적 크게 받는 특수한 경우의 안벽에서 파랑에 의한 월파방지가 요구되어지는 경우에는 설계조위에 항내파고를 적정한 방법으로 더한 높이 이상을 마루높이로 결정할 수 있다(해양수산부, 2017c).

Table 9 Standard of crown height(Domestic)

Category	Tidal range 3.0m or more	Tidal range less than 3.0m
Wharf for large vessels (Water depth of more than 4.5m)	A.H.H.W. + (0.5~1.5m)	A.H.H.W. + (1.0~2.0m)
Wharf for small vessels (Water depth of less than 4.5m)	A.H.H.W. + (0.3~1.0m)	A.H.H.W. + (0.5~1.5m)

출처 : 해양수산부

국내 표준적인 마루높이 기준은 접안시설의 수심이 4.5m 이상이면 대형접안시설, 4.5m 미만이면 소형접안시설로 구분하고, 조차 3.0m 이상인 지역과 3.0m 미만인 지역으로 구분하여 대상해역의 약최고고조위에 일정 높이를 더하여 설정한다.

대형접안시설의 경우, 조차가 3.0m 이상일 때 0.5~1.5m, 조차가 3.0m 이하일 때 1.0~2.0m를 약최고고조위에 더한 높이가 마루높이 기준이 되며, 소형접안 시설의 경우, 조차가 3.0m 이상일 때 0.3~1.0m, 조차가 3.0m 이하일 때 0.5~1.5m를 약최고고조위에 더한 높이가 마루높이 기준이 된다.

이 때, 조차가 큰 지역이 조차가 작은 지역보다 약최고고조위에 더해지는 값이 더 작는데, 이는 조차가 큰 지역에서 마루높이가 너무 높으면 저조시 선박의 계류시작점이 마루높이보다 낮아 계류가 불가능할 수 있기 때문에 설정한 값으로 추측해 볼 수 있다.

이러한 설계기준은 선종 및 선박의 크기에 상관없이 일괄적으로 적용하고 있으며, 2005년 개정된 항만 및 어항 설계기준상의 기준과 2017년에 개정된 기준이 동일하여 선박 대형화 및 해수면 상승속도 등의 추세를 반영하지 못하고 있는 것으로 사료된다. 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 중력식 안벽 단면 중 마루높이는 Fig. 18과 같다.

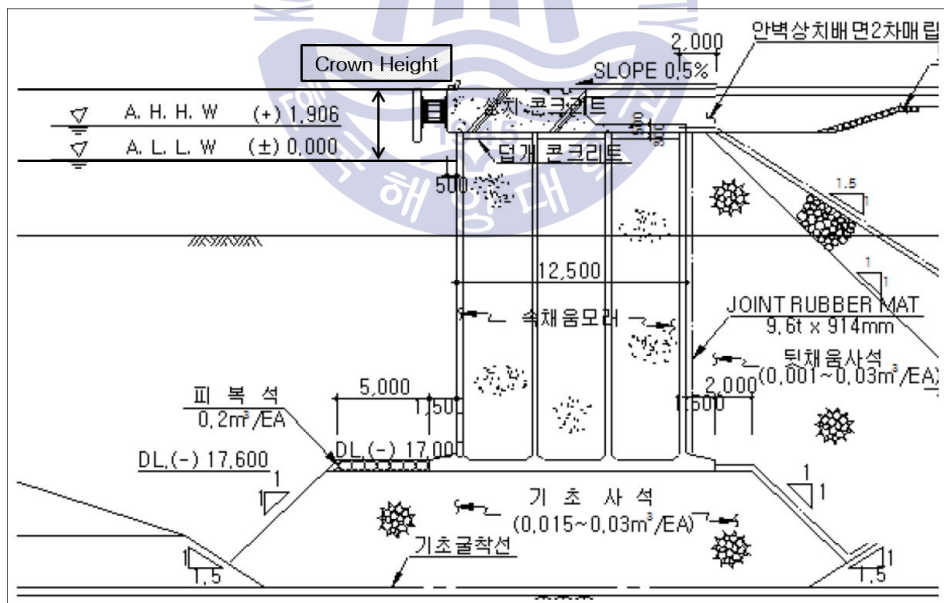


Fig. 18 Key elements of solid deck structures(R.O.K)

출처 : 해양수산부

2) 국내 마루높이 현황

한국환경정책·평가연구원에서 2010년 기준 국내 항만의 마루높이를 해수위 환경 변화와 관련된 여러 요소를 함께 검토하면 Table 10과 같다.

A는 해당 항만의 약최고고조위, B는 해일 수치모형실험으로 도출된 재현빈도 50년의 폭풍해일고, C는 예상되는 50년 뒤 해수면 상승 정도(Sea Level Rise), D는 해당 항만의 기존 마루높이, $A+B+C-D$ 는 월류고, $D-A$ 는 기존 마루높이와 약최고고조위의 차를 나타낸다.

29개 무역항의 해수면 상승정도와 해일고 예상치를 고려한 설계조위를 기존 구조물 마루높이와 비교하여 월류고를 산정하였을 때, 총 29개 무역항 중 62%인 18개 항이 50년 후 해수면 상승률을 고려할 때 50년 빈도의 해일이 발생할 때 월류할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 월류고가 높은 4개 항은 여수항, 통영항, 군산항, 인천항으로, 대부분 서해와 남해에 위치한 항만이 월류하는 것으로 나타났다. 제주항이나 서귀포항은 비록 해수면 상승률이 다른 해역에 비해 높은 수준이나 기존 시설물의 마루높이가 상대적으로 높은 편이어서 월류고가 30cm 이내로 높게 나타나지 않았다(한국환경정책·평가연구원, 2011).

또한, 마루높이와 약최고고조위의 차인 $D-A$ 값과 현재 국내 항만 및 어항 설계기준상 수심 4.5m 이상의 대형시설 마루높이 설계기준을 비교하면, 조차 3.0m 이상인 ① 경인항 ~ ⑪ 여수항 중 ④ 대산항 172cm, ⑤ 태안항 390cm, ⑩ 광양항 218cm를 제외한 모든 항구가 약최고고조위와 50~150cm의 범위에 있는 것으로 확인되었다. 또한, 조차 3.0m 이하인 ⑫ 제주항 ~ ⑳ 속초항 중 ⑫ 제주항 82cm, ⑬ 서귀포항 97cm, ⑮ 통영항 48cm, ⑰ 옥포항 66cm, ⑱ 장승포 92cm는 기존 마루높이의 범위인 100~200cm 범위 미만의 마루높이로 평가되었으며, ⑲ 마산항 203cm, ⑳ 진해항 201cm, ㉑ 부산항 270cm, ㉒ 옥계항 212cm로 기존 마루높이의 범위를 초과하는 것으로 평가되었다.

이와 같이 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 마루높이 기준이 대상선박이 지정되어 있지 않은 경우로 한정하고 있으나, 국내 28개 무역항 중 7개 항구만 본 설계기준을 초과하여 건설되었으며, 15개 항구는 본 설계기준에 적합하게 건설되었고, 5개 항구는 본 설계기준 미만으로 건설된 것을 확인하였다.

Table 10 Overtopping height of major port in domestic port

Category			A	B	C	A+B+C	D	A+B+C-D	D-A
			A.H. H.W. (cm)	Storm wave height (cm)	S.L.R (cm)	Design water level (cm)	Crown height (cm)	Over- topping height (cm)	Height from A.H.H. W.(cm)
West coast	1	Gyeonin	-	-	-	-	-	-	-
	2	Incheon	927.0	197.0	6.0	1,130	1,000	130.0	73
	3	Pyeongtaek	930.8	164.0	6.0	1,101	1,050	50.8	119
	4	Daesan	827.8	120.0	6.0	954	1,000	-46.2	172
	5	Taeon	769.8	106.0	6.0	882	1,160	-278.2	390
	6	Janghang	747.8	173.0	6.0	927	800	126.8	52
	7	Gunsan	742.6	182.0	6.0	931	800	130.6	57
	8	Mokpo	486.0	123.0	6.0	615	550	65.0	64
South coast	9	Wando	400.4	122.0	10.0	532	450	82.4	50
	10	Gwangyang	382.2	221.0	10.0	613	600	13.2	218
	11	Yeosu	361.6	220.0	10.0	592	450	141.6	88
	12	Jeju	278.0	85.0	29.5	393	360	32.5	82
	13	Seogwipo	303.2	83.0	29.5	416	400	15.7	97
	14	Samcheonpo	329.6	194.0	10.0	534	450	83.6	120
	15	Tongyeong	282.0	173.0	10.0	465	330	135.0	48
	16	Gohyeon	196.8	172.0	10.0	379	340	38.8	143
	17	Okpo	214.2	141.0	10.0	365	280	85.2	66
	18	Jangseungpo	188.4	134.0	10.0	332	280	52.4	92
	19	Masan	196.7	207.0	10.0	414	400	13.7	203
	20	Jinhae	199.4	183.0	10.0	392	400	-7.6	201
	21	Busan	129.8	110.0	10.0	250	400	-150.2	270
East coast	22	Ulsan	60.8	74.0	11.5	146	220	-73.7	159
		Onsan	63.2	74.0	11.5	149	220	-71.3	157
	23	Pohang	24.6	99.0	11.5	135	200	-64.9	175
	24	Hosan	15.4	-	11.5	-	-	-	-
	25	Samcheok	35.0	42.0	11.5	89	150	-61.5	115
	26	Donghae	39.2	43.0	11.5	94	200	-100.9	161
		Mukho	37.6	50.0	11.5	99	200	-106.3	162
	27	Okgye	37.6	41.0	11.5	90	250	-159.9	212
28	Sokcho	39.0	41.0	11.5	92	120	-28.5	81	

출처 : 한국환경정책·평가연구원

3.2.2 국외 마루높이 설계기준

1) 미국 설계기준

2017년 1월에 개정된 미국 항만시설의 설계기준은 UFC(Unified Facilities Criteria) 4-152-01(Design : Piers and Wharves)에서 규정하고 있으며, 부두 마루높이(Deck Elevation) 기준은 접안선박의 안전성을 위해서 가능한 범위에서 높이를 설계하도록 규정하고 있으며, 적절한 마루높이를 위해서는 접안선박의 특성을 파악하여 설계하도록 한다.

먼저 환경조건으로는 월파(Overtopping)를 고려하여 M.H.H.W.(Mean Higher High Water)를 최대파고의 2/3로 설정하고 적어도 1.0m를 더하도록 설정한다. 미국 기준의 M.H.H.W.는 Average High Tide와 같으며, 이는 국내의 약최고고조위와 동일한 의미로 사용된다.

또한, Pile Cap이나 Beam이 잠기는 곳은 부식을 방지하기 위한 조치를 수행해야 하며, 특히 M.H.H.W., 조차, 최대파고를 고려하여, 마루높이를 설계시 모든 환경조건에서 부두에 설치된 수로가 젖지 않도록 설계해야 한다.

접안선박 조건으로는 접안선박의 건현(Freeboard)과 승하선 장비 및 하역 장비의 설치와 작동을 고려해야 한다. 부두에 설치된 컨베이어, 크레인, 로딩암 등의 하역장비가 파도에 의해 젖지 않아야 하며, 계류선의 수직각(Mooring line angle)이 적절히 유지되도록 부두높이를 설정하여야 한다. 특히 만재시 M.L.L.W.(Mean Lower Low Water)의 조건과 경하시 M.H.H.W.에 부두 사용에 문제가 없어야 한다. 부두의 배수시설은 배수가 원활하도록 경사각을 확보하여 설치해야 하며, 배수구의 높이가 M.H.H.W.보다 높아 배수에 문제가 없도록 설정하여야 한다.

가능하다면 모바일 크레인, 부두서비스용 차량 및 철도의 원활한 접근을 위해 인접 지역의 높이와 가능한 비슷하게 부두의 마루높이를 설정하도록 권고하고 있다(U. S. Department of defense, 2017). 미국 설계기준에서 제시하는 고정식 콘크리트 형태 안벽의 단면은 Fig. 19와 같다.

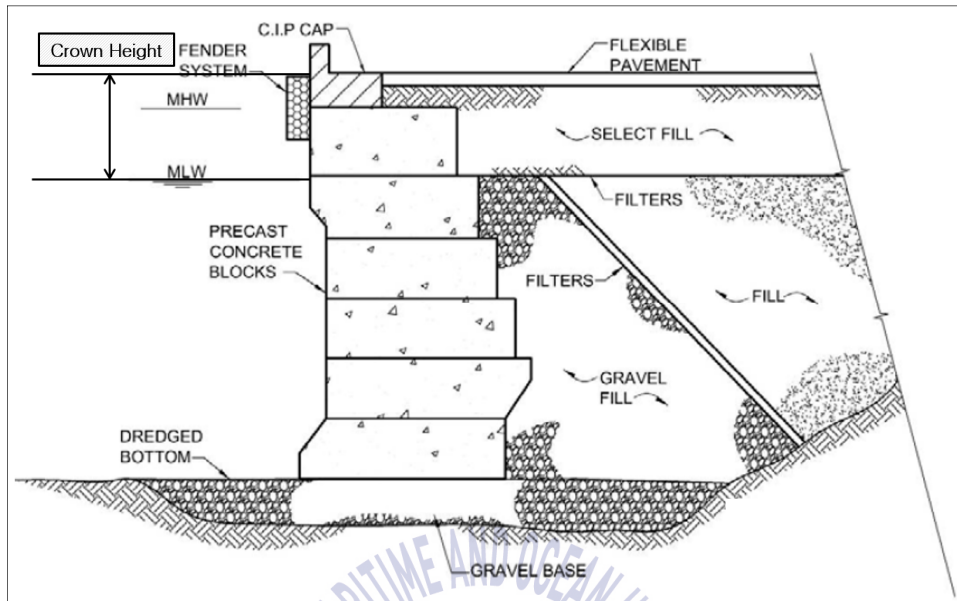


Fig. 19 Key elements of solid type and concrete block construction(U.S.A)

출처 : U. S. Department of defense

2) 일본 설계기준

일본의 항만시설 설계기준은 Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan(2009)에서 규정하고 있으며, 부두의 마루높이에 대한 기준점으로 사용되는 조차의 수준으로 월평균 최고 수위(mean monthly-highest water level, M.M.H.W.)를 사용한다. 설계 선박을 식별할 수 없는 경우, 일반적으로 표준 월평균 최고 수위를 기준으로 Table 11에 제시된 값을 기준으로 설정한다(The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009).

이는 국내 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 설계기준과 동일하며, 수심 4.5m를 기준으로 대형접안시설과 소형접안시설을 분류하였고, 이에 따라 조차 3.0m를 기준으로 월평균 최고 수위에 더해지는 높이를 설정하였다. 일본 설계 기준에서 제시하는 중력식 안벽의 단면은 Fig. 20과 같다.

Table 11 Standard of crown height(Japan)

Category	Tidal range 3.0m or more	Tidal range less than 3.0m
Wharf for large vessels (Water depth of 4.5 or more)	M.M.H.W. + 0.5~1.5m	M.M.H.W. + 1.0~2.0m
Wharf for small vessels (Water depth of less than 4.5)	M.M.H.W. + 0.3~1.0m	M.M.H.W. + 0.5~1.5m

출처 : The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan

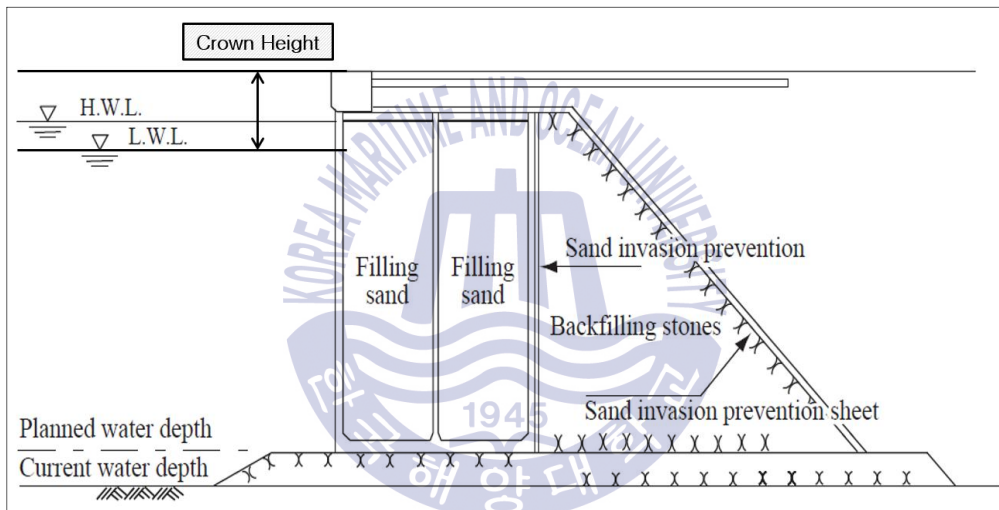


Fig. 20 Key elements of suspended deck structures(Japan)

출처 : The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan

3) 영국 설계기준

영국의 항만시설 설계기준에서 부두의 마루높이는 기존 인접지역의 작업 구역 높이와 비슷해야 한다고 규정하고 있으며, 최적의 마루높이를 결정하기 위해서는 부두 침수(Flooding)의 위험, 지구 온난화로 인한 해수면 변화(sea level changes due to global warming)의 영향, 크레인 등 하역장비의 높이(the cope

level on crane heights)를 고려하여야 한다고 명시되어 있다.

그러므로 정온한 해역에서 화물선의 부두 마루높이는 작업수위(working water level)보다 1.5m 이상 높아야 하며, 여기서 작업수위는 작업 가능한 최고 수위(Extreme sea level)로 정의할 수 있다. 파랑으로부터 개방된(open sea) 선석의 마루높이는 수위(water level)와 조차, 파랑의 높이와 빈도를 파악하기 위한 통계 분석을 수행하고 결정하여야 한다.

특히, VLCC 및 가스운반선의 마루높이는 OCIMF의 가이드라인에 따라 계류라인의 효율성을 최적화할 수 있고 송유관 및 하역구조물에 파랑이 영향을 미치지 않도록 설계하여야 한다(British Standard Institute, 2010b). 영국 설계기준에서 제시하는 콘크리트 케이슨 형태 안벽의 단면은 Fig. 21과 같다.

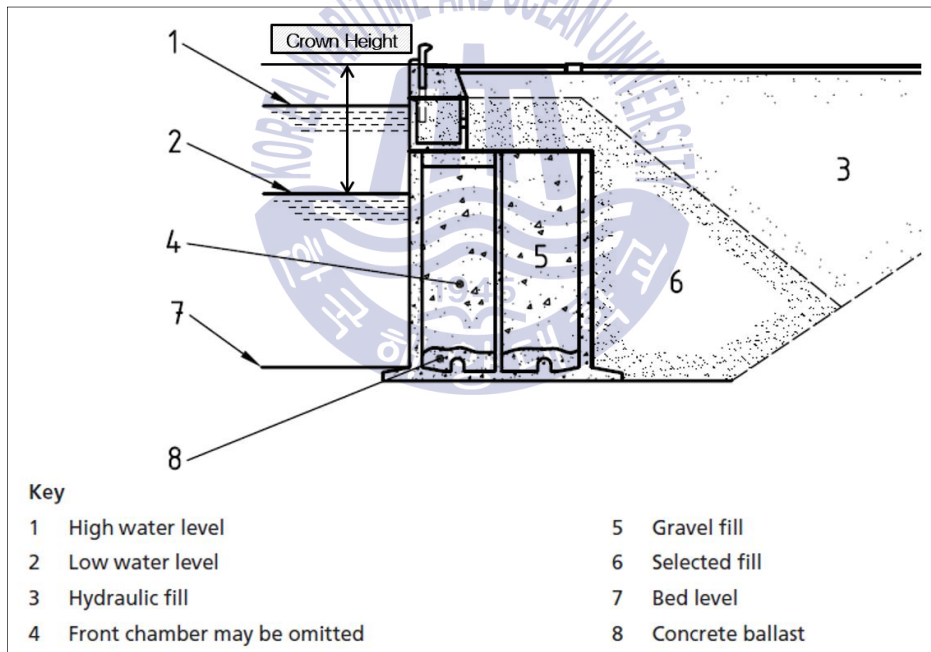


Fig. 21 Key elements of concrete caisson deck structures(U.K)

출처 : British Standard Institute

4) 홍콩 설계기준

홍콩 항만시설 설계기준에서 부두 마루높이는 인접 지역의 높이, 조석 변동(tidal variation), 고조위(Extreme water levels), 접안선박의 종류(type of vessels), 부두 작업의 유형(pier operations)을 유의하여 설정하여야 한다. 또한, 관련 정부 부처, 선박 또는 부두 운영자 및 유지·보수 당국과 협의하여 설정하여야 한다고 명시되어 있다(The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2004).

5) Port Designer's Handbook

PIANC 권고기준의 지침서인 Port Designer's Handbook에 의하면, 마루높이의 고려요소는 다음 6가지 사항으로 정의하고 있다.

- (a) 선석 apron 뒤의 터미널 구역의 높이(The elevation of the terminal area behind the berth apron)
- (b) 가장 높은 관측 수위와 조석 및 조위(The highest observed water level and the tidal level)
- (c) 항만 유역의 바람에 의한 수위(The wind-raised water level in the harbour basin)
- (d) 항만 유역의 파랑 작용(The wave action in the harbour basin)
- (e) 선석을 사용하는 접안선박의 유형(The type of ship using the berth)
- (f) 화물 작업 종류(The harbour installations and the cargo operation)

일반적으로 정온한 해역에서 마루높이는 작업수위(working water level) 보다 1.5m 이상 높아야 하고, 여기서 작업수위는 작업이 가능한 최고 수위(Extreme water level)로 정의할 수 있다. 파랑으로부터 직접 영향을 받는(open sea)의 선석의 마루높이는 취급되는 화물의 유형에 따라 가장 높은 관측 파고(highest observed crest of waves)보다 0.5~1.0m 상향하여 설계하여야 한다(Thoresen,

C.A, 2003). 본 설계기준에서 제시하는 다양한 형태의 안벽의 단면은 Fig. 22와 같다.

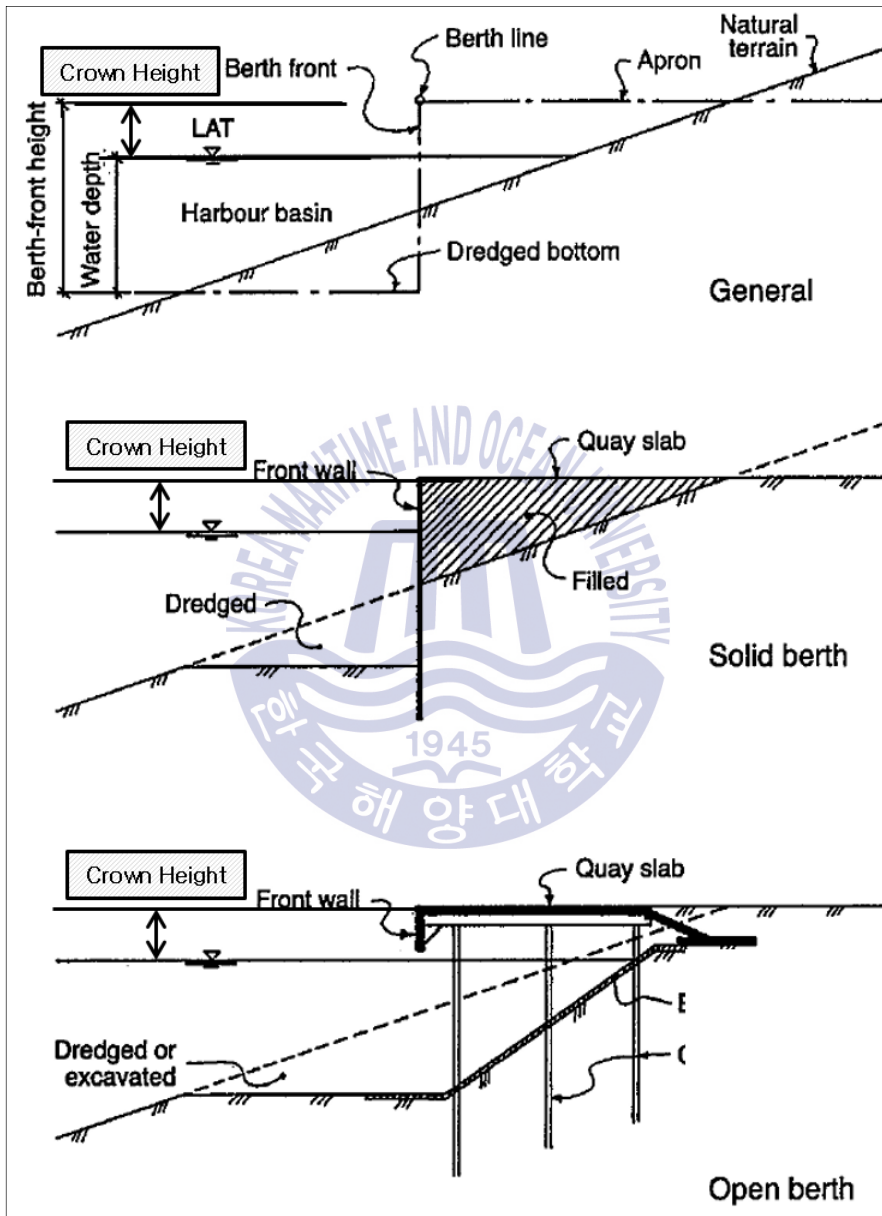


Fig. 22 Various berth structures(Port Designer's Handbook)

출처 : Port Designer's Handbook

3.3 마루높이 결정요소 선정

위에서 기술한 3.2절의 국내·외 마루높이 설계기준을 분석하여, 부두 설계시 적정 마루높이 설정을 위한 결정요소와 마루높이에 의해 영향을 받는 요소를 구분하였다.

한국, 일본, 미국, 영국, 홍콩 및 Port Designer's Handbook의 마루높이 설계시 고려사항은 Table 12와 같으며, 마루높이 기준에 영향을 주는 요소는 모든 설계기준에 해당되는 요소인 조차(Tidal range), 조위(Tidal level)이며, 미국, 영국, 홍콩, Port Designer's Handbook의 마루높이 기준에 해당하는 접안선박의 특성, 승하선 및 하역 설비, 인접 지역의 높이이다. 영국 기준에서 고려하고 있는 해수면 상승 정도는 조위와 밀접한 연관이 있는 요소로 마루높이 설계기준에 영향을 줄 수 있다.

Table 12 Considerations of crown height design criteria in domestic and international standards

Standard	Considerations
R.O.K	<ul style="list-style-type: none"> • Tidal range, Tidal level, Depth of water
Japan	<ul style="list-style-type: none"> • Tidal range, Tidal level, Depth of water
U.S.A	<ul style="list-style-type: none"> • Tidal range, Tidal level, Ship freeboard, Type of vessel • Cargo handling equipment, Adjacent land
U.K	<ul style="list-style-type: none"> • Tidal level, Sea level rise, Type of vessel • Cargo handling equipment, Elevation of the terminal area
Hong Kong	<ul style="list-style-type: none"> • Level of adjacent land, Tidal variation, • Extreme water level, Type of vessel, Pier operation
Port Designer's Handbook	<ul style="list-style-type: none"> • Elevation of the terminal area • The highest observed water level and the tidal level • Wind-raised water level in the harbour basin • Wave action in the harbour basin • Type of ship using the berth • Harbour installations and cargo operation

설정된 마루높이에 의해 영향을 받는 요소로는 접안선박의 계류요소 및 승하선·하역 설비가 해당된다. 계류요소는 계류삭의 장력, 계류라인의 길이 및 수직각, 계선주의 견인력, 선체 6자유도운동값을 포함하며, 선박의 승하선·하역 설비는 여객선·크루즈선의 갠웨이, 자동차선·차도선의 램프, 일반화물선·벌크선의 크레인을 포함한다. 육상에 설치된 하역 설비는 컨테이너선의 크레인, LNG선·가스선의 로딩암 등을 포함한다. 마루높이 결정요소 및 마루높이에 의해 영향을 받는 접안선박의 계류요소 및 승하선·하역 설비 요소는 Fig. 23과 같다.

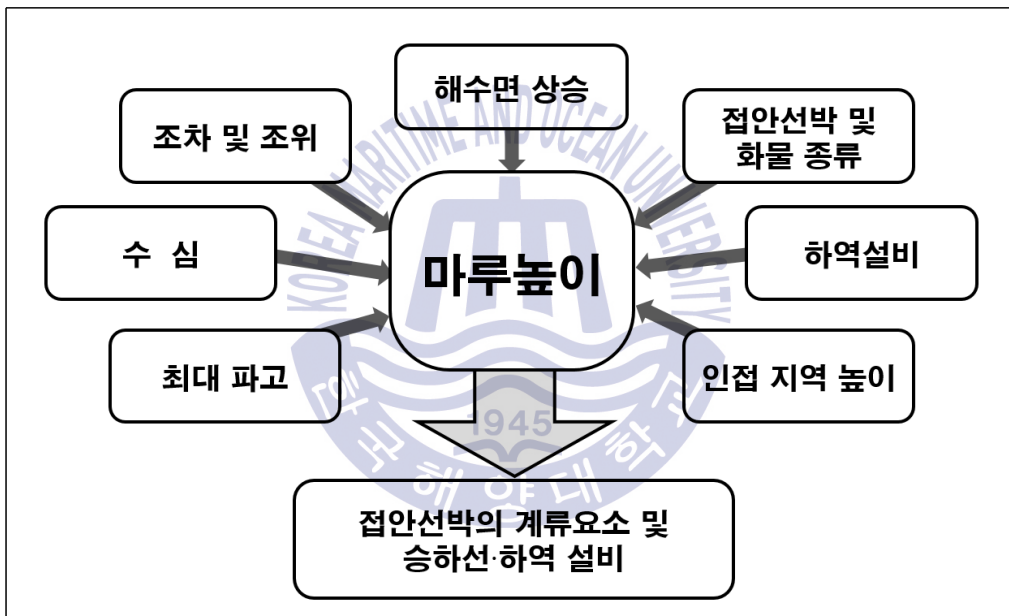


Fig. 23 Decisive factors of crown height

제 4 장 선종별 마루높이 민감도 평가

4.1 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가 개요

4장에서는 3장에서 도출한 마루높이 결정요소와 결정된 마루높이에 의해 영향을 받는 요소를 바탕으로, 마루높이 변화에 따른 접안선박의 계류요소별 민감도를 도출하고자 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가를 수행하였다.

4.1.1 계류안전성 평가 개요

1) 시뮬레이션 평가 개요

본 시뮬레이션 평가는 접안선박의 선종에 따른 계류요소의 민감도를 분석하고자 하며, 이를 위해 접안선박의 선종, 부두의 마루높이, 다양한 환경외력 조건에 따른 계류안전성 평가 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 값의 일반화를 위해 대상해역을 선정하지 않고 접안선박의 선종 및 크기에 따라 항만 및 어항 설계기준에 의거하여 설계한 가상의 부두를 설정하였다.

부두에 계류 중인 선박의 선체동요량은 항만의 자연적 환경 즉, 바람, 조류 및 조위, 파랑과 같은 환경외력과 대상선박의 제원 및 하중상태에 따른 홀수 변화, 부두의 형상, 계류삭의 재질과 특성, 계류라인의 배치 방법, 계선주의 위치 및 특성, 방충설비의 특성과 위치 등에 의해 종합적으로 결정된다.

따라서 계류안전성을 평가하기 위한 항목은 바람, 조류 및 조위, 파랑 등의 환경외력에 의해 가해지는 계류삭의 장력, 계선주에 작용하는 견인력, 방충재에 작용하는 반력, 선체 6자유도운동에 따른 하역 안전성 등이다. 계류안전성 관련 주요 평가항목을 정리하면 다음과 같다.

- 외력에 따른 계류삭에 작용하는 장력 평가

- 외력에 따른 계선주에 작용하는 견인력 평가
- 외력에 따른 방충설비에 작용하는 반력 평가
- 계류상태에서 선박의 운동에 따른 하역 안전성 및 한계 검토

본 논문에서는 마루높이 상향에 따른 선종별 계류안전성 민감도 분석을 위해 Fig. 24와 같이 계류안전성 평가 전용 소프트웨어로 개발된 TTI(Tension Technology International)사의 OPTIMOOR SW(Ver. 6.4.1, 2017. 06. 16 Update) Version을 사용하였다. OPTIMOOR 소프트웨어는 선형 해석을 기반으로 타 계류안전성 해석프로그램에 비하여 단순하나 정확한 모델링으로 국내 해상교통안전진단 및 국외 계류안전성 평가 시뮬레이션에 대표적으로 사용되고 있는 계류안전성 해석프로그램이다.

이를 통해 선종의 특징에 따라 4개 그룹으로 분류하고 그룹별 대상선박을 선정하여, 각 대상선박별로 4개의 마루높이 조건, 9개의 환경외력 조건을 설정하여 계류안전성을 평가하였다. 평가 결과를 종합하여 대상선박의 마루높이 및 환경외력 조건에 따른 계류요소 민감도를 도출하였다.

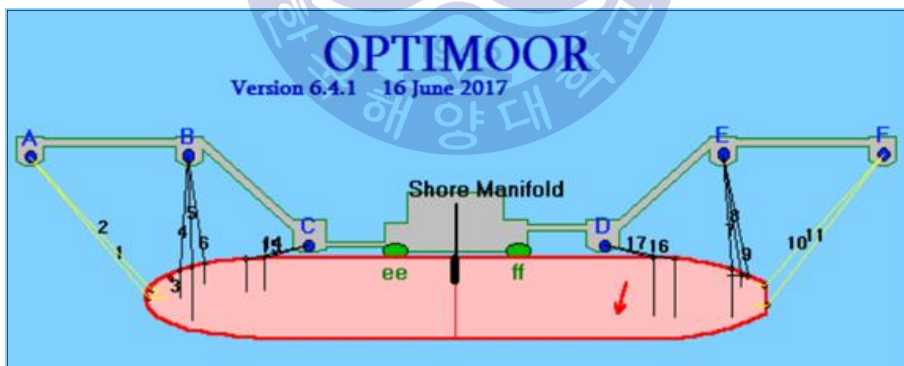


Fig. 24 Mooring safety assessment simulation program(OPTIMOOR)

출처 : Tension Technology International

2) 부두 좌표계

본 시뮬레이션 평가에 사용된 부두 좌표계($O_b - x_b y_b z_b$) 및 부호규약(Notation)은 Fig. 25와 같다. 부두 좌표계의 원점(Origin)은 부두의 중앙점으로 설정하였으며, 방충설비의 법선 상에 존재하는 것으로 설정하였다. 또한 높이 방향으로 는 부두면(Pier) 위치에 존재하며, 기준점(Datum)은 약최저저조위(A.L.L.W.)이다.

부두 목표점(Berth Target)은 부두 좌표계의 원점과 일치하며, 최종적으로 접안이 완료된 상태에서 선박 목표점(Vessel Target)과 같이 방향으로 평행하도록 설정한다. 바다에서 부두 쪽을 보았을 때, 우측 방향을 x 축, 부두방향을 y 축으로, 연직 상방향을 z 축으로 설정하였다. 부두의 방향은 진북(North) 방향으로부터 시계 방향으로 정의된다. 계선주는 순차적으로 B1, B2, B3 등으로 표현되고, 방충설비는 F1, F2, F3 등으로 표현된다.

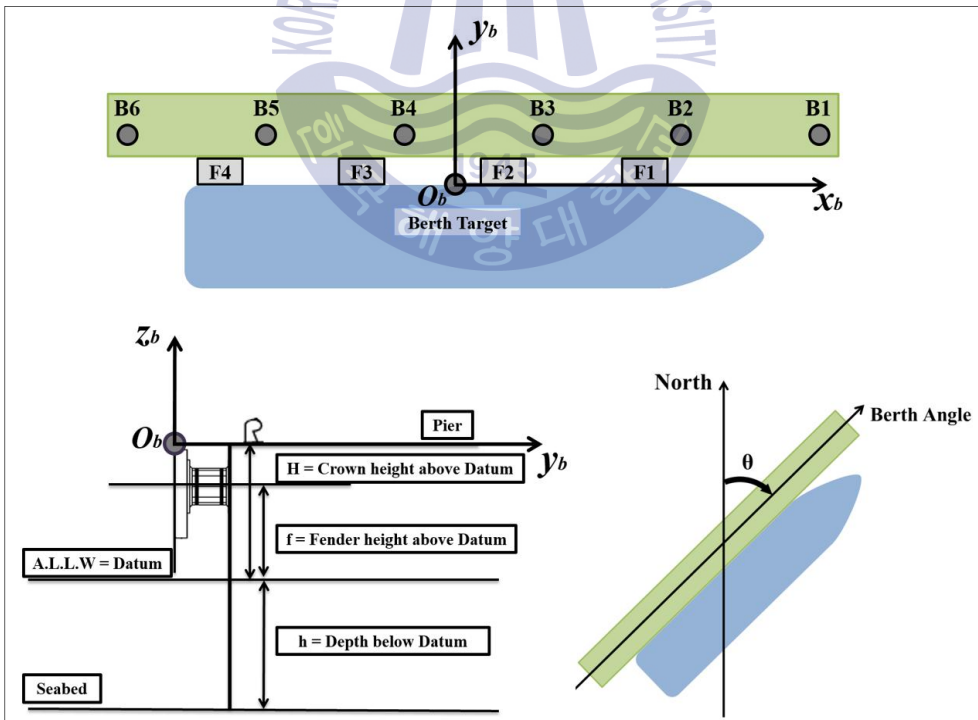


Fig. 25 Coordinate system and notation(Pier)

3) 선박 좌표계

본 시뮬레이션 평가에 사용된 선박 좌표계($O_s - x_s, y_s, z_s$) 및 부호규약(Notation)은 Fig. 26과 같다. 선박 좌표계의 원점은 선박의 중앙(Midship)으로 설정하였으며, 선박의 중심선(Centerline) 상에 존재하는 것으로 설정하였다. 또한 높이 방향으로는 상갑판(Main Deck)상에 존재한다. 또한, 선수 방향을 x 축, 접안 방향에 관계없이 부두 방향을 y 축으로, 그리고 연직 상방향을 z 축으로 설정하였다.

선박 목표점(Vessel Target)은 선박 좌표계의 원점과 일치하며, 최종적으로 접안이 완료된 상태에서 부두 목표점(Berth Target)과 길이 방향으로 평행하도록 설정한다. 선박의 페어리드(Fairlead) 위치는 순차적으로 1, 2, 3 등의 번호로 표시하며, 번호가 빠를수록 선수부에 있는 페어리드를 의미한다. 페어리드의 번호는 그 페어리드를 통과하는 계류삭의 번호와 동일하다.

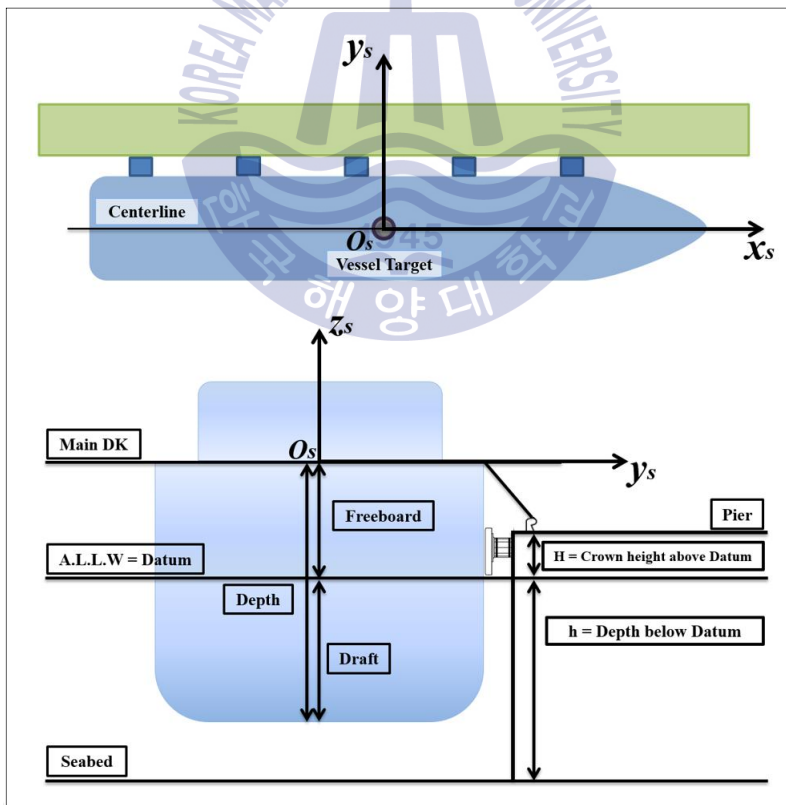


Fig. 26 Coordinate system and notation(Ship)

4.1.2 계류선박의 운동방정식 및 환경외력

1) 계류선박의 운동방정식

일반적으로 수면 상에서 선체의 운동은 복잡적이며, 이를 해석하고 연구하기 위해서는 6개의 운동 성분으로 분류하여야 한다. 이를 선체 6자유도운동(6 degrees of freedom ship motions)이라고 정의하며, Fig. 27과 같이 전후운동(Surge), 좌우운동(Sway), 상하운동(Heave)의 세 가지 병진운동과 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 세 가지 회전운동으로 분류된다.

따라서 선박이 바람, 파랑, 조류 등의 환경외력을 포함한 어떠한 힘에 의하여 평형 위치로부터 벗어나면, 그 힘이 제거되었을 때 선박은 운동이 감쇄되어 사라질 때까지 6자유도운동이 복합된 형태의 동요를 하게 된다.

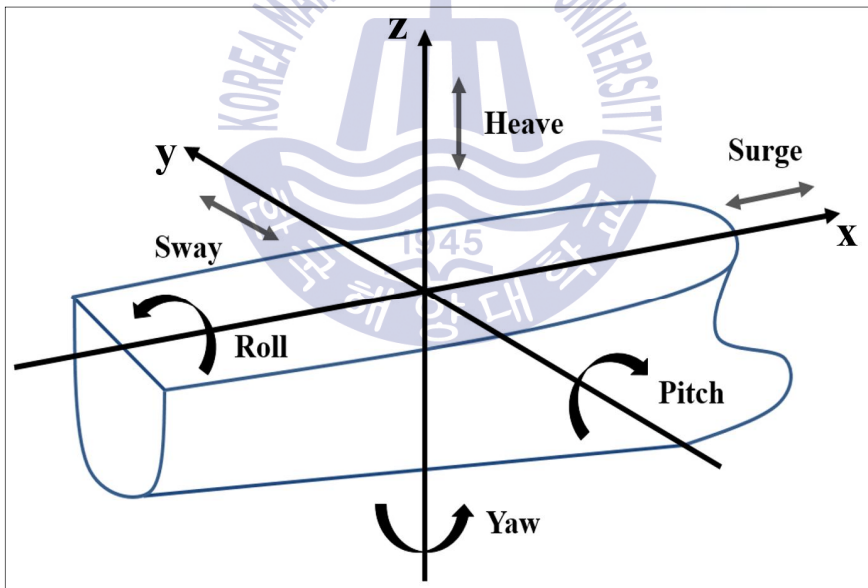


Fig. 27 6 degrees of freedom ship motions

계류된 선박에 다수의 계류삭, 방충설비에 바람, 파랑 조류 등의 환경외력이 작용하는 경우, 기본적으로는 작용하는 힘과 모멘트가 평형을 이루는 조건을 분석하면 각 계류삭 및 방충설비 등에 작용하는 장력 및 반력 등을 추정할 수 있다. 일반적으로 계류 선박의 동요 해석은 계류삭 장력 및 방현재 반력 등 비선형적인

계류력(Mooring force) 및 불규칙적인 외력을 대상으로 하기 때문에 시간 영역에 있어서 운동 방정식을 수치적으로 푸는 방법이 일반적으로 이용되고 있다.

계류 선박이 물로부터 받는 유체력은 가속도(\ddot{x}), 속도(\dot{x}), 변위(x)에 비례하는 성분으로 구분하며, 가속도에 비례하는 성분은 선체의 질량 및 관성모멘트와 불변 부가질량 및 관성모멘트이고, 속도에 비례하는 성분은 지연함수와 점성항, 변위에 비례하는 성분은 정적 복원력 계수와 계류력 계수이다. $m\ddot{x}$ 는 물체가 가속운동을 할 때 주위 유체입자로부터 받는 방해력이며, D_i 는 선체의 운동을 방해하는 감쇠력(Damping force)이다.

이에 따라 안벽에 계류한 선박은 식 (4-1)과 같이 운동 방정식에 의해 시계열 해석이 가능하며, 첨자 ij 는 j 모드에 있어서 i 모드의 운동에 영향을 주는 것을 의미한다(Gerard van Oortmerssen, 1977).

$$\sum_{i=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{x}(\tau) L_{ij}(t-\tau) d\tau + D_i(t) \quad (4-1)$$

$$+ \sum_{i=1}^6 \{C_{ij} + G_{ij}\} x_i(t) = F_j(t) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 6)$$

$M_{ij}(\infty)$: 선체 질량 및 관성모멘트

$m_{ij}(\infty)$: 불변 부가질량 및 관성모멘트

L_{ij} : 지연함수, D_i : 점성항

C_{ij} : 정적복원력 계수, G_{ij} : 계류력 계수

F_j : 외력항

또한 지연함수 및 불변 부가질량은 식 (4-2)와 (4-3)과 같이 표현된다.

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (4-2)$$

$$m_{ij}(t) = A_{ij}(\sigma) + \frac{1}{\sigma} \int_0^{\infty} L_{ij}(\sigma) \sin \sigma t d\sigma$$

(4-3)

$A_{ij}(\sigma)$: 각주파수 σ 에 대한 부가질량

$B_{ij}(\sigma)$: 각주파수 σ 에 대한 감쇠계수

2) 계류선박에 작용하는 환경외력

외해나 항 입구 부근에 시설된 계류시설, 장주기파의 침입이 예상되는 항만의 계류시설에 계류된 선박 또는 악천후 시에 계류하는 선박에 대하여는 파도와 바람, 흐름 등에 의한 하중의 작용을 받아 선박이 동요하게 된다. 계류선박의 동요에 의한 운동에너지가 접안에너지를 초과하는 경우가 있기 때문에 계선주 또는 방충재의 설계 시 계류선박의 동요에 의한 견인력 또는 충격력을 고려하는 것이 바람직하다. 계류선박의 동요에 의하여 발생하는 외력은 선박에 작용하는 파력, 풍압력, 흐름에 의한 유압력, 계류시스템의 특성을 근거로 동요계산을 하고 있다(해양수산부, 2017b).

계류시스템을 설계하기 위해서는 우선적으로 설계조건을 결정하는 것이 필요하다. 특히 해양구조물의 운동이나 환경외력을 구하는 경우에는 가동해역의 해양환경 조건을 설계조건으로 취급하는 것이 일반적이며, 이러한 설계조건의 기준은 해당 해역의 바람, 파도, 조류의 결합으로 정의하며, 보통 설치지역에서 발생될 수 있는 최악의 환경요소 데이터를 사용한다. 또한, 통상적으로 계류안벽이 위치하는 곳은 일반적으로 정온해역 및 천해역이며, 정온한 천해역에서는 바람 및 조류에 의한 외력이 탁월하게 작용한다.

먼저 바람은 선박과 계류삭에 정적하중을 유발하며, 다음과 같은 2가지 방법들을 이용하여 계산한다. 첫 번째로 풍력이 일정하다고 가정하고 1분 평균풍속에 근거하여 계산한다. 둘째로 변동풍속이 정상성분(1시간동안 평균풍속)과 경험적인 돌풍(Wind Gust) 스펙트럼인 시간변동성분을 합산한 값이고 설계 풍속은 정수면 10미터에서 측정된 값을 기준으로 선정한다. 파도는 부체나 계류삭에 동적 하중을 유발한다. 바람이 일으키는 풍파가 주된 파도이며 풍파는 비규

칙적이므로 흔히 유의파가 설계파로 사용된다. 조류는 부체나 계류삭에 준 정적하중을 유발하며, 계류삭 설계에서는 조류가 주된 환경요소일 경우가 많다. 이는 여러 종류의 해류의 벡터합을 구하여 사용된다(류창혁, 1999).

1) 바람

선박에 영향을 주는 풍력은 선박의 수면상부 면적의 영향에 의하며, 선수풍은 면적이 작기 때문에 종방향력은 작고, 횡방향력은 면적이 크기 때문에 비교적 크다. 바람이 선박의 선수와 정횡사이의 사각에서 불면 선박의 종방향과 횡방향 모두 힘을 받고, 정횡이나 정면으로 불어오는 바람에 의한 힘보다 크다. 정선수미 및 정횡의 바람을 제외하고 풍력의 방향은 부는 방향과 선체의 작용점의 방향은 같지 않으므로 전방위 풍속을 다 고려하는 것이 바람직하다.

풍압력(Wind force) 식은 (4-4), (4-5), (4-6)과 같으며, 선박의 풍압력은 풍압면적과 풍속의 제곱에 비례한다. 풍압계수 C_{x_w} , C_{y_w} , C_{xy_w} 은 특정선박에 대한 풍동실험이나 수조실험에서 구하는 것이 바람직하나, 불가피할 경우 풍동실험이나 수조에서의 실험결과를 근거하여 풍항력계수의 계산식을 사용하여 구할 수 있다. 풍속 V_w 는 최대풍속(10분간 평균풍속)을 사용하며, 수면상의 선체 정면 투영면적 A_T 와 수면상의 선체 측면 투영면적 A_L 은 대상선박의 치수를 사용하는 것이 바람직하나, 표준선형에 대해서는 회귀식을 참고로 사용하여 구할 수 있다. 일반화물선 및 소형탱커선과 VLCC의 풍향과 화물적재량에 따른 풍항력계수는 Fig. 28과 같다(해양수산부, 2017b).

$$F_{x_w} = \frac{1}{2} C_{x_w} \cdot \rho_w \cdot V_w^2 \cdot A_T \quad (4-4)$$

$$F_{y_w} = \frac{1}{2} C_{y_w} \cdot \rho_w \cdot V_w^2 \cdot A_L \quad (4-5)$$

$$M_{xy_w} = \frac{1}{2} C_{xy_w} \cdot \rho_w \cdot V_w^2 \cdot A_L \cdot LBP \quad (4-6)$$

F_{x_w} : 풍하중 합력의 x방향 성분(kN)

F_{y_w} : 풍하중 합력의 y방향 성분(kN)

M_{xy_w} : 풍하중 합력의 선박 중심축 회전 모멘트(kN· m)

C_{x_w} : x방향의 풍항력 계수, C_{y_w} : y방향의 풍항력 계수

C_{xy_w} : 선박중심축 회전의 풍압모멘트 계수

ρ_w : 공기의 밀도 $\rho_w = 1.23 \times 10^{-3} (t/m^3)$, V_w : 풍속(m/s)

A_L : 수면상 선체 측면 투영면적(m^2), A_T : 수면상 선체 정면 투영면적(m^2)

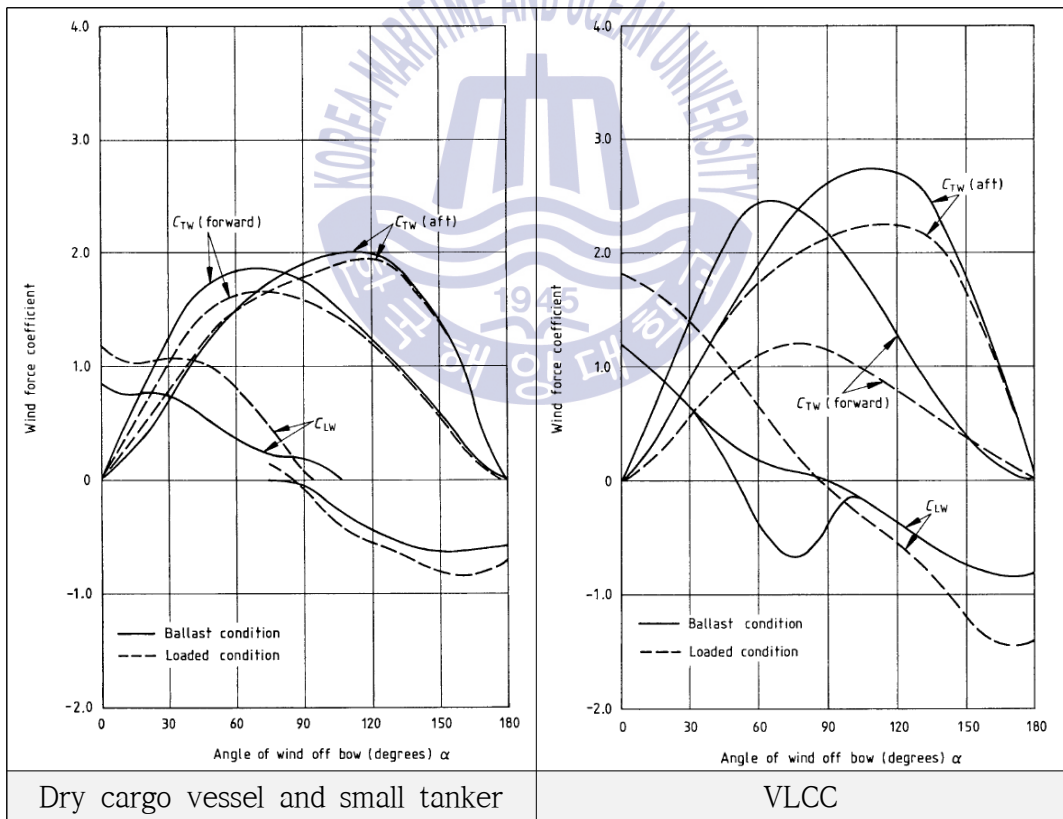


Fig. 28 Wind force coefficients for various ship

출처 : British Standard Institute



2) 파랑

파랑의 통계처리는 이상(異常) 파랑과 평상시(平常時) 파랑으로 구분하여 이에 적합한 분석방법을 사용한다. 이상시 파랑은 태풍, 폭풍 등에 의해 발생하는 고파랑의 장기간 자료의 극치통계분석을 통해 구하며, 평상시 파랑은 1년 이상의 연속된 파랑자료를 통계 처리하여 구한 파랑조건을 사용한다. 이상 파랑은 구조물의 설계파 산정과 이상시 항내정온도 검토에 이용되고, 평상시 파랑은 항내정온도 분석 및 항만가동일수 또는 작업일수를 산정하는 데 이용된다.

파랑 변형은 심해파가 파랑 자료를 필요로 하는 지점에 도달할 때까지의 변형이며, 천수변형, 굴절변형, 회절변형, 반사 및 쇄파 등에 의한 변형이다. 설계파는 파랑의 불규칙성을 충분히 고려하여 가능한 불규칙파를 이용한다(해양수산부, 2017b).

실제의 해상상태는 매우 불규칙적이어서 선박의 운동을 직접 관측하는 것은 매우 복잡하다. 그러므로 파고가 작다고 가정하여 불규칙적인 해상상태를 규칙적인 선형파들의 중첩으로 생각하여, 규칙파 중에서의 선체운동을 계산한 후 스펙트럼 해석을 통하여 불규칙파 중에서의 운동을 예측한다.

파랑 스펙트럼(Wave Spectrum)은 불규칙파의 파형을 무수한 주파수 및 파향의 성분파가 중첩된 것이라 가정하여 각 파도가 소유한 총 에너지량을 파랑 주파수에 따른 분포 곡선으로 표현한 것이다(해양수산부, 2017b). 기본 원리는 양의 x -방향으로 진행하는 불규칙 장파정파는 식 (4-7)과 같이 St. Denis와 Pierson의 중첩원리에 의하여 많은 개수의 규칙 성분파의 합으로 나타낼 수 있다(염덕준, 2012).

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(k_n x - w_n t + \epsilon_n) \quad (4-7)$$

여기서 각 성분 n 에 대하여,

ζ_{a_n} : 성분파의 진폭(m), w_n : 성분파의 원 주파수(rad/s)

k_n : 성분파의 파수(rad/m), ϵ_n : 성분파의 위상(rad)

한 지점에서 계측한 파형의 시간 변화 신호에 대해 후리에 급수 해석 결과는 공간 의존성을 가진 파수, k 에 대한 정보를 포함하고 있지 않으나 분산관계를 이용하여 원 주파수로부터 파수를 계산할 수 있다. 파형의 시간 변화 신호에 대한 후리에 급수는 각각의 원주파수, w_n 에 대하여 성분파의 진폭, ζ_{a_n} 과 위상, ϵ_n 의 정보를 제공한다. 따라서 충분한 개수의 후리에 급수를 취하면 전체 시간에 대한 기록을 정확하게 재생할 수 있다. 그러나 실제로 파형의 시간에 따른 변화 그 자체보다 주파수와 진폭으로 표현되는 통계적 정보를 아는 것으로 충분하다.

파랑 스펙트럼과 불규칙파의 관계는 Fig. 29와 같으며, 그림의 왼쪽 아래 부분에 있는 불규칙파의 시간 영역 변화는 후리에 급수 해석에 의하여 고유의 주파수, 진폭 및 위상을 갖는 많은 수의 성분 규칙파의 합으로 표현된다. 각각의 성분 규칙파로부터 $\frac{1}{2}\zeta_a^2(w)/\Delta w$ 값을 계산하여 원 주파수를 독립 변수로 하는 수직 평면상에 도시화한 것이 파 에너지 스펙트럼, $S_\zeta(w)$ 이며, 위상 정보는 스펙트럼으로 변환하는 과정에서 없어지게 된다(염덕준, 2012).

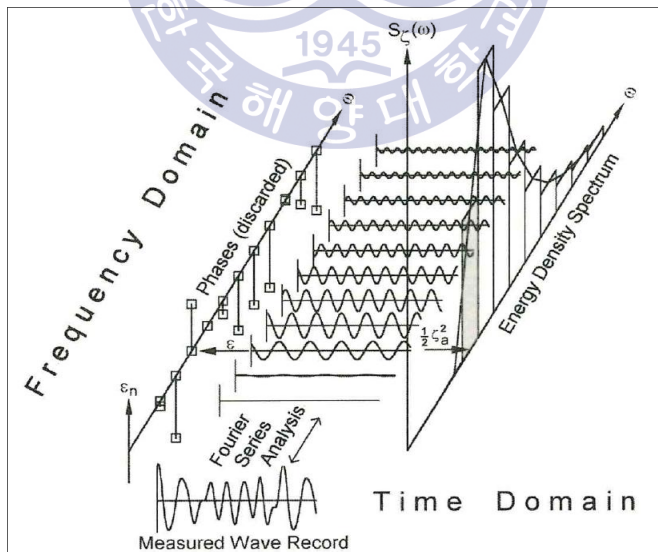


Fig. 29 Wave spectrum domain analysis

출처 : 선박의 운동과 조종

그러나 전 세계 해상상태는 기상의 변화에 따라서 지역적으로 시간적으로 변화하며 그에 따라서 파 스펙트럼도 지속적으로 변화한다. 또한, 유의파고의 크기 및 파에 포함되어 있는 에너지의 총량이 같더라도 주파수에 따른 에너지의 분포가 매우 달라서 파 주기 면에서 매우 다른 해상상태가 발생할 수도 있다. 이러한 다양성에도 불구하고 적절한 가정 하에서 해양파에 대한 표준 스펙트럼들을 제안하여 사용하고 있으며 그 중에서 대표적으로 Pierson-Moskowitz 스펙트럼, Bretschneider 스펙트럼, JONSWAP 스펙트럼이 있다. 파 스펙트럼의 수학적 식은 파고나 파 주기와 관련이 있는 물리량들을 중요 파라미터로 가지고 있다(염덕준, 2012). 본 연구는 유의파고와 특성주기의 변수로서 표현 가능한 Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 이용하여 불규칙 해상상태를 가정하였다.

가. Pierson-Moskowitz 스펙트럼

Pierson-Moskowitz 스펙트럼은 해면 위 19.5m 위치에서의 풍속을 유일한 매개변수로 하는 1-파라미터 스펙트럼으로 바람이 분 거리(fetch)와 시간(duration)이 충분히 큰 개방된 해역을 대표하는 표준 스펙트럼이며, 스펙트럼 식은 (4-8)과 같다(염덕준, 2012).

$$S(w) = \frac{\alpha g^2}{w^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{V_w} \right)^4 \right] \quad (4-8)$$

$S(w)$: w 를 독립변수로 하는 파 스펙트럼($cm^2 \cdot sec$)

α : 8.10×10^{-3} , β : 0.74

g : 중력가속도(cm/sec^2)

V_w : 해면 위 19.5m 지점의 풍속(cm/sec)

나. Bretschneider 스펙트럼

Bretschneider 스펙트럼은 파고와 파 주기를 매개변수로 하는 2-파라미터 스

펙트럼으로 특히 외해(open sea)에 적용할 수 있는 스펙트럼이며, 스펙트럼 식은 (4-9)와 같다(염덕준, 2012).

$$S_{\zeta}(w) = \frac{173 H_{1/3}^2}{T_1^4} w^{-5} \exp\left\{ \frac{-692}{T_1^4} w^{-4} \right\} \quad (4-9)$$

$S_{\zeta}(w)$: 원 주파수 w 를 독립변수로 하는 파 스펙트럼($cm^2 \cdot sec$)

w : 성분파의 원 주파수(rad/s)

$H_{1/3}$: 유의파고 (m), T_1 : 평균 도심 주기

이 스펙트럼은 1967년 제 2차 ISSC(International Ship Structure Congress)와 1969년 제 12차 ITTC(International Towing Tank Conference)에서 내항성 해석과 모형시험을 위한 표준 스펙트럼으로 채용되었으며 수정된 2-파라미터 Pierson-Moskowitz 스펙트럼, ISSC 스펙트럼 또는 ITTC 스펙트럼으로 불리기도 한다.

충분히 발달한 해상 상태에 대해 본래의 1-파라미터 Pierson-Moskowitz 스펙트럼이 식 (4-10)과 (4-11)과 같이 Bretschneider 스펙트럼의 정의에 따른 유의파와 특성 파 주기의 관계에 의하여 얻어질 수 있다(염덕준, 2012).

$$T_1 = 3.86 \sqrt{H_{1/3}} \quad (4-10)$$

$$T_2 = 3.56 \sqrt{H_{1/3}} \quad (4-11)$$

다. JONSWAP 스펙트럼

1968년과 1969년에 북해의 Sylt섬으로부터 100마일 떨어진 지점까지의 해역에서 집중적인 파랑 계측이 행해진 JONSWAP(Joint North South Wave Project) 프로젝트가 수행되었다. 계측 자료에 대한 해석 결과로부터 북해의 제한된(fetch-limited) 해역에 발생하는 풍하에 대한 스펙트럼 식을 (4-12)와 같이 유도하였다. JONSWAP 스펙트럼은 1984년 제 17차 ITTC에서 제한된 해역에서의 표준 스펙트럼으로 추천되었다(염덕준, 2012).

$$S_{\zeta}(w) = \frac{320 \cdot H_{1/3}^2}{T_p^4} w^{-5} \exp\left\{\frac{-1950}{T_p^4} w^{-4}\right\} \gamma^4 \quad (4-12)$$

$\gamma = 3.3$ (첨예도 계수)

$$A = \exp\left\{-\left(\frac{w}{w_p} - 1\right)^2\right\}$$

$$w_p = \frac{2\pi}{T_p} \text{ (스펙트럼 최대치에서의 원주파수)}$$

$\sigma =$ 원주파수의 스텝함수 : if $w < w_p$ than $\sigma = 0.07$
if $w > w_p$ than $\sigma = 0.09$

$\gamma^4 = 1.552$ 일 때 JONSWAP 스펙트럼은 Bretschneider 스펙트럼의 식과 동일하다. 유의파고 4m, 스펙트럼 최대치 주기가 각각 6초, 8초 및 10초인 3개의 해상상태에 대한 Bretschneider 스펙트럼과 JONSWAP 스펙트럼은 Fig. 30과 같다.

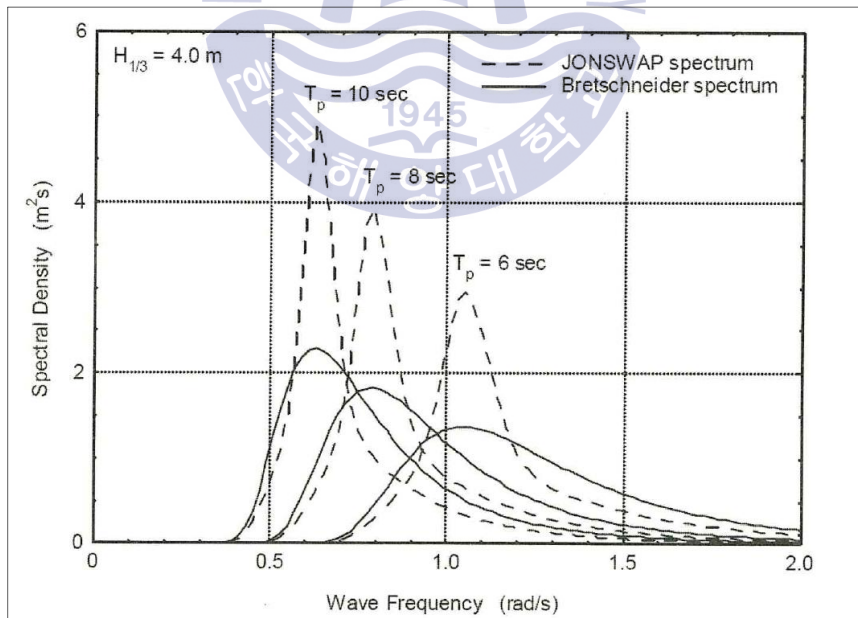


Fig. 30 Bretschneider spectrum and JONSWAP spectrum

출처 : 선박의 운동과 조종

3) 조위 및 조류 조건

일반적으로 선박이 계류할 수 있도록 안벽이 축조된 곳은 대부분 육지와 연결된 해안가로서 천해 해역이며, 이러한 천해 해역에서는 조류가 비교적 탁월하고, 외해(open sea)와 같은 곳에서는 조류력(Current force)과 함께 해류도 영향을 미치게 된다. 특히 대형선의 경우에 계류력에 있어서는 공선시에 조류의 영향보다 바람의 영향을 훨씬 많이 받고, 반면에 만재시에는 바람의 영향보다 조류가 계류력에 더 큰 영향을 미친다(김세원, 2000).

선박의 계류설비 배치를 결정할 때 풍력과 함께 조류력도 고려하여야 하며, 조류력의 변화는 풍력과 비슷하다. 그러나 조류력은 여유수심(UKC)의 영향이 크고, 터미널의 대부분은 조류와 같은 방향으로 설치하여 조류력의 영향을 최소화한다. 조류력 식은 (4-13), (4-14), (4-15)와 같으며, 선박의 조류력은 흘수와 조류속도의 제곱에 비례한다(OCIMF, 2008; 김세원 외, 2012).

$$F_{x_c} = \frac{1}{2} C_{x_c} \cdot \rho_c \cdot V_c^2 \cdot LBP \cdot T \quad (4-13)$$

$$F_{y_c} = \frac{1}{2} C_{y_c} \cdot \rho_c \cdot V_c^2 \cdot LBP \cdot T \quad (4-14)$$

$$M_{x_{y_c}} = \frac{1}{2} C_{x_{y_c}} \cdot \rho_c \cdot V_c^2 \cdot LBP^2 \cdot T \quad (4-15)$$

F_{x_c} : 조류력의 x방향 성분(kN), F_{y_c} : 조류력의 y방향 성분(kN)

$M_{x_{y_c}}$: 조류력의 선박 중심축 회전 모멘트(kN·m)

C_{x_c} : x방향의 조류력 계수, C_{y_c} : y방향의 조류력 계수

$C_{x_{y_c}}$: 선박중심축 회전의 조류모멘트 계수

ρ_c : 해수의 밀도 $\rho_c = 1.025(t/m^3)$

V_c : 조류속도(m/s), T : 흘수(m)

선종별 조류방향에 따른 조류력 계수는 Fig. 31과 같다.

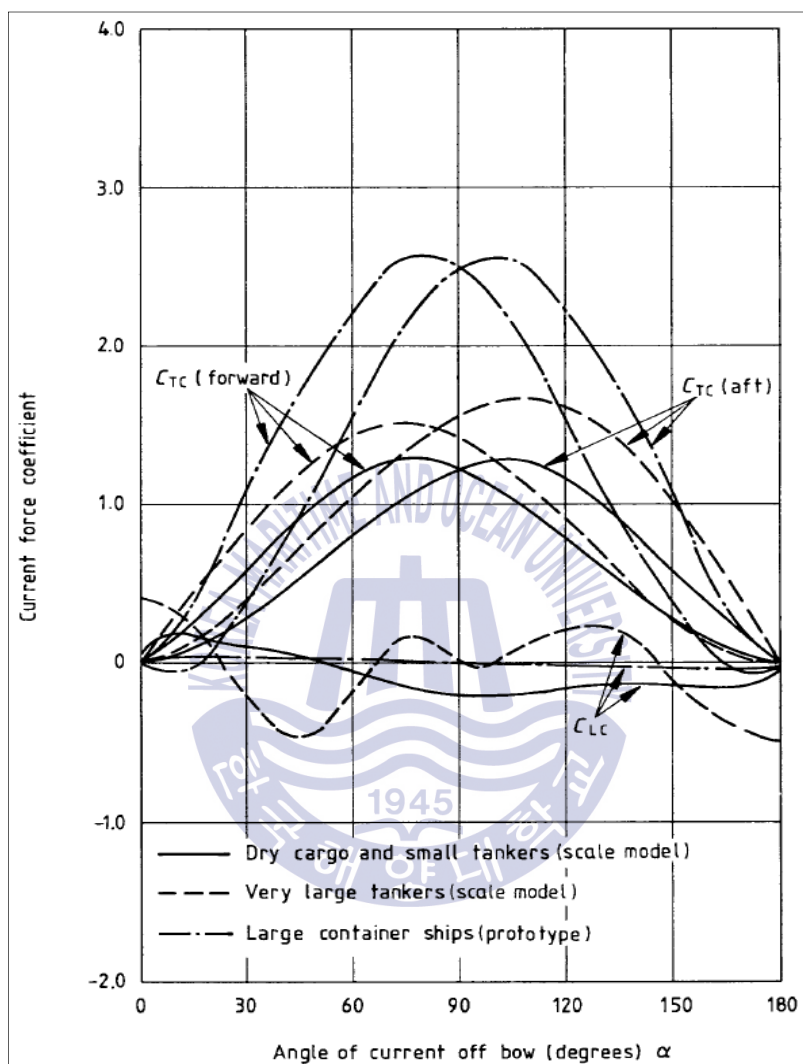


Fig. 31 Current drag force coefficients of all ships

출처 : British Standard Institute

4.1.3 계류설비 및 계류라인 배치

1) 부두 계류설비 배치

부두의 계류설비는 설계하는 부두에 접안예정인 대상선박 중 최대크기의 선박이 안전하게 계류할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 해당 부두에서 대상선박에 작용하는 환경외력의 크기를 계산하여 계류점의 위치와 최적의 계류라인의 개수를 결정하여야 한다.

계선주 설계시 접안선박의 계류라인에 균형있게 장력이 분산될 수 있도록 계선주의 위치는 접안선박의 종방향 중심(Center point)을 기준으로 가능한 대칭적으로 배치하여야 하며, 브레스트 라인의 계선주는 선박의 선수미선에 대하여 가능한 수직선에 가깝게 선박의 선수미 끝부근 지점에서 내어줄 수 있도록 설치되어야 한다. 또한, 충분한 계선주를 설치하여 부두의 허용범위 내에서 선박의 장력을 분산시킬 수 있도록 해야 하며, 부두의 마루높이는 계류라인과 부두의 수직각이 가능한 작도록 설계되어야 하며, 특히 돌핀부두 계류시 어떠한 경우에도 30° 를 넘지 않아야 한다(OCIMF, 2008; 김세원 외, 2012).

2) 선박 계류라인 배치

대상선박을 부두에 계류시 대상선박의 선종 및 크기에 따라 풍력, 파력 및 조류력 등의 환경외력 조건에서 계류력을 계산하여 계류설비의 위치, 크기, 수를 결정한다.

이론적으로 주어진 외력에 대항하기 위한 가장 효율적인 계류라인의 배치는 모든 계류라인을 외력과 동일한 방향으로 내어주고 선박의 종방향 중심선 상의 위치에 설치하여 마치 합성력과 저항력이 동일한 위치에서 하나로 작용하도록 하는 것이다. 그러나 이러한 형태의 시스템은 부두특성에 따라 서로 다른 외력의 방향과 계류점 위치의 상이함에 따라서 유연성을 갖고 적용시킬 수 없기 때문에 현실적으로 불가능하다. 그러므로 일반적으로 적용할 수 있는 계류형태는 어떤 방향의 환경외력에 대해서도 대처할 수 있는 보편적인 것이어야 하며, 그

러므로 이러한 힘들은 종방향과 횡방향의 구성요소로 분해하는 방법으로 접근하는 것이 최선의 방안이다.

이에 따라 각각의 계류라인에 장력을 효율적으로 분산시키기 위하여 선박의 계류라인은 선체길이 중앙과 좌현, 우현 기준으로 대칭이 되도록 해야 하며, 동일한 기능의 계류라인은 가급적 길이가 비슷하도록 배치한다.

일반적인 선박의 계류라인의 명칭은 Fig. 32와 같으며, 특히 선수·선미 브레스트 라인은 선박의 종방향 선수미선에 대해 가능한 수직방향으로 하고, 선박의 선수와 선미쪽으로 멀리 떨어지게 배치해야 한다. 스프링 라인은 가능한 선박의 종방향 선수미선과 평행한 방향이 되도록 해야 한다(OCIMF, 2008). 선수 헤드라인과 선미 스텐라인은 선박이 앞뒤(전후)로 이동하는 것을 방지하고 선박이 안벽기준선의 직각방향으로 이동하는 것을 지지하므로 안벽에 대하여 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 의 각도를 갖도록 하는 것이 좋다(해양수산부, 2017c).

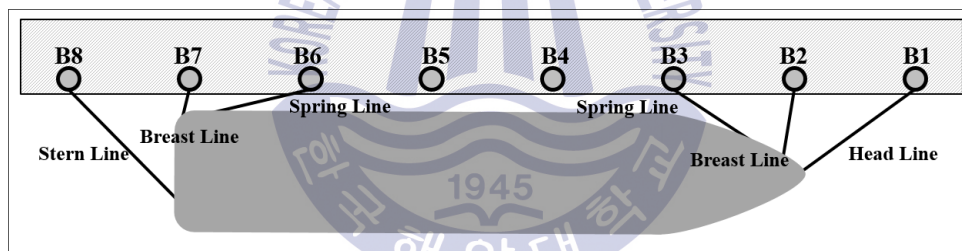


Fig. 32 Mooring line plan

3) 계류라인 수직각 한계

계류삭의 장력은 부두와 계류라인으로 이루어진 수직각과 계류라인과 선박의 선수미선이 이루는 수평각에 의해 영향을 받는다. 그러므로 선박이 환경외력에 대처하기 위한 가장 효과적인 방법은 계류라인의 방향과 계류라인에 걸리는 장력의 방향이 일치하도록 배치하는 것이며, 선박에 작용하는 힘과 그 힘을 지탱하는 요소인 계류라인과의 사이각이 커질수록 계류라인의 저항력은 적어진다. 예를 들어 계류라인의 수직각이 25° 일 경우 풍력에 대한 계류삭의 장력 효율

성은 91%이며, 계류라인 수직각이 45° 일 경우 풍력에 대한 계류선의 장력 효율성은 71%이다(OCIMF, 2008). 이에 따라 계류라인의 수평각과 수직각은 최소로 유지하는 것이 좋으며, 수평각은 계선주의 위치에 따라 달라지고, 수직각은 대상부두의 마루높이와 대상해역의 조위에 따라 달라진다.

이에 따라 국제정유사해운포럼(Oil Companies International Marine Forum, OCIMF)에서는 Fig. 33과 같이 모든 계류라인이 25° 이하의 수직각을 유지하도록 요구하고 있다. 또한, 항만 및 어항 설계기준에서는 Fig. 34와 같이 이상적인 계류시스템의 계류라인의 수직각은 25° 를 추천하며, 돌핀 계류시에는 어떠한 경우에도 30° 를 초과하지 않도록 규정한다.

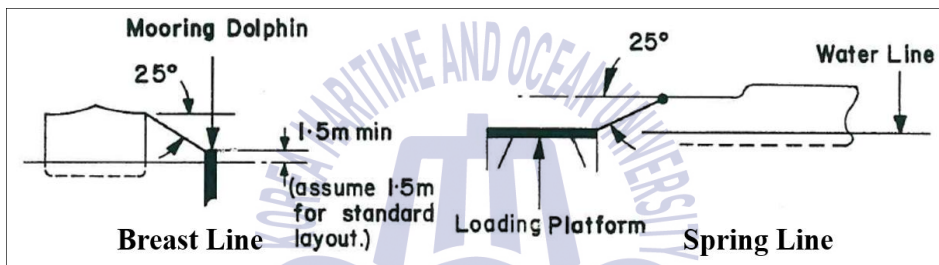


Fig. 33 Criteria on the vertical angle of mooring line(OCIMF)

출처 : OCIMF

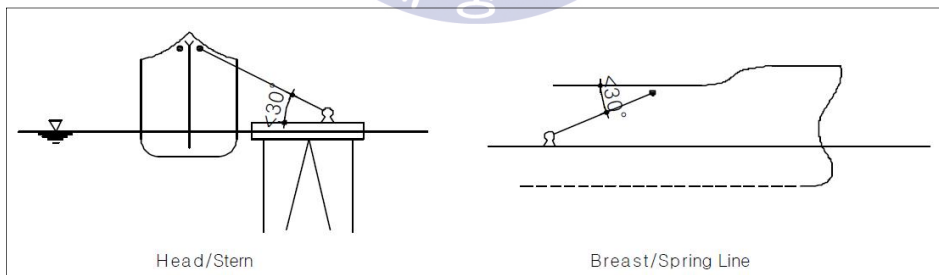


Fig. 34 Criteria on the vertical angle of mooring line(Harbour Design Criteria in Korea)

출처 : 해양수산부

4.1.4 선종별 그룹화 및 특징 분석

접안선박의 선종별로 마루높이에 따른 계류요소 민감도를 분석하기 위해 항만 및 어항 설계기준과 PIANC 기준을 참고하여 선종별로 분류된 대상선박의 주요 제원을 동일한 톤수로 분류하고, 그 특징에 따라 4개의 선박 그룹으로 구분하였다.

1) 톤수별 선박 제원 분석

항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 선박 주요제원은 전장, 수선간장, 형폭, 만재흘수이며, PIANC 기준에서 제시하는 선박의 주요제원은 배수량, 전장, 수선간장, 형폭, 흘수, 방형계수, 풍압면적이므로 더 정확한 선종별 그룹화를 위하여 PIANC 기준을 활용하였다. 이에 따라 PIANC 기준에서 제시한 총톤수 및 재화중량톤수에 따른 선박의 배수량(Δ), 전장(L.O.A), 수선간장(L.B.P), 폭(B), 흘수(T), 방형계수(C_b), 수면상 측면 풍압면적(A_L)을 Table 13과 같이 30만톤급, 20만톤급, 10만톤급, 7만톤급, 5만톤급으로 분류하여 동일 톤수에서 선종별 제원의 특성을 파악하였으며, 적용 톤수는 크루즈선과 PCTC는 총톤수이고, 탱커선, 벌크선, 컨테이너선, LNG선, LPG선은 재화중량톤수이다(PIANC, 2014).

분석대상 선종은 탱커선, 벌크선, 컨테이너선, 크루즈선, PCTC, LNG선, LPG선이며, LNG(P)는 Prismatic형 LNG선, LNG(M)은 Moss형 LNG선을 의미한다.

Table 13 Group of ship depending on the DWT/GT(1)

Ship's type	DWT/GT (ton)	Δ (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Max. A_L Windage(m^2)
Tanker	300,000	365,000	350	330	63	21	0.82	8,600
Bulker		350,000	350	333	56	22	0.84	8,200
Tanker	200,000	246,000	310	294	55	19	0.80	6,800
Bulker		236,000	315	300	49	19	0.83	6,900
Container		260,000	400	385	59	17	0.68	12,000
Cruise		105,000	353	327	51	9.1	0.66	15,400

Table 13 Group of ship depending on the DWT/GT(2)

Ship's type	DWT/GT (ton)	Δ (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Max. A_L Windage(m^2)
Tanker	100,000	125,000	250	236	43	15	0.80	4,500
Bulker		121,000	255	242	39	15	0.82	4,800
Container		140,000	326	310	43	15	0.71	7,500
Cruise		53,500	295	273	34	8.4	0.67	10,800
LNG(P)		144,640	318	306	51	12	0.80	7,870
Tanker	70,000	90,000	225	213	38	14	0.80	3,700
Bulker		86,000	230	219	35	13	0.81	3,850
Container		100,000	280	266	42	14	0.64	6,100
Cruise		38,000	265	225	32	7.8	0.66	8,700
LNG(P)		85,000	268	252	40	11	0.70	5,820
LNG(M)		111,700	284	270	47	11	0.75	8,560
PCTC		52,000	228	210	32	11	0.66	6,900
Tanker	50,000	66,000	210	200	32	13	0.79	3,000
Bulker		62,000	208	198	31	12	0.79	3,150
Container		68,000	267	253	32	13	0.65	4,700
Cruise		29,000	232	212	28	7.4	0.64	7,000
LNG(P)		56,500	244	228	34	9.5	0.74	4,500
LNG(M)		71,000	249	237	40	11	0.69	6,000
LPG		80,000	248	238	39	13	0.65	5,800
PCTC		38,200	201	185	32	10	0.60	5,400

출처 : PIANC

재화중량톤수 30만톤급, 20만톤급, 10만톤급의 탱커선과 벌크선의 제원은 Table 14와 같으며, 이를 분석하면 각 톤수별로 두 선종의 전장, 수선간장, 폭, 흘수, 방형계수, 풍압면적이 거의 유사하여 탱커선과 벌크선을 동일한 그룹으로 분류하였다.

Table 14 Comparison of dimension on tanker and bulker

Ship's type	DWT (ton)	△ (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Max. A_L Windage(m^2)
Tanker	300,000	365,000	350	330	63	21	0.82	8,600
Bulker		350,000	350	333	56	22	0.84	8,200
Tanker	200,000	246,000	310	294	55	19	0.80	6,800
Bulker		236,000	315	300	49	19	0.83	6,900
Tanker	100,000	125,000	250	236	43	15	0.80	4,500
Bulker		121,000	255	242	39	15	0.82	4,800

또한, Table 15와 같이 크루즈선과 PCTC는 보통 총톤수를 기준톤수로 사용하며, 타선종과 비교하였을 때 재화중량톤수에 비해 총톤수가 크다. 또한, 풍압면적은 크루즈선 $8,200m^2$, PCTC $6,900m^2$ 으로 비교적 큰 편이다. 또한, 두 선종 모두 폭 32m, 방형계수 0.66으로 동일하여 전장과 흘수에 차이가 있으나 배수량, 풍압면적, 방형계수가 유사하여 동일 그룹으로 분류하였다.

Table 15 Comparison of dimension on Cruise and PCTC

Ship's type	GT (ton)	△ (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Max. A_L Windage(m^2)
Cruise	70,000	38,000	265	225	32	7.8	0.66	8,700
PCTC		52,000	228	210	32	11	0.66	6,900
Cruise	50,000	29,000	232	212	28	7.4	0.64	7,000
PCTC		38,200	201	185	32	10	0.60	5,400

Table 16의 재화중량톤수 5만톤급 선박 중 LNG선과 LPG선의 주요제원을 보면, Prismatic LNG(LNG(P))와 Moss LNG(LNG(M)), LPG선의 배수량은 각각 56,500ton, 71,000ton, 80,000ton으로 상이하나 전장, 수선간장, 폭은 오차범위 5% 정도로 거의 유사하며, 특히 LNG(M)과 LPG선의 제원과 풍압면적은 오차범위 4% 내외로 거의 유사하여 동일 그룹으로 분류하였다.

Table 16 Comparison of dimension on LNG and LPG ship

Ship's type	DWT (ton)	Δ (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Max. A_L Windage(m^2)
LNG(P)	70,000	85,000	268	252	40	11	0.70	5,820
LNG(M)		111,700	284	270	47	11	0.75	8,560
LNG(P)	50,000	56,500	244	228	34	9.5	0.74	4,500
LNG(M)		71,000	249	237	40	11	0.69	6,000
LPG		80,000	248	238	39	13	0.65	5,800

Table 17과 같이 컨테이너선은 동일 재화중량톤수에서 전장, 수선간장 및 폭의 치수가 가장 크며, 갑판상 화물의 적재량에 따라 풍압면적이 유동적인 특징이 있으므로 하나의 그룹으로 분류하였다.

Table 17 Comparison of container ship's dimension depending on the DWT

Ship's type	DWT (ton)	Δ (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Max. A_L Windage(m^2)
Container	200,000	260,000	400	385	59	16.5	0.68	10,700
	100,000	140,000	326	310	42.8	14.5	0.71	6,900
	70,000	100,000	280	266	41.8	13.8	0.64	5,800
	50,000	68,000	267	253	32.2	12.5	0.65	4,500

2) 선종별 그룹화 및 특성 분석

선박 제원을 기준으로 구분한 선박 그룹은 A, B, C, D로 총 4개의 그룹으로 나누었으며, A그룹은 크루즈선, 여객선, PCTC, B그룹은 컨테이너선으로 구분하였다. C그룹은 벌크선과 탱커선, D그룹은 LNG선과 LPG선으로 구분하였으며, 각 그룹별 특성은 Table 18과 같으며, Fig. 35는 각 그룹의 선박 사진이다.

Table 18 Characteristics of ship's group

Group	Type	Characteristics
A	Cruise, Passenger ship, PCC, PCTC	<ul style="list-style-type: none"> • Embarkation & loading facilities(ramp, gangway) are required. • Variations in ship draft due to loading condition are relatively small. • The windage area is relatively static and large.
B	Container ship	<ul style="list-style-type: none"> • The windage area varies with the loading condition. • Affected by vertical height of gantry crane. • Sizes of ship keep getting bigger.
C	Bulk Carrier, Oil Tanker	<ul style="list-style-type: none"> • The freeboard and the windage area is various with the loading condition. • The draft is larger compared with other ships of the same tonnage at full load. • Positions of dockside cranes and loading arms should be considered when berthing.
D	LNG Carrier, LPG Carrier	<ul style="list-style-type: none"> • The ship specification and the windage area are larger compared with other ships of the same tonnage. • Positions of the manifold and loading arms should be considered when ship is moored.

A그룹은 크루즈선, 여객선, PCTC로 화물적재량에 따른 흘수 변화가 적어 풍압면적이 비교적 고정적이며 큰 편이이므로 풍압력에 의한 선체운동량이 타선종에 비해 크다. 또한 자동차선은 선박의 하역설비인 램프, 크루즈선과 여객선은 여객 승하선 설비인 갱웨이 설치가 필수적이므로 부두 마루높이와 대상선박의 승하선·하역 구조물의 연계성이 중요하다.

B그룹은 컨테이너선으로 갑판에 컨테이너 선적을 하므로 화물적재량에 따라 풍압면적이 유동적인 특성이 있다. 또한, 하역 작업시 육상의 크레인을 사용하므로 육상 크레인의 수직높이에 영향을 받으며, 부두 마루높이에 따라 육상 크레인의 최대 높이가 달라질 수 있다. 선박의 초대형화가 가장 활발히 이루어지

는 선종으로 대형화에 따른 마루높이의 상향이 필요한 그룹이다.

C그룹은 벌크선 및 유조선으로 선박 대형화가 활발히 이루어져 재화중량톤수 기준으로 모든 선종 중 가장 큰 제원의 선박이 있는 그룹이다. 화물적재량에 따라 흘수, 건현 높이 및 풍압면적이 매우 유동적이며, 만재시 동일 톤수의 타 선종에 비해 흘수가 큰 편이다. 또한 동일 재화중량톤수의 타선종에 비해 비교적 방형계수와 만재흘수가 크다.

D그룹은 LPG선, LNG선으로 동일 재화중량톤수의 타선종과 비교하였을 때 선박의 제원과 풍압면적이 컨테이너선 다음으로 비교적 크며, 접안시 본선의 매니폴더 위치와 육상 로딩암 위치를 고려해야 한다.

Group	Photo of ships	
A		
B		
C		
D		

Fig. 35 Photo of ship on each group

출처 : www.google.com

선박의 특성에 따라 분류한 4개의 선박 그룹의 마루높이에 따른 민감도 분석을 위해 각 그룹에서 대상선박을 선정하였다. 대상선박의 제원은 국내 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 선종 및 크기에 따른 선박 제원을 참고하여 선정하였으며, 이는 일본 국토기술정책종합연구소 자료 및 일본선박명세서의 자료를 참고하여 제시된 자료이다(해양수산부, 2017b).

대상선박의 톤수는 선박 대형화를 고려하여 10만톤급으로 설정하였으며, 항만 및 어항 설계기준에서 제시하고 있는 선종별 적용 톤수를 그대로 사용하였다. 이에 따라 A그룹인 크루즈선과 D그룹인 LNG선은 총톤수 10만톤급 선박을 대상선박으로 선정하였고, B그룹인 컨테이너선과 C그룹인 벌크선은 재화중량톤수 10만톤급 선박을 대상선박으로 선정하였다. Table 19는 국내 항만 및 어항 설계기준에서 제시한 10만톤급 선박의 전장, 수선간장, 폭, 만재흘수이며, 이를 참고하여 대상선박을 모델링 하였다.

Table 19 Dimension of 100,000ton ship by Harbour Design Criteria in Korea

Group	Ship's type	Size (ton)	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)
A	Cruise	GT 100,000	324	281	32.3	8.1
B	Container	DWT 100,000	350	335	43.0	14.7
C	Bulker		259	247	39.8	15.1
D	LNG	GT 100,000	294	281	45.4	12.1

출처 : 해양수산부

4.2 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가

본 계류안전성 수치 시뮬레이션 평가를 위해 대상선박, 부두 및 계류배치, 마루높이, 환경외력 조건을 설정하였다. 대상선박은 4.3 절의 선박 그룹화 및 대상선박 선정에 따라 설정하였으며, 부두의 계류시스템은 계류안전성 평가 결과의 일반화를 위해 항만 및 어항 설계기준상 각 계류시스템의 배치 기준에 따라 설계하였다. 마루높이는 총 4개의 조건으로 설정하였으며, 환경외력은 마루높이에 따른 계류요소의 민감도를 측정할 수 있도록 풍속, 풍향 변화에 따라 9개 조건으로 설정하였다.

4.2.1 대상선박 모델링

선박 특성에 따라 분류한 각 선박 그룹에서 10만톤급 대상선박을 선정하여 Table 20과 같이 선박 제원을 설정하였으며, 화물 적재량 조건은 가장 흘수가 적고, 수면상의 면적이 가장 큰 경하상태를 설정하였다. 경하상태의 흘수는 실제 대상선박의 경하흘수를 고려하여 8.0m로 모델링하였다.

Table 20 Dimension of target ship

Group	Ship's type	L.O.A (m)	L.B.P (m)	B (m)	T (m)
A	Cruise	324	281	32.3	8.0
B	Container	350	335	43.0	8.0
C	Bulker	259	247	39.8	8.0
D	LNG	294	281	45.4	8.0

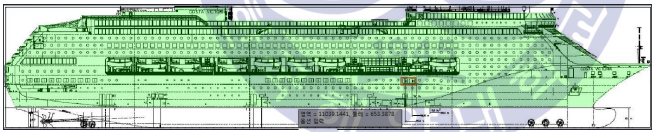

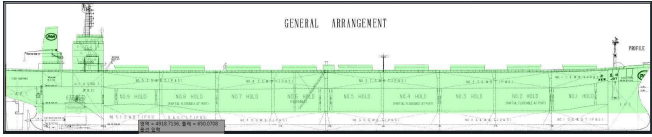
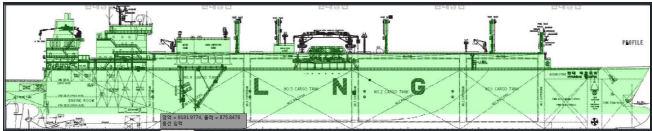
각 대상선박의 풍압면적은 환경외력 조건인 풍압력에 의해 영향을 받는 수면상부의 면적을 의미하며, 풍압력에 따른 대상선박의 계류안전성 변화에 직접적인 영향을 줄 수 있는 요소이므로, 정확한 모델링이 필요하다.

선박에 영향을 주는 풍압력은 선박의 수면상부 면적에 의하여 결정되며, 풍

향이 선수방향일 경우 수면상부의 면적이 작으므로 선박에 미치는 종방향력은 작고, 풍향이 정횡방향일 경우 수면상부의 면적이 크므로 선박에 미치는 횡방향력은 비교적 크다. 또한 바람이 접안선박의 선수방향과 정횡방향 사이의 각도에서 불어오면 종방향과 횡방향에 모두 힘을 받게 되며, 정횡으로 불어오는 바람에 의한 힘보다 작다(OCIMF, 2008).

대상선박의 10만톤급 GA를 참조하여 Table 21과 같이 경하상태의 풍압면적을 계산하였다. 계산 결과와 PIANC 기준에서 제시한 선종 및 톤수별 최대 풍압면적 값과 비교하면, 계산결과가 PIANC 기준보다 대체적으로 크고 그 차이는 크루즈선 약 2.2%, 컨테이너선 약 0.9%, 벌크선 2.4%, LNG선 약 0.4% 정도이다.

Table 21 Longitudinal windage area of target ship

Group	Longitudinal windage area(A_L)	PIANC Guidelines (m^2)	Computed Result (m^2)
A		10,800	11,039
B		6,900	6,964
C		4,800	4,919
D		7,870	7,904

4.2.2 계류시스템 모델링

대상부두 모델링 요건인 선석길이 및 계류시스템의 배치는 항만 및 어항 설계기준에서 선종 및 톤수별로 규정한 기준에 따라 모델링하였다. 계류형태는 선석길이, 계류시스템 모델링을 고려하여 각 대상선박의 일반적인 배치방법으로 모델링하였다.

본 계류안전성 수치 시뮬레이션의 대상부두는 안벽형태로 설정하였으며, 이는 바람이 부두에서 선박 쪽으로 불 때 마루높이 변화에 따른 대상선박의 풍압면적 변화량이 크기 때문이다. 실제로 B그룹의 탱커선이나 D그룹의 LNG선, LPG선은 돌핀 형태의 부두에서 계류되는 경우가 많으나, 돌핀 계류는 마루높이 변화에 따른 풍압면적의 차이가 미미하기 때문에 본 시뮬레이션에서 제외하였다.

1) 선석길이

선석의 길이는 대상선박이 특별히 정해진 경우, 정해진 선박의 전장에 선수 및 선미 계류라인에 의한 선박계류에 필요한 길이를 더한 수치를 표준으로 한다. 선석길이는 단독이용을 전제로 하여 선박의 전장에 선수 헤드라인과 선미 스텐라인에 필요한 길이를 더한 값을 기본으로 한다. 선박이 횡접안하여 계류할 때에는 선수 헤드라인, 선미 스텐라인, 브레스트라인, 스프링라인 등이 필요하며, 선수 헤드라인과 선미 스텐라인은 선박이 전후로 이동하는 것을 방지하고 선박이 안벽기준선의 직각방향으로 이동하는 것을 지지하므로 안벽에 대하여 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 의 각도로 배치될 수 있도록 선석의 길이가 설정되어 있다(해양수산부, 2017c).

이에 따라 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 각 대상선박 선종 및 톤수에 따른 선석길이와 대상선박의 전장은 Table 22와 같다. 각 선석길이와 대상선박 전장의 차이를 보면, 크루즈선은 전장의 1.14배, 컨테이너선은 전장의 1.14배, 벌크선은 전장의 1.27배, LNG선은 전장의 1.22배이다.

Table 22 Comparison between length of pier and L.O.A

Group	Ship's type	Length of pier (m)	L.O.A (m)	Length of pier / L.O.A
A	Cruise	370	324	1.14
B	Container	400	350	1.14
C	Bulker	330	259	1.27
D	LNG	360	294	1.22

2) 계선주

계선주에 작용하는 견인력은 계류라인의 과단력, 계류시설이 설치되는 지점의 기상·해상조건, 선박의 제원 등을 근거로 하여 필요에 따라 접안 중의 선박에 의한 힘, 계류 중의 선박의 풍압력, 동요에 의한 힘을 고려하여 계산하는 것이 바람직하다.

직주는 폭풍 시에 선박을 계류하기 위하여 선석 양단에 수제선에서 되도록 멀리 설치하고, 곡주는 평상시의 선박의 계류나 이·접안에 사용할 수 있도록 선석의 수제선 부근에 배치한다.

곡주에 작용하는 견인력은 선수미가 선축과 25° 이상의 방향에서 당기는 것으로 하고, 경하상태에 대해서도 곡주가 15m/s의 풍속까지 계류할 수 있도록 선박에 작용하는 풍압력에서 구한 것이다. 이는 총톤수 5,000톤 이하의 선박에 대한 계류라인의 1줄의 절단강도, 총톤수 5,000톤 이상의 선박에 계류라인 2줄의 절단강도에 상당하며, 견인력의 산정은 풍압력 외에 선축방향에 2노트, 선축 직각방향에 0.6노트의 유속이 고려되어 있다.

이에 따라 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 각 대상선박의 톤수에 따른 곡주의 배치 및 견인력은 Table 23과 같다(해양수산부, 2017c).

Table 23 Load, interval and number of Bollard

Gross tonnage of design ship (ton)	Max. Load of bollard (ton)	Max. interval between bollards (m)	Min. number of installation per berth (unit)
200 ~ 500	15	10~15	4
500 ~ 1,000	25		
1,000 ~ 2,000	25		
2,000 ~ 3,000	35	15	5
3,000 ~ 5,000	35		
5,000 ~ 10,000	50	20	11
10,000 ~ 20,000	70		
20,000 ~ 50,000	100	20	16
50,000 ~ 100,000	100	20	20
100,000 ~ 150,000	150	22	21
150,000 ~ 200,000	150	22	22
200,000 ~ 250,000	200	22	23

출처 : 해양수산부

여기서 계선주 기준은 대상선박의 총톤수이므로 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 선종별 재화중량톤수와 총톤수를 비교하여 그 설계기준을 설정하여야 한다. 우리나라 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 선종별 재화중량톤수와 총톤수의 관계는 다음과 같다. 화물선 GT = 0.529DWT, 컨테이너선 GT = 0.882DWT, 유조선 GT = 0.535DWT, RO/RO선 GT = 1.780DWT, 자동차전용선 GT = 2.721DWT, LPG선 GT = 0.845DWT, LNG선 GT = 1.370DWT, 여객선 GT = 8.939DWT으로, 이에 따른 대상선박의 GT 및 DWT와 이에 따른 곡주의 최대 견인력 및 곡주간 간격은 Table 24와 같다(해양수산부, 2017b).

이에 따라, A와 D그룹의 곡주 간격은 22m 이하여야 하므로, 모든 대상선박의 계선주 간격은 가장 일반적인 거리(interval)인 20m로 설정하고, A와 D그룹의 계선주 견인력은 150톤, B와 C그룹의 계선주 견인력은 100톤으로 설정하였다.

Table 24 Selection of bollard by ship's group

Group	Ship's type	GT (ton)	DWT (ton)	Max. Load of bollard (ton)	Interval between bollards (m)
A	Cruise	100,000	11,187	150	20
B	Container	88,200	100,000	100	20
C	Bulker	52,900	100,000	100	20
D	LNG	100,000	73,000	150	20

3) 방충재

선체와 안벽사이에는 선박의 접안 시와 계류 중에 파랑이나 바람에 의한 동요 시 접안력 및 마찰력이 작용하며, 이때 선체 및 구조물의 손상을 방지하기 위하여 안벽에 방충설비를 한다. 방충재의 종류는 안벽구조의 특성 및 이용선박, 계류 중인 선박의 동요 및 접안각도 등 선박의 접안상황, 선박의 접안 시 발생하는 방충재 반력이 안벽의 구조에 주는 영향 등을 고려하여 선정해야 하며, 일반적으로 방충재의 폭은 5~20m로 설정한다(해양수산부, 2017c).

본 시나리오에서는 대형선 접안 부두에서 주로 사용되는 Cell Type, 1,400H×1,600φ×2 방충재를 20m 간격으로 설치하였으며, 방충재 특성 및 반력은 Table 25와 같다. Cell Type 방충재의 특성곡선은 Fig. 36과 같으며, Cell Type 방충재 설치모습은 Fig. 37과 같다.

Table 25 Characteristics of fender

Type	Specification	Grade	Interval between fender (m)	Rated Deflection	
				Reaction Force (Ton)	Energy Absorption (Ton-M)
Cell	1,400H×1,600φ×2	RH	20	147.0	93.0

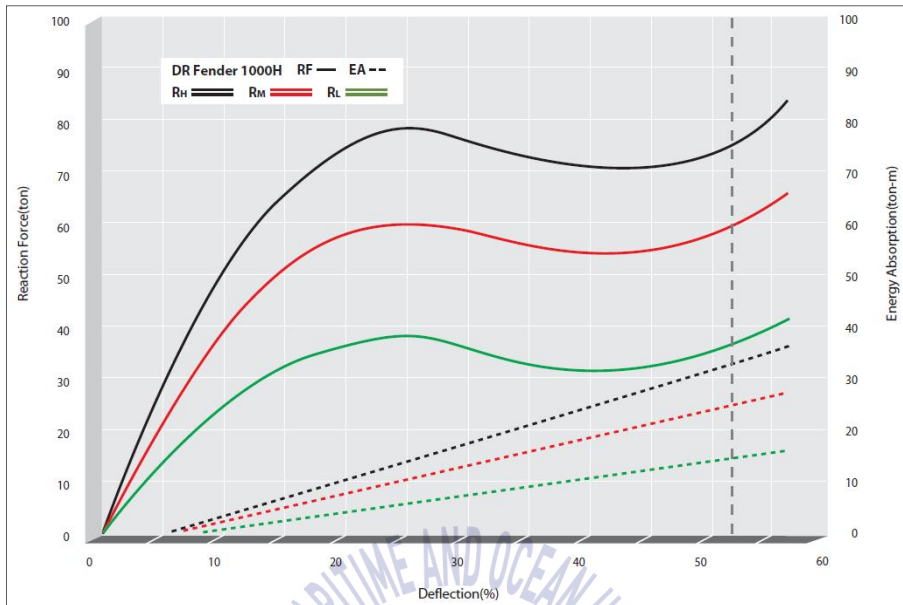


Fig. 36 Characteristic curve of fender

출처 : www.google.com



Fig. 37 Cell type fender

출처 : www.google.com

4) 계류형태

항만 및 어항 설계기준에 따라 선석의 길이, 계선주, 방충재를 선정하고 각 대상선박의 계류형태를 설정한다. 계류형태는 본 논문 4.1.3절의 항만 및 어항 설계기준 및 OCIMF의 Mooring Equipment Guidelines의 계류형태 권고사항을 기반으로 설정하였다.

A그룹인 크루즈선의 계류시스템 배치는 Table 26과 같고, 계류삭 배치는 선수 헤드라인 4개, 선수 브레스트라인 2개, 선수 스프링라인 2개, 선미 스프링라인 2개, 선미 브레스트라인 2개, 선미 스텐라인 4개로 선수 4-2-2 / 선미 2-2-4 배치이며, 총 16개의 계류라인이 선박을 계류하고 있다. 이는 일반적으로 대형 크루즈선은 브레스트라인을 필수적으로 사용하고 있으며, 상선의 4-2 / 2-4 배치에 브레스트 라인을 선수와 선미에 추가한 형태이다. 이 때 선수 헤드라인의 접안면과 수평각은 44~49° 이며, 라인길이는 32.4~38.5m이고, 선미 스텐라인의 접안면과 수평각은 35~54° 이며 라인길이는 30.5~41.4m이다.

Table 26 Mooring arrangement of cruise ship

Category		Total number	Each number
Mooring line	Bow	Head	L1, L2, L3, L4
		Breast	L5, L6
		Spring	L7, L8
	Stern	Spring	L9, L10
		Breast	L11, L12
		Stern	L13, L14, L15, L16
Bollard	Bow	3	B1, B2, B3
	Stern	3	B4, B5, B6
Fender	Total	16	F1 ~ F16

B그룹인 컨테이너선의 계류시스템 배치는 Table 27과 같고, 계류삭 배치 일반적인 컨테이너선의 계류라인 배치로 이는 선수 헤드라인 4개, 선수 스프링라인 2개, 선미 스프링라인 2개, 선미 스텐라인 4개로 선수 4-2 / 선미 2-4 배치이며, 총 12개의 계류라인이 선박을 계류하고 있다. 선수 헤드라인의 접안선과 수평각은 37~48°이며 라인길이는 43.0~49.9m이고, 선미 스텐라인의 접안선과 수평각은 31~53°이며 라인길이는 36.3~49.8m이다.

Table 27 Mooring arrangement of container ship

Category		Total number	Each number
Mooring line	Bow	Head	4
		Breast	-
		Spring	2
	Stern	Spring	2
		Breast	-
		Stern	4
Bollard	Bow	2	
	Stern	2	
Fender	Total	16	

C그룹인 벌크선의 계류시스템 배치는 Table 28과 같고, 계류삭 배치는 선수 헤드라인 4개, 선수 스프링라인 2개, 선미 스프링라인 2개, 선미 스텐라인 4개로 선수 4-2 / 선미 2-4 배치이며, 총 12개의 계류라인이 선박을 계류하고 있다. 선수 헤드라인의 접안선과 수평각은 31~44°이며, 라인길이는 43.1~49.1m이고, 선미 스텐라인의 접안선과 수평각은 26~45°이며 라인길이는 42.1~51.6m이다.

Table 28 Mooring arrangement of bulker

Category		Total number	Each number
Mooring line	Bow	Head	L1, L2, L3, L4
		Breast	-
		Spring	L5, L6
	Stern	Spring	L7, L8
		Breast	-
		Stern	L9, L10, L11, L12
Bollard	Bow	2	B1, B2
	Stern	2	B3, B4
Fender	Total	13	F1 ~ F13

D그룹인 LNG선의 계류시스템 배치는 Table 29와 같고, 계류삭 배치는 선수 헤드라인 4개, 선수 스프링라인 2개, 선미 스프링라인 2개, 선미 스텐라인 4개로 4-2 / 2-4 배치이며, 총 12개의 계류라인이 선박을 계류하고 있다. 선수 헤드라인의 접안선과 수평각은 29~45° 이며, 그 길이는 46.1~53.1m이고, 선미 스텐라인의 접안선과 수평각은 26~46° 이며 그 길이는 42.4~53.9m이다.

LNG선의 경우 보통 돌핀형태의 부두에 계류가 많으나, 본 연구의 시뮬레이션 대상부두는 바람이 부두에서 선박 쪽으로 불 때 마루높이 변화에 따른 계류요소 민감도 분석을 위해 모든 대상선박을 안벽형태로 모델링하였다. Fig. 38은 네덜란드 로테르담항구에서 안벽형태의 LNG 터미널에 계류한 선박이다.

Table 29 Mooring arrangement of LNG ship

Category		Total number	Each number
Mooring line	Bow	Head	L1, L2, L3, L4
		Breast	-
		Spring	L5, L6
	Stern	Spring	L7, L8
		Breast	-
		Stern	L9, L10, L11, L12
Bollard	Bow	2	B1, B2
	Stern	2	B3, B4
Fender	Total	14	F1 ~ F14



Fig. 38 LNG carrier berthing in fixed wharf

출처 : Quayquip

5) 계류삭

선박의 계선설비는 선박의 크기에 따라서 적절한 용량을 가진 것으로 결정하기 위해 선박설비규정에 정하여져 있는 의장수(Equipment number, EN)에 따라서 결정하며, 이것은 국제적으로 적용되는 국제통일규칙에 의하여 단일화 되어 있다. 의장수에 따라 계류라인의 수, 길이, 파단력이 결정되며, 의장수는 식 (4-16)과 같이 하기만재흘수선(Summer load waterline)에 대한 형배수량(moulded displacement), 선폭(moulded breadth), 하기만재흘수선에서 갑판상 수직거리, 하기만재흘수선상에서 갑판실까지의 측면면적으로 구한다(김세원, 2014).

$$EN = \Delta^{2/3} + 2.0hB + 0.1A \quad (4-16)$$

Δ : 하기만재흘수선에 대한 형배수량(ton)

B : 선폭(m)

h : 하기만재흘수선에서 갑판실까지의 높이(m)

A : 하기만재흘수선상에서 갑판실까지의 측면면적(m^2)

본 계류안전성 수치 시뮬레이션의 계류삭은 실제 선박에서 주로 사용하는 종류를 선정하였으며, 이는 Table 30과 같다. 먼저 A그룹의 크루즈선은 여객의 승하선을 위해 항만 및 어항 설계기준에서 요구하는 선종별 허용동요량의 범위가 상선에 비해 작으므로 함성섬유 로프 중 장력 대비 신축성이 가장 적은 폴리에스테르 로프를 주로 사용한다.

폴리에스테르 섬유로프는 일반 재질 중에서 가장 내구성이 있고, 건조한 상태나 물에 젖은 상태에서도 높은 장력을 갖는다. 이 재질은 외부적인 마모에 대하여 저항력이 좋고, 주기적인 장력변화에 대하여 갑작스럽게 강도가 떨어지지 않는다. 폴리에스테르 로프는 주기적인 장력변화에 대하여 나일론보다 190배나 더 오랫동안 견디었고, 폴리프로필렌 로프보다는 570배나 오랫동안 견디었다. 그에 반해 가격은 동일한 강도를 기준으로 폴리프로필렌 로프보다는 3배, 나일론 로프보다는 1.2배 비싸나 한번 설치하면 보다 오랫동안 사용할 수 있으므로 보다 경제적인 장점이 있다. 그러므로 폴리에스테르 로프는 장력과 내구

성이 중요하고 높은 신축성이 필요하지 않은 곳에 더욱 좋으므로 대형 크루즈 선에 많이 사용되고 있다(김세원, 2014).

B, C, D그룹의 대상선박의 계류삭은 대형 상선에서 주로 사용하는 나일론 로프를 선정하였으며, 나일론 로프는 합성섬유 로프 중 직경 대비 파단력이 크고, 에너지 흡수력이 양호하여 충격강도에도 좋은 특성이 있다. 또한, 뒤틀림이 적고 신축성이 좋은 특징으로 계류작업에도 양호하여 실제 상선에 가장 많이 사용된다.

각 그룹의 표준 계류삭 개수 및 파단력은 Table 31과 같이 선박의 제원 및 배수량에 따라 의장수를 계산하여 최소 68~72ton 이상의 조건으로 확인하였으며, 실제 선박에서 사용되는 조건을 고려하여 직경 70~80mm로 설정하였으며, 이 때의 파단력은 70~90ton으로 나타났다.

Table 30 Standard of mooring rope by equipment number

Group	Standard Displacement	Equipment Number	Mooring rope		
			Number (ea)	Length (m)	Breaking Load (ton)
A	56,000	4500 ~ 5500	7 ~ 8	200	68 ~ 72
B	140,000				
C	121,000				
D	141,000				

Table 31 Characteristic of mooring rope

Group	Material	Diameter (mm)	Breaking Load (ton)
A	Polyester	70 ~ 80	70 ~ 90
B	Nylon		
C	Nylon		
D	Nylon		

C그룹의 유조선이나 D그룹의 LNG선의 경우 와이어 재질의 로프를 사용하기도 하나, 와이어 로프는 일반적으로 합성섬유 로프에 비해 신축성이 작고 파단력이 높으며 안전성 또한 더욱 좋다. 그러므로 본 계류안전성 수치 시뮬레이션에서는 와이어 로프에 비해 파단력 및 안전성이 좋지 않은 나일론 합성섬유 로프를 사용하였다.

와이어 및 합성섬유 로프에 대한 일반적인 장력-신장력 곡선은 Fig. 39와 같다. 와이어 로프는 파단강도의 50%의 하중을 가했을 때 약 1%씩 연장되고, 고모듈러 섬유로프는 와이어 로프의 약 2배에 해당된다. 폴리에스테르 및 폴리프로필렌 로프는 파단강도의 50% 하중에서 약 6%씩 연장되고, 나일론 로프는 파단강도의 50% 하중에서 약 12~15% 연장된다(OCIMF, 2008).

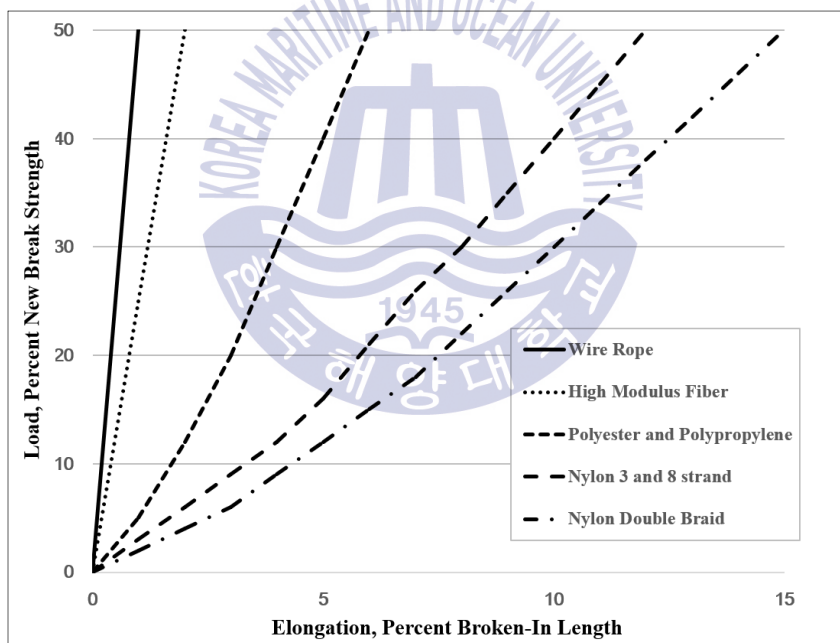


Fig. 39 Load-Extension curve of mooring rope

출처 : Tension Technology International

4.2.3 마루높이 모델링

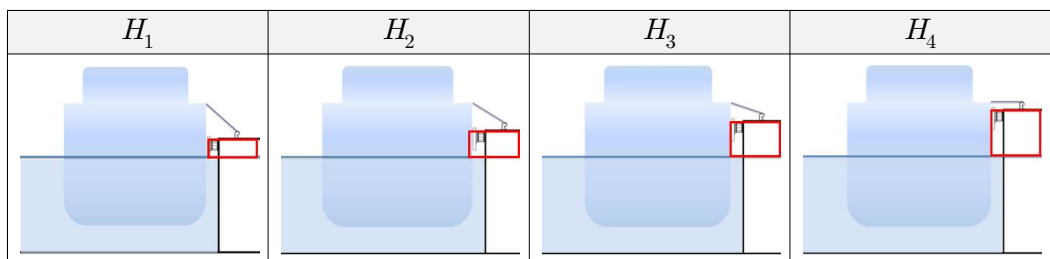
마루높이에 따른 접안선박의 계류안전성 민감도를 평가하기 위해 마루높이를 4개로 설정한다. 마루높이는 H_i 로 표현하고, 항만 및 어항 설계기준에서 마루높이 설계기준의 기준점이 되는 약최고고조위(A.H.H.W.)에서 1m, 2m, 3m, 4m 상향시켜 Table 32와 같이 모델링하였다.

마루높이 H_1 은 A.H.H.W. + 1m, H_2 는 A.H.H.W. + 2m, H_3 는 A.H.H.W. + 3m, H_4 는 A.H.H.W. + 4m로 나타낸다. 여기서 H_1 은 항만 및 어항 설계기준 수심 4.5m 이상의 대형접안시설의 최저기준이고, H_2 는 대형접안시설의 최고기준이다. Table 33은 마루높이가 상승될 때 계류된 선박과 마루높이의 상관관계를 나타낸다.

Table 32 Classification of crown height

i	H_i	Crown height(m)	Description
1	H_1	A.H.H.W. + 1	Minimum standard of wharf for large vessels on Harbour design standard in Korea
2	H_2	A.H.H.W. + 2	Maximum standard of wharf for large vessels on Harbour design standard in Korea
3	H_3	A.H.H.W. + 3	Above 1m from the max. standard of wharf for large vessels on Harbour design standard in Korea
4	H_4	A.H.H.W. + 4	Above 2m from the max. standard of wharf for large vessels on Harbour design standard in Korea

Table 33 Correlation of crown height and moored ship



4.2.4 외력조건 및 시나리오 설정

1) 외력조건 설정

마루높이 변화에 따른 계류요소의 민감도를 분석하기 위해 환경외력 조건을 설정한다. 먼저 마루높이에 따라 접안선박의 풍압면적이 달라지기 위한 조건은 풍향이 부두에서 접안선 방향으로 불어오는 경우이며, 바다에서 부두쪽으로 불어올 때의 풍압면적은 마루높이의 변화에 상관없이 동일하여 본 시뮬레이션 풍향 조건에서 제외하였다. 이에 따라 풍향조건은 Fig. 40과 같이 ① 접안현 정횡 (WD1), ② 접안현에서 선수방향으로 45° (WD2), ③ 접안현에서 선미방향으로 45° (WD3) 총 3가지로 설정하였다.

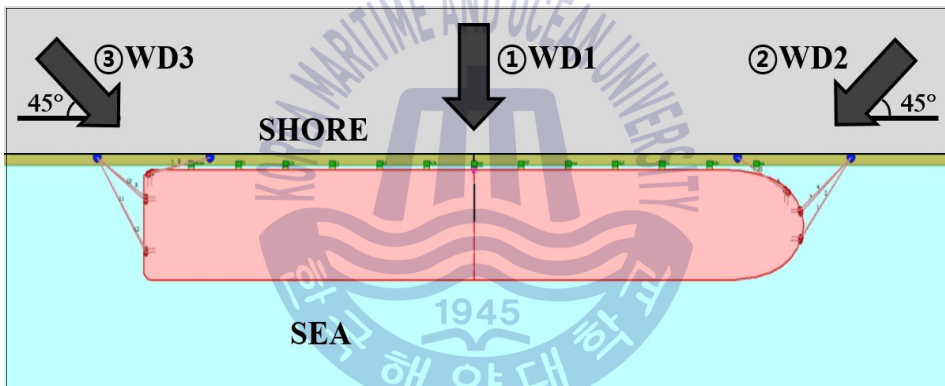


Fig. 40 Wind direction for the mooring safety assessment

풍속은 접안선박에 영향을 줄 수 있는 최소풍속으로 20kts를 설정하였고, 풍랑주의보 14m/s 수준인 30kts, 풍랑경보 21m/s 수준인 40kts를 설정하였으며, 마루높이에 따른 민감도 영향이 적은 환경외력인 파랑 및 조류 조건은 제외하였다.

적재조건 및 조위조건은 대상선박의 견현과 풍압면적이 가장 큰 상태인 경하상태와 이 때 수면의 높이가 가장 높은 조위인 약최고고조위로 설정하였다. Table 34는 마루높이 변화에 따라 바람이 부두에서 접안선 방향으로 불 때의 측면 풍압면적(A_L)과 정면 풍압면적(A_T)을 계산한 값이다.

Table 34 Windage area of each ship depending on the crown height

Group	Crown height	Longitudinal windage area(A_L) (m^2)	Transverse windage area(A_T) (m^2)
A	-	11,039	1,257
	H_1	10,762	1,225
	H_2	10,484	1,193
	H_3	10,204	1,161
	H_4	9,923	1,129
B	-	6,964	1,557
	H_1	6,637	1,515
	H_2	6,309	1,473
	H_3	5,981	1,431
	H_4	5,654	1,389
C	-	4,919	994
	H_1	4,674	955
	H_2	4,430	916
	H_3	4,187	877
	H_4	3,945	838
D	-	7,904	1,422
	H_1	7,626	1,380
	H_2	7,349	1,338
	H_3	7,071	1,296
	H_4	6,793	1,254

2) 시나리오 설정

선박 그룹화를 통해 설정한 그룹별 대상선박의 마루높이에 따른 계류안전성 민감도 분석을 위한 시뮬레이션 시나리오를 Table 35와 같이 설정하였다.

대상선박은 각 그룹별 10만톤급 대표선종으로 A그룹 크루즈선, B그룹 컨테이너선, C그룹 벌크선, D그룹 LNG선이다. 조위는 약최고고조위 상태, 적재상태는

경하상태를 선정하여 선박이 부두면에서 수직방향으로 가장 높은 조건으로 설정하였다. 마루높이는 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 4개 조건으로 설정하였다.

환경외력 조건은 풍속 20kts, 30kts, 40kts 3개 조건, 풍향 WD1, WD2, WD3의 3개 조건으로 설정하고, 파랑 및 조류 조건은 제외하였다. 총 시뮬레이션 횟수는 144회이며, 평가요소는 4가지로 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각으로 선정하였다. 방충재의 반력은 본 시나리오의 풍향조건에서 크게 변화가 없으므로 제외하였다.

Table 35 Simulation scenario of mooring safety assessment

Target ship	Tidal level / Load condition	Crown height	Wind speed (knots)	Wind direction
A : Cruise ship B : Container ship C : Bulker D : LNG Carrier	A.H.H.W.	H_1	20	① WD1
			30	
			40	
		H_2	20	
			30	
			40	
	/ Ballast condition	H_3	20	② WD2
			30	
			40	
		H_4	20	③ WD3
			30	
			40	

4.3 계류안전성 수치 시뮬레이션 결과 분석

4.3.1 크루즈선 분석 결과

A그룹의 대상선박인 10만톤급 크루즈선의 마루높이에 따른 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각의 계류안전성 수치 시뮬레이션 및 민감도 분석 결과는 다음과 같다.

1) 계류삭 장력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 41과 같으며, 최대 장력값은 선미 브레스트라인 12번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 20.5톤, 30kts 52.0톤, 40kts 94.5톤이며, 최소 장력값은 선미 스프링라인 10번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 11.8톤, 30kts 19.1톤, 40kts 28.8톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 28.8~94.5톤, H_2 26.7~94.3톤, H_3 24.6~94.0톤, H_4 22.4~93.8톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선미스프링라인 10번으로 H_1 28.8톤, H_2 26.7톤, H_3 24.6톤, H_4 22.4톤으로 감소율은 각각 7.3%, 7.9%, 8.9%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 42와 같으며, 최대 장력값은 선수 브레스트라인 5번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 18.2톤, 30kts 43.8톤, 40kts 78.0톤이며, 최소 장력값은 선미 스프링라인 10번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 7.8톤, 30kts 11.6톤, 40kts 16.9톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 16.9~78.0톤, H_2 15.7~77.2톤, H_3 14.7~76.4톤, H_4 13.5~75.5톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선미 스프링라인 9번으로 H_1 18.1톤, H_2 16.9톤, H_3 15.6톤, H_4 14.3톤으로 감소율은 각각 6.6%, 7.7%, 8.3%로 나타났다.

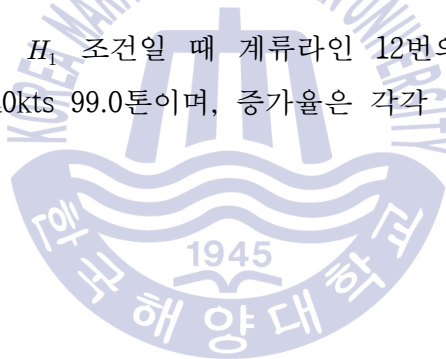
풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 43과 같으며, 최대 장력값은 선미 브레스트라인 12번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 22.7톤, 30kts

56.6톤, 40kts 99.0톤이며, 최소 장력값은 선미 스프링라인 10번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 13.3톤, 30kts 21.5톤, 40kts 32.0톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 31.9~99.0톤, H_2 29.6~98.1톤, H_3 27.2~97.1톤, H_4 24.7~96.2톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선미스프링라인 9번으로 H_1 34.6톤, H_2 32.0톤, H_3 29.4톤, H_4 26.7톤으로 감소율은 각각 7.5%, 8.1%, 9.2%로 나타났다.

풍속에 따른 계류삭 장력값은 Fig. 44와 같으며, 풍향 WD1, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 12번의 장력값은 풍속 20kts 20.5톤, 30kts 52.0톤, 40kts 94.5톤이며, 증가율은 각각 153.7%, 81.7%로 나타났다.

풍향 WD2, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 5번의 장력값은 풍속 20kts 18.2톤, 30kts 43.8톤, 40kts 78.0톤이며, 증가율은 각각 140.7%, 78.1%로 나타났다.

풍향 WD3, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 12번의 장력값은 풍속 20kts 22.7톤, 30kts 56.6톤, 40kts 99.0톤이며, 증가율은 각각 149.3%, 74.9%로 나타났다.



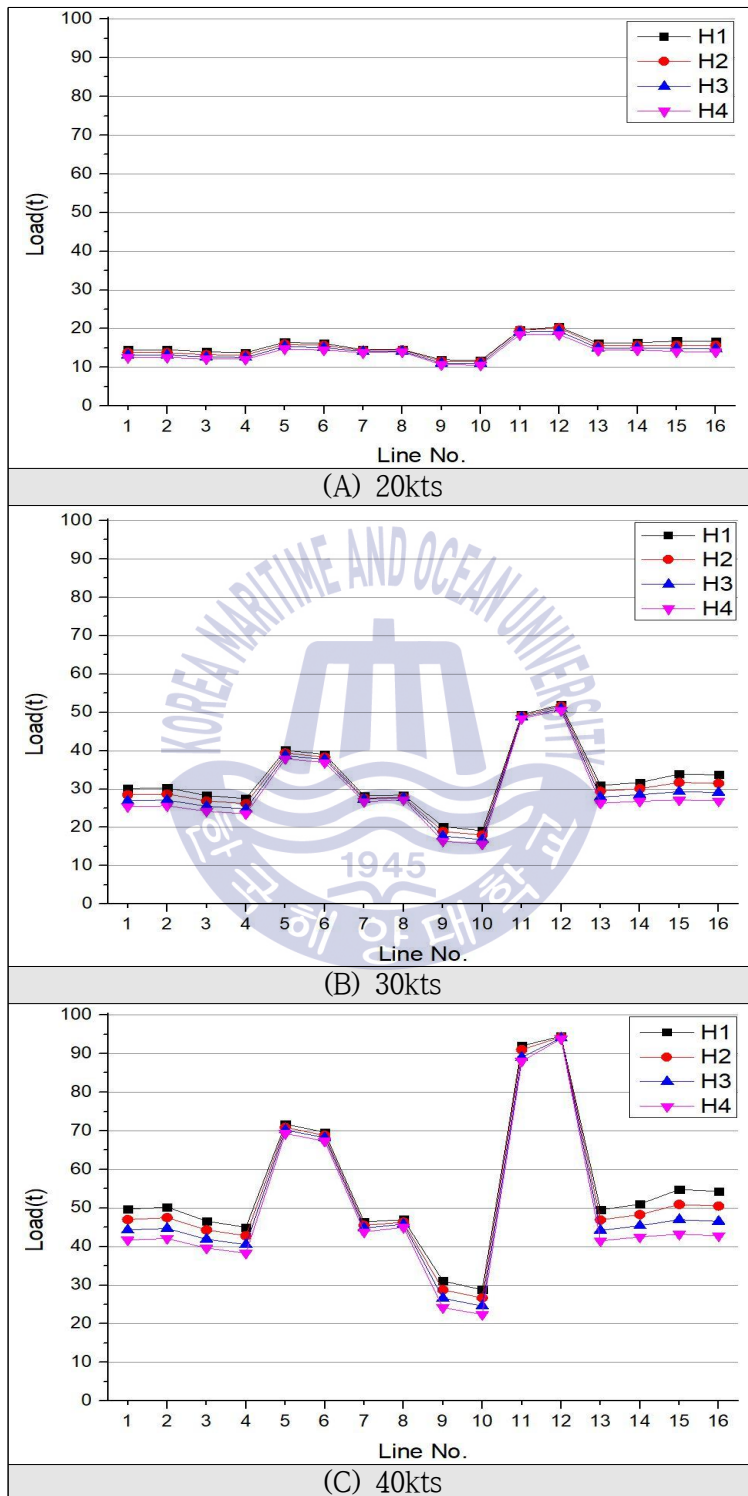


Fig. 41 Tension of line (Group A, WD1)

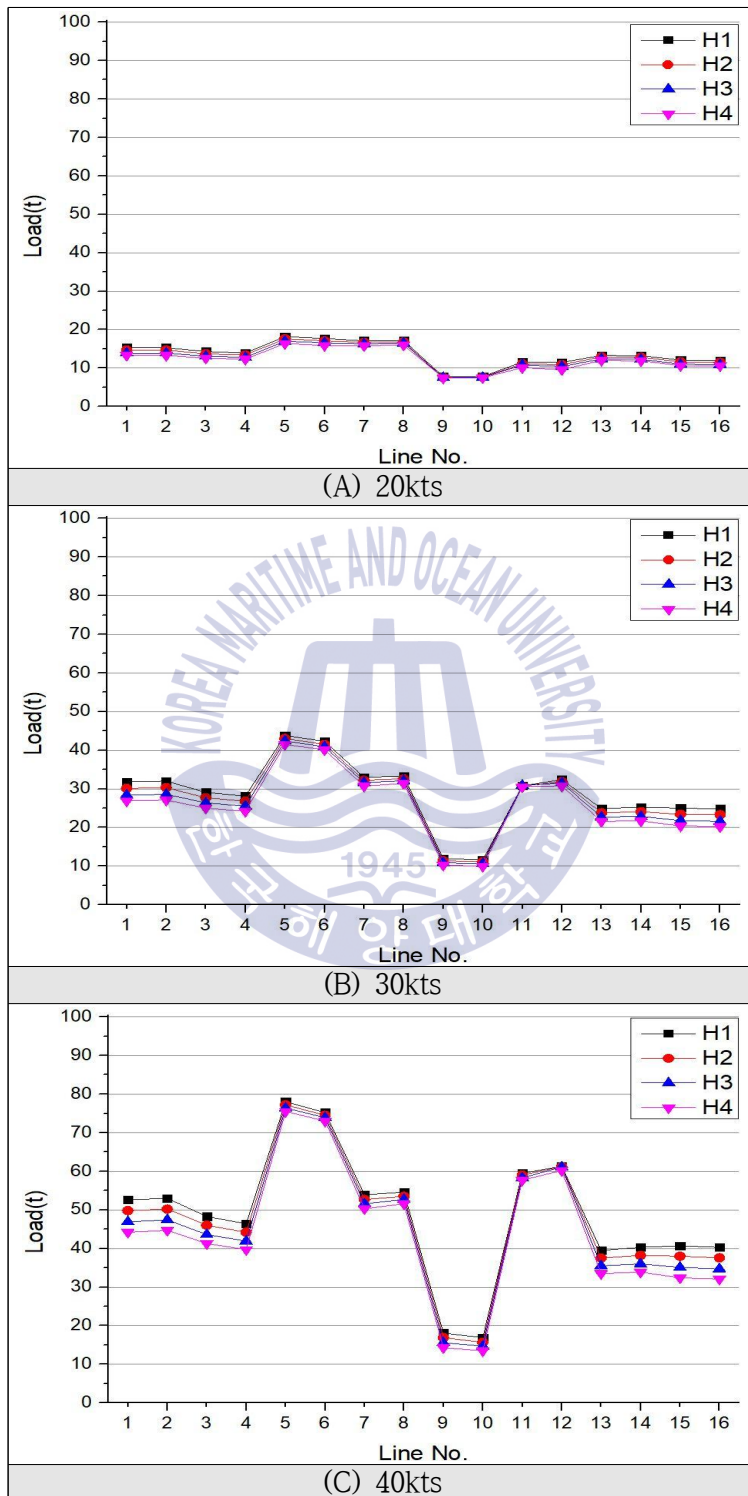


Fig. 42 Tension of line (Group A, WD2)

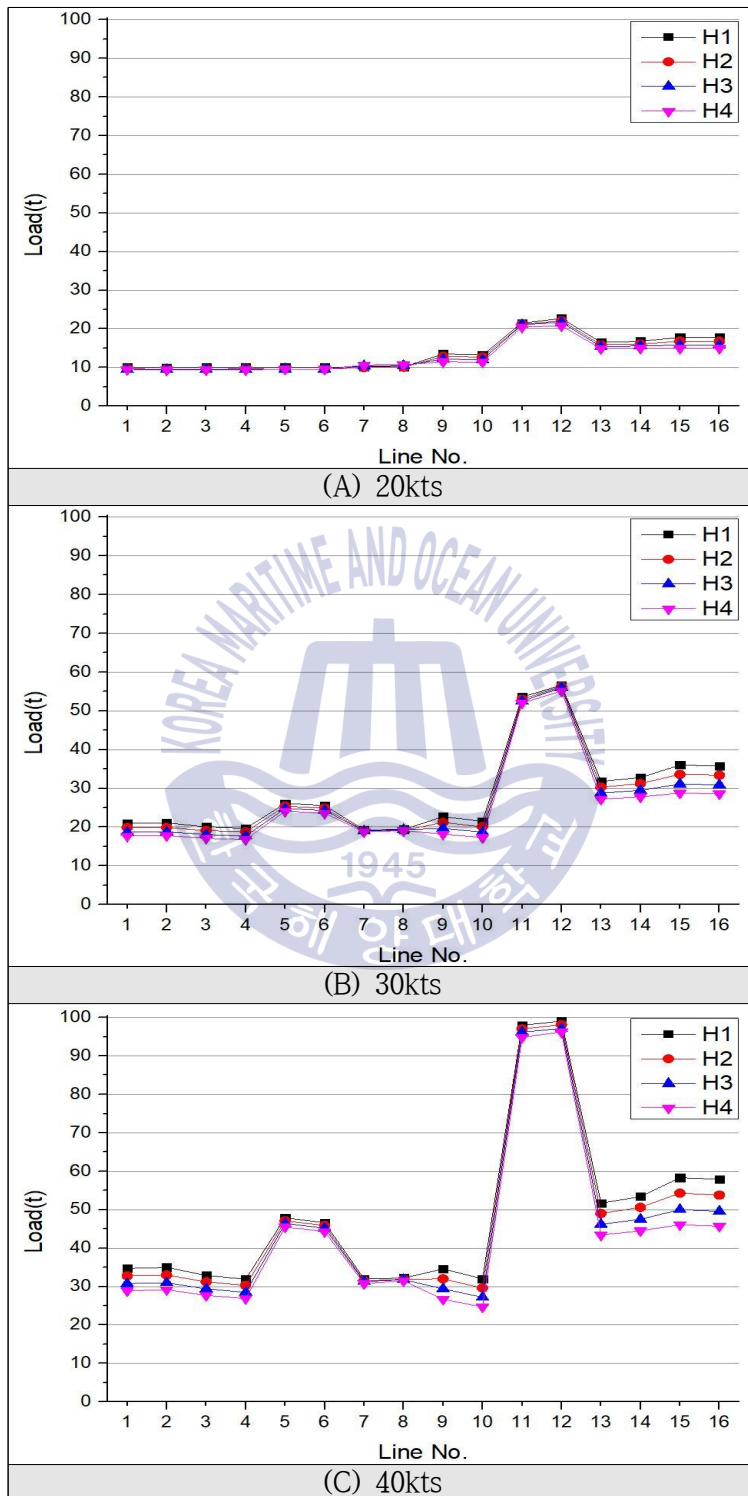


Fig. 43 Tension of line (Group A, WD3)

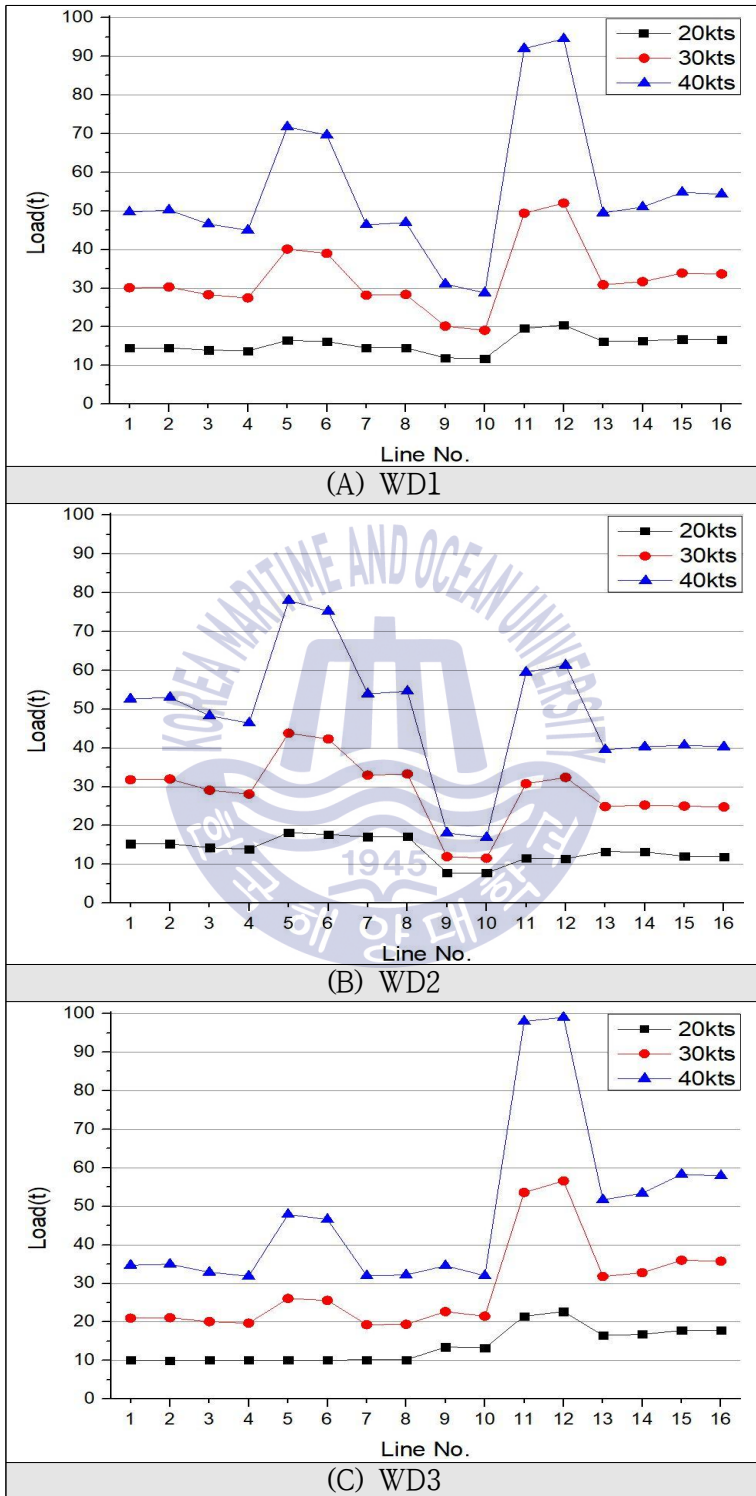


Fig. 44 Tension of line depending on wind speed (Group A)

2) 계선주 견인력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 45와 같으며, 최대 견인력값은 선미 계선주 6번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 65.0톤, 30kts 128.2톤, 40kts 206.7톤이며, 최소 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 23.8톤, 30kts 39.3톤, 40kts 59.9톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 59.9~206.7톤, H_2 55.5~193.8톤, H_3 51.2~180.3톤, H_4 46.6~167.4톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선미 계선주 4번으로 H_1 59.9톤, H_2 55.5톤, H_3 51.2톤, H_4 46.6톤으로 감소율은 각각 7.3%, 7.7%, 9.0%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 46과 같으며, 최대 견인력값은 선수 계선주 1번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 58.6톤, 30kts 120.4톤, 40kts 199.5톤이며, 최소 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 15.6톤, 30kts 23.7톤, 40kts 35.0톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 35.0~199.5톤, H_2 32.6~189.5톤, H_3 30.3~179.1톤, H_4 27.8~169.3톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선미 계선주 4번으로 H_1 35.0톤, H_2 32.6톤, H_3 30.3톤, H_4 27.8톤으로 감소율은 각각 6.9%, 7.1%, 8.3%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 47과 같으며, 최대 견인력값은 선미 계선주 6번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 67.7톤, 30kts 134.3톤, 40kts 218.1톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 3번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 20.3톤, 30kts 38.7톤, 40kts 64.2톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 64.2~218.1톤, H_2 61.6~204.7톤, H_3 56.6~190.6톤, H_4 51.4~177.0톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선미 계선주 4번으로 H_1 66.6톤, H_2 61.6톤, H_3 56.6톤, H_4 51.4톤으로 감소율은 각각 7.5%, 8.1%, 9.2%로 나타났다.

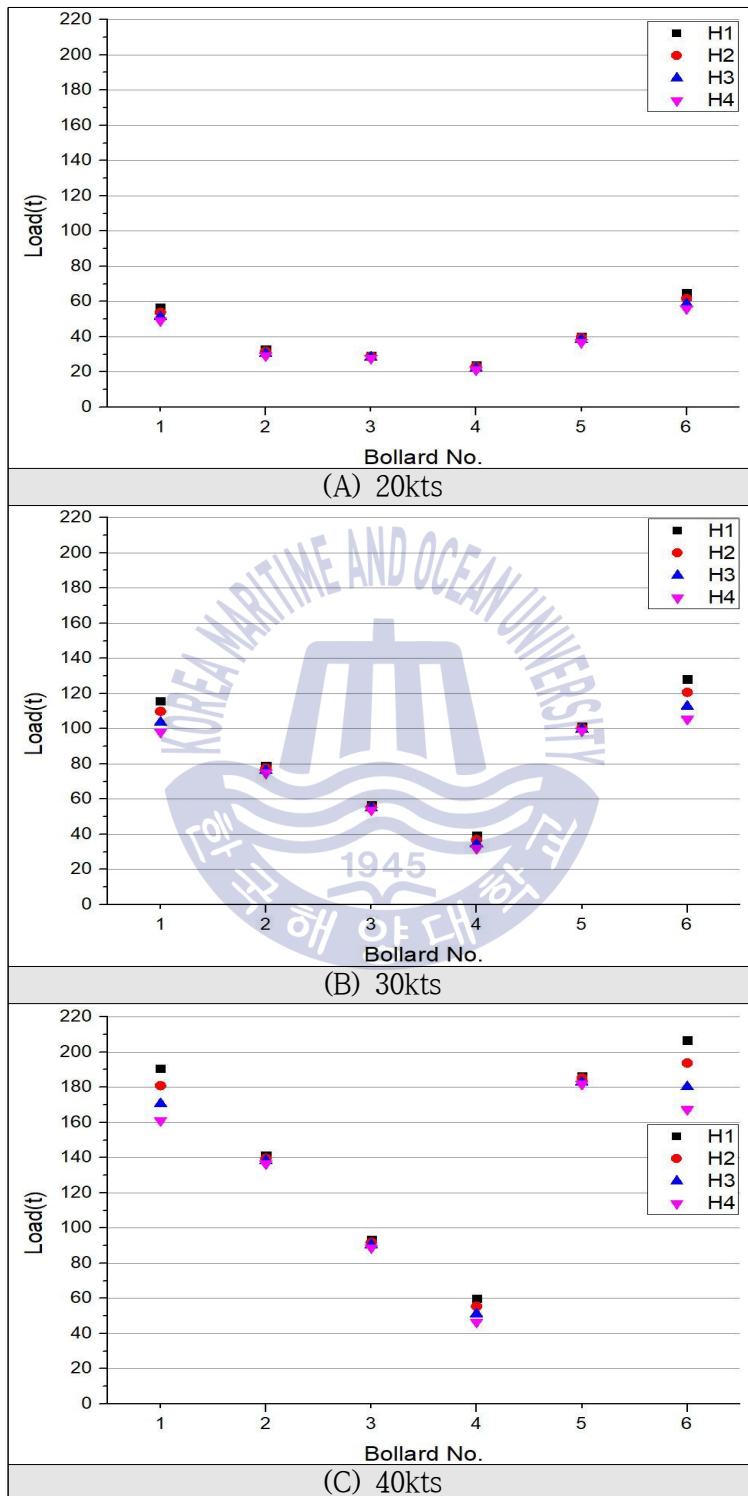


Fig. 45 Load of bollard (Group A, WD1)

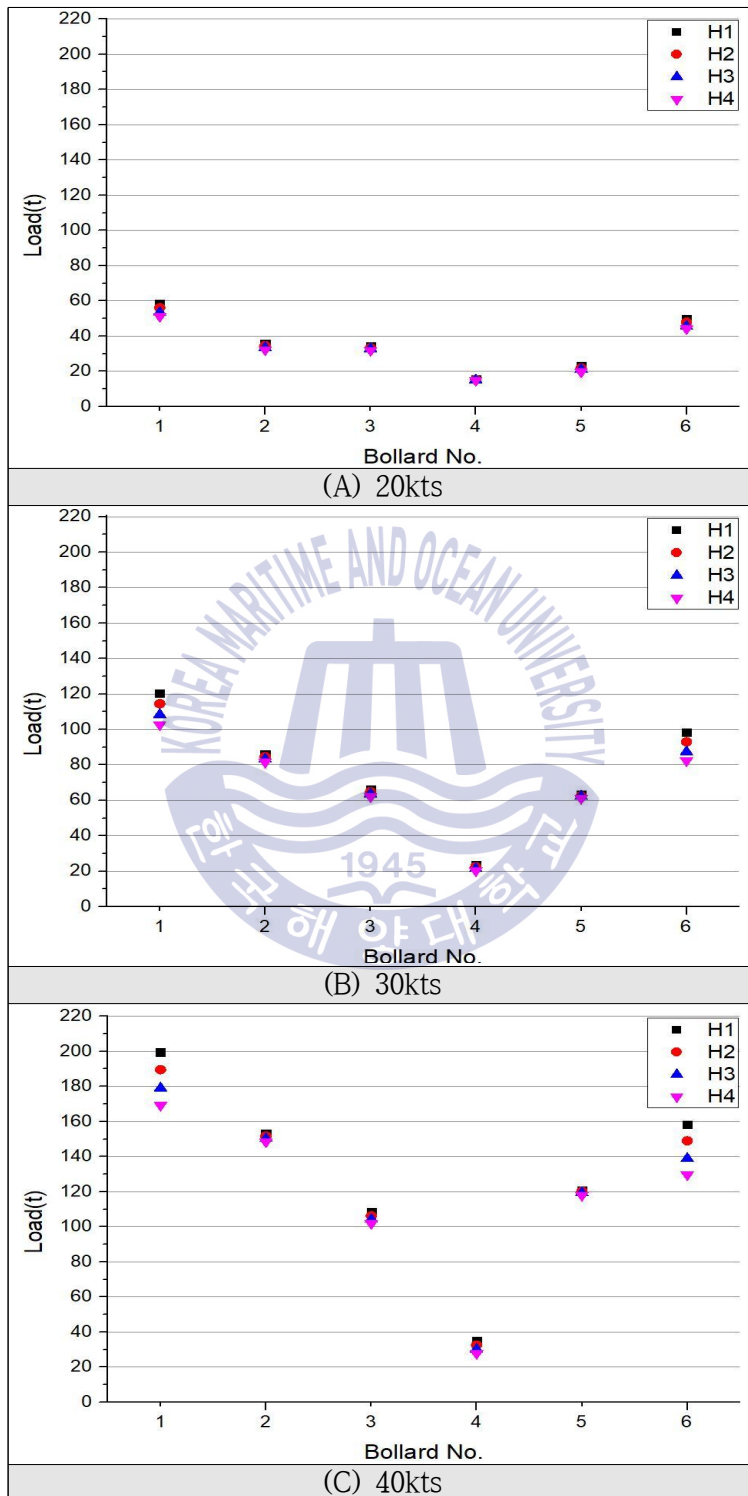


Fig. 46 Load of bollard (Group A, WD2)

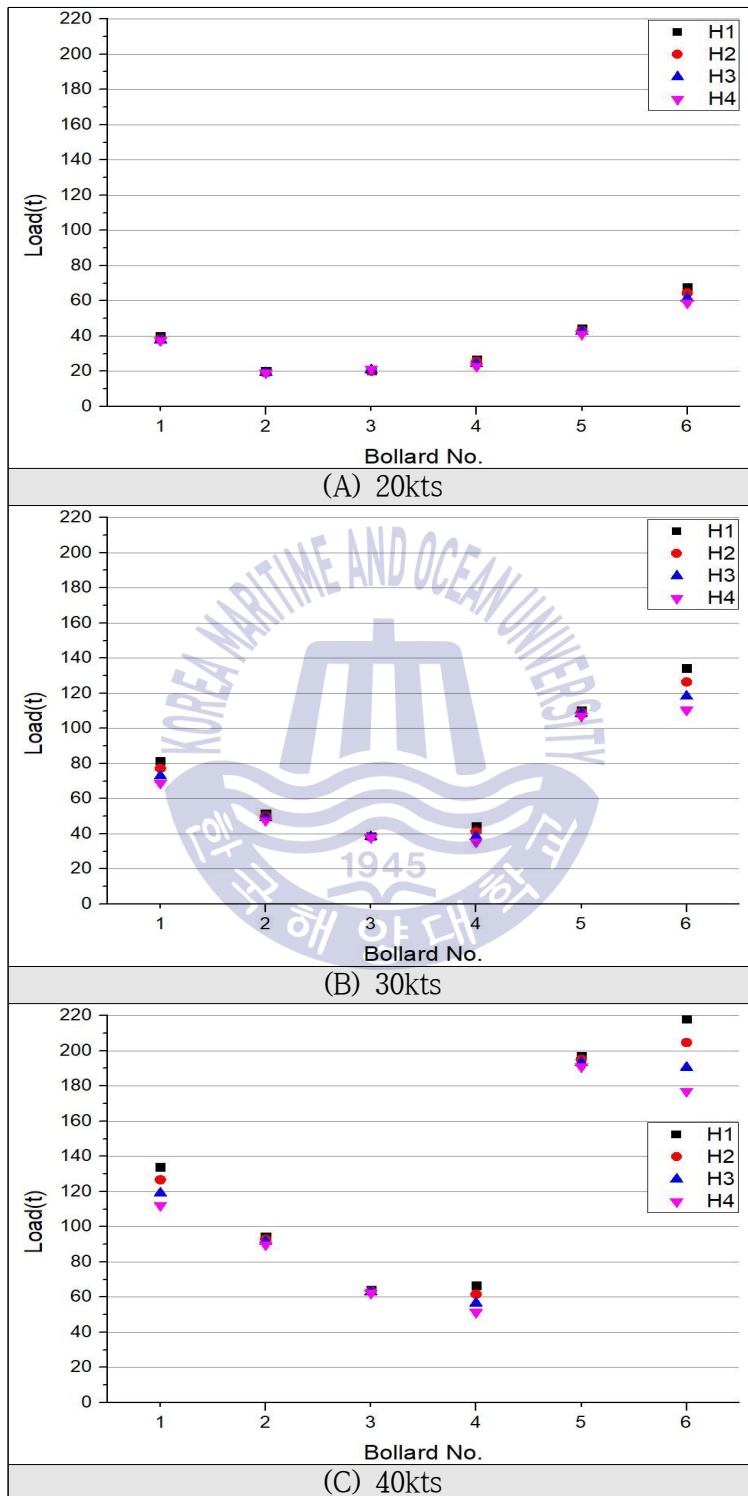


Fig. 47 Load of bollard (Group A, WD3)

3) 선체동요량

선체 6자유도운동 중 본 시나리오에서 가장 동요량이 큰 운동은 Surge와 Sway이며 그 분석 결과는 다음과 같다.

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 48과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.44m, 30kts 1.54m, 40kts 2.68m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.11m, 30kts 0.11m, 40kts 0.13m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.44m, H_2 0.35m, H_3 0.29m, H_4 0.24m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 20.5%, 17.1%, 17.2%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 2.68m, H_2 2.47m, H_3 2.24m, H_4 2.04m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 7.8%, 9.3%, 8.9%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 49와 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.31m, 30kts 1.33m, 40kts 2.41m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.21m, 30kts 0.26m, 40kts 0.32m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.31m, H_2 0.25m, H_3 0.19m, H_4 0.14m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 19.4%, 24.0%, 26.3%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 2.41m, H_2 2.21m, H_3 2.01m, H_4 1.83m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 8.3%, 9.0%, 9.0%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 50과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.28m, 30kts 1.27m, 40kts 2.32m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.06m, 30kts 0.05m, 40kts 0.06m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.28m, H_2 0.22m, H_3 0.17m, H_4 0.14m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 21.4%, 22.7%, 17.6%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 2.32m, H_2 2.12m, H_3 1.91m, H_4 1.73m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 8.6%, 9.9%, 9.4%로 나타났다.

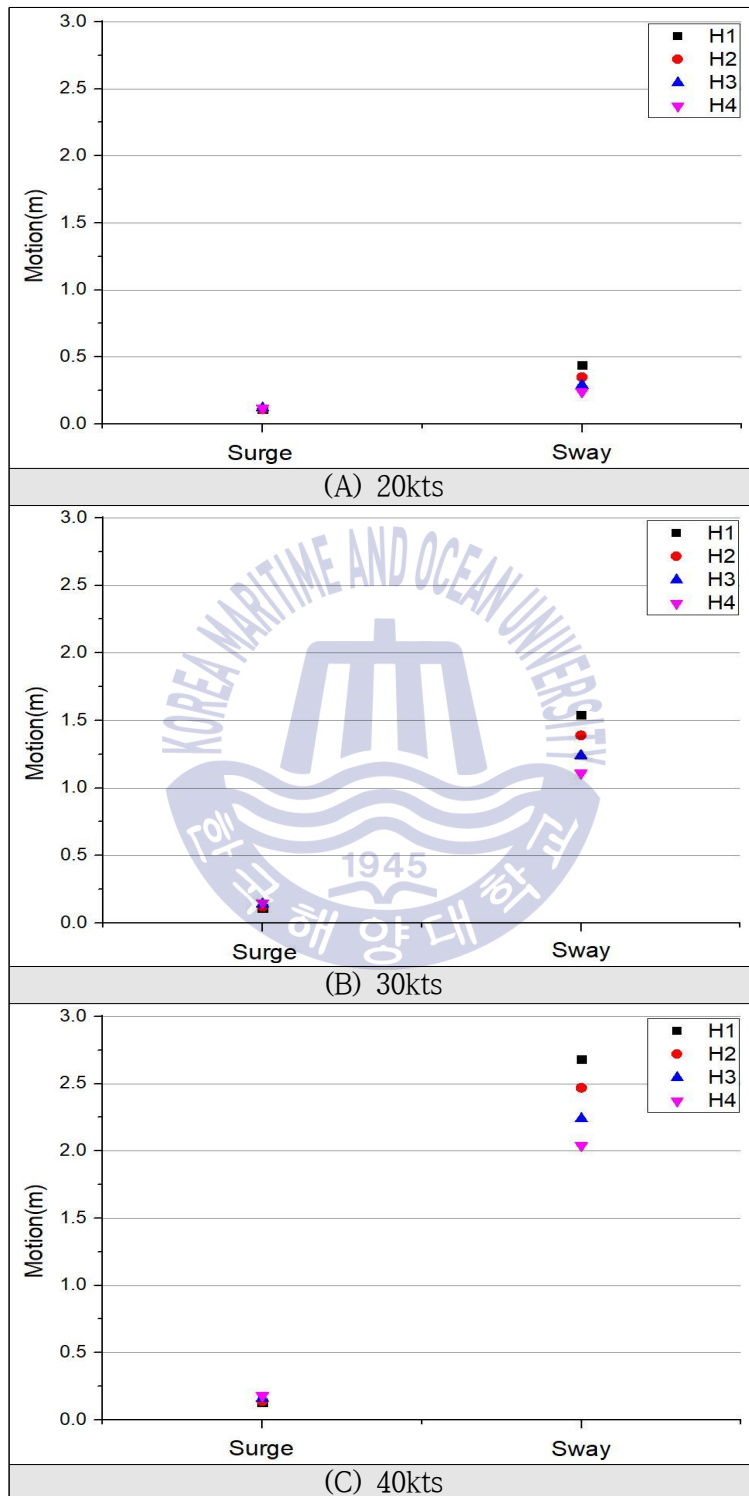


Fig. 48 Surge & sway motion (Group A, WD1)

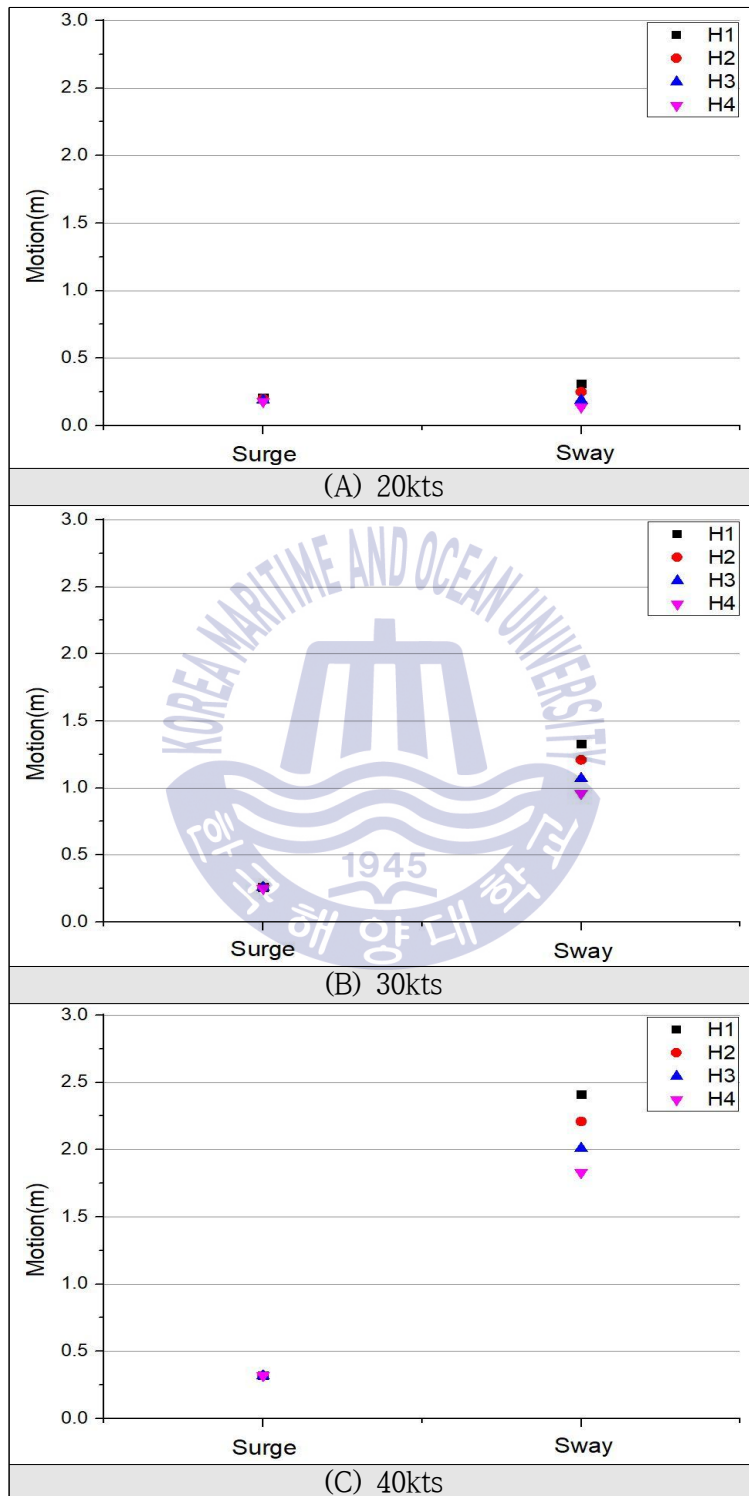


Fig. 49 Surge & sway motion (Group A, WD2)

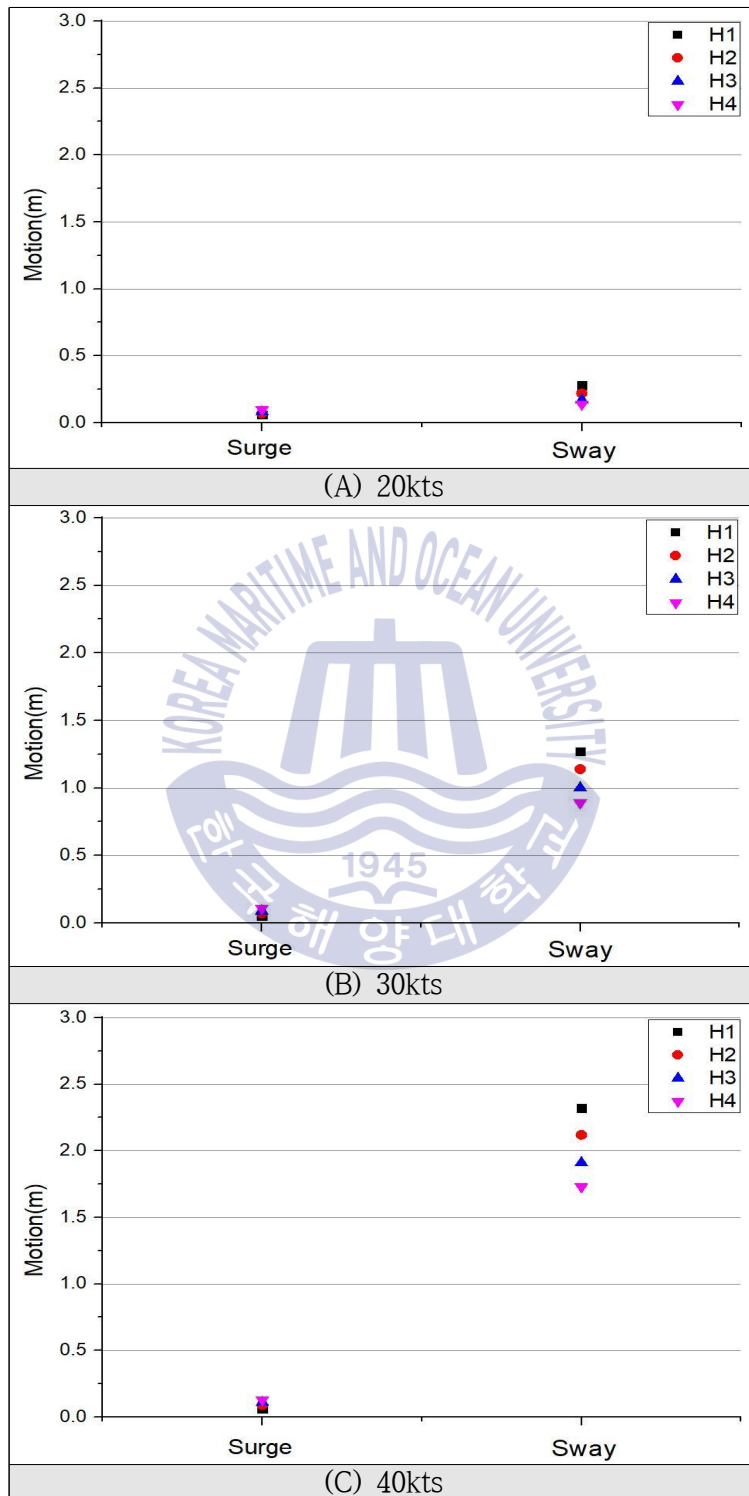


Fig. 50 Surge & sway motion (Group A, WD3)

4) 계류라인 수직각

계류라인 수직각은 부두에서 접안선 방향의 풍향 조건에서 풍속이 커질수록 감소되나, 이는 선체의 횡방향 직선운동인 Sway에 의한 감소량이므로 풍속에 따른 감소량은 제외하고, 풍속 20kts, 풍향 WD1 조건에서 마루높이 변화에 따른 계류라인 수직각은 Fig. 51과 같다.

최대 계류라인 수직각은 선미 브레스트라인 11번이고, 그 값은 마루높이 H_1 60°, H_2 58°, H_3 55°, H_4 52° 이며, 최소 계류라인 수직각은 선미 스텐라인 16번으로 H_1 17°, H_2 16°, H_3 14°, H_4 12° 이다. 이 때 계류라인 수직각의 최대 감소율은 선미 스텐라인 16번에서 각각 5.9%, 12.5%, 14.3%로 나타났다.

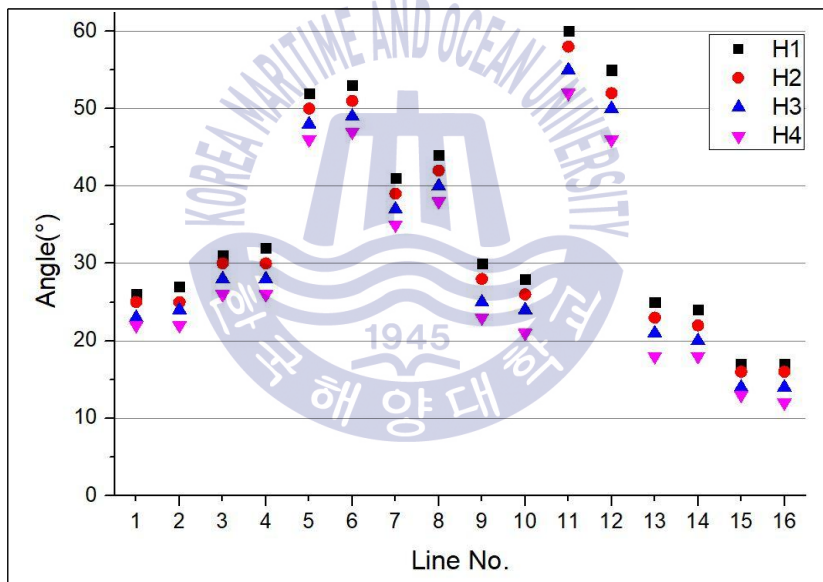


Fig. 51 Vertical angle of mooring line (Group A)

4.3.2 컨테이너선 분석 결과

B그룹의 대상선박인 10만톤급 컨테이너선의 마루높이에 따른 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각 계류안전성 수치 시뮬레이션 및 민감도 분석 결과는 다음과 같다.

1) 계류삭 장력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 52와 같고, 최대 장력값은 선미 스텐라인 12번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 17.7톤, 30kts 37.6톤, 40kts 61.7톤이며, 최소 장력값은 선미 브레스트라인 5번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 12.2톤, 30kts 22.2톤, 40kts 36.8톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 36.8~61.7톤, H_2 35.9~59.9톤, H_3 35.0~58.1톤, H_4 34.1~56.3톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 58.5톤, H_2 56.6톤, H_3 54.7톤, H_4 52.9톤으로 감소율은 각각 3.2%, 3.4%, 3.3%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 53과 같고, 최대 장력값은 선수 헤드라인 2번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 15.8톤, 30kts 34.5톤, 40kts 57.9톤이며, 최소 장력값은 선미 브레스트라인 7번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 12.0톤, 30kts 20.5톤, 40kts 32.8톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 32.8~57.9톤, H_2 32.3~56.0톤, H_3 31.7~54.1톤, H_4 31.1~52.3톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 57.5톤, H_2 55.7톤, H_3 53.8톤, H_4 52.0톤으로 감소율은 각각 3.1%, 3.4%, 3.3%로 나타났다.

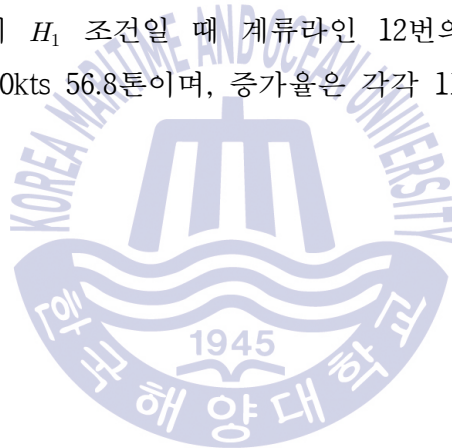
풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 54와 같고, 최대 장력값은 선미 스텐라인 12번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 15.5톤, 30kts 33.9톤, 40kts 56.8톤이며, 최소 장력값은 선미 브레스트라인 7번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 10.4톤, 30kts 16.0톤, 40kts 23.6톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장

력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 23.6~56.8톤, H_2 23.2~55.1톤, H_3 22.9~53.3톤, H_4 22.6~51.6톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 33.4톤, H_2 32.2톤, H_3 31.1톤, H_4 29.9톤으로 감소율은 각각 3.6%, 3.4%, 3.9%로 나타났다.

풍속에 따른 계류삭 장력값은 Fig. 55와 같으며, 풍향 WD1, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 12번의 장력값은 풍속 20kts 17.7톤, 30kts 37.6톤, 40kts 61.7톤이며, 증가율은 각각 112.4%, 64.1%로 나타났다.

풍향 WD2, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 2번의 장력값은 풍속 20kts 15.8톤, 30kts 34.5톤, 40kts 57.9톤이며, 증가율은 각각 118.4%, 67.8%로 나타났다.

풍향 WD3, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 12번의 장력값은 풍속 20kts 15.5톤, 30kts 33.9톤, 40kts 56.8톤이며, 증가율은 각각 118.7%, 67.6%로 나타났다.



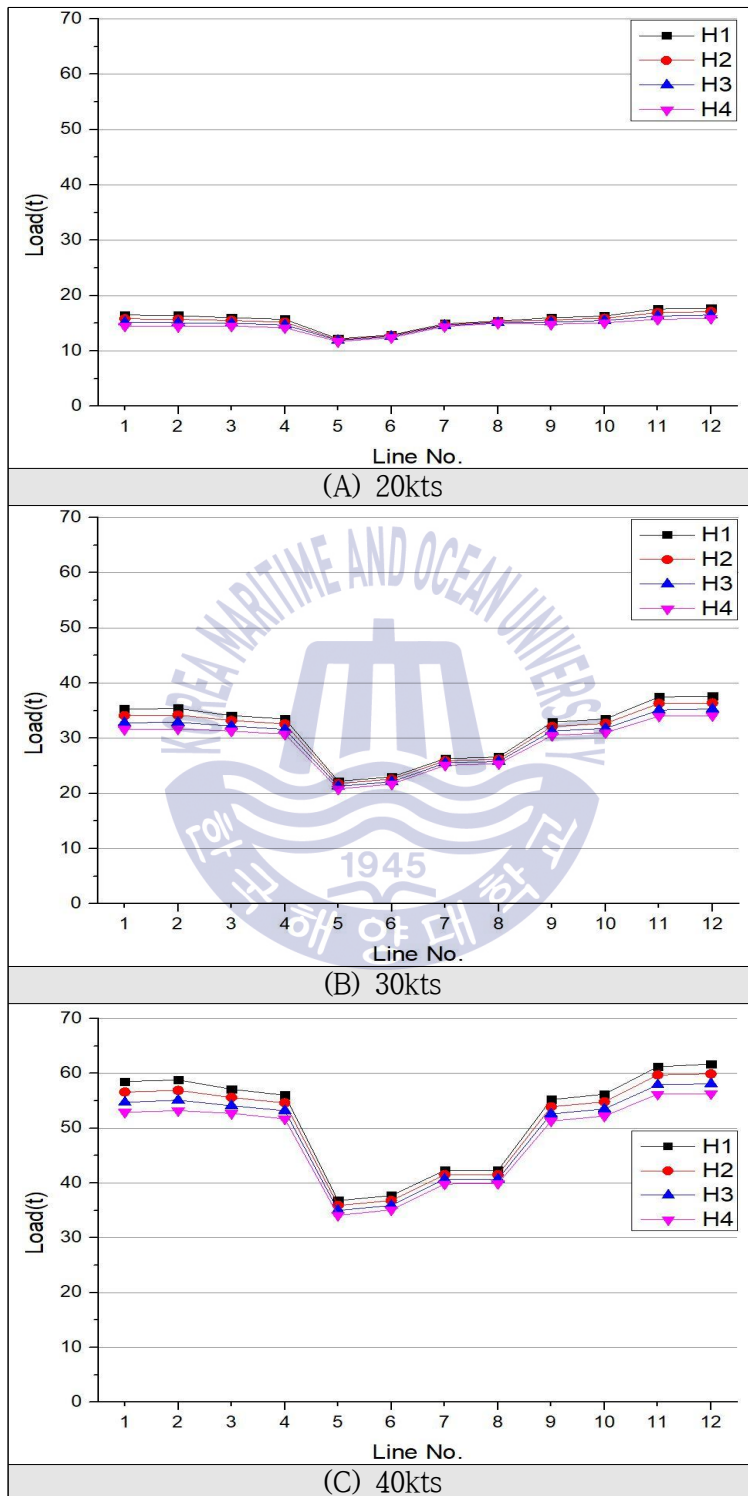


Fig. 52 Tension of line (Group B, WD1)

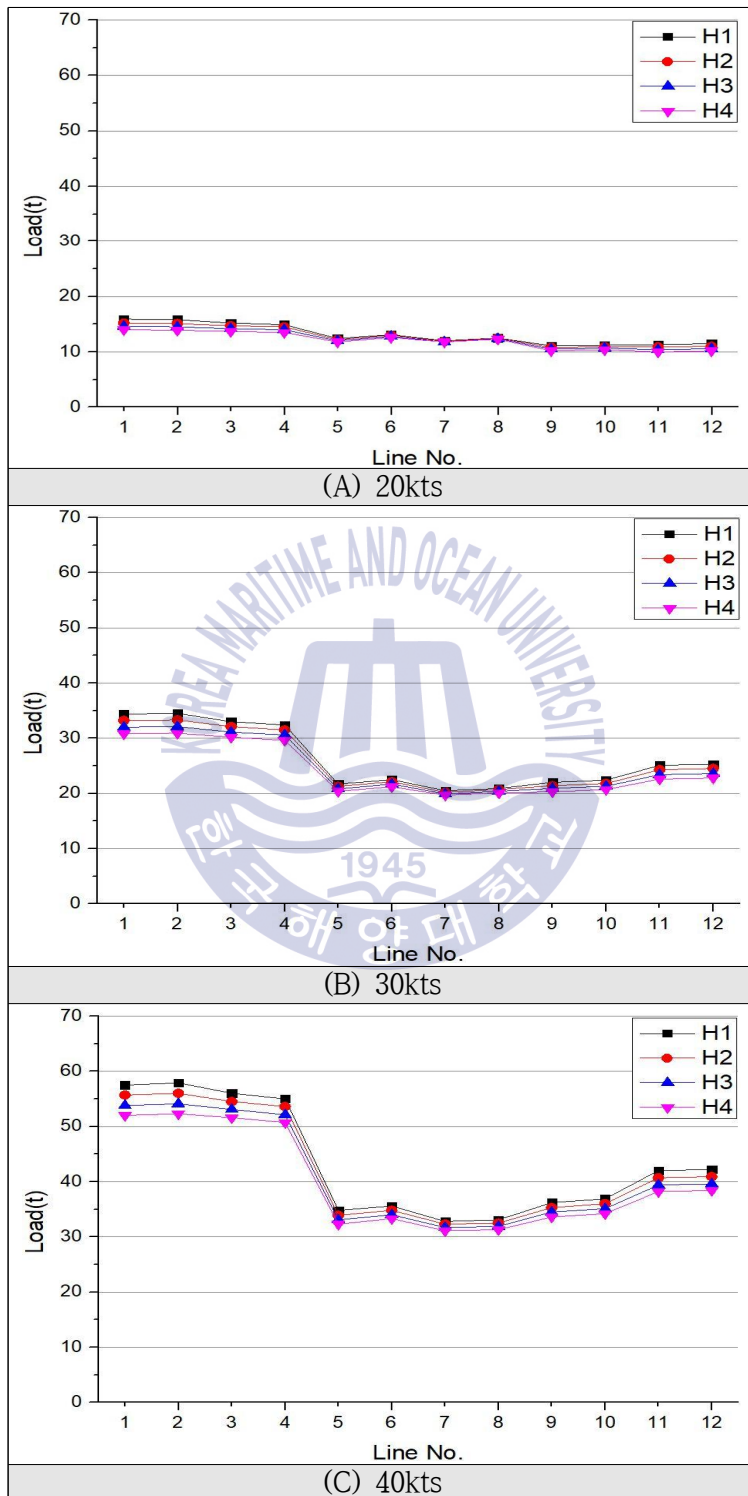


Fig. 53 Tension of line (Group B, WD2)

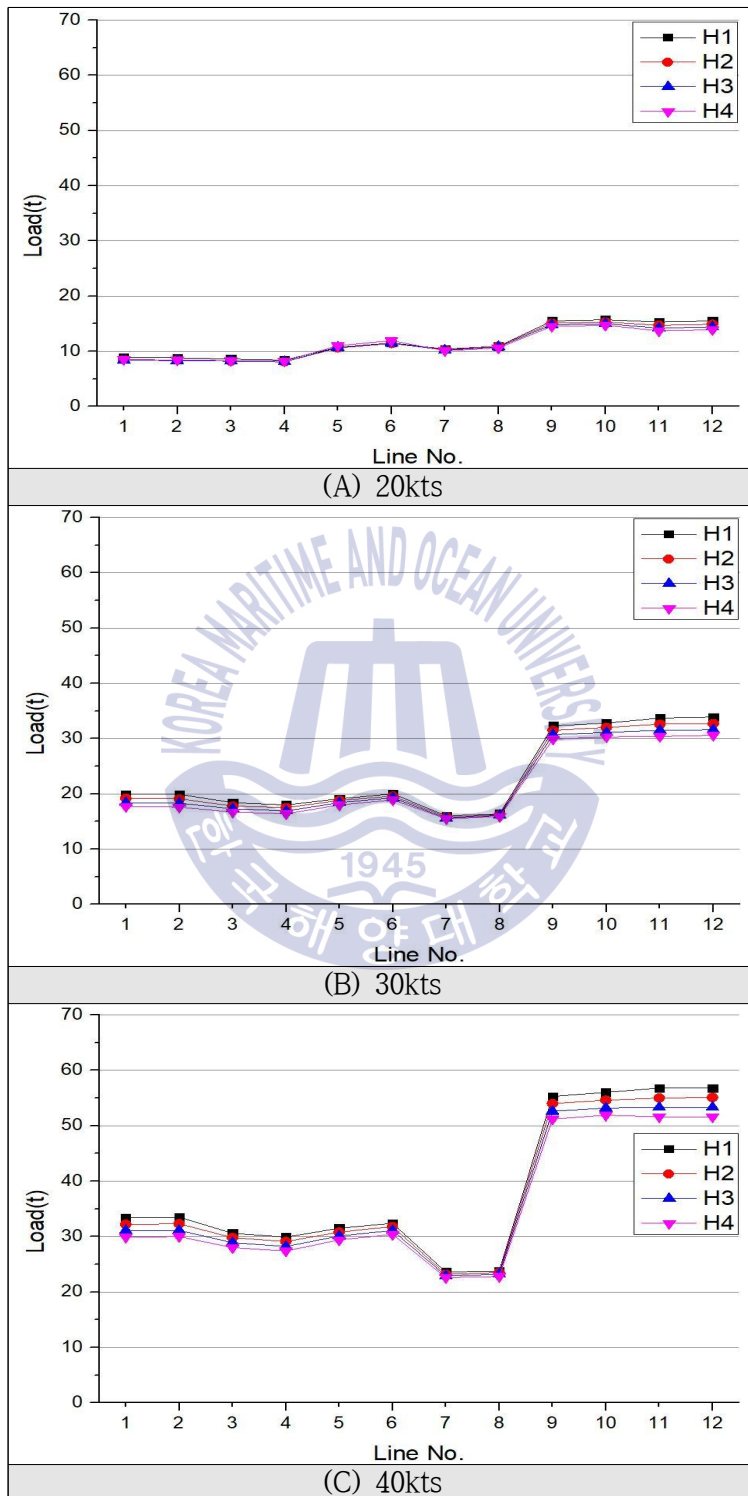


Fig. 54 Tension of line (Group B, WD3)

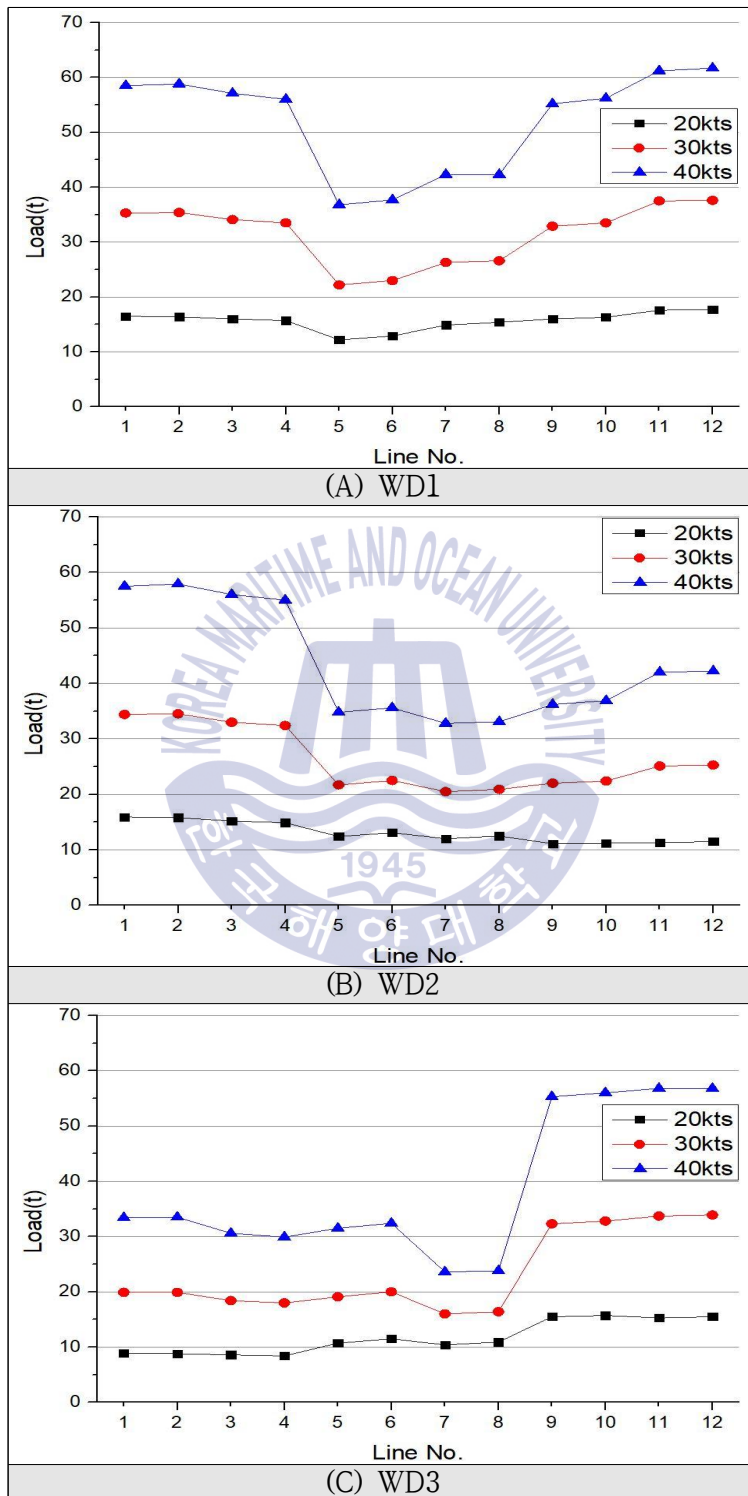


Fig. 55 Tension of line depending on wind speed (Group B)

2) 계선주 견인력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 56과 같고, 최대 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 66.6톤, 30kts 139.7톤, 40kts 232.3톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 2번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 25.2톤, 30kts 45.3톤, 40kts 74.5톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 74.5~232.3톤, H_2 72.7~226.0톤, H_3 70.9~219.8톤, H_4 69.2~213.6톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 229.5톤, H_2 222.9톤, H_3 216.3톤, H_4 209.7톤으로 감소율은 각각 2.9%, 3.0%, 3.1%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 57과 같고, 최대 견인력값은 선수 계선주 1번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 61.5톤, 30kts 133.7톤, 40kts 225.6톤이며, 최소 견인력값은 선미 계선주 3번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 24.5톤, 30kts 41.4톤, 40kts 65.9톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 65.9~225.6톤, H_2 64.8~218.9톤, H_3 63.6~212.2톤, H_4 62.4~205.7톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 225.6톤, H_2 218.9톤, H_3 212.2톤, H_4 205.7톤으로 감소율은 각각 3.0%, 3.1%, 3.1%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 58과 같고, 최대 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 61.0톤, 30kts 130.9톤, 40kts 222.4톤이며, 최소 견인력값은 선미 계선주 3번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 21.3톤, 30kts 32.4톤, 40kts 47.4톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 47.4~222.4톤, H_2 46.7~216.2톤, H_3 46.0~210.0톤, H_4 45.4~203.9톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 126.9톤, H_2 122.8톤, H_3 118.8톤, H_4 114.8톤으로 감소율은 각각 3.2%, 3.3%, 3.4%로 나타났다.

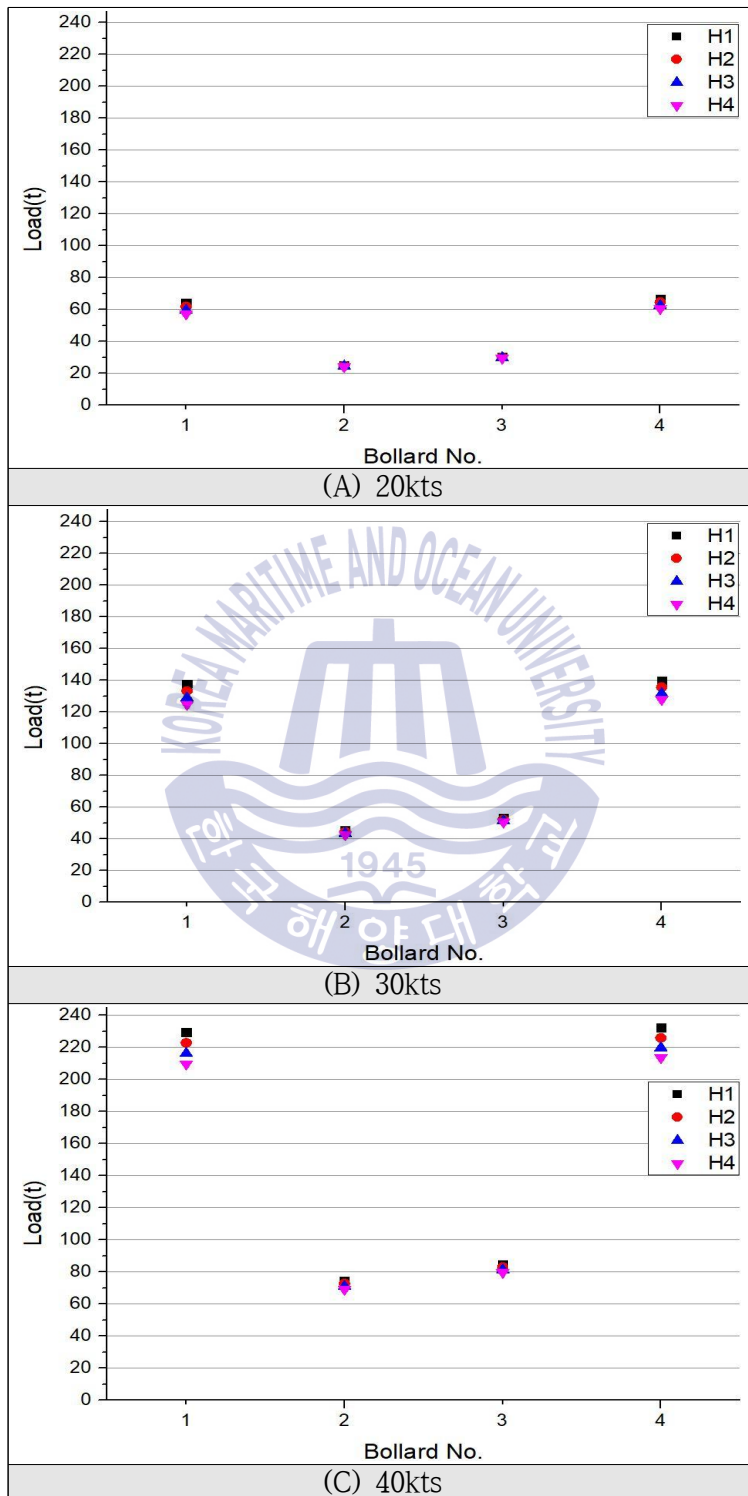


Fig. 56 Load of bollard (Group B, WD1)

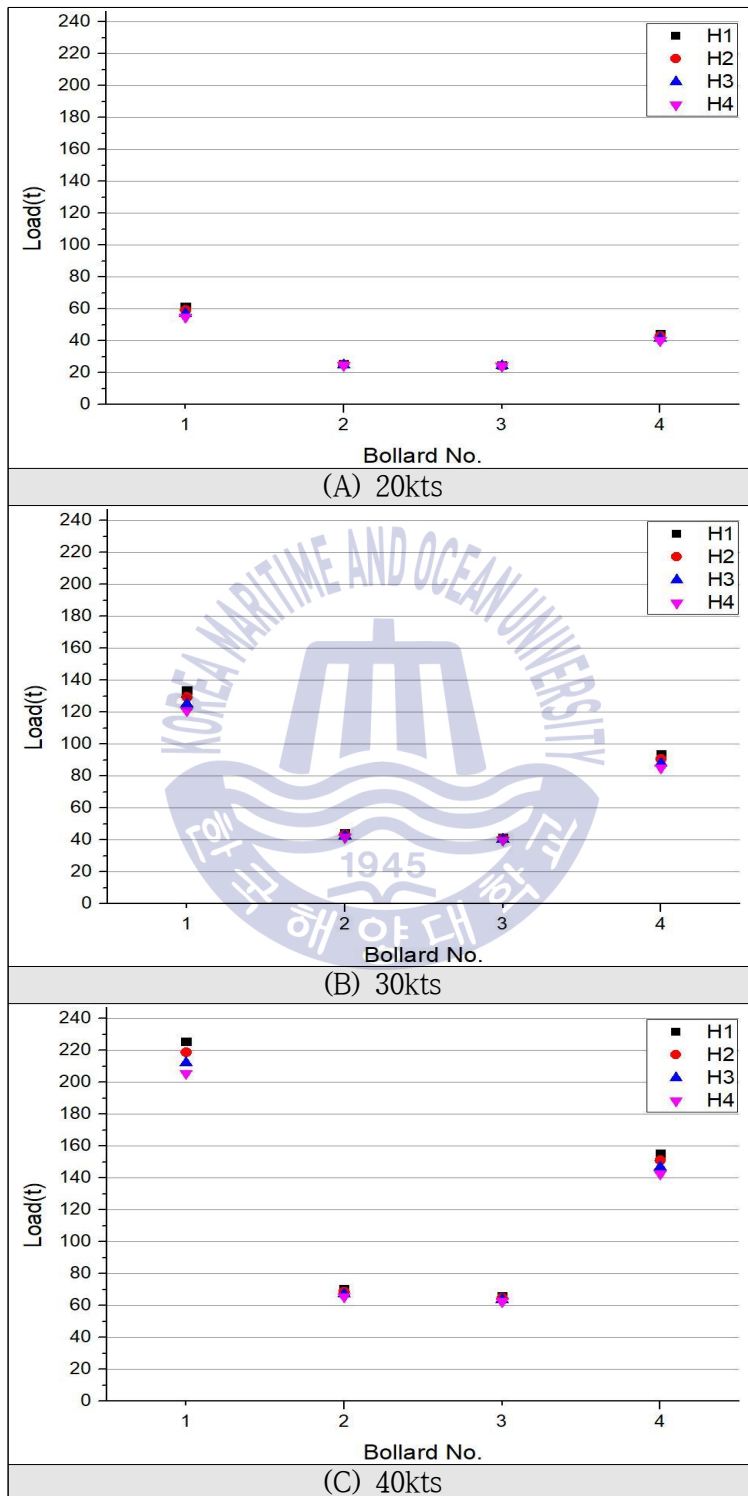


Fig. 57 Load of bollard (Group B, WD2)

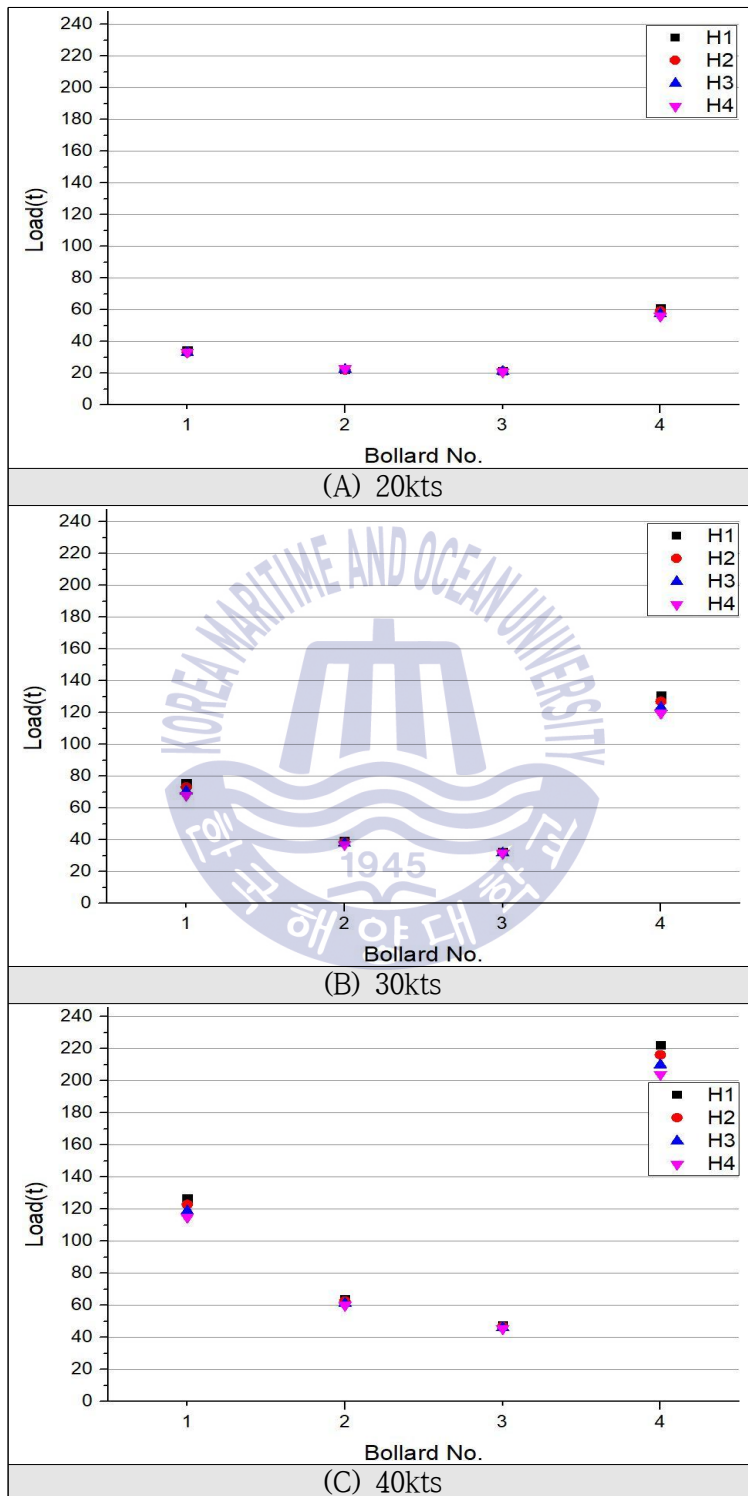


Fig. 58 Load of bollard (Group B, WD3)

3) 선체동요량

선체 6자유도운동 중 본 시나리오에서 가장 동요량이 큰 운동은 Surge와 Sway이며, 그 분석 결과는 다음과 같다.

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 59와 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 1.22m, 30kts 4.01m, 40kts 6.92m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.09m, 30kts 0.37m, 40kts 0.65m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 1.22m, H_2 1.08m, H_3 0.95m, H_4 0.83m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 11.5%, 12.0%, 12.6%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 6.92m, H_2 6.60m, H_3 6.29m, H_4 6.0m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 4.6%, 4.7%, 4.6%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 60과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.68m, 30kts 3.16m, 40kts 5.77m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0m, 30kts 0.31m, 40kts 0.68m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.68m, H_2 0.60m, H_3 0.51m, H_4 0.40m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 11.8%, 15.0%, 21.6%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 5.77m, H_2 5.48m, H_3 5.20m, H_4 4.93m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 5.0%, 5.1%, 5.2%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 61과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.36m, 30kts 2.64m, 40kts 5.04m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.24m, 30kts 0.28m, 40kts 0.44m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.36m, H_2 0.26m, H_3 0.19m, H_4 0.15m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 27.8%, 26.9%, 21.1%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 5.04m, H_2 4.78m, H_3 4.53m, H_4 4.29m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 5.2%, 5.2%, 5.3%로 나타났다.

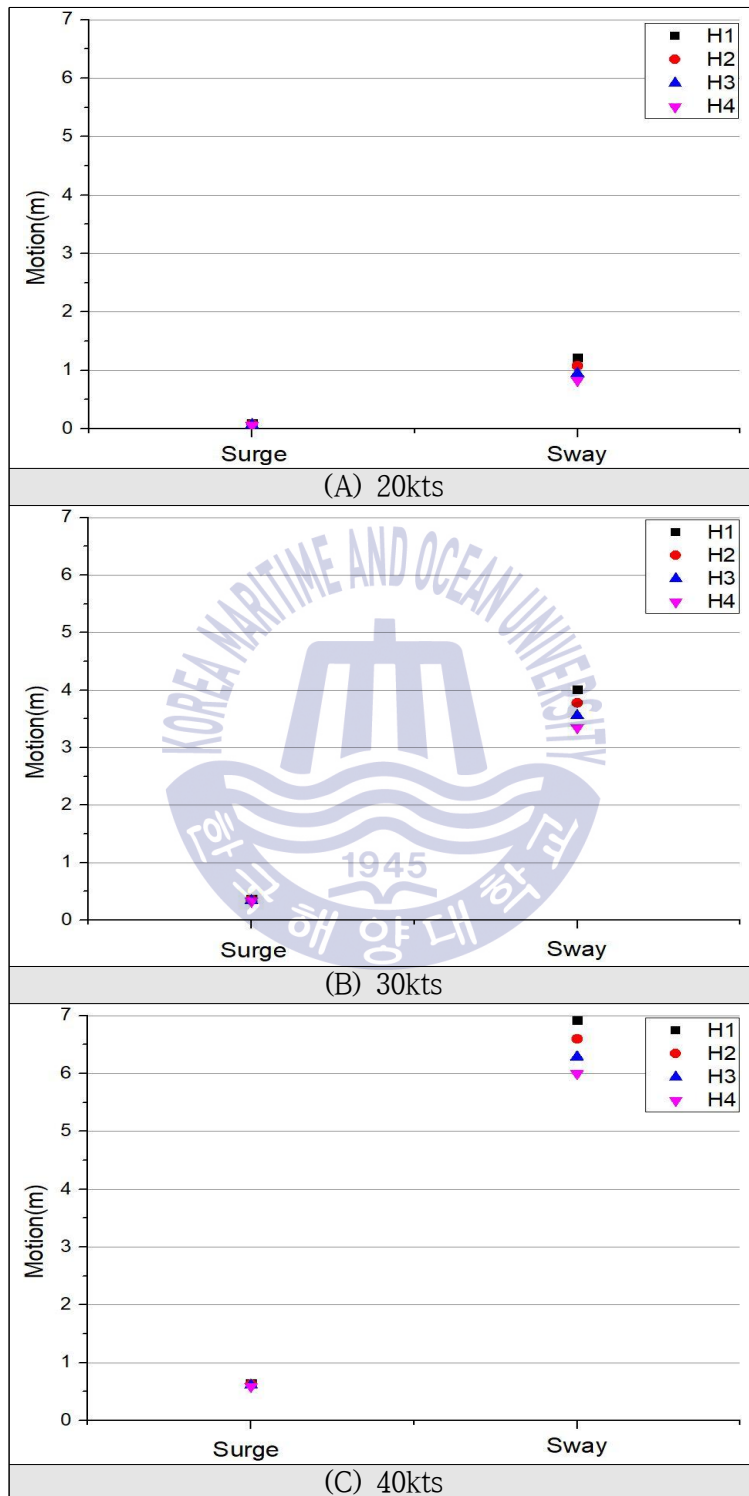


Fig. 59 Surge & sway motion (Group B, WD1)

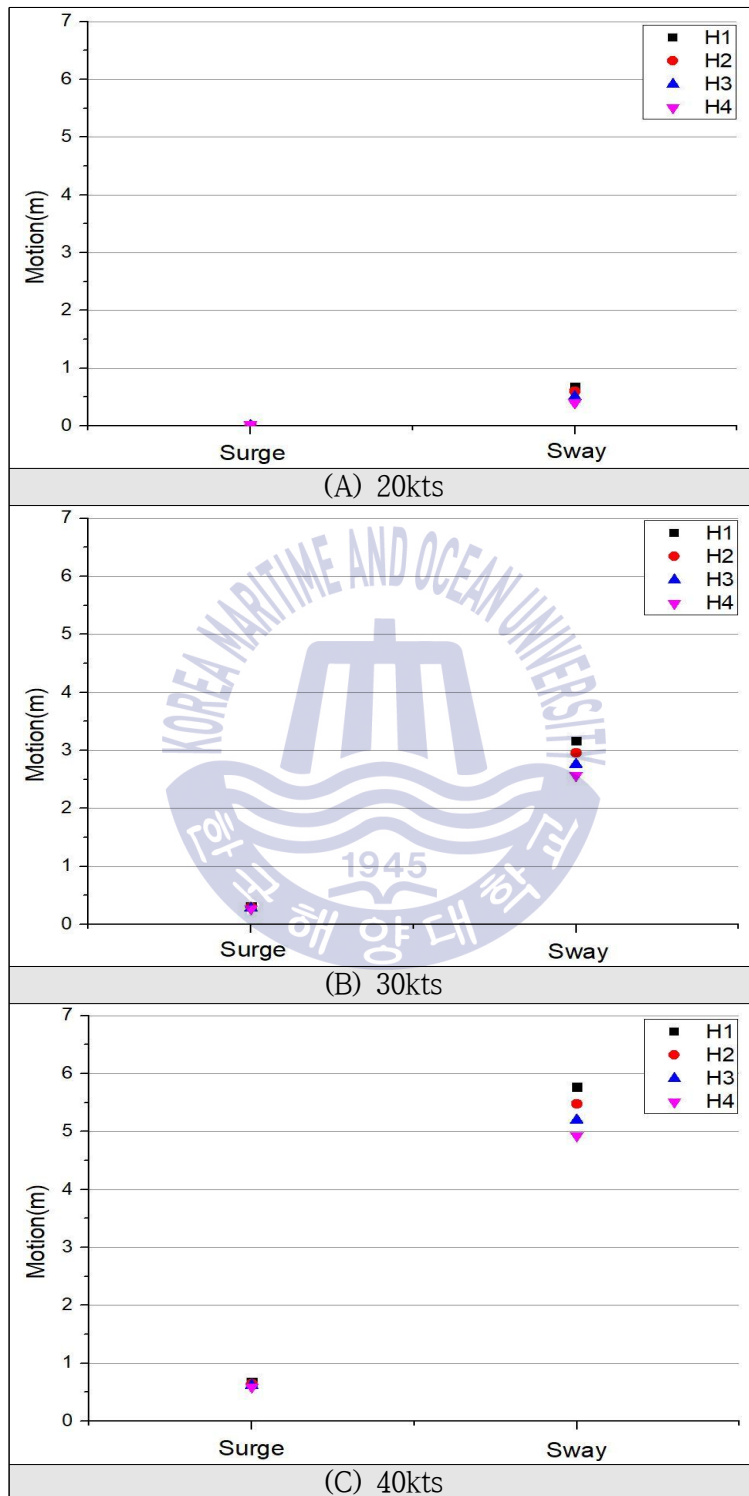


Fig. 60 Surge & sway motion (Group B, WD2)

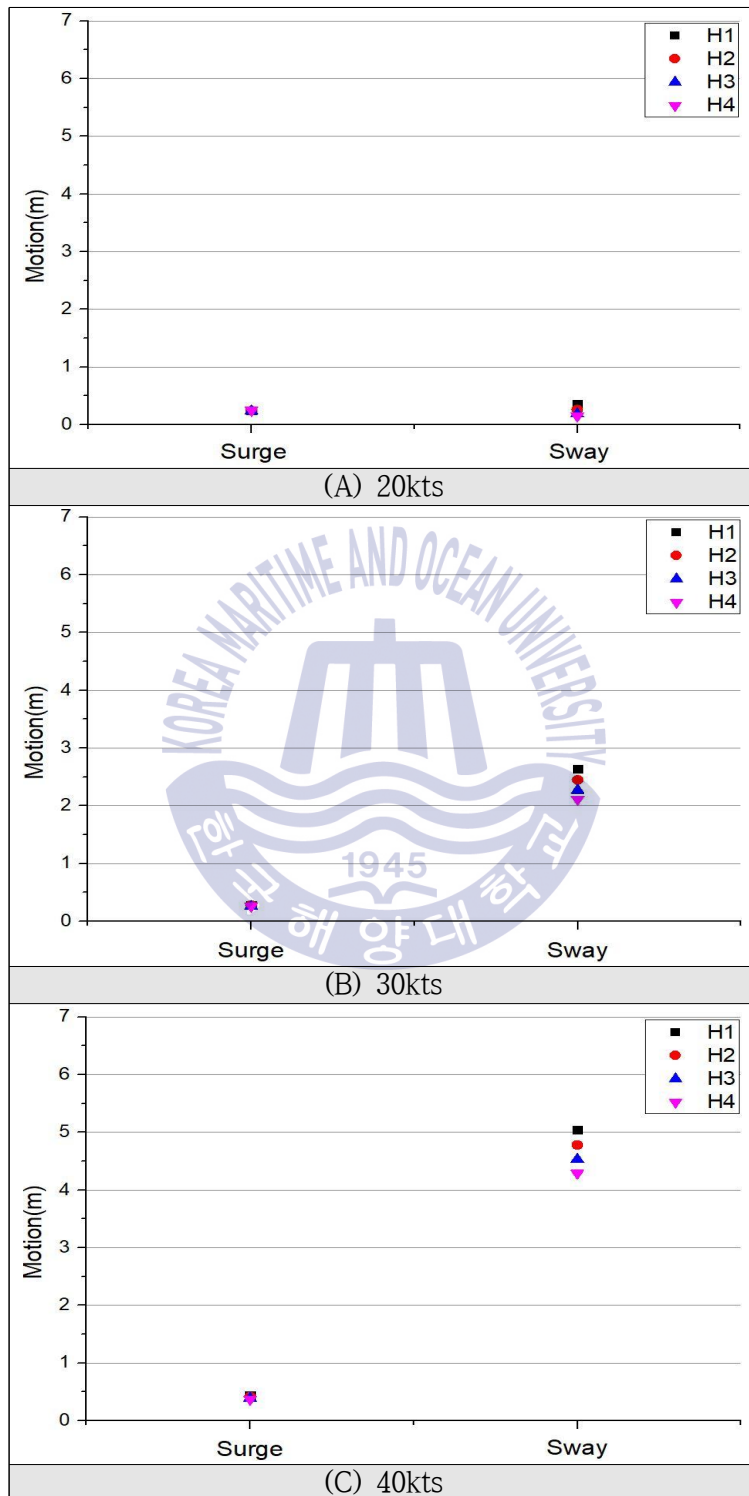


Fig. 61 Surge & sway motion (Group B, WD3)

4) 계류라인 수직각

계류라인 수직각은 부두에서 접안선 방향의 풍향 조건에서 풍속이 커질수록 감소되나, 이는 선체의 횡방향 직선운동인 Sway에 의한 감소량이므로 풍속에 따른 감소량은 제외하고, 풍속 20kts, 풍향 WD1 조건에서 마루높이 변화에 따른 계류라인 수직각은 Fig. 62와 같다.

최대 계류라인 수직각은 선수 스프링라인 6번이고, 그 값은 마루높이 H_1 35°, H_2 34°, H_3 32°, H_4 31° 이며, 최소 계류라인 수직각은 선미 스테인라인 12번으로 H_1 15°, H_2 13°, H_3 12°, H_4 11° 이다. 이 때 계류라인 수직각의 최대 감소율은 선미 스테인라인 12번에서 각각 13.3%, 7.7%, 8.3%로 나타났다.

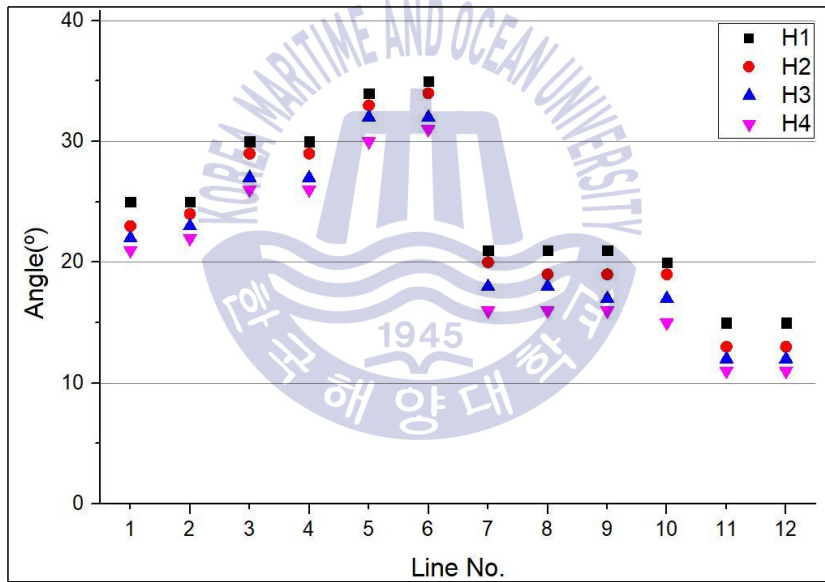


Fig. 62 Vertical angle of mooring line (Group B)

4.3.3 벌크선 분석 결과

C그룹의 대상선박인 10만톤급 벌크선의 마루높이에 따른 계류삭 장력, 계선 주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각의 계류안전성 수치 시뮬레이션 및 민감도 분석 결과는 다음과 같다.

1) 계류삭 장력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 63과 같고, 최대 장력값은 선미 스텐라인 12번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 11.6톤, 30kts 24.7톤, 40kts 40.3톤이며, 최소 장력값은 선미 브레스트라인 5번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 8.2톤, 30kts 15.3톤, 40kts 25.6톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 25.6~40.3톤, H_2 25.0~39.0톤, H_3 24.4~37.8톤, H_4 23.8~36.5톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 31.4톤, H_2 30.4톤, H_3 29.4톤, H_4 28.4톤으로 감소율은 각각 3.2%, 3.3%, 3.4%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 64와 같고, 최대 장력값은 선수 헤드라인 2번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 9.4톤, 30kts 17.9톤, 40kts 30.3톤이며, 최소 장력값은 선수 브레스트라인 5번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 7.9톤, 30kts 11.6톤, 40kts 18.5톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 18.5~30.3톤, H_2 18.1~29.3톤, H_3 17.8~28.3톤, H_4 17.4~27.3톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선미 스텐라인 11번으로 H_1 26.4톤, H_2 25.5톤, H_3 24.6톤, H_4 23.8톤으로 감소율은 각각 3.4%, 3.5%, 3.3%로 나타났다.

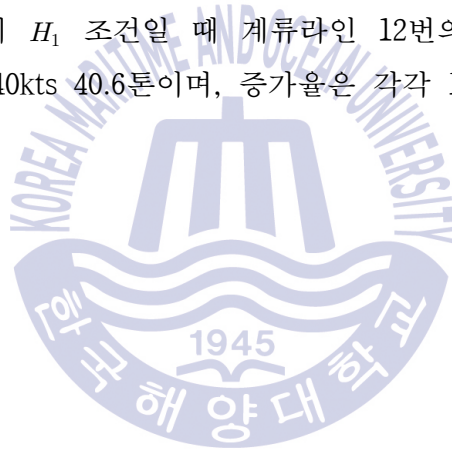
풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 65와 같고, 최대 장력값은 선미 스텐라인 12번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 12.1톤, 30kts 24.7톤, 40kts 40.6톤이며, 최소 장력값은 선수 브레스트라인 5번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 8.5톤, 30kts 9.6톤, 40kts 16.4톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력

은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 16.4~40.6톤, H_2 16.0~39.3톤, H_3 15.6~38.0톤, H_4 15.2~36.8톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 19.5톤, H_2 18.8톤, H_3 18.1톤, H_4 17.5톤으로 감소율은 각각 3.6%, 3.7%, 3.3%로 나타났다.

풍속에 따른 계류삭 장력값은 Fig. 66과 같으며, 풍향 WD1, 마루높이 H_1 조건 일 때 계류라인 12번의 장력값은 풍속 20kts 11.6톤, 30kts 24.7톤, 40kts 40.3톤이며, 증가율은 각각 112.9%, 63.2%로 나타났다.

풍향 WD2, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 2번의 장력값은 풍속 20kts 9.4톤, 30kts 17.9톤, 40kts 30.3톤이며, 증가율은 각각 90.4%, 69.3%로 나타났다.

풍향 WD3, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 12번의 장력값은 풍속 20kts 12.1톤, 30kts 24.7톤, 40kts 40.6톤이며, 증가율은 각각 104.1%, 64.4%로 나타났다.



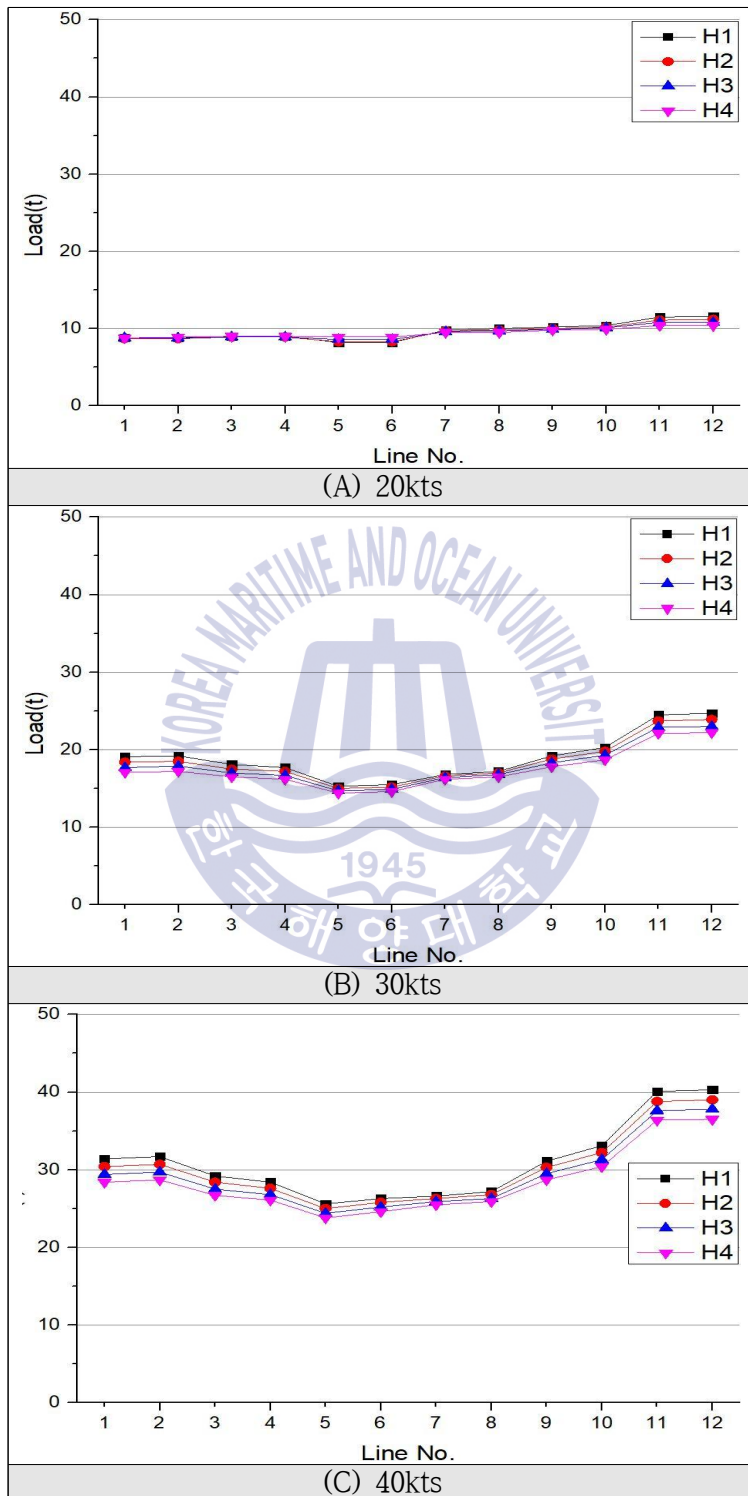


Fig. 63 Tension of line (Group C, WD1)

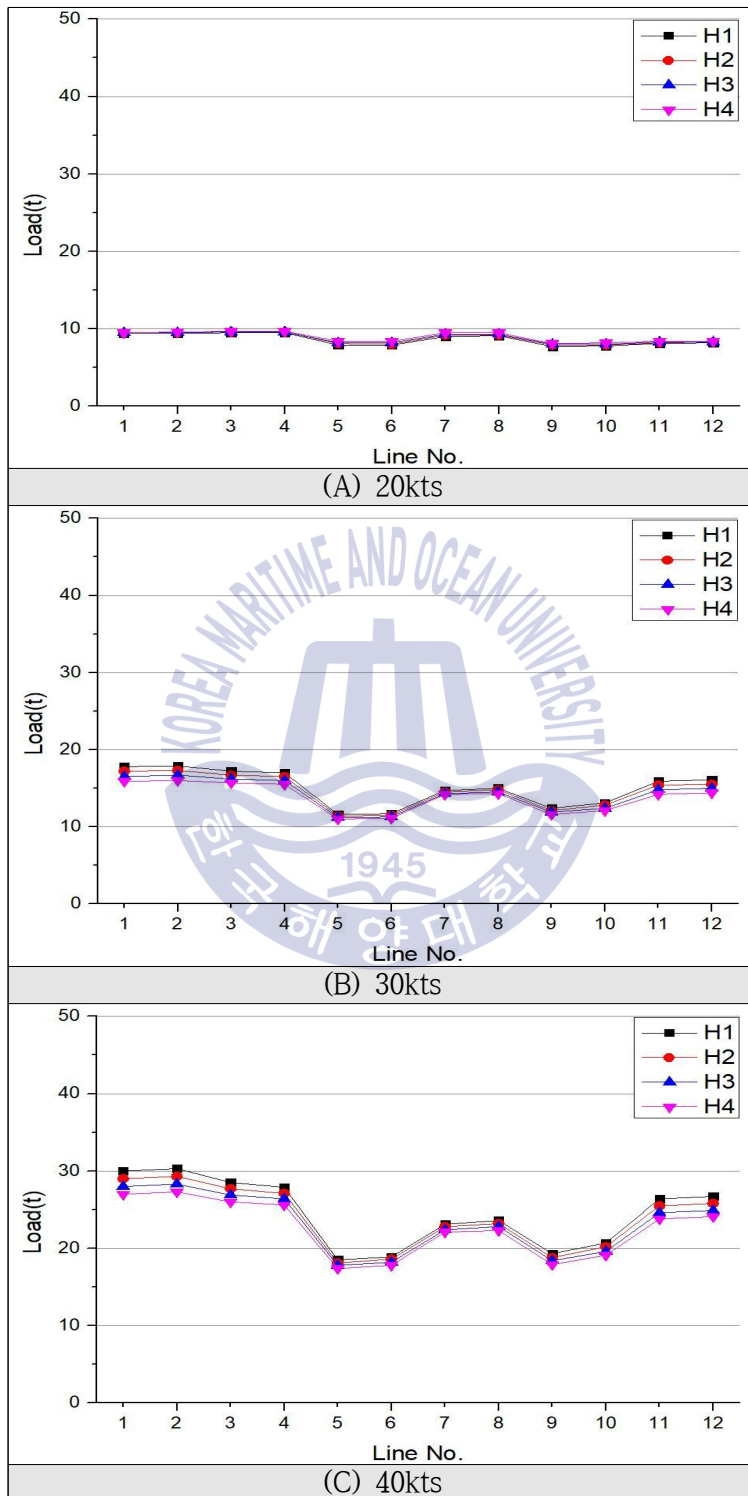


Fig. 64 Tension of line (Group C, WD2)

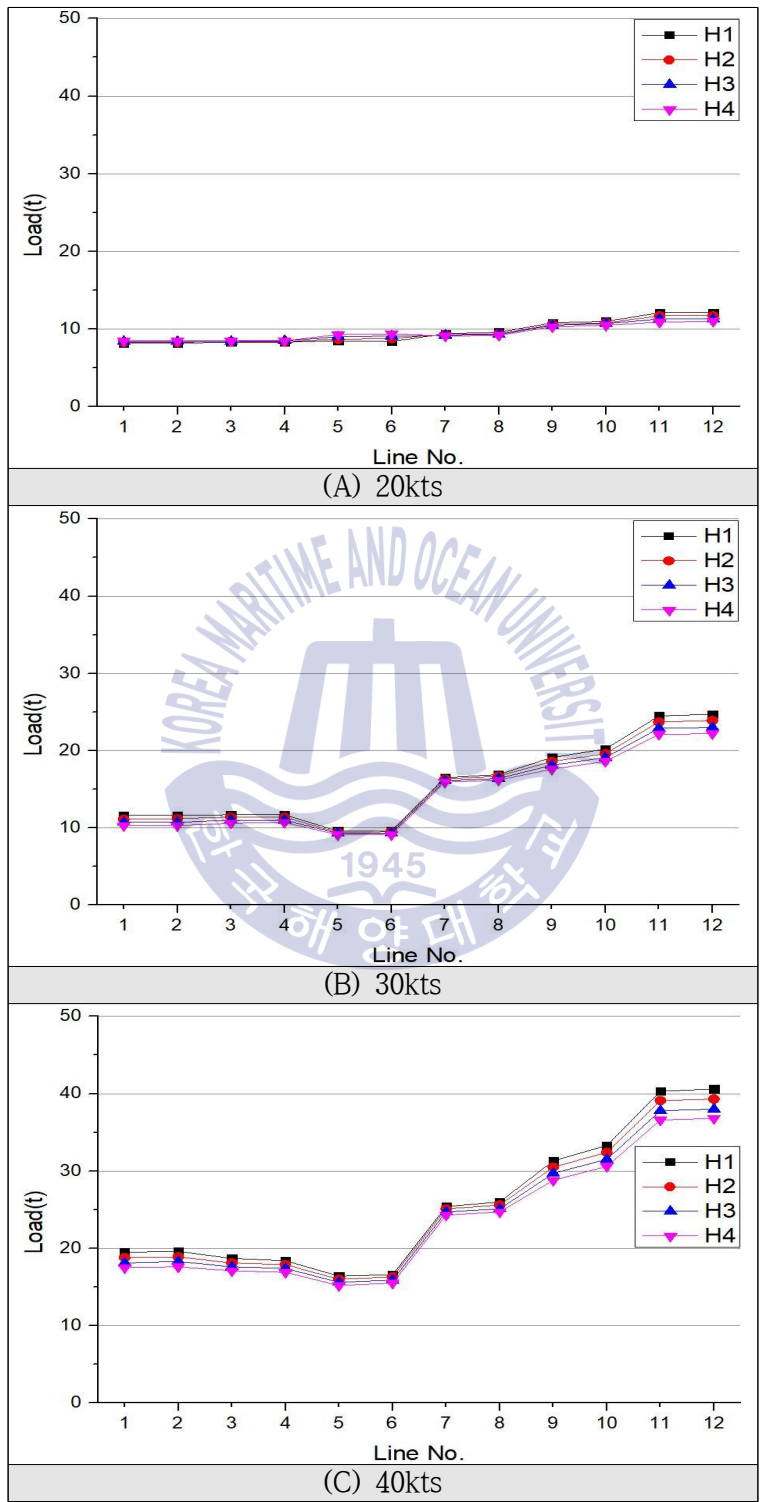


Fig. 65 Tension of line (Group C, WD3)

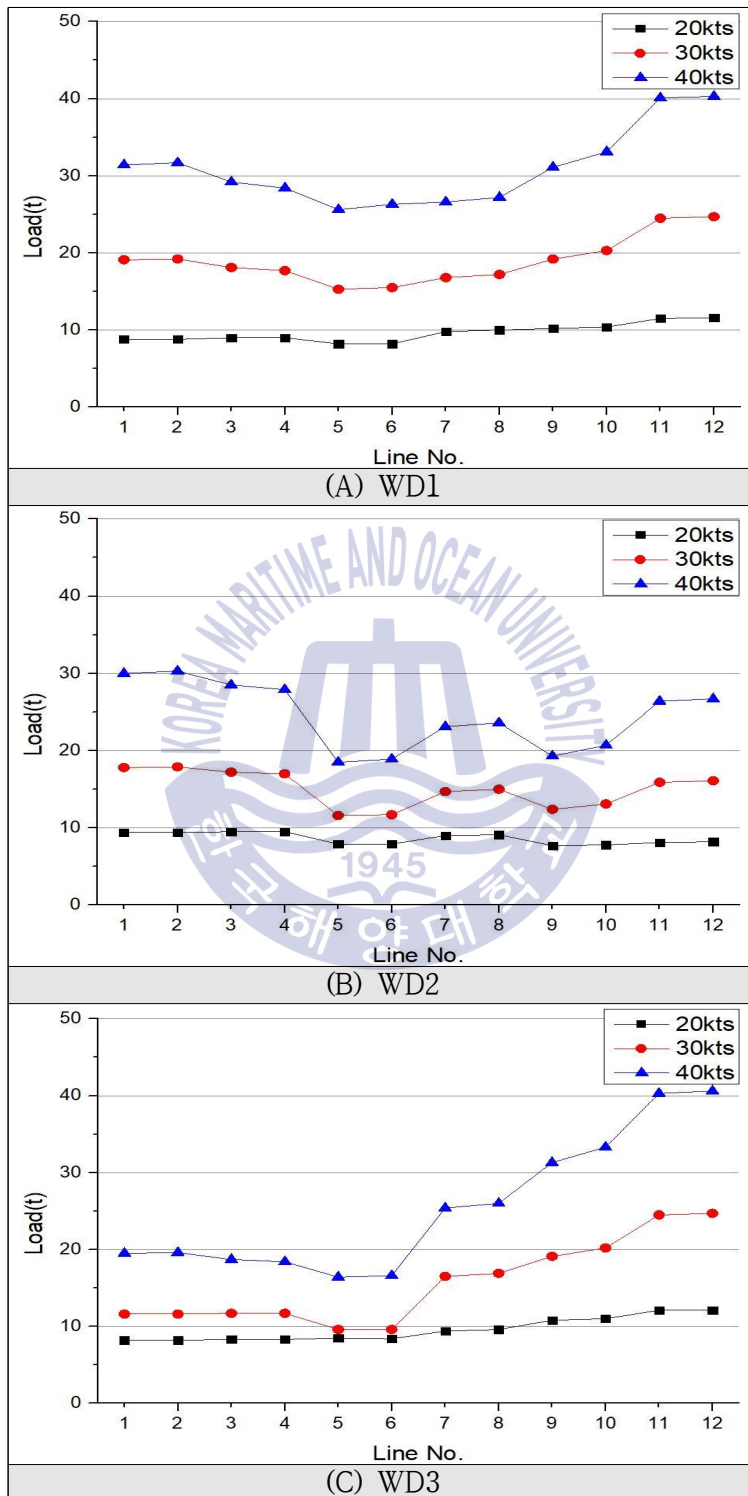


Fig. 66 Tension of line depending on wind speed (Group C)

2) 계선주 견인력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 67과 같고, 최대 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 43.3톤, 30kts 88.0톤, 40kts 143.3톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 2번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 16.3톤, 30kts 30.9톤, 40kts 52.0톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 52.0~143.3톤, H_2 50.8~139.1톤, H_3 49.6~135.0톤, H_4 48.4~130.8톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 120.1톤, H_2 116.5톤, H_3 113.0톤, H_4 109.5톤으로 감소율은 각각 3.0%, 3.0%, 3.1%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 68과 같고, 최대 견인력값은 선수 계선주 1번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 37.7톤, 30kts 69.6톤, 40kts 116.2톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 2번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 15.7톤, 30kts 23.3톤, 40kts 37.4톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 37.4~116.2톤, H_2 36.7~112.5톤, H_3 36.0~109.0톤, H_4 35.2~105.5톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 116.2톤, H_2 112.5톤, H_3 109.0톤, H_4 105.5톤으로 감소율은 각각 3.2%, 3.1%, 3.2%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 69와 같고, 최대 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 45.4톤, 30kts 87.6톤, 40kts 144.3톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 2번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 16.9톤, 30kts 19.3톤, 40kts 33.0톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 33.0~144.3톤, H_2 32.2~140.0톤, H_3 31.4~135.8톤, H_4 30.7~131.6톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 75.8톤, H_2 73.4톤, H_3 71.0톤, H_4 68.7톤으로 감소율은 각각 3.2%, 3.3%, 3.2%로 나타났다.

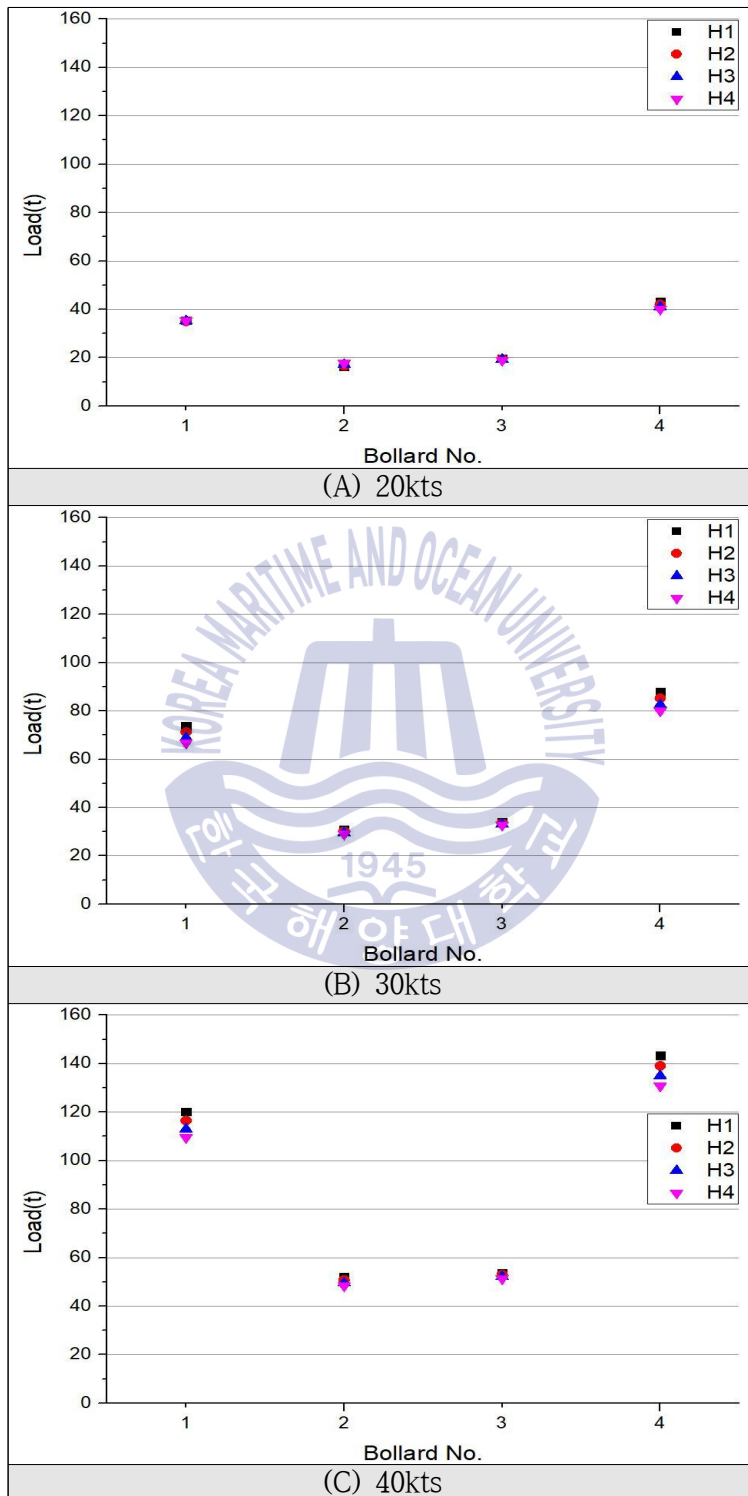


Fig. 67 Load of bollard (Group C, WD1)

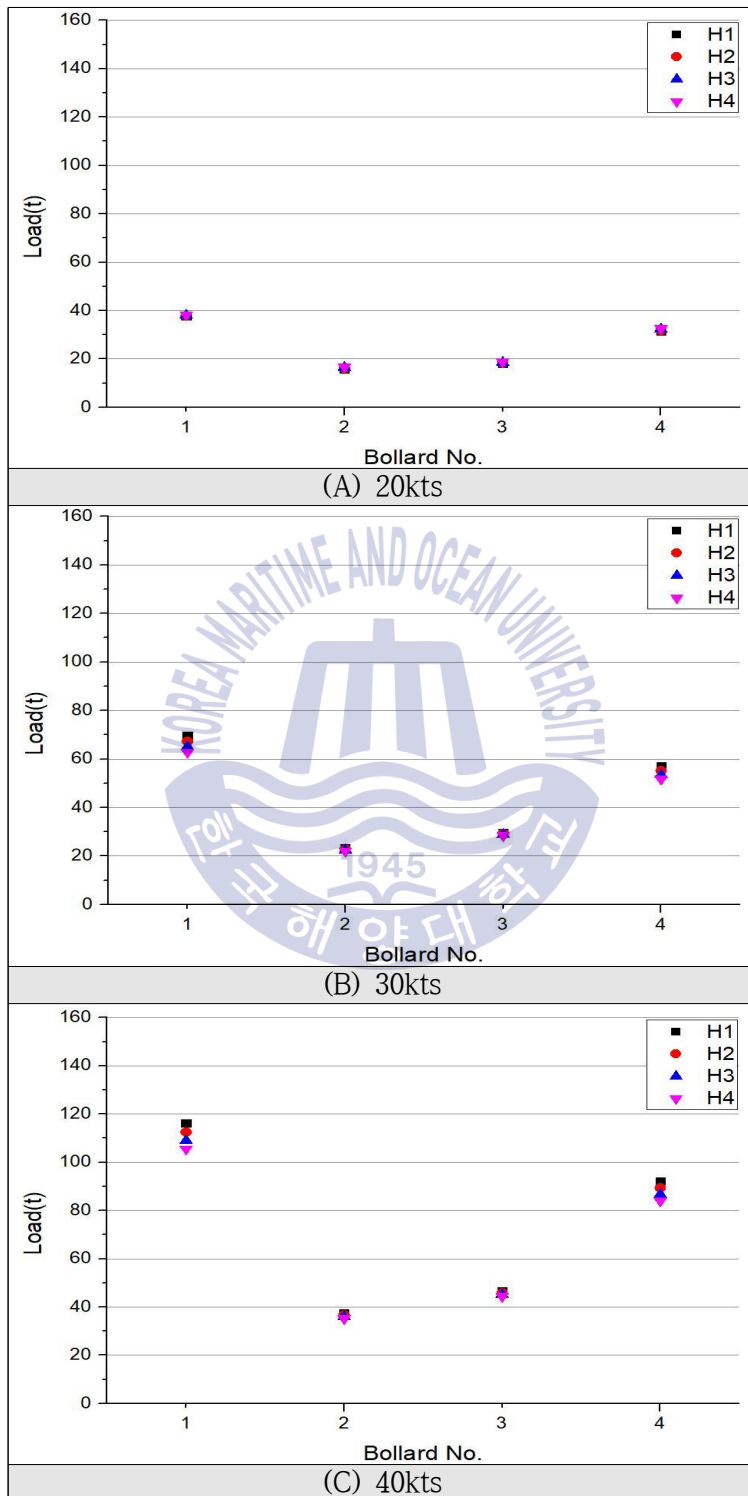


Fig. 68 Load of bollard (Group C, WD2)

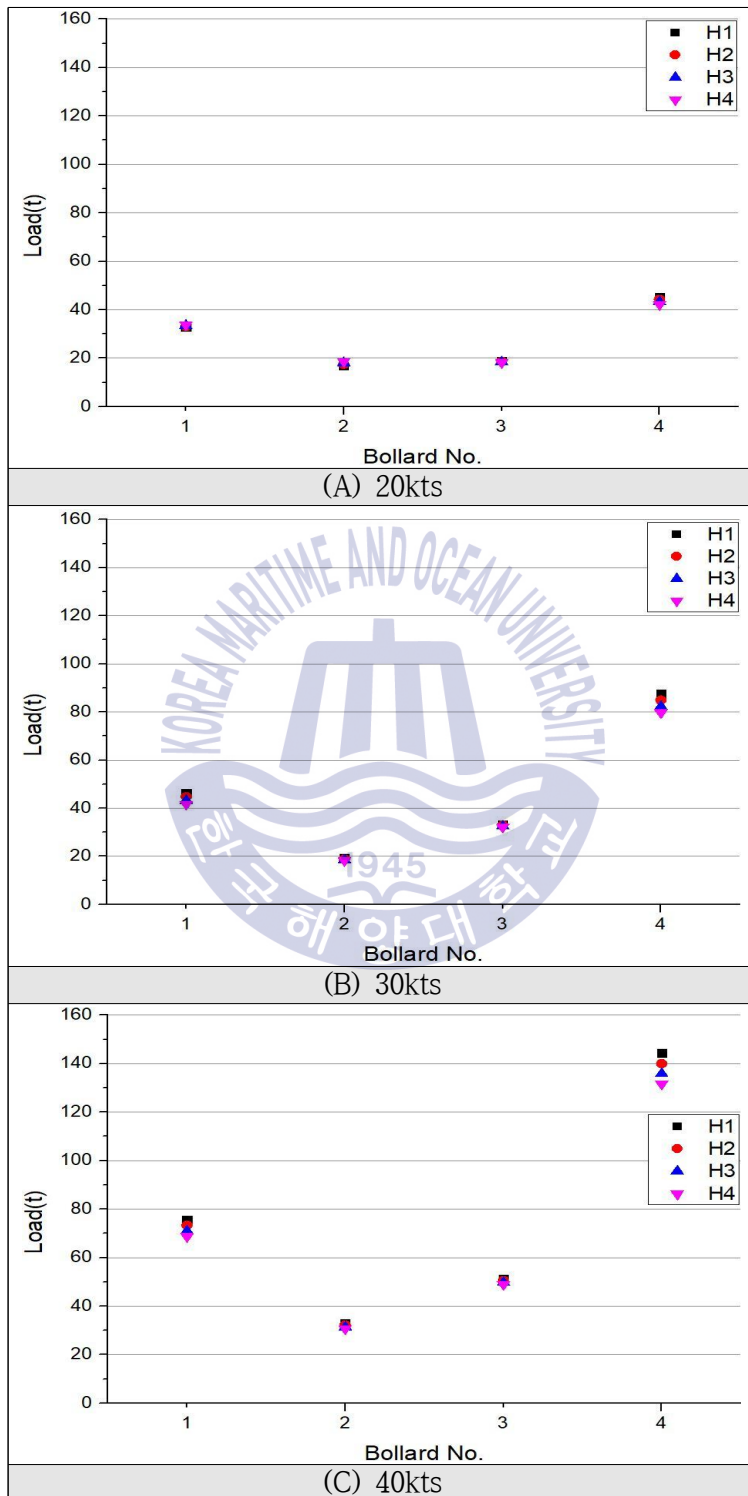


Fig. 69 Load of bollard (Group C, WD3)

3) 선체동요량

선체 6자유도운동 중 본 시나리오에서 가장 동요량이 큰 운동은 Surge와 Sway이며, 그 분석 결과는 다음과 같다.

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 70과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.38m, 30kts 3.13m, 40kts 5.91m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.08m, 30kts 0.25m, 40kts 0.38m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.38m, H_2 0.29m, H_3 0.23m, H_4 0.18m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 23.7%, 20.7%, 21.7%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 5.91m, H_2 5.61m, H_3 5.31m, H_4 5.03m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 5.1%, 5.3%, 5.3%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 71과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0m, 30kts 2.03m, 40kts 4.44m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.10m, 30kts 0.43m, 40kts 0.77m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 30kts에서 마루높이 H_1 2.03m, H_2 1.84m, H_3 1.66m, H_4 1.49m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 9.4%, 9.8%, 10.2%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 4.44m, H_2 4.17m, H_3 3.93m, H_4 3.69m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 6.1%, 5.8%, 6.1%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 72와 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.36m, 30kts 2.23m, 40kts 4.71m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0m, 30kts 0.29m, 40kts 0.35m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.36m, H_2 0.30m, H_3 0.25m, H_4 0.19m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 16.7%, 16.7%, 24.0%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 4.71m, H_2 4.44m, H_3 4.18m, H_4 3.93m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 5.7%, 5.9%, 6.0%로 나타났다.

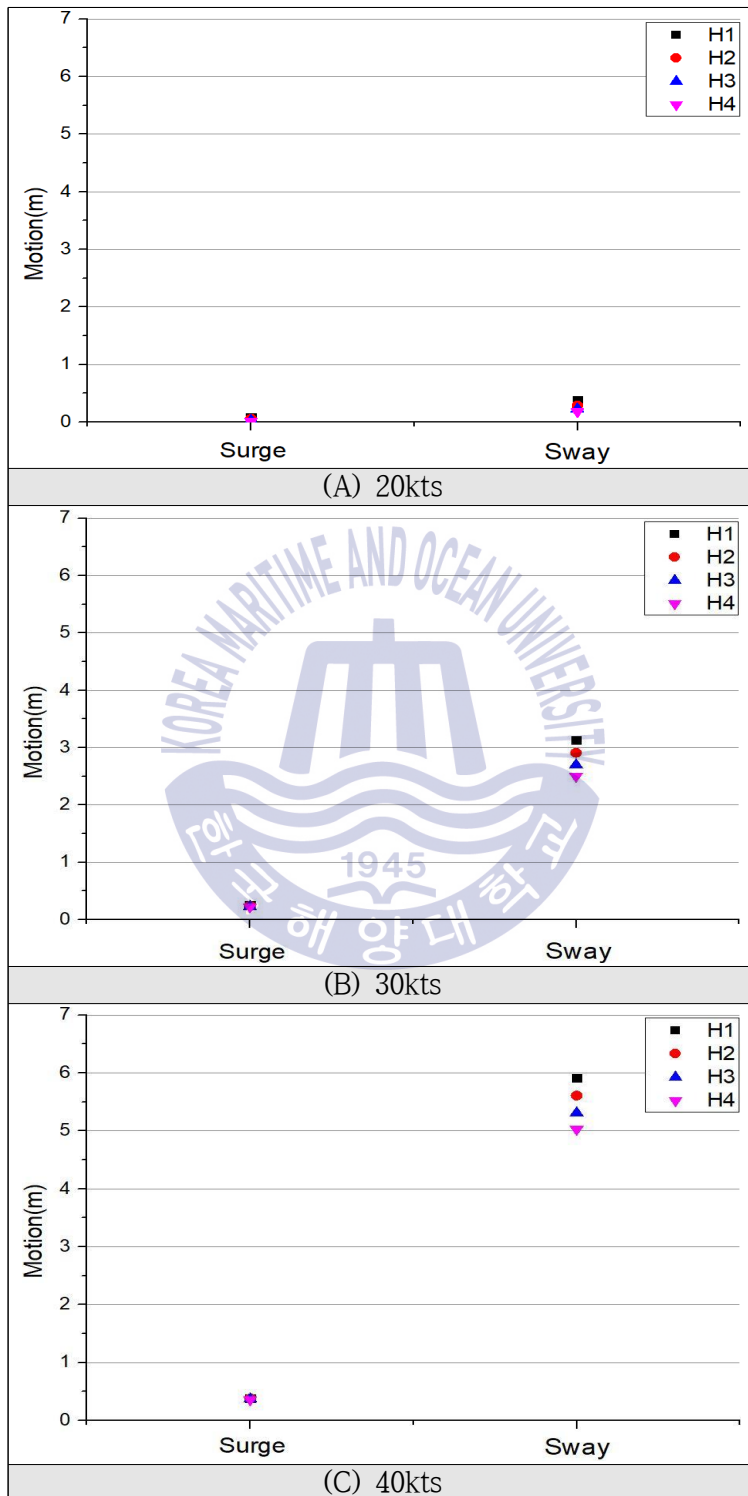


Fig. 70 Surge & sway motion (Group C, WD1)

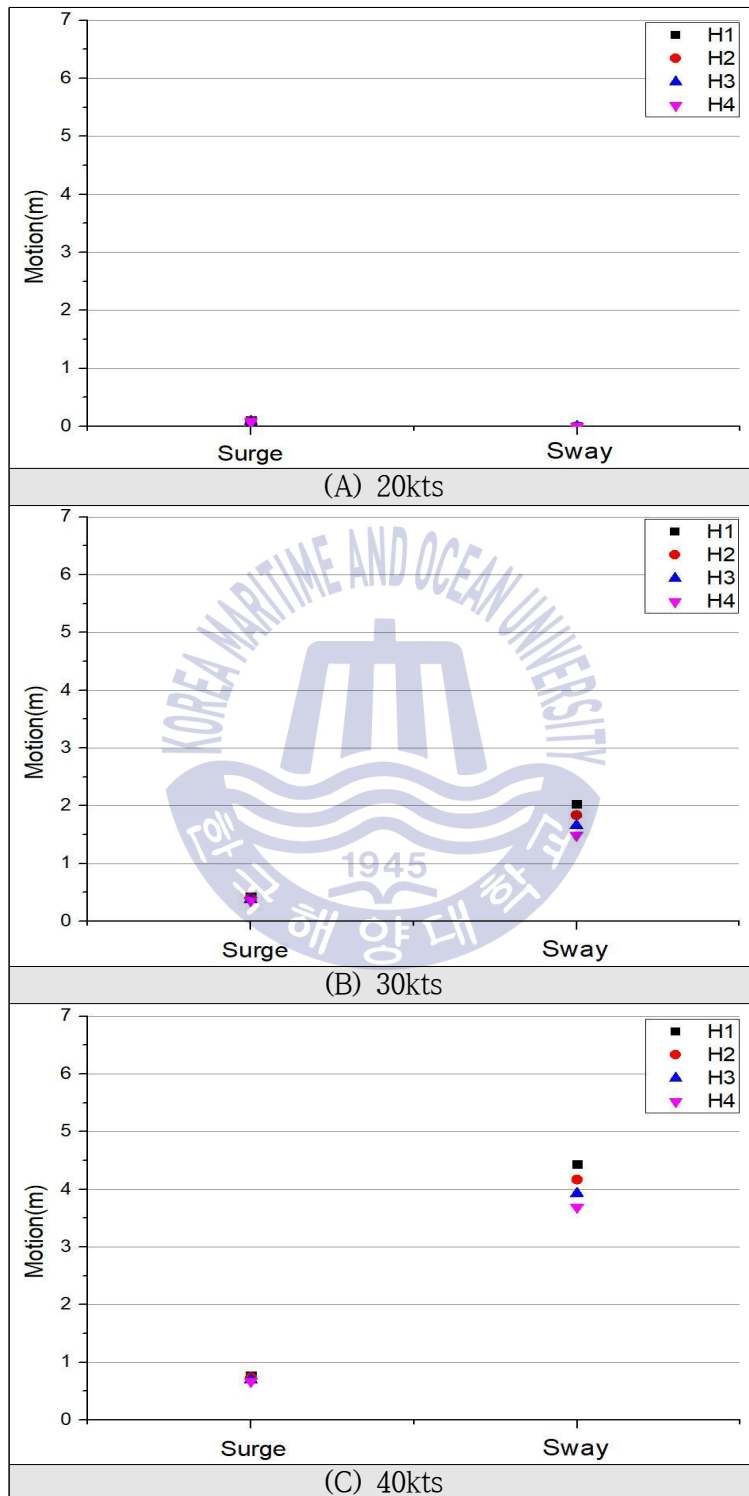


Fig. 71 Surge & sway motion (Group C, WD2)

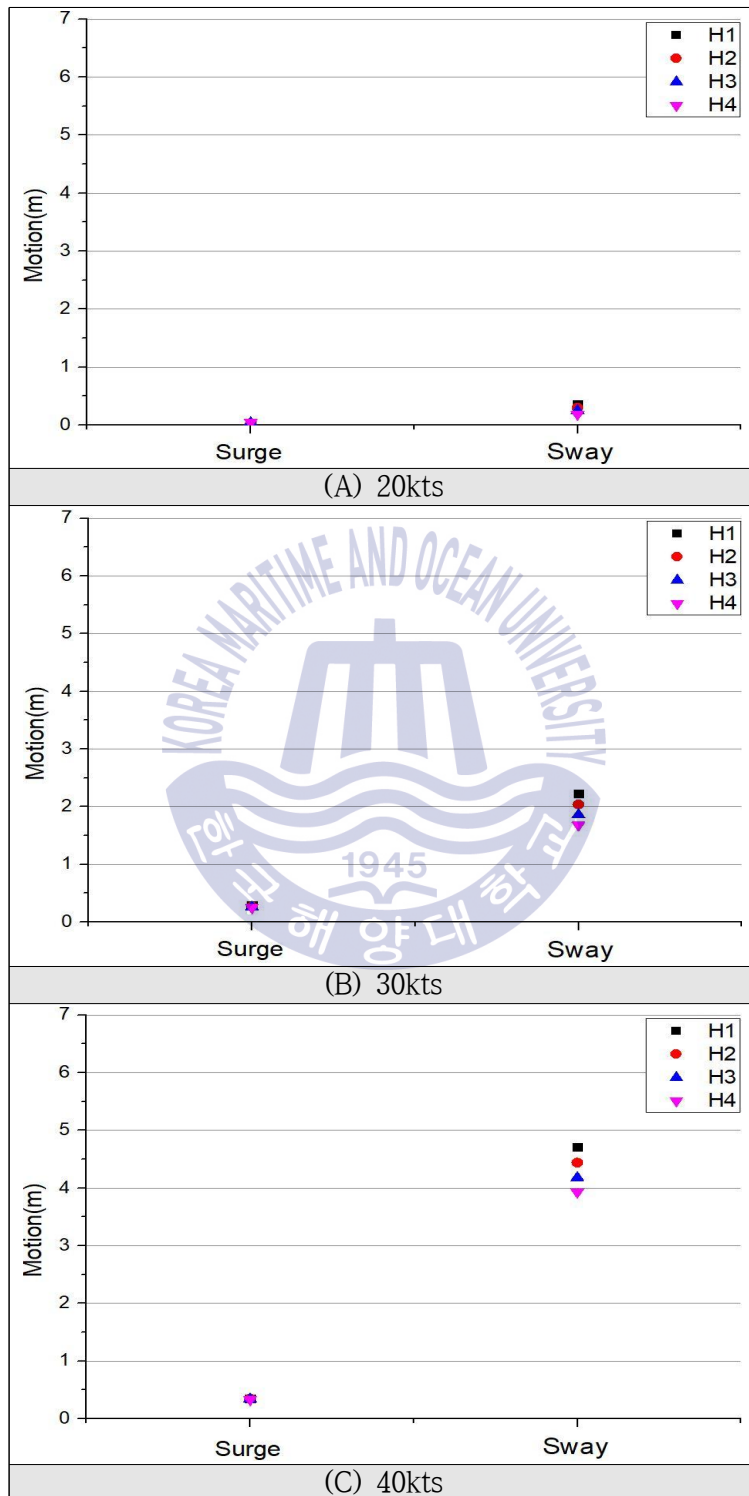


Fig. 72 Surge & sway motion (Group C, WD3)

4) 계류라인 수직각

계류라인 수직각은 부두에서 접안선 방향의 풍향 조건에서 풍속이 커질수록 감소되나, 이는 선체의 횡방향 직선운동인 Sway에 의한 감소량이므로 풍속에 따른 감소량은 제외하고, 풍속 20kts, 풍향 WD1 조건에서 마루높이 변화에 따른 계류라인 수직각은 Fig. 73과 같다.

최대 계류라인 수직각은 선미 스프링라인 7번이고, 그 값은 마루높이 H_1 33°, H_2 32°, H_3 30°, H_4 28° 이며, 최소 계류라인 수직각은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 18°, H_2 17°, H_3 16°, H_4 15° 이다. 이 때 계류라인 수직각의 최대 감소율은 선수 헤드라인 2번에서 각각 5.3%, 5.6%, 11.8%로 나타났다.

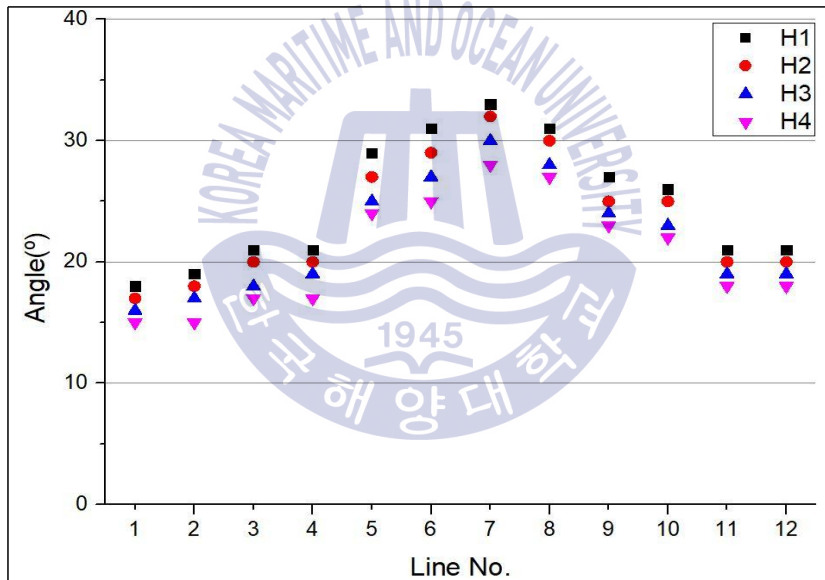


Fig. 73 Vertical angle of mooring line (Group C)

4.3.4 LNG선 분석 결과

D그룹의 대상선박인 10만톤급 LNG선의 마루높이에 따른 계류삭 장력, 계선 주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각의 계류안전성 수치 시뮬레이션 및 민감도 분석 결과는 다음과 같다.

1) 계류삭 장력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 74와 같고, 최대 장력값은 선미 스티라인 11번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 18.6톤, 30kts 40.1톤, 40kts 66.8톤이며, 최소 장력값은 선미 브레스트라인 5번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 12.4톤, 30kts 21.5톤, 40kts 34.7톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 34.7~66.8톤, H_2 33.9~65.1톤, H_3 33.1~63.4톤, H_4 32.3~61.8톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 61.2톤, H_2 59.5톤, H_3 57.9톤, H_4 56.3톤으로 감소율은 각각 2.8%, 2.7%, 2.8%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 75와 같고, 최대 장력값은 선수 헤드라인 2번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 15.0톤, 30kts 33.5톤, 40kts 57.1톤이며, 최소 장력값은 선미 브레스트라인 7번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 10.4톤, 30kts 15.8톤, 40kts 24.0톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 24.0~57.1톤, H_2 23.6~55.6톤, H_3 23.2~54.0톤, H_4 22.8~52.5톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 56.0톤, H_2 54.4톤, H_3 52.9톤, H_4 51.3톤으로 감소율은 각각 2.9%, 2.8%, 3.0%로 나타났다.

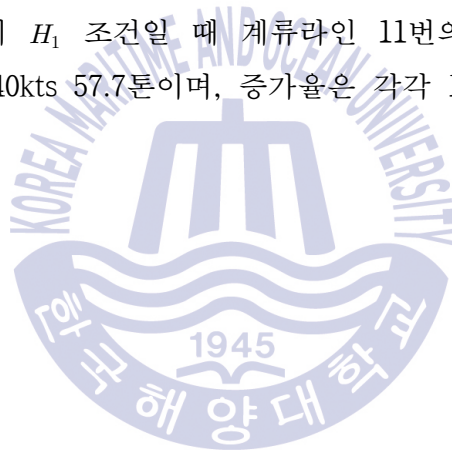
풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계류삭 장력값은 Fig. 76과 같고, 최대 장력값은 선미 스티라인 11번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 15.7톤, 30kts 34.1톤, 40kts 57.7톤이며, 최소 장력값은 선수 브레스트라인 6번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 10.0톤, 30kts 12.3톤, 40kts 19.2톤이다. 마루높이 상승에 따른 계류삭 장

력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 19.2~57.7톤, H_2 18.8~56.2톤, H_3 18.4~54.7톤, H_4 18.0~53.2톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계류삭은 선수 헤드라인 1번으로 H_1 27.1톤, H_2 26.3톤, H_3 25.5톤, H_4 24.7톤으로 감소율은 각각 3.0%, 3.0%, 3.1%로 나타났다.

풍속에 따른 계류삭 장력값은 Fig. 77과 같으며, 풍향 WD1, 마루높이 H_1 조건 일 때 계류라인 11번의 장력값은 풍속 20kts 18.6톤, 30kts 40.1톤, 40kts 66.8톤이며, 증가율은 각각 115.6%, 66.6%로 나타났다.

풍향 WD2, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 2번의 장력값은 풍속 20kts 15.0톤, 30kts 33.5톤, 40kts 57.1톤이며, 증가율은 각각 123.3%, 70.4%로 나타났다.

풍향 WD3, 마루높이 H_1 조건일 때 계류라인 11번의 장력값은 풍속 20kts 15.7톤, 30kts 34.1톤, 40kts 57.7톤이며, 증가율은 각각 117.2%, 69.2%로 나타났다.



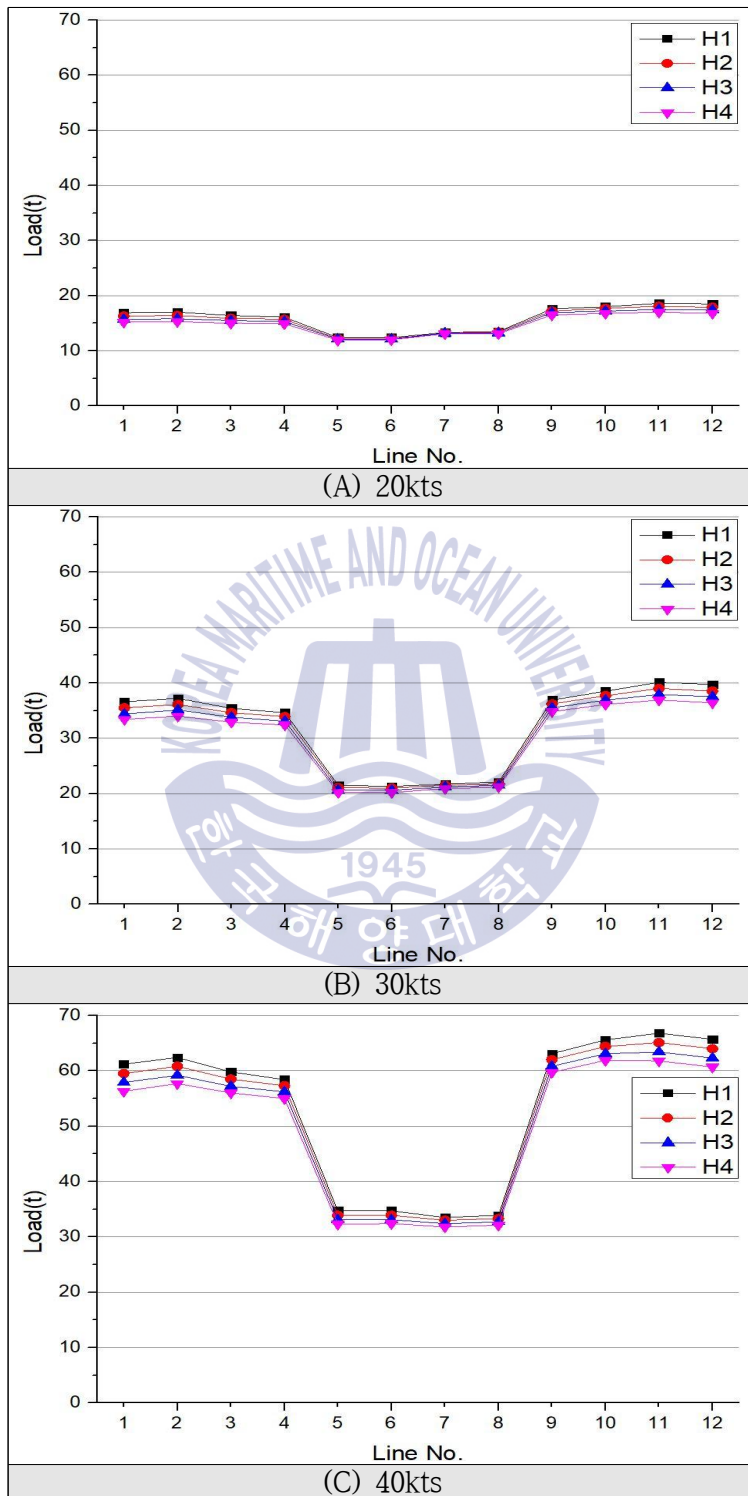


Fig. 74 Tension of line (Group D, WD1)

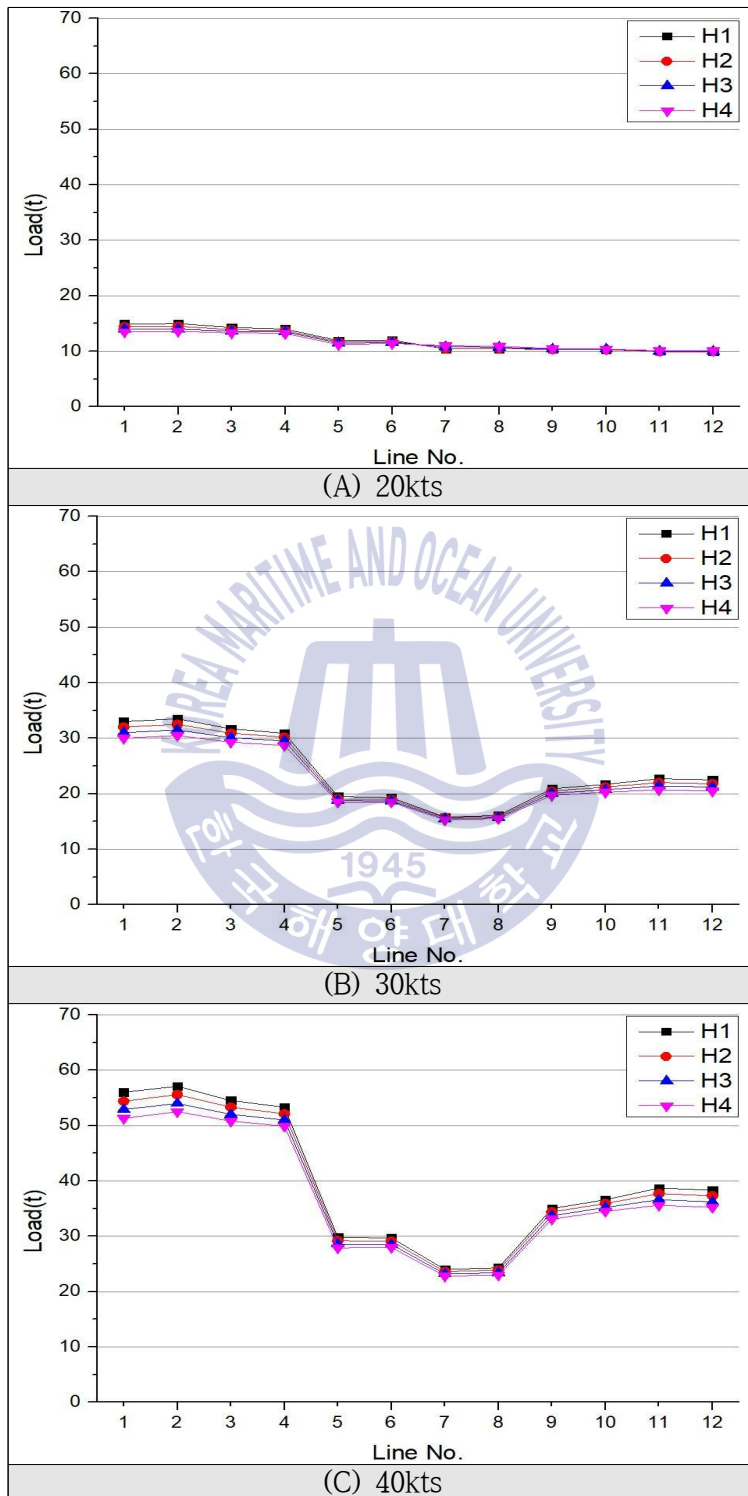


Fig. 75 Tension of line (Group D, WD2)

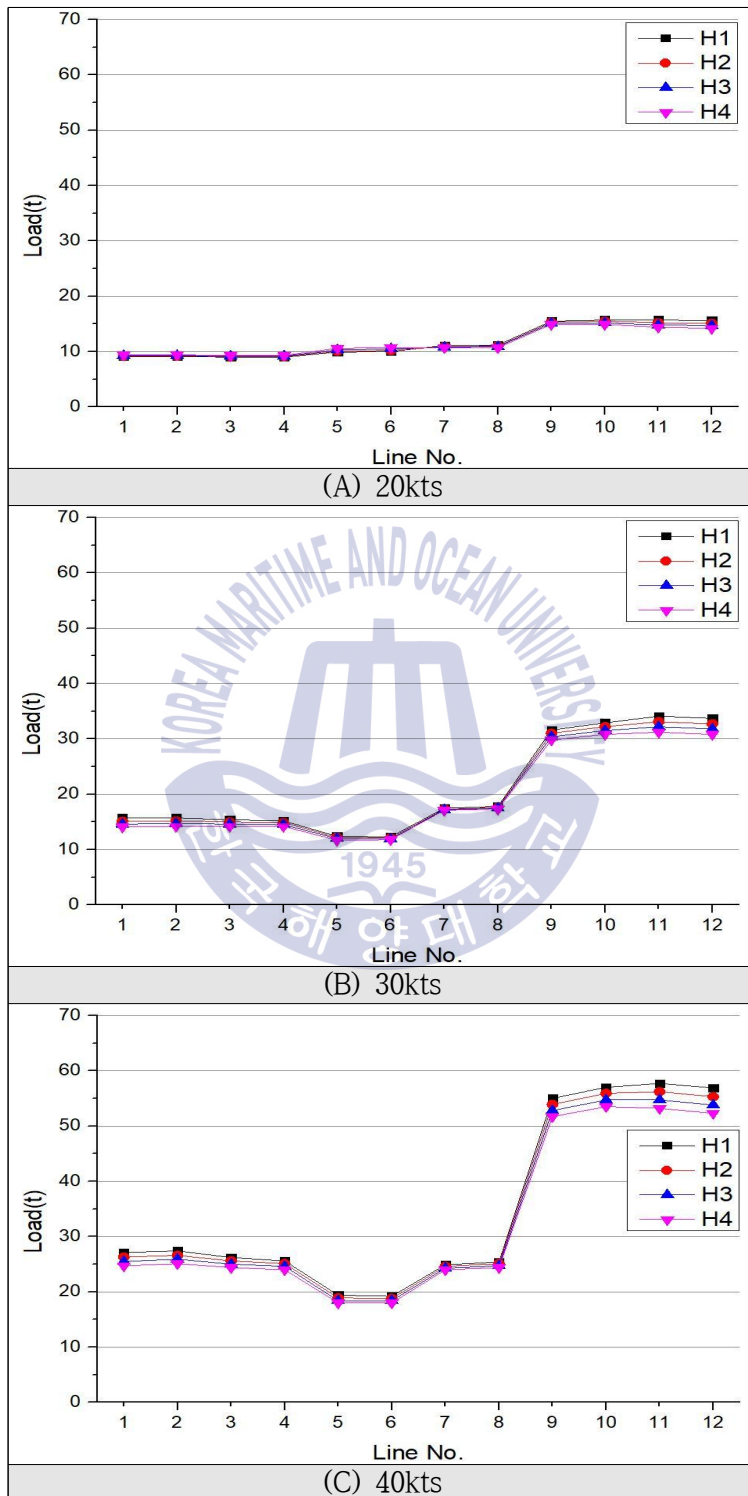


Fig. 76 Tension of line (Group D, WD3)

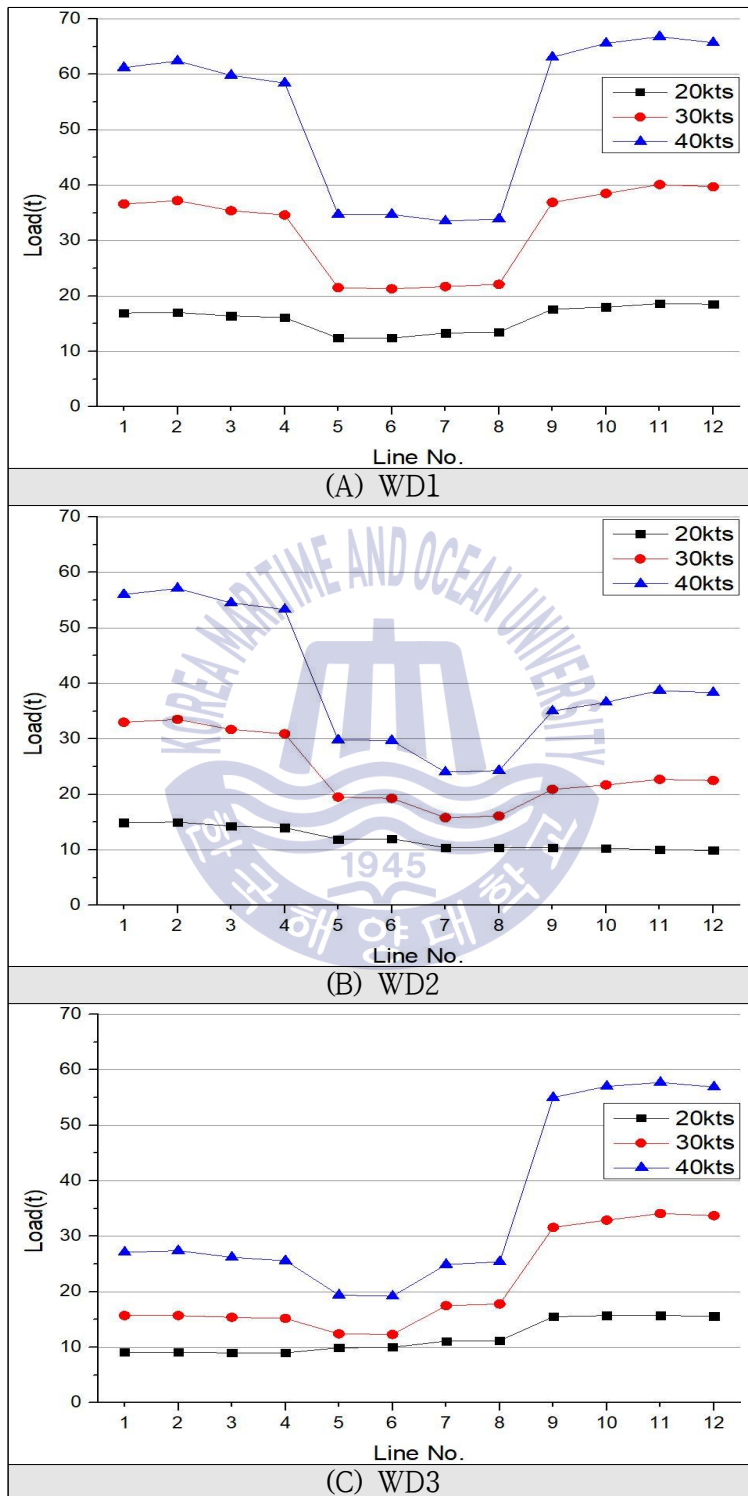


Fig. 77 Tension of line depending on wind speed (Group D)

2) 계선주 견인력

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 78과 같고, 최대 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 71.8톤, 30kts 153.5톤, 40kts 259.0톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 2번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 24.8톤, 30kts 42.9톤, 40kts 69.4톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 67.5~259.0톤, H_2 66.3~253.2톤, H_3 65.1~247.4톤, H_4 63.9~241.8톤이며, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 240.8톤, H_2 235.2톤, H_3 229.5톤, H_4 223.9톤으로 감소율은 각각 2.3%, 2.4%, 2.4%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 79와 같고, 최대 견인력값은 선수 계선주 1번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 57.9톤, 30kts 128.4톤, 40kts 220.0톤이며, 최소 견인력값은 선미 계선주 3번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 20.7톤, 30kts 31.9톤, 40kts 48.3톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 48.3~220.0톤, H_2 47.4~214.4톤, H_3 46.6~208.9톤, H_4 45.8~203.5톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 220.0톤, H_2 214.4톤, H_3 208.9톤, H_4 203.5톤으로 감소율은 각각 2.5%, 2.6%, 2.6%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 계선주 견인력값은 Fig. 80과 같고, 최대 견인력값은 선미 계선주 4번의 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 61.7톤, 30kts 130.8톤, 40kts 224.4톤이며, 최소 견인력값은 선수 계선주 2번의 마루높이 H_1 일 때 20kts 19.8톤, 30kts 24.7톤, 40kts 38.6톤이다. 마루높이 상승에 따른 계선주 견인력은 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 38.6~224.4톤, H_2 37.7~219.1톤, H_3 36.8~213.8톤, H_4 35.9~208.7톤, 마루높이 변화에 따른 감소율이 가장 큰 계선주는 선수 계선주 1번으로 H_1 105.8톤, H_2 103.0톤, H_3 100.3톤, H_4 97.6톤으로 감소율은 각각 2.6%, 2.6%, 2.7%로 나타났다.

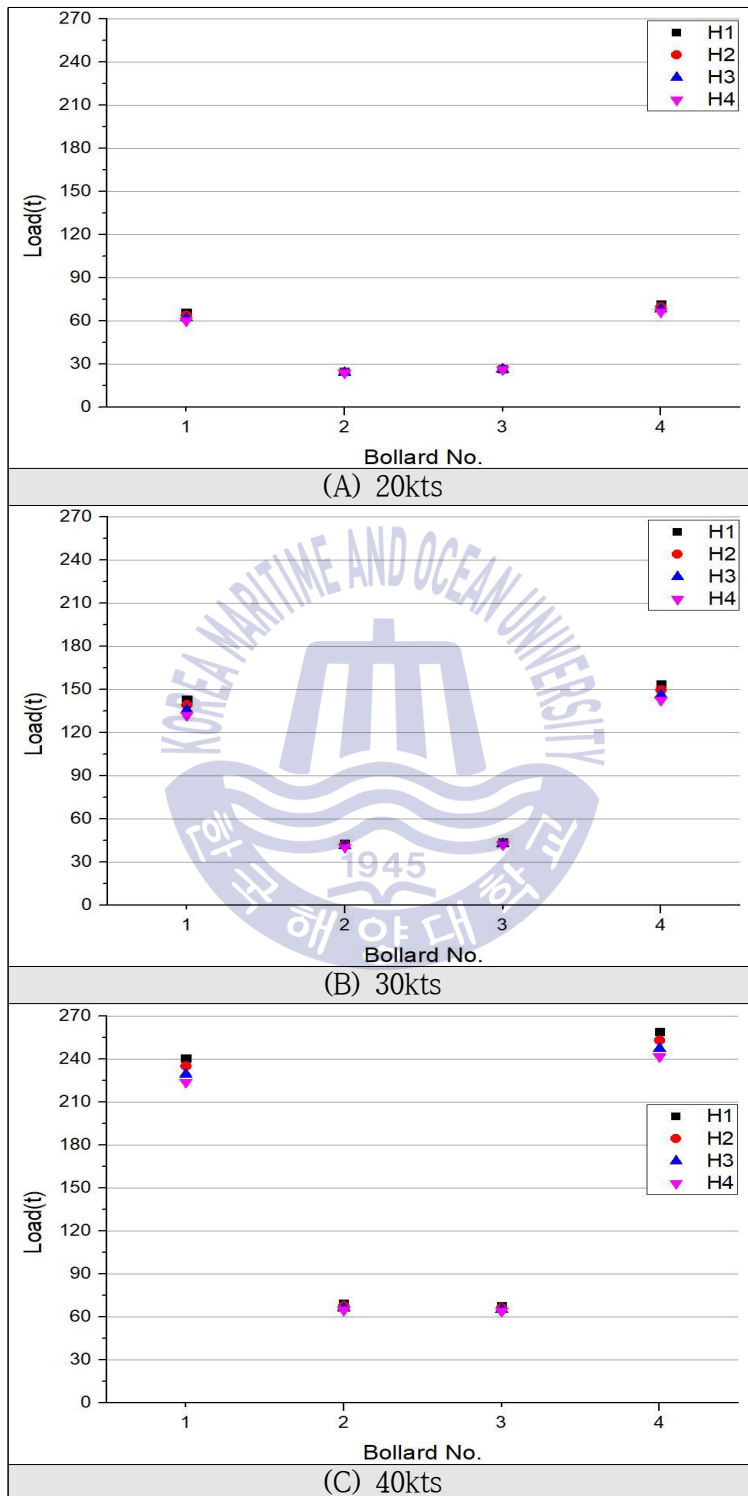


Fig. 78 Load of bollard (Group D, WD1)

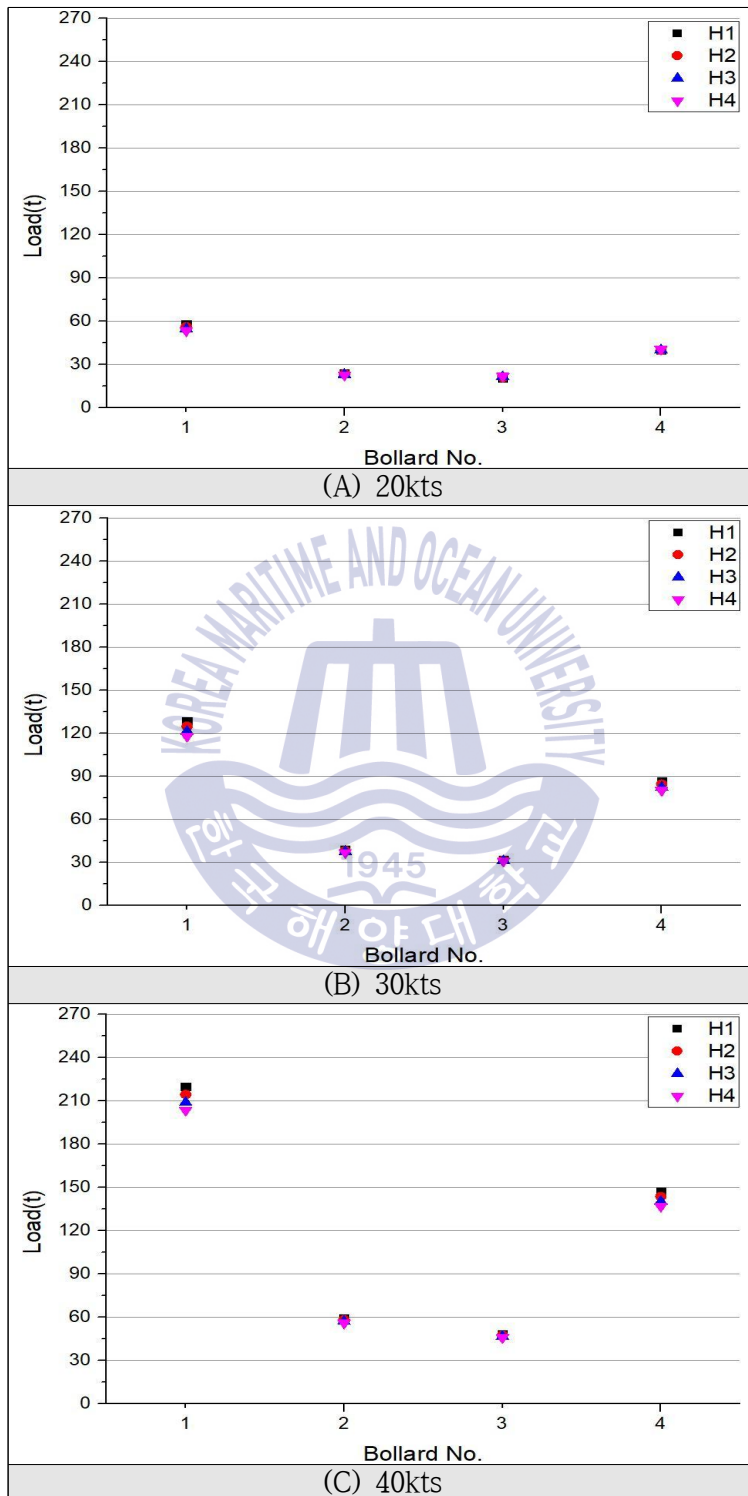


Fig. 79 Load of bollard (Group D, WD2)

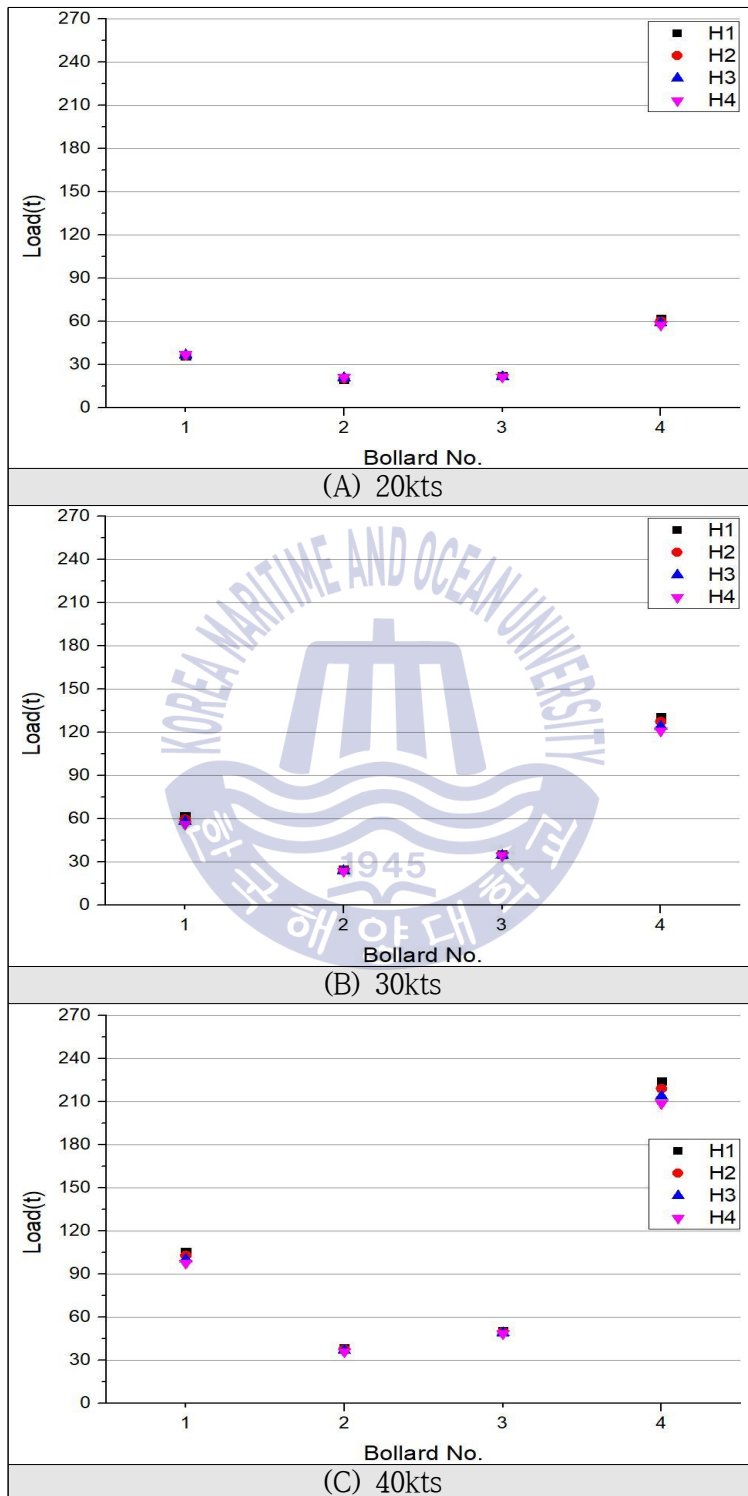


Fig. 80 Load of bollard (Group D, WD3)

3) 선체동요량

선체 6자유도운동 중 본 시나리오에서 가장 동요량이 큰 운동은 Surge와 Sway이며, 그 분석 결과는 다음과 같다.

풍향 WD1, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 81과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 1.25m, 30kts 4.15m, 40kts 7.23m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.07m, 30kts 0.30m, 40kts 0.48m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 1.25m, H_2 1.12m, H_3 1.01m, H_4 0.89m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 10.4%, 9.8%, 11.9%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 7.23m, H_2 6.93m, H_3 6.64m, H_4 6.37m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 4.1%, 4.2%, 4.1%로 나타났다.

풍향 WD2, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 82와 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.40m, 30kts 2.77m, 40kts 5.32m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.05m, 30kts 0.20m, 40kts 0.49m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.40m, H_2 0.33m, H_3 0.28m, H_4 0.23m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 17.5%, 15.1%, 17.9%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 5.32m, H_2 5.07m, H_3 4.83m, H_4 4.60m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 4.7%, 4.7%, 4.8%로 나타났다.

풍향 WD3, 모든 풍속 조건에서 Surge와 Sway값은 Fig. 83과 같으며, 6자유도운동 중 Sway 운동이 가장 동요량이 크고, 그 값은 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.34m, 30kts 2.19m, 40kts 4.50m이다. 두 번째로 동요량이 큰 운동은 Surge로 마루높이 H_1 일 때 풍속 20kts 0.08m, 30kts 0.12m, 40kts 0.11m이다. 마루높이 상승에 따른 Sway값은 풍속 20kts에서 마루높이 H_1 0.34m, H_2 0.29m, H_3 0.25m, H_4 0.21m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 14.7%, 13.8%, 16.0%로 나타났다. 풍속 40kts에서 마루높이 H_1 4.50m, H_2 4.28m, H_3 4.07m, H_4 3.87m이며, 이 때 마루높이 변화에 따른 감소율은 각각 4.9%, 4.9%, 4.9%로 나타났다.

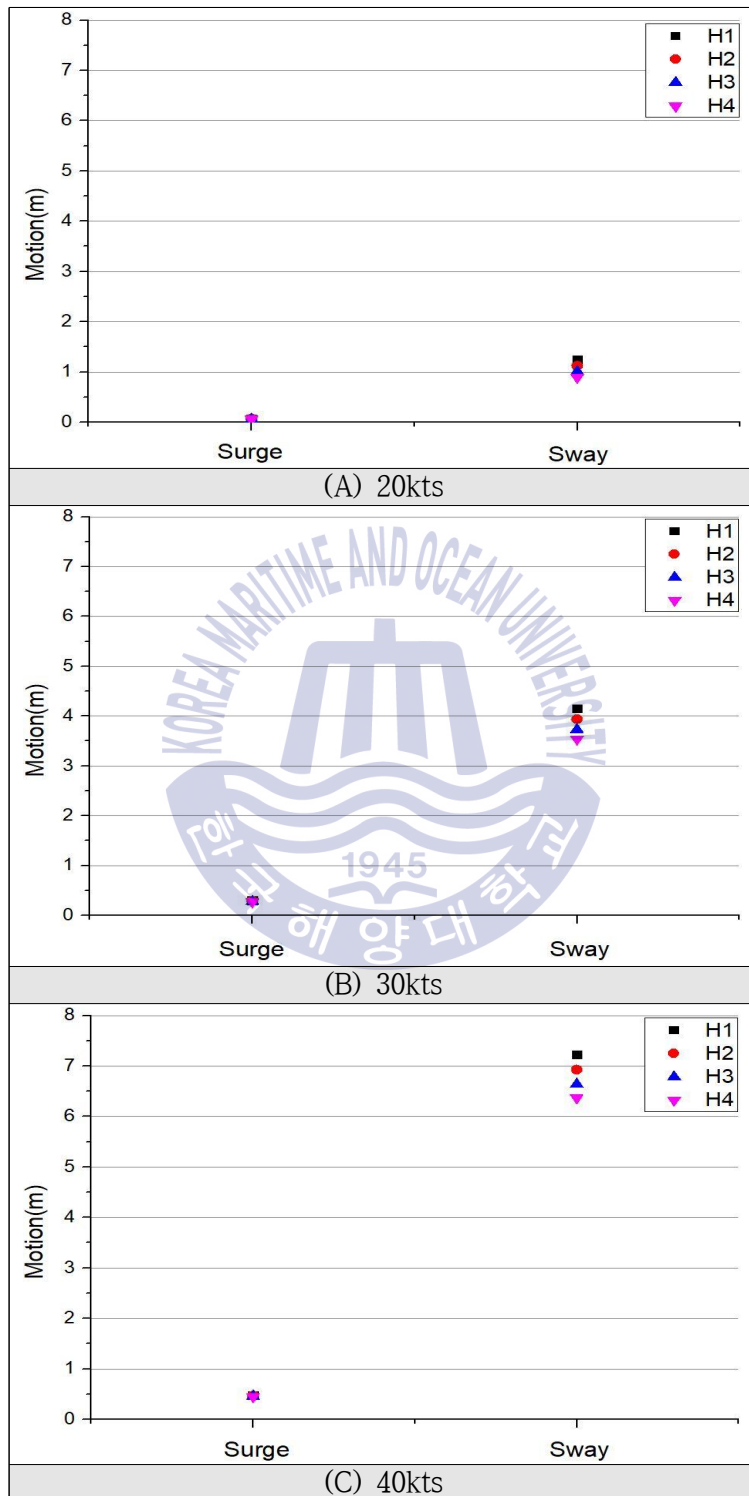


Fig. 81 Surge & sway motion (Group D, WD1)

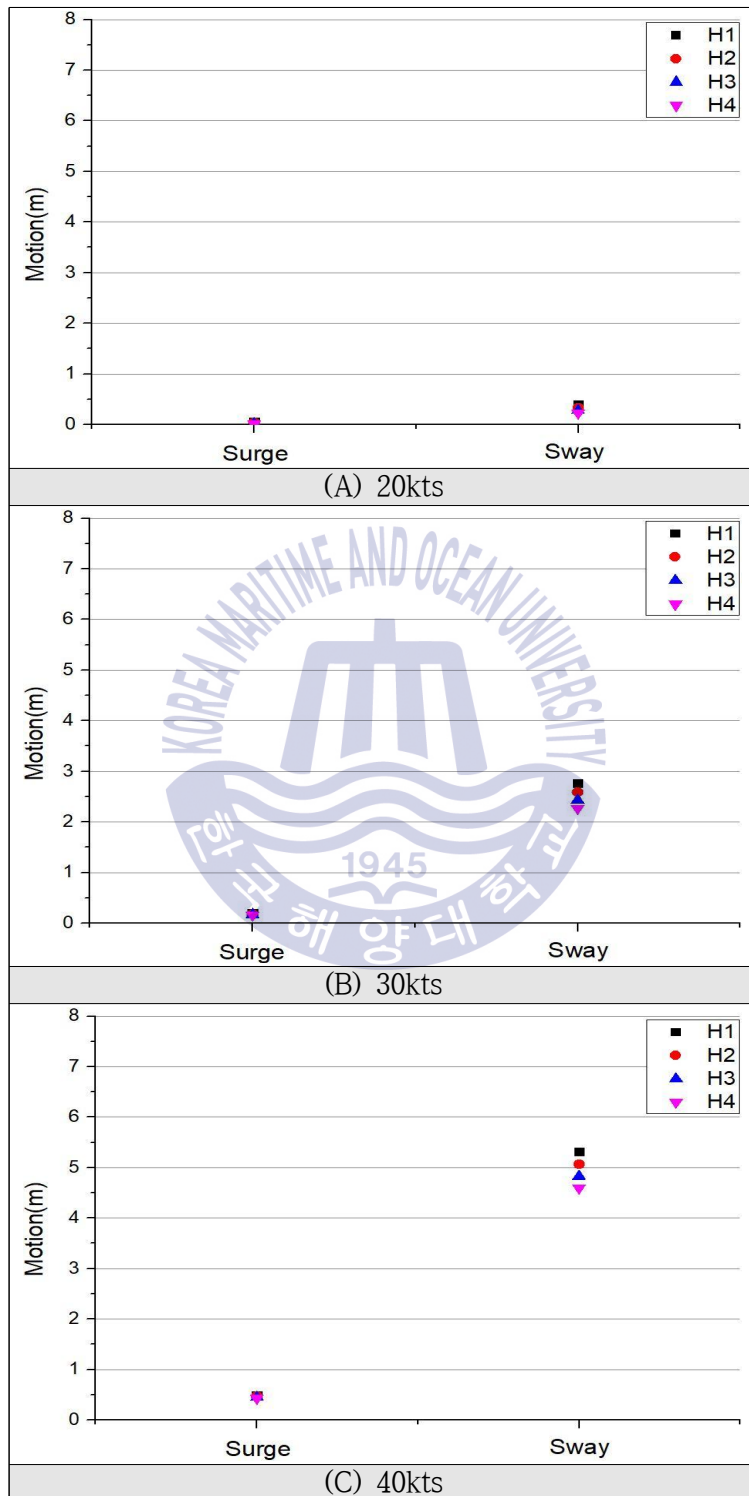


Fig. 82 Surge & sway motion (Group D, WD2)

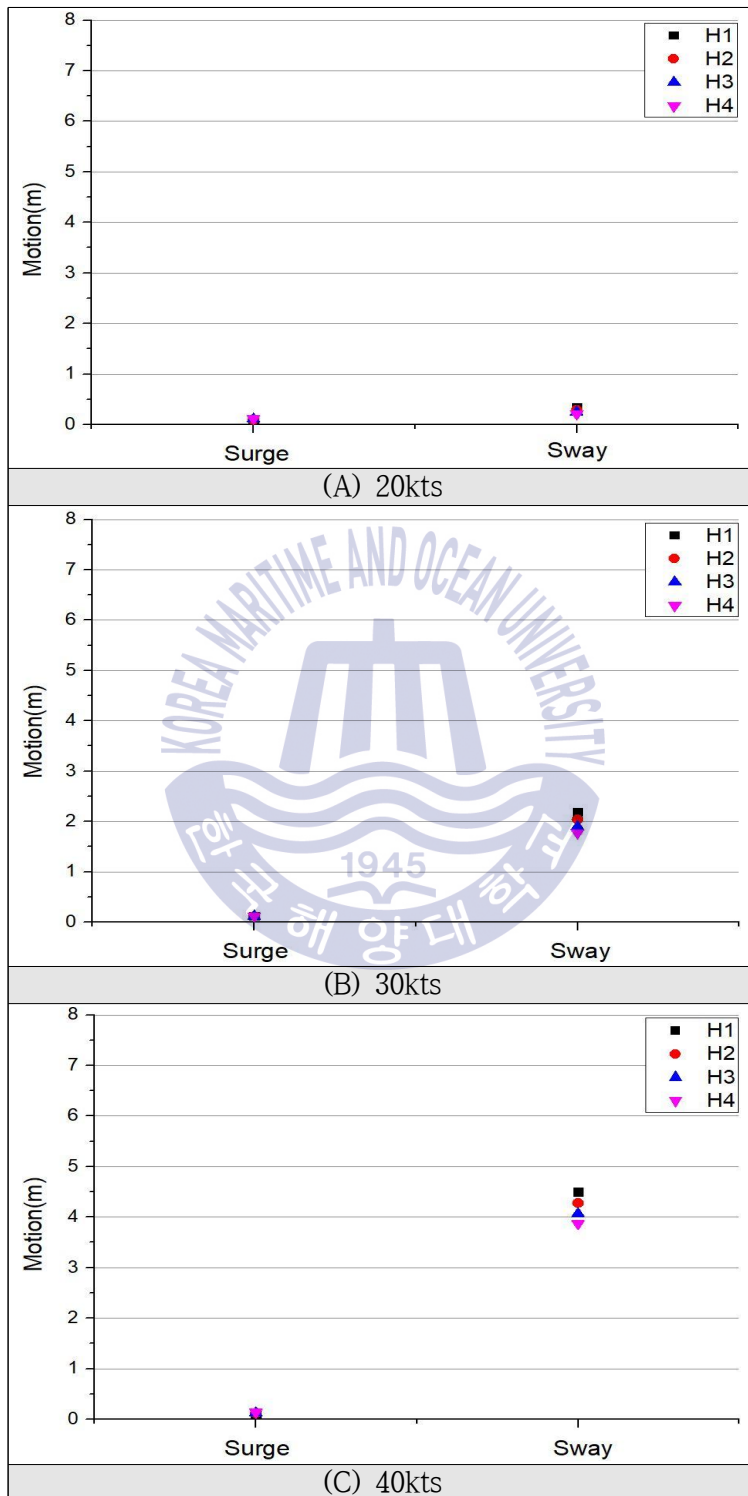


Fig. 83 Surge & sway motion (Group D, WD3)

4) 계류라인 수직각

계류라인 수직각은 부두에서 접안선 방향의 풍향 조건에서 풍속이 커질수록 감소되나, 이는 선체의 횡방향 직선운동인 Sway에 의한 감소량이므로 풍속에 따른 감소량은 제외하고, 풍속 20kts, 풍향 WD1 조건에서 마루높이 변화에 따른 계류라인 수직각은 Fig. 84와 같다.

최대 계류라인 수직각은 선수 스프링라인 6번이고, 그 값은 마루높이 H_1 30°, H_2 29°, H_3 27°, H_4 26° 이며, 최소 계류라인 수직각은 선미 스텐라인 12번으로 H_1 16°, H_2 14°, H_3 13°, H_4 12° 이다. 이 때 계류라인 수직각의 최대 감소율은 선미 스텐라인 12번에서 각각 12.5%, 7.1%, 7.7%로 나타났다.

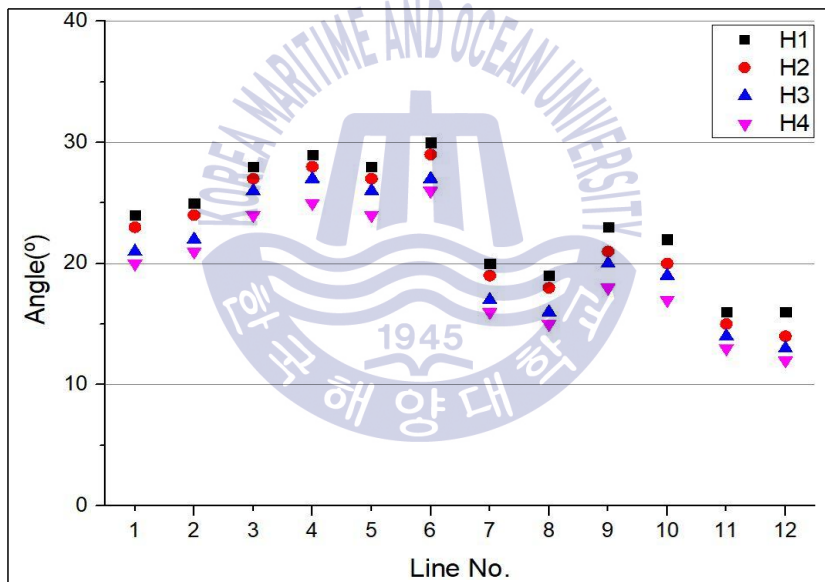


Fig. 84 Vertical angle of mooring line (Group D)

4.3.5 선종별 종합평가

마루높이 변화에 따른 대상선박의 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각의 민감도를 비교하였다. 마루높이가 상향됨에 따라 계류요소의 값이 감소하는 추세로 나타났으며, 각 계류요소별 최대 감소율은 Table 36과 같다.

Table 36 Max. decrement of group depending on the environment condition

Category	Environment Condition		Group A (%)	Group B (%)	Group C (%)	Group D (%)
Tension of line	WD1	20kts	6.0	4.6	2.0	3.7
		30kts	7.6	3.8	3.8	3.1
		40kts	8.9	3.4	3.4	2.8
	WD2	20kts	5.4	4.6	0.0	3.6
		30kts	7.3	3.7	4.1	3.3
		40kts	8.3	3.4	3.5	3.0
	WD3	20kts	6.0	4.7	3.5	3.2
		30kts	7.6	4.2	4.3	3.8
		40kts	9.2	3.9	3.7	3.1
Load of bollard	WD1	20kts	5.2	3.9	2.8	3.1
		30kts	7.2	3.3	3.3	2.7
		40kts	9.0	3.1	3.1	2.4
	WD2	20kts	4.6	3.9	0.0	2.9
		30kts	5.7	3.4	3.5	2.9
		40kts	8.3	3.1	3.2	2.6
	WD3	20kts	5.8	4.4	2.5	2.4
		30kts	7.8	3.6	3.6	3.1
		40kts	9.2	3.4	3.3	2.7
Motion of ship	WD1	20kts	20.5	12.6	23.7	11.9
		30kts	10.8	5.9	7.4	5.3
		40kts	9.3	4.7	5.3	4.2
	WD2	20kts	26.3	21.6	0.0	17.9
		30kts	11.6	6.9	10.2	6.6
		40kts	9.0	5.2	6.1	4.8
	WD3	20kts	22.7	27.8	24.0	16.0
		30kts	12.3	7.3	9.7	6.9
		40kts	9.9	5.3	6.0	4.9
Vertical angle of mooring line	WD1	20kts	14.3	13.3	11.8	12.5

Table 36에서 계류라인의 수직각의 마루높이 상향에 따른 각 그룹별 최대감소율을 보면, 풍향 WD1, 풍속 20kts 조건에서 A그룹 14.3%, B그룹 13.3%, C그룹 11.8%, D그룹 12.5%로 모든 그룹에서 10% 이상의 최대감소율을 보였으며, 그 중 A그룹의 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다.

계류삭 장력의 마루높이 상향에 따른 각 그룹별 최대 감소율은 Fig. 85와 같으며, 모든 환경외력 조건에서 A그룹의 민감도가 가장 크고, 환경외력 조건에 따라 약간의 차이는 있으나 B그룹, C그룹, D그룹 순으로 마루높이에 따른 계류삭 장력의 민감도가 큰 것으로 분석되었다. 각 그룹별 최대 감소율은 A그룹 9.2%, B그룹 4.7%, C그룹 4.3%, D그룹 3.8%이며, 풍향 WD3 조건에서 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다.

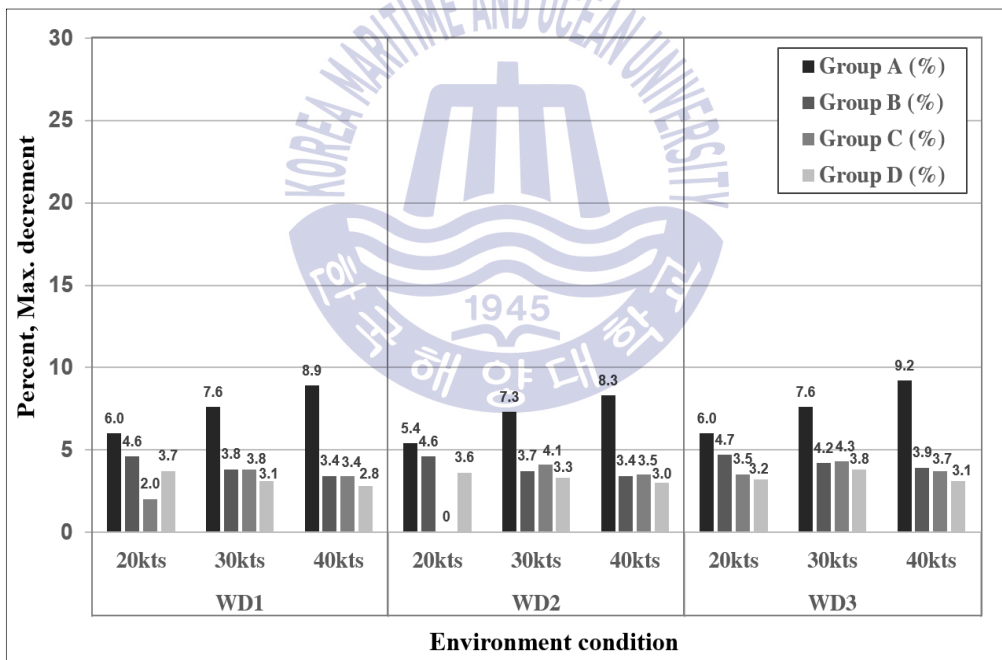


Fig. 85 Max. decrement on tension of mooring line by crown height

계선주 견인력의 마루높이 상향에 따른 각 그룹별 최대 감소율은 Fig. 86과 같으며, 계류삭 장력요소와 마찬가지로 모든 환경외력 조건에서 A그룹의 민감도가 가장 크며, 환경외력 조건에 따라 약간의 차이는 있으나 B그룹, C그룹, D 그룹 순으로 마루높이에 따른 계선주 견인력의 민감도가 큰 것으로 분석되었다. 각 그룹별 최대 감소율은 A그룹 9.2%, B그룹 4.4%, C그룹 3.6%, D그룹 3.1%이며, 풍향 WD3 조건에서 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다.

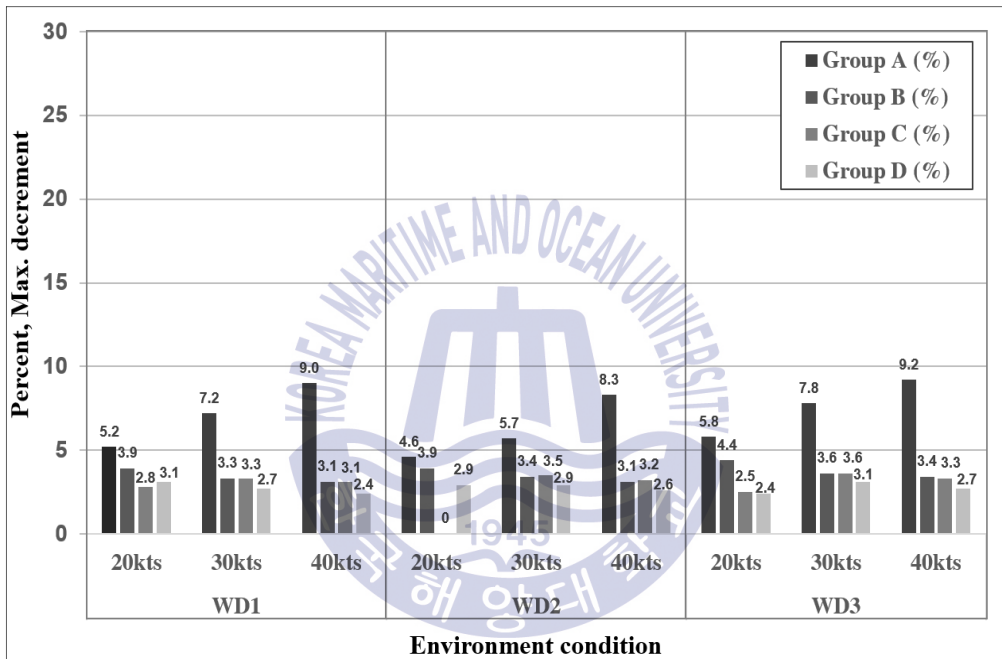


Fig. 86 Max. decrement on load of bollard by crown height

선체동요량 중 Sway 운동의 마루높이 상향에 따른 각 그룹별 최대 감소율은 Fig. 87과 같으며, 각 환경외력 조건별로 최대 민감도의 그룹이 다른 것으로 분석되었다. 풍향 WD1 조건에서는 C그룹이 23.7%로 가장 큰 민감도를 나타냈으며, 풍향 WD2 조건에서는 A그룹이 26.3%로 가장 큰 민감도를 나타내었다. 풍향 WD3 조건에서는 B그룹이 27.8%로 가장 큰 민감도를 나타내었다. 또한, 계류안전성 시뮬레이션에서 도출된 4개 계류요소 중 선체동요량의 마루높이 상향

에 따른 민감도가 가장 크게 나타났으며, 이는 마루높이 상향시 환경외력에 따른 선체운동량 경감에 가장 큰 효과를 볼 수 있는 것으로 분석되었다. 각 그룹별 최대 감소율은 A그룹 26.3%, B그룹 27.8%, C그룹 24.0%, D그룹 17.9%로 B그룹의 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다.

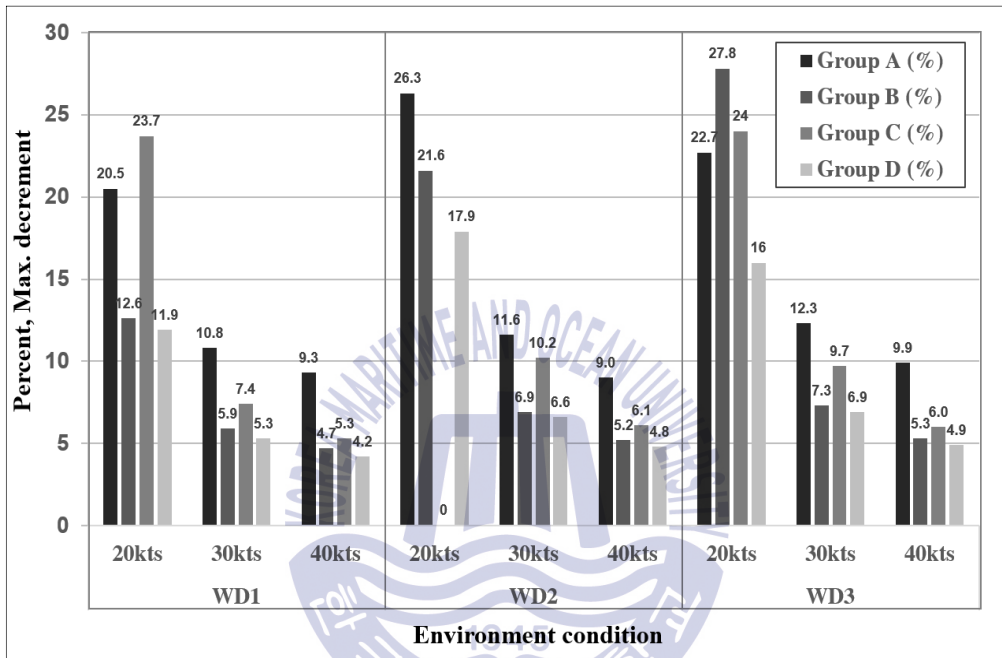


Fig. 87 Max. decrement on sway motion by crown height

제 5 장 마루높이 평가지표 및 설계기준 개발

5장에서는 본 연구의 2장과 3장에서 도출한 마루높이 결정요소를 바탕으로 적정 마루높이를 선정하기 위한 평가지표를 개발하였다. 특히, 선박평가지표를 이용하여 4장에서 수행한 계류안전성 수치 시뮬레이션의 결과를 평가하고 선박 그룹별 적정 마루높이를 도출하였다. 이를 토대로 환경 및 선박의 특성을 반영한 마루높이 설계기준을 제안하였다.

5.1 마루높이 평가지표 개발

환경 및 선박 특성을 반영한 마루높이 평가지표를 설정하기 위해 마루높이 평가지표를 환경 및 선박 요소로 분류하여 설정하였다. 먼저, 마루높이 H_i 일 때 안전성 평가지표를 Crown Height의 약자인 $CH(H_i)$ 로 설정하고, 식 (5-1)과 같이 $CH(H_i)$ 는 환경평가지표 CE (Environment index of crown height)와 선박평가지표 CS (Ship index of crown height)의 곱으로 표현하였다. 적절한 마루높이는 그 해역의 환경특성과 접안선박의 특성을 동시에 만족하여야 하기 때문이다.

$$CH(H_i) = CE_{ij} \cdot CS_{ik} \quad (5-1)$$

CE_{ij} 는 마루높이 H_i 일 때, 환경평가지표 j 요소의 값을 의미하며 Table 37과 같이 4개 지표로 설정되고, 각 지표가 모두 충족될 때 모든 환경지표를 고려한 것으로 평가되어 식 (5-2)와 같이 CE_j 는 CE_1, CE_2, CE_3, CE_4 의 곱으로 표현된다. 여기서, CE_1 은 조위 및 조차, CE_2 는 해수면 상승, CE_3 은 승하선 및 하역 설비, CE_4 는 수심을 나타낸다.

$$CE_{ij} = CE_{i1} \cdot CE_{i2} \cdot CE_{i3} \cdot CE_{i4} \quad (5-2)$$

Table 37 Environment index of crown height(*CE*)

<i>j</i>	<i>CE_j</i>	Environment index of crown height
1	<i>CE₁</i>	Tidal range and level
2	<i>CE₂</i>	Sea level rise
3	<i>CE₃</i>	Embarkation and loading equipment
4	<i>CE₄</i>	Depth of water

CS_{ik} 는 마루높이 H_i 일 때, 선박평가지표 k 요소의 값을 의미하며 Table 38과 같이 4개 지표로 설정되고, 환경평가지표와 마찬가지로 각 지표가 모두 충족될 때 모든 선박지표를 고려한 것으로 평가되어 식 (5-3)과 같이 CS_k 는 CS_1, CS_2, CS_3, CS_4 의 곱으로 표현된다. 여기서, CS_1 은 계류삭 장력, CS_2 는 계선주 견인력, CS_3 는 선체동요량, CS_4 는 계류라인 수직각을 나타낸다.

$$CS_{ik} = CS_{i1} \cdot CS_{i2} \cdot CS_{i3} \cdot CS_{i4} \quad (5-3)$$

Table 38 Ship index of crown height(*CS*)

<i>k</i>	<i>CS_k</i>	Ship index of crown height
1	<i>CS₁</i>	Tension of mooring line
2	<i>CS₂</i>	Load of bollard
3	<i>CS₃</i>	Oscillation of ship motion
4	<i>CS₄</i>	Vertical angle of mooring line

5.1.1 환경평가지표

1) 조위 및 조차

먼저 환경평가지표의 각 요소에 대해 분석하면, CE_1 은 조위 및 조차를 의미하고, 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 설계기준은 해당 해역의 조차를 기준으로 약최고고조위에 일정 높이를 더하여 설정한다. 그러므로 마루높이 건설시 해당 해역의 조차 및 조위를 분석하여 마루높이 설정에 반영하여야 한다.

조석(Tide)이란 달과 태양 그리고 지구의 운동에 의하여 발생하는 해수면의 주기적인 승강운동을 말하며, 보통 1일 2회의 고조(High water)와 저조(Low water)가 발생하지만 지역에 따라서는 1일에 1회의 고·저조가 발생하는 곳도 있다. 조차(Tidal range)는 매일 다르게 나타나는데 이는 1일을 단위로 하여 삭(그믐)으로부터 경과한 시간을 의미하는 월령(Moon's age)과 관계있다. 삭(그믐) 및 망(보름) 발생 후 1~3일 후에 고조와 저조의 조위차가 최대가 되는 때를 대조라 하며, 이때 조차의 평균을 대조차(Spring range)라 한다. 또 상현 및 하현 후 1~3일간 조차가 최소가 되었을 때를 소조라 하고, 이때 조차의 평균을 소조차(Neap range)라 한다. 또한 장기간에 걸쳐서 조차를 평균한 것을 평균조차(Mean range)라 한다(국립해양조사원, 2017).

조석의 시기에 따라 평균해면(M.S.L.)을 기준으로 다양한 조위가 나타나며, 이러한 각종 조위면을 표시한 그림을 조위면도라 한다. 이는 통상 1년 이상의 자료를 분석한 결과를 기본으로 작성된다. 조석에 의한 평균적인 고조의 높이를 평균고조위(H.W.O.M.T.)라고 하고, 평균적인 저조의 높이를 평균저조위(L.W.O.M.T.)라고 하며, 평균조차란 평균고조위와 평균저조위간의 차이를 나타낸다.

보름이나 그믐 후에 나타나는 대조시의 고조위를 대조평균고조위(H.W.O.S.T.), 대조시의 저조위를 대조평균저조위(L.W.O.S.T.)와 그 차이를 대조차라고 한다. 반달이 뜬 후 나타나는 평균적인 고조위를 소조평균고조위(H.W.O.N.T.), 저조위를 소조평균저조위(L.W.O.N.T.)라고 하며 그 차를 소조차라고 한다. 연중 최고 조위에 근접하는 고조위를 약최고고조위(Approx.H.H.W.)라 하고 연중 최저저조

위에 근접하는 저조위를 약최저저조위(Approx.L.L.W.)라고 하며, 그 차이를 연중 최대에 근접한 조차로서 약최대조차라고 정의한다.

실제 장기관측을 통해 나타나는 조위는 기상현상에 따라 약최저저조위보다 낮거나 약최고고조위보다 높게 된다. 이같이 관측기간 동안 나타나는 가장 높은 조위를 관측고극조위, 가장 낮은 조위를 관측저극조위라고 한다(지구과학사전, 2009).

해도에서 수심을 표시하는 기준면을 기본수준면(Datum Level)이라고 하고 우리나라의 기본수준면은 약최저저조면으로 규정하고 있으며 조석표의 조고도 이면을 기준으로 하여 기술한다. 일반적인 조위면도는 Fig. 88과 같다.

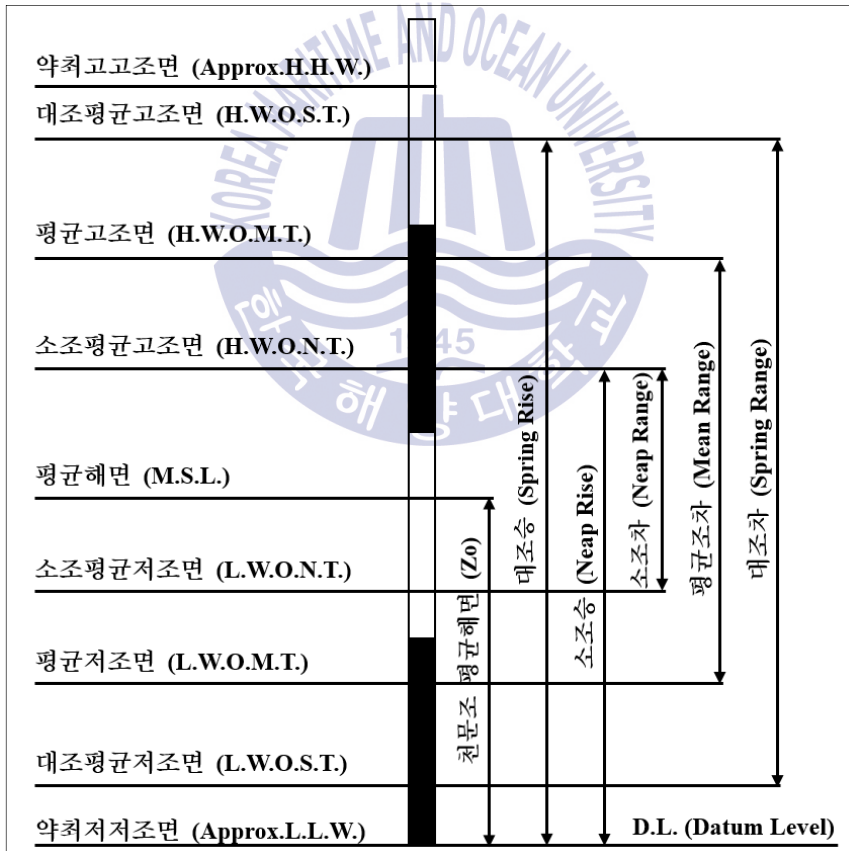


Fig. 88 Tidal range and level

우리나라 해역별 조차 현황을 보면, 동해안의 조석은 매우 작아 일반적으로 대조차는 48cm 이하로 나타난다. 평균 고조간격은 연안의 대부분이 약 3시간이고, 남쪽으로 갈수록 급격히 증가하여 부산 부근에서는 약 8시간을 보인다. 월 평균해면은 여름에 높고 겨울에 낮으며 그 높이의 차는 약 0.3m이다.

남해안의 조석은 1일 2회의 고·저조가 나타나며, 일조부등은 뚜렷하지 않다. 평균고조 간격은 남해안 동부(부산)에서의 약 8시간부터 서쪽으로 갈수록 점차 증가하여 중부에서 9시간, 서부에서 11시간 정도의 평균고조간격을 보인다. 대조차는 부산에서 118cm이고, 서쪽으로 가면서 점차 증가하여 여수에서 297cm, 완도에서 340cm가 된다. 월평균해면은 2월에 가장 낮고 8월에 가장 높으며, 그 차는 약 0.3m정도이다.

서해안의 조석은 규칙적으로 1일 2회의 고·저조가 일어나며, 일조부등의 크기는 매우 작은 편이다. 월평균해면은 2월에 가장 낮고 8월에 가장 높으며, 그 차는 약 0.5m에 달한다. 평균고조간격은 서해안 남부에서 약 11시간이고, 북쪽으로 갈수록 점차 증가하여 군산에서 약 3시간, 인천에서 약 4.5시간 정도 나타난다. 대조차는 서해 남단인 진도에서 298cm이고, 북쪽으로 가면서 점차 증가하여 군산에서 660cm, 인천에서 870cm에 달한다.

2017년 기준 국내 주요항만의 대조차 및 약최고고조위는 Table 39와 같으며, 대체적으로 동해안 북쪽에서 서해안 북쪽까지 시계방향으로 대조차 및 약최고고조위가 증가하는 것을 알 수 있다. 대조차와 약최고고조위가 가장 작은 항만은 포항으로 대조차 0.2m, 약최고고조위 0.25m이며, 가장 큰 항만은 평택으로 대조차 8.7m, 약최고고조위 9.36m로 나타났다. 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 설계기준을 분류하는 조차는 3.0m이며, 조차 3.0m 미만의 지역은 여수를 기준으로 동쪽에 위치하는 항만들로 속초~통영과 제주항, 서귀포항으로 정의할 수 있으며, 조차 3.0m 이상의 지역은 제주항과 서귀포항을 제외한 여수의 서쪽에 위치하는 항만들로 여수~인천으로 정의할 수 있다.

Table 39 Spring range and A.H.H.W. on domestic major port(2017)

Coast	Port	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Spring range (m)	A.H.H.W. (m)
East	Sokcho	38-12	128-36	0.3	0.36
	Donghae	37-30	129-09	0.3	0.38
	Pohang	36-22	129-23	0.2	0.25
	Ulsan	35-30	129-23	0.5	0.61
South	Busan	35-06	129-02	1.2	1.84
	Busan New port	35-05	128-47	1.7	1.98
	Masan	35-13	128-35	1.8	1.96
	Tongyeong	34-50	128-26	2.4	2.87
	Yeosu	34-45	127-47	3.0	3.51
	Gwangyang	34-54	127-45	3.2	3.64
	Wando	34-19	126-46	3.4	4.00
	Jeju	33-32	126-33	2.3	3.05
	Seogwipo	33-14	126-34	2.5	3.24
West	Mokpo	34-47	126-23	4.3	4.86
	Gunsan	35-59	126-34	6.6	7.23
	Daesan	37-00	126-21	7.6	8.28
	Pyeongtaek	36-58	126-49	8.7	9.36
	Incheon	37-28	126-36	8.7	9.27

출처 : 국립해양조사원

2) 해수면 상승

환경평가지표 CE_2 는 해수면 상승을 의미하며, 매년 증가하는 해수면 상승 정도를 조사하고, 이를 마루높이 설정에 반영하여야 한다. 항만 및 어항 설계기준에 의거하면 항만시설의 설계공용기간은 3등급으로 50년이며, 이는 항만 및 부두 시설은 건설 이후 50년 동안 구조 견고성을 확보하여야 하고 시설 사용이 가능하여야 함을 의미한다. 그러므로 50년 이상의 장기적인 해수면 상승정도를 적정 마루높이 설정에 반영할 필요가 있다(해양수산부, 2017b).

국립기상과학원에서 예측한 1986~2005년 기준 2081~2100년의 전 지구와 국내 해역의 해수면 상승값은 Table 40과 같다. 이는 2.2절에서 설명한 IPCC의 4개 RCP 시나리오에 의거하여 해수면 상승 예측범위를 나타내었으며, 국내 해역의 경우 국내 전체, 동해안, 남해안, 서해안으로 구분하여 그 평균값과 불확실성 범위값[최소값~최대값]을 제시하였다.

국내 해수면 상승 평균값은 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5에 대해 각각 37.8, 48.1, 47.7, 65.0cm 상승하는 것으로 전망되었으며, 이는 전 지구의 해수면 상승 평균값과 약 3cm정도의 차이를 보였다. 특히 온실가스가 현재 추세로 저감없이 배출되는 경우를 의미하는 RCP 8.5일 때, 국내의 모든 해역에서 전 지구 평균보다 해수면 상승 예측값이 높은 것으로 분석되었으며, 모든 시나리오에서 전 지구보다 우리나라 주변해역의 해수면 상승 예측값의 불확실성 범위가 다소 크게 나타났다.

동해 앞바다(East sea offshore)의 해수면 상승 평균값은 RCP 4종 시나리오에 대해 각각 38.6, 48.8, 48.5, 66.0cm이고, 동해안(East coast)의 해수면 상승은 각각 37.8, 48.5, 47.6, 65.4cm로 동해 앞바다와 1cm 미만에서 거의 유사하다. 동해안이 해수면 상승은 우리나라 평균과 매우 유사하였으나 불확실성의 범위는 크게 나타났다. 남해 앞바다(South sea offshore)의 해수면 상승은 각각 39.5, 49.9, 49.8, 67.3cm로 우리나라 평균해수면 상승보다 높았다. 특히 RCP 8.5 시나리오의 경우 우리나라 평균뿐 아니라 전 지구 평균보다도 약 4cm 높게 상승이 전망된다. 불확실성의 범위는 우리나라 평균과 유사하였다. 남해안(South coast)

은 각각 39.4, 49.8, 49.5, 67.1cm로 남해 앞바다의 해수면 상승보다 낮았으나 우리나라 평균보다는 높게 상승했다. 남해안 역시 RCP 8.5 시나리오에서 전 지구 평균보다 약 4cm 높게 상승하였다. 서해 앞바다(West sea offshore)의 해수면 상승은 각각 37.8, 47.8, 47.8, 64.6cm로 우리나라 평균해수면 상승 및 다른 분석 지역에 비해서도 낮았으며 불확실성의 범위도 작았다. 서해안(West coast)은 각각 36.3, 47.2, 45.7, 63.7cm로 다른 지역에 비해 낮게 나타났다.

지역 간에 21세기 말 해수면 상승 정도의 차이는 4cm 이내로 RCP 6.0에서 서해안과 남해 앞바다의 차이가 4cm로 가장 큰 차이를 보였다. 모든 시나리오에서 남해 앞바다의 해수면 상승 예측 평균값이 가장 높은 것으로 나타났으며, RCP 8.5의 경우는 전 지구 평균보다 약 4cm 높게 전망된다. 해수면의 상승 예측값이 가장 적었던 지역은 서해안으로 분석되었다(허태경 등, 2018).

Table 40 Projections of sea level rise for the period(2081~2100)

Area	Latitude (° N)	Longitude (° E)	RCP 2.6 (m)	RCP 4.5 (m)	RCP 6.0 (m)	RCP 8.5 (m)
Global	-	-	0.407 [0.21-0.62]	0.475 [0.27-0.71]	0.495 [0.27-0.73]	0.633 [0.37-0.94]
Korea	33-43	123-132	0.378 [0.17-0.59]	0.481 [0.23-0.70]	0.477 [0.23-0.74]	0.650 [0.33-0.96]
East sea offshore	35-39	130-132	0.386 [0.18-0.60]	0.488 [0.24-0.70]	0.485 [0.24-0.75]	0.660 [0.34-0.97]
East coast	35.5-37.5 37.5-38.5	129.5-130.5 128.5-129.5	0.378 [0.16-0.61]	0.485 [0.21-0.71]	0.476 [0.21-0.76]	0.654 [0.31-0.97]
South sea offshore	32.5-34	126-129.5	0.395 [0.19-0.61]	0.499 [0.25-0.71]	0.498 [0.26-0.76]	0.673 [0.36-0.97]
South coast	33.5-34.5 34.5-35.5	126.5-127.5 127.5-129.5	0.394 [0.18-0.62]	0.498 [0.23-0.72]	0.495 [0.24-0.77]	0.671 [0.33-0.99]
West sea offshore	34-38	123-125.5	0.378 [0.18-0.59]	0.478 [0.23-0.70]	0.478 [0.24-0.74]	0.646 [0.34-0.95]
West coast	34.5-37.5	125.5-126.5	0.363 [0.18-0.56]	0.472 [0.23-0.67]	0.457 [0.24-0.69]	0.637 [0.34-0.91]

출처 : 한국기상학회

3) 승하선 및 하역 설비

환경평가지표 CE_3 는 승하선 및 하역 설비를 의미하며, 마루높이가 접안선박의 승하선 및 하역 작업에 제한이 되어서는 안 되므로, 대상선박의 승하선 및 하역 설비를 원활히 사용가능한 마루높이를 적정 마루높이 설정에 반영하여야 한다.

항만 및 어항 설계기준상 하역장 또는 계류시설에 설치되는 하역기계는 당해 시설의 이용형태에 가장 적합한 구조, 능력 및 위치와 구조상의 안전성을 갖추어야 하고, 하역작업을 원활하고 안전하게 수행할 수 있도록 설치되어야 한다고 명시되어 있다. 항만 및 어항 설계기준에서 명시하는 하역기계는 하역작업에 이용하는 기계로 항만구역에 설치되는 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인, 스트래들 캐리어, 야드 트랙터, 리치스택커, 쉽언로더, 쉽로더, 스택커 리클레이머, 벨트콘베이어, 다목적 크레인, 모빌하버 크레인, 로딩암 등 그 밖의 시설장비(시설장비와 유사한 구조 및 기능을 가진 장비로서 항만하역작업을 위하여 항만법령에 의해서 신고된 시설장비)를 포함한다(해양수산부, 2017c).

특히 Fig. 89와 같이 부두에 설치된 여객선 및 크루즈선의 보딩 브릿지(Boarding Bridge), 갱웨이를 포함한 여객의 승하선 설비와 PCTC, RO/RO선의 램프를 포함한 차량승강시설 등 선박에 장치되어 있는 장비를 원활히 설치할 수 있도록 대상선박의 선종 및 크기를 고려하여 마루높이를 설정하여야 한다.

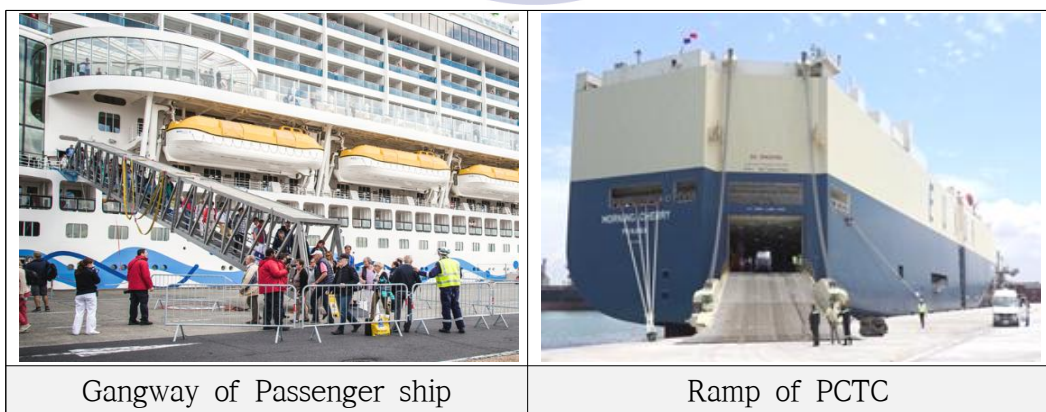


Fig. 89 Embarkation and loading equipment of passenger ship and PCTC

출처 : www.google.com

또한, 탱커선 및 가스선의 적재화물 하역은 Fig. 90과 같이 전용부두에 고정된 하역시설인 로딩암>Loading arm)을 사용하며, 로딩암은 상부와 하부에 두 개의 회전연결장치로 구성되어 있다. 로딩암의 상부 회전장치는 각각 송출관과 입수관을 연결해 주는 도르래를 연결시켜 주고, 하부 회전장치와 도르래는 회전장치와 육상 파이프관을 연결시켜 주는데 사용된다. 이에 따라 Fig. 91과 같이 로딩암은 수평면에서의 회전, 선폭방향에서의 퍼짐으로 인한 작동범위를 갖고 있으며, 적절한 설치위치와 탱커 매니폴드의 표준화에 의해 가장 효과적으로 작동할 수 있다(Sriram Balasubramanian, 2017).

그러므로 안벽 기준선에서부터 로딩암 설치거리는 암>arm)의 길이, 방충재의 높이, 마루높이를 감안하여 하역에 지장이 없도록 적절하게 설정한다. 특히, 로딩암의 설치 위치가 부적절한 경우, 로딩암의 조작성이 나빠지고 작업이나 점검이 용이하지 않게 되는 등의 악영향이 나타날 수 있다(해양수산부, 2017c).



Fig. 90 Loading equipment of LNG and Tanker ship

출처 : www.google.com

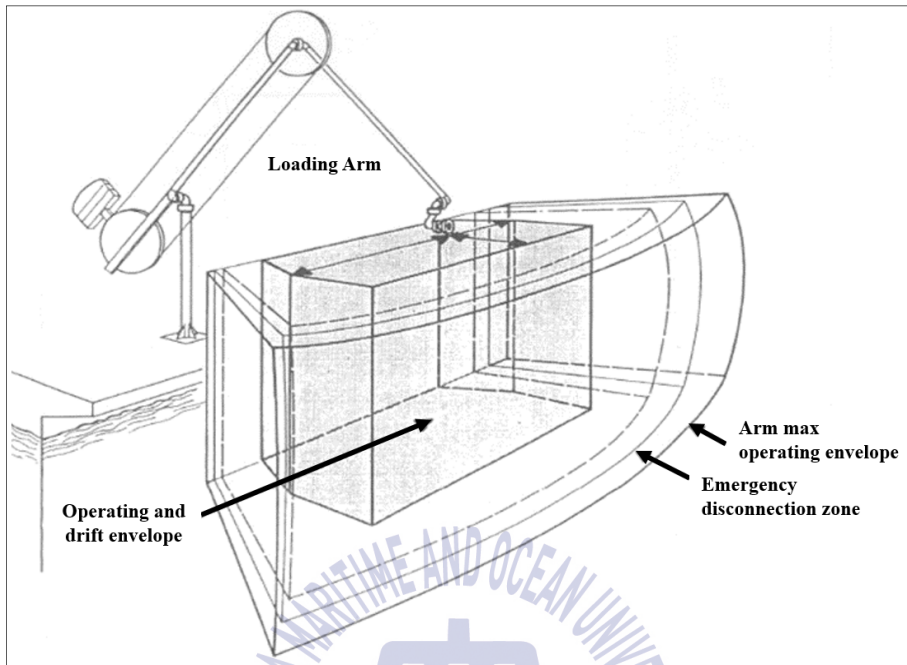


Fig. 91 Loading arm operating envelope

출처 : Marine insight

4) 수심

환경평가지표 CE_4 는 선석의 수심을 의미하며, 항만 및 어항 설계기준에서 제시한 선종별 선석의 수심을 마루높이 설정에 반영하여야 한다. 항만 및 어항 설계기준에서 선석의 수심은 화물선, 컨테이너선, 여객선, 유조선 등 7개 선종에 대하여 각 톤수별로 대상선박의 최대흘수에 여유수심을 더한 값으로 제시되고 있으며, 선석 수심의 기준이 되는 수면은 공사용 기준면이다. 현재 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 설계기준은 수심 4.5m를 기준으로 대형접안시설과 소형접안시설을 구분하여 제시하고 있다.

항만 및 어항 설계기준상 4개 선종의 톤수별 수심은 Table 41과 같으며, 대표적으로 10만톤급의 선박의 수심을 비교하면 화물선 17.0m, 컨테이너선 16.0m, 유조선 18.0m, 여객선 9.0m이다. 이는 항만 및 어항 설계기준에서 각 선

종별 10만톤급 선박의 최대흘수인 15.1m, 14.7m, 14.8m, 8.1m의 약 1.09~1.22배 정도로 제시되고 있다.

Table 41 Design depth of water depending of ship's type

Bulkер		Container ship		Tanker		Passenger ship	
DWT(ton)	Depth(m)	DWT(ton)	Depth(m)	DWT(ton)	Depth(m)	GT(ton)	Depth(m)
1,000	4.5	10,000	9.0	1,000	4.5	3,000	5.0
5,000	7.5	30,000	12.0	5,000	7.5	5,000	5.5
10,000	9.0	50,000	14.0	10,000	9.0	10,000	7.5
40,000	13.0	60,000	15.0	50,000	14.0	20,000	9.0
70,000	15.0	100,000	16.0	70,000	16.0	30,000	9.0
100,000	17.0	150,000	17.5	100,000	18.0	50,000	9.0
120,000	18.0	200,000	18.5	150,000	21.0	70,000	9.0
150,000	20.0	250,000	20.0	300,000	27.0	100,000	9.0

출처 : 해양수산부

PIANC 기준에서 설계 수심은 Fig. 92와 같이 선박의 트림과 경사를 포함한 정적 흘수(Static draught including trim and list), 선박의 고정 흘수의 불확실성에 따른 여유(Allowance for static draught uncertainties), 선체침하현상(Squat include dynamic trim), 해수밀도(Change in water density), 풍압력과 선회로 인한 동적 경사(Dynamic heel due to wind and turning), 파랑(Wave response allowance), 수심 측정의 불확실성에 따른 여유(Allowance for bed level uncertainties) 등을 고려하여 설정하도록 권고하고 있다.

이에 따라 Table 42와 같이 선속 10kts 미만의 선박이 운항하는 정온한 부두의 선석 수심은 최대흘수(T)의 1.10배로 설정하도록 권고하고 있으며, 통항선박의 선속이 10~15kts일 경우는 1.12배, 15kts 이상일 경우는 1.15배의 수심을 권고하고 있다. 또한, 통항선박 및 유의파고(H_s)에 관계없이 저질에 따라 추가로 고려해야 할 값을 명시하고 있으며, 내항(Inner channel)일 경우 그 값은 모래(sand), 진흙(clay) 0.4m, 암초(rock), 산호(coral) 0.6m이고 머드(mud)는 고려하지 않아도 된다(PIANC, 2014).

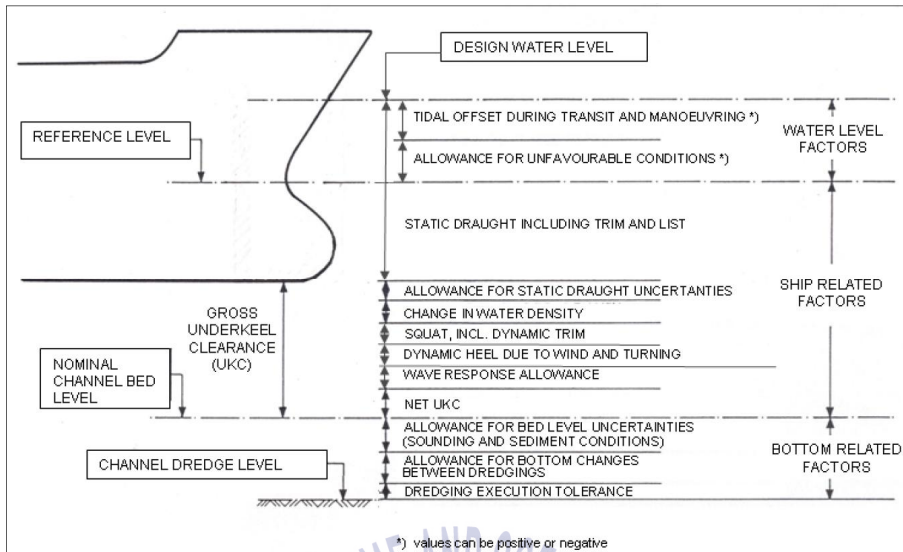


Fig. 92 Consideration on the depth of water(PIANC)

출처 : PIANC

Table 42 Depth of water depending on the ship's speed and swell

Vessel speed	Significant wave height(H_s)	Channel bottom	Inner channel	Outer channel
≤ 10 kts	None	-	1.10 T	-
10~15kts			1.12 T	
> 15 kts			1.15 T	
All	Low swell $H_s < 1$ m	-	-	1.15~1.20 T
	Moderate swell $1\text{m} < H_s < 2$ m			1.20~1.30 T
	Heavy swell $H_s > 2$ m			1.30~1.40 T
All	All	Mud	None	None
		Sand/clay	0.4m	0.5m
		Rock/coral	0.6m	1.0m

출처 : PIANC

5.1.2 선박평가지표

1) 계류삭 장력

선박평가지표의 각 요소에 대해 분석하면, CS_1 은 계류삭의 장력을 의미한다. 마루높이에 따라 계류삭의 길이 및 장력이 변화하며, 마루높이가 상향되면 부두에서 선박으로 바람이 불 때 풍압면적이 감소하고, 이 때 선박을 부두에 연결하는 계류삭에 미치는 장력 또한 감소하게 된다.

선박의 계류삭은 선박의 설계단계에서 의장수의 크기에 따라 수량, 길이, 파단력(Minimum Breaking Load, M.B.L)이 결정되고, 파단력에 따라 계류삭 재질도 결정된다. 사용될 계류삭의 재질 및 파단력은 윈치드럼의 크기, 페어리드 형태, 페어리드의 곡률반경, 갑판면적 등의 항목에 영향을 주게 된다(김세원, 2014). 이에 따라, 접안선박의 특성을 파악하여 계류삭의 재질, 파단력을 선정하고, 그에 따른 안전사용하중(Safety Working Load, S.W.L)을 고려하여야 한다.

실제 상선에서 가장 많이 이용되고 있는 계류삭은 합성화학섬유로 만들어진 합성섬유(Synthetic fiber) 재질의 로프이며, 그 종류로는 폴리에스테르(Polyester), 나일론(Nylon), 폴리프로필렌(Polypropylene) 등이 있다.

폴리에스테르 로프는 합성섬유 로프 중에서 가장 내구성이 좋으며, 건조한 상태나 물에 젖은 상태에서도 높은 장력을 갖는다. 이 재질은 외부적인 마모에 대하여 저항력이 좋은 반면 신축성이 작으므로, 장력과 내구성이 중요하고 높은 신축성이 필요치 않은 선박에 사용된다. 나일론 로프는 폴리에스테르 로프보다 더 강하지만, 습기에 민감하여 습기로 인한 장력 감소율이 폴리에스테르 로프보다 높으며, 주기적인 장력 변화에 대하여 폴리에스테르 로프보다 장력 손실율이 크다. 그러나 나일론 로프는 어떤 재질의 로프보다 유연성이 좋고 파단력이 크며, 폴리에스테르 로프보다 저렴하여 상선에서 가장 많이 사용된다. 폴리프로필렌 로프는 나일론 로프보다 강도가 약하여 주기적인 장력에 쉽게 약해지나, 물보다 가벼우므로 부유하는 신호전달 라인으로 사용될 수 있다. 합성섬유 로프의 직경에 따른 표준강도는 Table 43과 같다.

Table 43 Minimum Breaking Load of synthetic fiber rope

Rope size No.	Diameter (mm)	Polyester (ton)	Nylon (ton)	Polypropylene (ton)
1	8	0.9	1.2	0.9
2	16	3.7	4.8	3.1
3	24	8.2	11	6.7
4	32	14	18	11
5	40	22	27	17
5.5	44	26	32	21
6	48	30	38	25
6.5	52	35	44	28
7	56	40	50	32
7.5	60	45	57	37
8	64	52	65	42
9	72	65	81	53
10	80	80	99	65
11	88	95	118	78
12	96	113	139	92

출처 : 선체구조정비론

계류삭 장력의 안전사용하중은 Table 44와 같이 계류삭의 재질에 따라 보통 설계하중(Design Load, DL)의 0.45~0.55배로, 설계하중은 파단력과 같다. 국제 표준화 기구인 ISO(International Organization for Standardization)에 따르면 와이어(Wire) 재질의 로프의 안전사용하중은 파단력의 55%이며, 폴리아미드(Polyamide) 재질의 로프는 파단력의 45%, 기타 합성섬유(Other Synthetic) 재질의 로프는 파단력의 50% 사용을 권고하고 있다(OCIMF, 2008).

Table 44 Safety working load of mooring rope

Material	S.W.L	SF(M.B.L/S.W.L)	× M.B.L
Wire	Highest load calculated for adopted standard environmental criteria	1.82	0.55
Polyamide		2.22	0.45
Other Synthetic		2.00	0.50

출처 : OCIMF

2) 계선주 견인력

선박평가지표의 CS_2 는 계선주의 견인력을 의미하며, 마루높이에 따라 계선주에 미치는 견인력이 변화한다. 마루높이가 상향되면 부두에서 선박으로 바람이 불 때 풍압면적이 감소하고, 이 때 선박의 계류삭에 미치는 장력이 감소하여 계선주의 견인력 또한 감소하게 된다.

계선주에 작용하는 견인력은 계류라인의 파단력, 계류시설이 설치되는 지점의 기상 및 해상조건, 접안선박의 제원 등을 근거로 하여 필요에 따라 접안 중의 선박에 의한 힘, 계류 중 선박의 풍압력, 선체동요에 의한 힘 등을 고려하여 계산하는 것이 바람직하다. 또한, 계선주는 직주와 곡주로 분류되며, 직주는 폭풍 시에 선박을 계류하기 위한 선석 양단 부근의 계류시설 또는 그 부근의 기준선으로부터 떨어지게 설치하는 계선주이고, 곡주는 평상시에 선박을 계류 또는 접이안하기 위한 계류시설로 기준선 가까이에 설치하는 계선주이다(해양수산부, 2017c).

선박의 견인 및 계류설비는 SOLAS Chapter II -1, Reg. 3-8에서 규정하고 있으며, 선박에는 선박의 정상작동과 관련된 모든 견인 및 계류작업을 안전하게 수행할 수 있도록 충분한 안전하중의 장비 및 부속품이 제공되어야 한다고 명시되어 있다. 이에 따라 계선주의 안전사용하중은 IMO MSC/Circular 1175의 선박 견인 및 계류설비 지침에서 규정하고 있으며, 이는 선박의 정상 계류에 사용되는 계선주 및 비트, 페어리더, 스탠드 롤러 및 초크 등 선박의 통상 견인에 사용되는 유사한 구성품 전체를 포함하고 있다.

IMO MSC/Circular 1175의 주요 내용으로 계선주 안전사용하중(S.W.L)은 설계하중(D.L)의 80%를 초과하지 않도록 권고하고 있으며, 각 부두 및 선석의 계류 배치 계획도에 선박의 위치, 계선주 종류, 안전사용하중 등을 명시하도록 권고하고 있다(IMO, 2005).

부산항 국제여객터미널에 배치된 곡주(Bollard) 및 직주(Bitt)는 Fig. 93과 같다.



Fig. 93 Bollard and bitt in the Busan international passenger terminal

3) 선체동요량

선박평가지표의 CS_3 은 선체동요량을 의미하며, 마루높이에 따라 접안선박의 선체 6자유도운동값이 변화한다. 마루높이가 상향되면 부두에서 선박으로 풍력이 작용할 때 풍압면적이 감소하고, 이 때 접안선박에 미치는 풍압력이 감소하므로 선체동요량 또한 감소하게 된다.

화물의 적하 및 양하 작업이 안전하게 이루어 질 수 있는 선박의 운동한계는 선종, 크기 및 하역기기에 의해 결정되며, 일반적으로 동일한 파고에서 선박의 크기가 커질수록 Surge, Sway같은 수평적 운동에 대한 반응은 작아지며, 수직 방향 운동인 Heave는 선박이 저조시, 만선상태에서 최소가 된다. 선종별로 보면 페리선과 RO/RO선이 모든 선종 중에서 선체동요량의 허용한계값이 가장 작고 매우 엄격한 기준을 적용받고 있다. 컨테이너선의 경우 급격히 수평방향의 Sway 운동이 1.0m 이상 나타나면 하역율이 현저히 떨어질 수 있으며, 유조선은 실질적인 한계로 Surge 2.0m, Sway 1.0m정도로 본다. LPG선, LNG선 등 가스선은 위험화물이므로 유조선보다 더 낮은 기준을 적용받고 있다(김세원, 2000).

항만 및 어항 설계기준 및 PIANC 기준에서 규정하는 선종 및 하역장비에 따른 선체동요량 허용한계기준을 4장에서 분류한 선박 그룹별로 정리하면 Table 45와 같다(해양수산부, 2017b).

Table 45 Recommended motion criteria for safe working conditions

Group	ship's type	Cargo handling equipment	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
A	Ferry, RO/RO Ship	side ramp	0.6	0.6	0.6	1	1	2
		dew/storm ramp	0.8	0.6	0.8	1	1	4
		link span	0.4	0.6	0.8	3	2	4
		rail ramp	0.1	0.1	0.4	-	1	1
B	Container ship	100% efficiency	1.0	0.6	0.8	1	1	3
		50% efficiency	2.0	1.2	1.2	1.5	2	6
C	Bulk carrier <10,000(DWT)	ship's gear	1.0	1.2	0.6	1	1	2
		quarry cranes	1.0	1.2	0.8	2	1	3
	General cargo ship 5,000~10,000 (DWT)	-	2.0	1.5	1.0	3	2	5
	Bulk carrier 30,000~150,000 (DWT)	crane elevator	2.0	1.0	1.0	2	2	6
		bucket wheel	1.0	0.5	1.0	2	2	2
		conveyor belt	5.0	2.5	-	3	-	-
Tanker	loading arms	3.0	3.0	-	-	-	-	
D	LNG carrier	loading arms	2.0	2.0	-	2	2	2

출처 : 해양수산부

4) 계류라인 수직각

선박평가지표의 CS_4 는 계류라인 수직각을 의미하며, 마루높이에 따라 선박 계류라인의 수직각이 변화한다. 마루높이가 상향되면 부두의 계선주의 높이도 올라가므로 계선주와 본선 사이의 계류라인 수직각 또한 감소하게 된다.

계류라인 수직각이 클수록 Fig. 94와 같이 계류삭의 수평장력에 대한 효율성은 감소하게 된다. 예를 들어, 수직각이 25° 일 때 계류삭 수평장력의 효율성은 91%이며, 수직각 37° 일 때 그 효율성은 80%, 수직각 45° 일 때 71%로 측정된다(OCIMF, 2008). 또한, 수직각 60° 일 때 수평장력 효율성은 50%로 측정되며, 60° 를 초과한 이후의 효율성은 급격히 감소하게 되어 70° 일 때 34%, 80° 일 때 17%로 측정된다.

또한 미국의 UFC 4-159-03(Design : Moorings)에서 계류라인의 배치는 선박에 미치는 외력과 모멘트의 분산을 위해 계류라인의 길이가 비슷하도록 설계하여야 하며, 계류삭 장력의 효율을 높이기 위해 계류라인의 수직각은 낮아야 한다고 명시되어 있다(U. S. Department of defense, 2005).

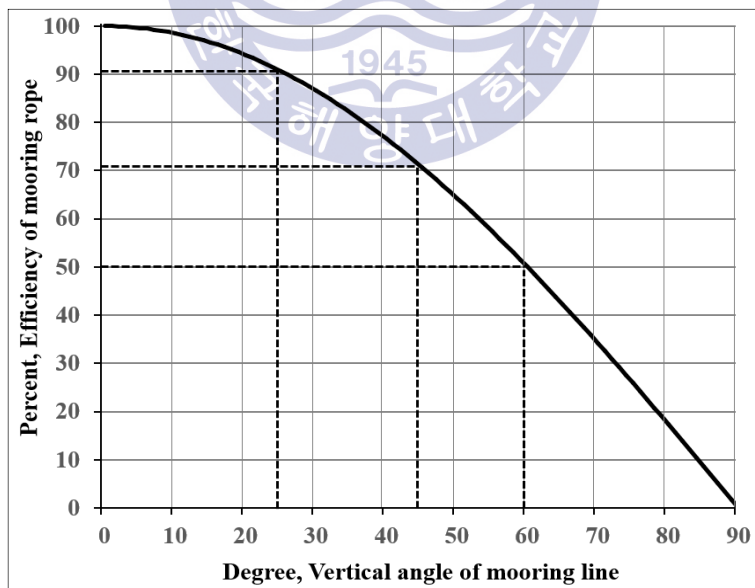


Fig. 94 Efficiency of mooring rope by vertical angle of mooring line

5.1.3 마루높이 평가방법

5장의 5.1.1에서 설정한 마루높이 환경평가지표 4개와 5.1.2에서 설정한 선박 평가지표 4개를 사용하여 4장의 마루높이에 따른 선종별 계류안전성 수치 시뮬레이션의 결과를 평가하고, 선종별 적정 마루높이를 도출하기 위한 평가방법을 개발하였다.

마루높이 H_i 일 때, 안전성 평가지표 $CH(H_i)$ 는 식 (5-1)와 같이 환경평가지표 CE_{ij} 와 선박평가지표 CS_{ik} 의 곱으로 표현된다. 또한, 환경평가지표와 선박평가지표도 마찬가지로 식 (5-2), (5-3)과 같이 각 평가지표 4개의 곱으로 표현된다. 이는 적정 마루높이 설정시 환경평가지표 4개와 선박평가지표 4개가 모두 고려되어야 하기 때문이다.

$$CH(H_i) = CE_{ij} \cdot CS_{ik} \quad (5-1)$$

$$CE_{ij} = CE_{i1} \cdot CE_{i2} \cdot CE_{i3} \cdot CE_{i4} \quad (5-2)$$

$$CS_{ik} = CS_{i1} \cdot CS_{i2} \cdot CS_{i3} \cdot CS_{i4} \quad (5-3)$$

CE_{ij} 는 마루높이 H_i 일 때 환경평가지표 j 요소이며, CE_{i1} 는 조위 및 조차, CE_{i2} 는 해수면 상승 정도, CE_{i3} 는 승하선 및 하역 설비, CE_{i4} 는 수심을 나타낸다. 각 환경평가지표는 최대값 1과 최소값 0의 값으로 표현되고, 각 평가지표가 고려되었을 경우 1의 값을 갖고, 각 지표가 고려되지 않았을 경우 0의 값을 갖는다. 이에 따라 환경평가지표 4개 중 1개의 지표라도 고려되지 않아 0의 값을 갖게 되면 CE_{ij} 는 0이 된다. 예를 들어, 마루높이 H_i 설정할 때 해수면 상승 정도를 반영하는 CE_{i2} 를 고려하지 않으면 $CE_{i2} = 0$ 이 되어 $CE_{ij} = 0$ 이 되고 CE_{ij} 와 CS_{ik} 의 곱으로 표현되는 $CH(H_i)$ 값 또한 0이 된다.

CS_{ik} 는 마루높이 H_i 일 때 선박평가지표 k 요소이며, CS_{i1} 는 계류삭 장력, CS_{i2} 는 계선주 견인력, CS_{i3} 는 선체동요량, CS_{i4} 는 계류라인 수직각을 나타낸다. 각 선박평가지표는 Table 46의 각 선박평가지표의 평가기준에 따라 평가하고, 각 등급(Class)별로 정해진 평가값(Value : VL)을 모두 곱하여 구한다.

Table 46 Evaluation standards on ship index of crown height

Class	Value (VL)	$CS_1(\%)$	$CS_2(\%)$	$CS_3(\%)$	$CS_4(\%)$
		Tension of Mooring line	Load of Bollard	Oscillation of ship motion	Vertical Angle of Mooring Line
1	0.0	$50 \leq CS_1$	$80 \leq CS_2$	$100 \leq CS_3$	$67 \leq CS_4$
2	0.2	$40 \leq CS_1 < 50$	$64 \leq CS_2 < 80$	$80 \leq CS_3 < 100$	$54 \leq CS_4 < 67$
3	0.5	$36 \leq CS_1 < 40$	$48 \leq CS_2 < 64$	$60 \leq CS_3 < 80$	$40 \leq CS_4 < 54$
4	0.8	$30 \leq CS_1 < 36$	$40 \leq CS_2 < 48$	$50 \leq CS_3 < 60$	$33 \leq CS_4 < 40$
5	1.0	$CS_1 < 30$	$CS_2 < 40$	$CS_3 < 50$	$CS_4 < 33$
Standard on application		ISO, OCIMF	IMO	PIANC	OCIMF
Safety factor		S.W.L \leq M.B.L \times 50%	S.W.L \leq M.B.L \times 80%	Applicable motion \leq 100%	Recommendation Angle \leq 30° (33%)

Table 46과 같이 선박평가지표의 평가등급은 1등급부터 5등급까지 5개로 구분하였고, 1등급은 국내·외 기준에서 권고하는 한계수준으로 계류안전성을 확보할 수 없는 구간으로 0의 평가값을 부여하였다. 2등급은 1등급의 기준에서 20%의 여유수준을 고려한 구간으로 0.2의 평가값을 부여하였으며, 3등급은 2등급과 4등급의 중간 구간으로 0.5의 평가값을 부여하였다. 4등급은 매우 안전한 수준인 5등급에서 20%의 여유수준을 고려한 구간으로 0.8의 평가값을 부여하였으며, 5등급은 선장, 일항사급의 선박운용자 및 하역관리자 모임의 브레인스토밍(Brain Storming) 과정에서 도출된 매우 안전한 수준의 구간으로 1.0의 평가값을 부여하였다.

계류삭 장력 평가지표인 CS_1 은 국제 ISO기준에서 계류삭의 재질에 따라 약 5% 정도씩 다르긴 하나 보통 파단력의 50% 정도를 한계 수준으로 권고하고 있다. 파단력의 50% 한계수준은 계류삭의 재질 및 직경에 따라 파단력은 정해져

있으나, 계류삭의 마모 상태에 따라 그 파단력에 차이가 있기 때문에 국제적으로 설정된 안전한 수준으로 고려되었다. 이에 따라 계류삭 파단력의 30% 수준 정도는 매우 안전한 구간으로 평가되었다.

계선주 견인력 지표인 CS_2 는 국제 IMO 기준에서 계류로 인해 계선주에 손상이 가지 않는 수준으로 최대 견인력의 80% 정도를 한계수준으로 설정하였으며, 이에 따라 한계수준의 절반인 40% 정도는 매우 안전한 구간으로 평가되었다.

선체동요량 지표인 CS_3 는 PIANC 기준에서 선종 및 하역장비별로 선체 6자유운동의 허용 범위를 설정하였으며, 허용 범위의 절반인 50% 정도는 매우 안전한 구간으로 평가되었다.

계류라인 수직각 지표인 CS_4 는 직각인 90° 를 100%로 설정하여 퍼센트로 환산하였으며, OCIMF와 국내 항만 및 어항 설계기준에서 돌핀에 접안하는 탱커선에 한하여 25° (28%)를 추천하며 30° (33%)를 초과하지 않도록 권고하고 있다. 이에 따라 30° 이하 수준은 매우 안전한 구간으로 설정하고 60° (67%)를 초과할 경우 계류삭의 수평장력은 50% 이하로 매우 감소하는 것으로 측정되어 이를 평가값이 0이 되는 구간으로 설정하였다.

선박평가지표 CS_{ik} 는 각 선박평가지표의 평가등급에 따라 도출된 평가값을 모두 곱하여 구해진다. 예를 들어, 마루높이 H_i 를 설정할 때 계류삭 장력 CS_{i1} 과 계선주 견인력 CS_{i2} 의 값이 각각 3등급으로 평가되면 평가값은 각각 0.5이며, 선체동요량 CS_{i3} 는 4단계로 평가되면, 그 값은 0.8이 되고, 계류라인 수직각 CS_{i4} 은 5단계로 평가되면, 그 값은 1.0이 된다. 이에 따라 선박평가지표인 CS_{ik} 는 $0.5 \times 0.5 \times 0.8 \times 1.0$ 이 되어 0.2가 된다.

그리고 Table 47의 마루높이 위험도 평가기준에 따라 $CH(H_i)$ 값의 위험 정도를 5단계로 평가한다. 마루높이 위험도는 0.2 차이로 Very High Risk, High Risk, Moderate Risk, Low Risk, Very Low Risk로 구분되며, $CH(H_i)$ 평가값이 0에 가까울 때 위험하며, 1에 가까울 때 그 위험도가 감소하는 것으로 평가된다.

예를 들어, 모든 환경평가지표가 고려되어 $CE_{ij} = 1$ 이 되고, 이에 따라

$CH(H_i) = CS_{ik}$ 일 때, 각 CS_{ik} 평가값이 해당하는 평가범위에 따라 $CH(H_i)$ 이 달라진다. 세 개의 CS_{ik} 평가값이 5등급에 해당하고, 하나의 CS_{ik} 이 4등급일 경우 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.8 = 0.8$ 으로 Very Low Risk에 해당하고, 두 개의 CS_{ik} 평가값이 5등급에 해당하고, 두 개의 CS_{ik} 이 4등급일 경우 $1.0 \times 1.0 \times 0.8 \times 0.8 = 0.64$ 로 Low Risk에 해당한다. 또한, 두 개의 CS_{ik} 평가값이 5등급에 해당하고 나머지 CS_{ik} 평가값이 각각 4등급, 3등급일 경우 $1.0 \times 1.0 \times 0.8 \times 0.5 = 0.4$ 로 Moderate Risk에 해당하며, 모든 CS_{ik} 평가값이 4등급에 해당하여 0.8일 경우 $0.8^4 = 0.4096$ 이므로 이 또한 Moderate Risk에 해당하게 된다.

하나의 CS_{ik} 평가값이 5등급에 해당하고 나머지 CS_{ik} 평가값이 4등급, 3등급일 경우 $1.0 \times 0.8 \times 0.8 \times 0.5 = 0.32$, $1.0 \times 0.8 \times 0.5 \times 0.5 = 0.20$ 로 High Risk에 해당하며, 3등급의 CS_{ik} 평가값이 세 개 이상일 경우 $1.0 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 = 0.125$ 로 Very High Risk에 해당하며, 2등급의 CS_{ik} 평가값이 하나 이상일 경우 나머지 세 개의 CS_{ik} 평가값이 모두 5등급인 경우를 제외하고는 $1.0 \times 1.0 \times 0.8 \times 0.2 = 0.16$ 으로 모든 조건에서 Very High Risk에 해당한다.

즉, 모든 환경평가요소가 고려되고, 각 CS_{ik} 요소가 선박평가지표의 4등급이나 5등급에 모두 해당되거나, 하나의 CS_{ik} 요소가 3등급일 경우 4등급 요소는 하나 이하, 나머지는 5등급에 해당되어야 $1.0 \times 1.0 \times 0.8 \times 0.5 = 0.4$ 로 Moderate Risk 이상의 마루높이 위험도를 확보할 수 있다. 또한 3등급의 CS_{ik} 가 두 개 이상이거나 2등급의 CS_{ik} 가 하나라도 존재할 때는 High Risk 및 Very High Risk의 위험도에 해당하게 된다.

Table 47 Risk level evaluation standards of crown height

$CH(H_i)$	Risk Level
$0.0 \leq CH < 0.2$	Very High Risk
$0.2 \leq CH < 0.4$	High Risk
$0.4 \leq CH < 0.6$	Moderate Risk
$0.6 \leq CH < 0.8$	Low Risk
$0.8 \leq CH \leq 1.0$	Very Low Risk

5.2 마루높이 평가지표 적용 결과

5.2.1 마루높이 평가지표 적용

본 논문 4장의 선종별 마루높이에 따른 계류안전성 수치 시뮬레이션으로 도출된 CS_1 계류삭 장력, CS_2 계선주 견인력, CS_3 선체동요량, CS_4 계류라인 수직각 결과값을 Table 46의 선박평가지표의 평가기준에 대입하여 마루높이 H_i 일 때 CS_{i1} , CS_{i2} , CS_{i3} , CS_{i4} 의 평가값과 각 선박평가지표의 곱인 CS_{ik} 값을 구하였다. 이 때, 모든 환경평가지표 CE_{ij} 는 적정 마루높이 설정에 모두 고려되었다고 가정하여 $CE_{ij} = 1$ 이 되고, $CS_{ik} = CH(H_i)$ 이므로 최종적으로 구해진 $CH(H_i)$ 은 Table 47의 마루높이 위험도 평가기준에 의해 평가되었다.

본 계류안전성 시뮬레이션을 수행한 4개의 마루높이 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 중 적정 마루높이를 도출하기 위해 $CH(H_i)$ 가 Moderate Risk인 0.4 이상이 되는 최소 마루높이 H_i 를 적정 최소 마루높이로 선정하였다. 적정 최소 마루높이를 선정하는 이유는 마루높이를 상향할수록 접안선박의 계류안전성은 좋아지고, 각 선박평가지표 CS_{i1} , CS_{i2} , CS_{i3} , CS_{i4} 의 평가값과 그 평가값의 곱인 CS_{ik} 값은 1.0에 가까워지게 된다. 이에 따라 $CE_{ij} = 1$ 일 때, $CS_{ik} = CH(H_i)$ 이므로 $CH(H_i)$ 값 또한 커지게 되어 마루높이 위험도는 Very Low Risk 범위인 1.0의 값에 가까워져 그 위험도가 감소하게 됨을 알 수 있다.

그러나 접안선박 계류안전성 향상을 위해 마루높이를 계속 상향할 수 없으므로, 마루높이 상향의 최소 기준이 필요하다. 이에 따라 $CH(H_i)$ 의 위험도 평가기준에서 Moderate Risk 범위 중 최소값인 0.4 이상의 값을 만족하는 최소 H_i 를 적정 최소 마루높이로 선정하였다.

1) 크루즈선

A그룹의 대상선박인 10만톤급 크루즈선의 각 환경외력 조건에서 마루높이 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 에 따른 CS_1 계류삭 장력, CS_2 계선주 견인력, CS_3 선체동요량, CS_4 계류라인 수직각의 최대값(Max)과 평가값(VL), 그에 따른 마루높이 안전성 평가지표 CH 값은 Table 48과 같다.

풍속 30kts 이상의 조건에서는 마루높이 H_i 에 상관없이 모든 풍향 조건에서 CH 값은 0이 되었으며, 이는 풍속 30kts 이상의 바람이 부두에서 접안선박 방향으로 불 때 10만톤급 크루즈선의 경우 모든 계류요소의 안전성을 확보하기 어렵다는 의미로 해석할 수 있다.

풍속 20kts일 때 풍향 및 마루높이에 따른 CH 값은 Fig. 95와 같으며, 풍향 WD1에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.2, H_2 일 때 0.32, H_3 일 때 0.5, H_4 일 때 0.5로 적정 마루높이는 Moderate Risk의 0.4 이상의 최소 마루높이인 H_3 로 선정할 수 있다. 풍향 WD2에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.4, H_2 일 때 0.5, H_3 일 때 0.5, H_4 일 때 0.5이며, 풍향 WD3에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.4, H_2 일 때 0.4, H_3 일 때 0.4, H_4 일 때 0.5이다. WD2와 WD3의 풍향 조건에서 적정 마루높이는 CH 값이 0.4 이상이 되는 최소 마루높이인 H_1 이 되며, 모든 풍향 조건에서 CH 값이 0.4 이상이 되는 적정 최소 마루높이는 약최고고조위에서 3m 상향된 H_3 으로 설정할 수 있다.

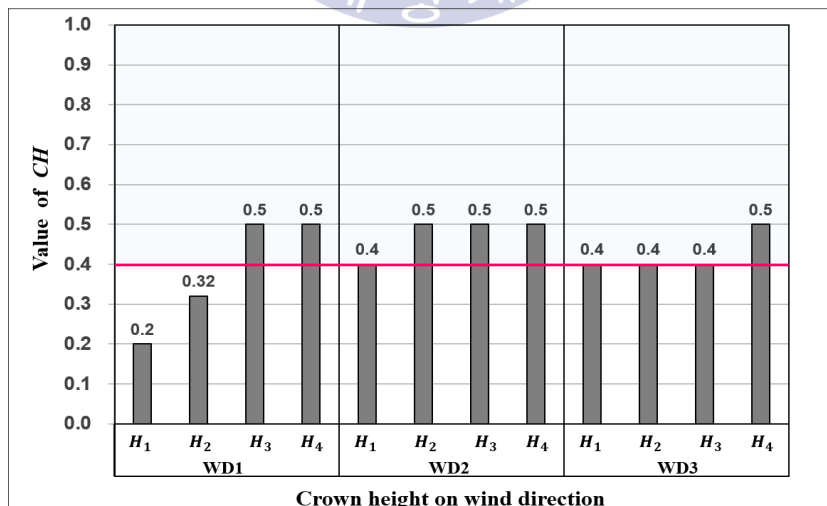


Fig. 95 Results of CH by environment condition (Group A)

Table 48 Results of risk level evaluation on ship index(Group A)

Item WD	H_i	Wind Speed (kts)	CS_1 (%)		CS_2 (%)		CS_3 (%)		CS_4 (%)		CH
			Max	VL	Max	VL	Max	VL	Max	VL	
WD1	H_1	20	26	1.0	43	0.8	73	0.5	49	0.5	0.2
		30	65	0	85	0	257	0	48	0.5	0
		40	118	0	138	0	447	0	46	0.5	0
	H_2	20	25	1.0	41	0.8	58	0.8	47	0.5	0.32
		30	65	0	80	0	232	0	46	0.5	0
		40	118	0	129	0	412	0	44	0.5	0
	H_3	20	24	1.0	39	1.0	48	1.0	44	0.5	0.5
		30	64	0	75	0.2	207	0	43	0.5	0
		40	118	0	120	0	373	0	42	0.5	0
	H_4	20	23	1.0	37	1.0	40	1.0	42	0.5	0.5
		30	63	0	70	0.2	185	0	41	0.5	0
		40	117	0	112	0	340	0	40	0.5	0
WD2	H_1	20	23	1.0	39	1.0	52	0.8	49	0.5	0.4
		30	55	0	80	0	222	0	48	0.5	0
		40	98	0	133	0	402	0	46	0.5	0
	H_2	20	22	1.0	37	1.0	42	1.0	47	0.5	0.5
		30	54	0	76	0.2	202	0	46	0.5	0
		40	97	0	126	0	368	0	44	0.5	0
	H_3	20	21	1.0	36	1.0	32	1.0	44	0.5	0.5
		30	53	0	72	0.2	178	0	43	0.5	0
		40	96	0	119	0	335	0	42	0.5	0
	H_4	20	20	1.0	34	1.0	23	1.0	42	0.5	0.5
		30	52	0	68	0.2	160	0	41	0.5	0
		40	94	0	113	0	305	0	40	0.5	0
WD3	H_1	20	28	1.0	45	0.8	47	1.0	49	0.5	0.4
		30	71	0	90	0	212	0	48	0.5	0
		40	124	0	145	0	387	0	46	0.5	0
	H_2	20	28	1.0	43	0.8	37	1.0	47	0.5	0.4
		30	70	0	84	0	190	0	46	0.5	0
		40	123	0	136	0	353	0	44	0.5	0
	H_3	20	27	1.0	41	0.8	28	1.0	44	0.5	0.4
		30	70	0	79	0.2	167	0	43	0.5	0
		40	121	0	127	0	318	0	42	0.5	0
	H_4	20	26	1.0	39	1.0	23	1.0	42	0.5	0.5
		30	69	0	74	0.2	148	0	41	0.5	0
		40	120	0	118	0	288	0	40	0.5	0

2) 컨테이너선

B그룹의 대상선박인 10만톤급 컨테이너선의 각 환경외력 조건에서 마루높이 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 에 따른 CS_1 계류삭 장력, CS_2 계선주 견인력, CS_3 선체동요량, CS_4 계류라인 수직각의 최대값(Max)과 평가값(VL), 그에 따른 마루높이 안전성 평가지표 CH값은 Table 50과 같다.

풍속 30kts 이상의 조건에서는 마루높이 H_i 에 상관없이 모든 풍향 조건에서 CH값은 0이 되었으며, 이는 풍속 30kts 이상의 바람이 부두에서 접안선박 방향으로 불 때 10만톤급 컨테이너선의 경우 모든 계류요소의 안전성을 확보하기 어렵다는 의미로 해석할 수 있다.

풍속 20kts일 때 풍향 및 마루높이에 따른 CH값은 Fig. 96과 같으며, 풍향 WD1에서 마루높이에 따른 CH값은 H_1 일 때 0, H_2 일 때 0.032, H_3 일 때 0.2, H_4 일 때 0.2로 모든 풍향 조건에서 Moderate Risk인 0.4이하로 분석되었다. 그 이유는 CS_2 지표가 모두 0.2 또는 0.5의 값을 보이기 때문이며, 항만 및 어항 설계기준상 재화중량톤수 10만톤급 컨테이너선의 총톤수는 88,200톤으로 설정되어 계선주의 견인력은 100톤으로 설정되나, 실제 10만톤급 컨테이너선의 총톤수는 Table 49와 같이 91,410톤에서 94,511톤 정도로 10만톤에 가까우므로 계류안전성을 높이기 위해서는 재화중량톤수 10만톤급 선박에 사용되는 150톤급 견인력의 계선주를 사용하는 것을 권고한다.

또한, CS_3 지표인 선체운동량 또한 풍향이 부두에서 접안선박의 정횡방향(WD1)으로 불 때 H_1 은 0, H_2 는 0.2, H_3 는 0.5, H_4 는 0.5의 값을 보이기 때문이며, 이를 증가시키기 위해서 10만톤급 컨테이너선은 풍향이 부두에서 접안선박의 정횡방향일 때 Sway 운동을 감소시키기 위해 선수 및 선미에 브레스트 라인을 추가로 배치하는 것을 권고한다.

Table 49 Sample of DWT 100,000ton Container ship

Company	Ship's Name	DWT(ton)	GT(ton)	LOA(m)	B(m)
HMM	Hyundai Faith	98,967	94,511	339.6	45.6
CMA CGM	CMA CGM TOSCA	101,818	91,410	334.1	42.8
Hapag Lloyd	Hanover Express	103,760	93,750	335.5	42.8
Maersk	Maersk Stepnica	107,978	92,293	334.1	42.8

풍향 WD2에서 마루높이에 따른 CH값은 H_1 일 때 0.32, H_2 일 때 0.32, H_3 일 때 0.4, H_4 일 때 0.4이며, 풍향 WD3에서 마루높이에 따른 CH값은 H_1 일 때 0.4, H_2 일 때 0.4, H_3 일 때 0.4, H_4 일 때 0.4이다. WD2와 WD3의 풍향 조건에서 적정 마루높이는 Moderate Risk인 0.4 이상이 되는 최소 마루높이인 H_3 가 되며, WD1을 제외한 모든 풍향 조건에서 CH값이 0.4 이상이 되는 적정 최소 마루높이는 약최고고조위에서 3m 상향된 H_3 으로 설정할 수 있다.

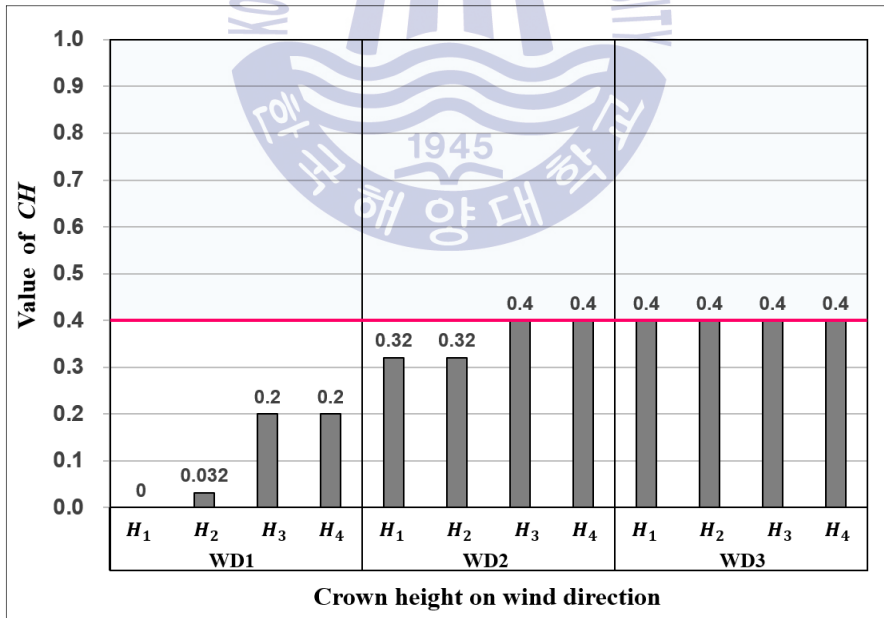


Fig. 96 Results of CH by environment condition (Group B)

Table 50 Results of risk level evaluation on ship index(Group B)

Item WD	H_i	Wind Speed (kts)	CS_1 (%)		CS_2 (%)		CS_3 (%)		CS_4 (%)		CH
			Max	VL	Max	VL	Max	VL	Max	VL	
WD1	H_1	20	19	1.0	66	0.2	102	0	39	0.8	0
		30	42	0.2	140	0	334	0	38	0.8	0
		40	69	0	232	0	577	0	37	0.8	0
	H_2	20	19	1.0	65	0.2	90	0.2	38	0.8	0.032
		30	40	0.2	136	0	315	0	37	0.8	0
		40	67	0	226	0	550	0	34	0.8	0
	H_3	20	18	1.0	63	0.5	79	0.5	36	0.8	0.2
		30	39	0.5	132	0	297	0	34	0.8	0
		40	65	0	220	0	524	0	33	0.8	0
	H_4	20	18	1.0	61	0.5	69	0.5	34	0.8	0.2
		30	38	0.5	128	0	279	0	33	0.8	0
		40	63	0	214	0	500	0	32	1.0	0
WD2	H_1	20	18	1.0	62	0.5	57	0.8	39	0.8	0.32
		30	38	0.5	134	0	263	0	38	0.8	0
		40	64	0	226	0	481	0	37	0.8	0
	H_2	20	17	1.0	59	0.5	50	0.8	38	0.8	0.32
		30	37	0.5	129	0	247	0	37	0.8	0
		40	62	0	219	0	457	0	34	0.8	0
	H_3	20	16	1.0	57	0.5	43	1.0	36	0.8	0.4
		30	36	0.5	125	0	230	0	34	0.8	0
		40	60	0	212	0	433	0	33	0.8	0
	H_4	20	16	1.0	55	0.5	33	1.0	34	0.8	0.4
		30	34	0.8	121	0	214	0	33	0.8	0
		40	58	0	206	0	411	0	32	1.0	0
WD3	H_1	20	17	1.0	61	0.5	30	1.0	39	0.8	0.4
		30	38	0.5	131	0	220	0	38	0.8	0
		40	63	0	222	0	420	0	37	0.8	0
	H_2	20	17	1.0	59	0.5	22	1.0	38	0.8	0.4
		30	36	0.5	127	0	204	0	37	0.8	0
		40	61	0	216	0	398	0	34	0.8	0
	H_3	20	17	1.0	57	0.5	16	1.0	36	0.8	0.4
		30	35	0.8	123	0	189	0	34	0.8	0
		40	59	0	210	0	378	0	33	0.8	0
	H_4	20	16	1.0	56	0.5	13	1.0	34	0.8	0.4
		30	34	0.8	120	0	176	0	33	0.8	0
		40	57	0	204	0	358	0	32	1.0	0

3) 벌크선

C그룹의 대상선박인 10만톤급 벌크선의 각 환경외력 조건에서 마루높이 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 에 따른 CS_1 계류삭 장력, CS_2 계선주 견인력, CS_3 선체동요량, CS_4 계류라인 수직각의 최대값(Max)과 평가값(VL), 그에 따른 마루높이 안전성 평가 지표 CH 값은 Table 51과 같다.

풍속 30kts 이상의 조건에서는 마루높이 H_i 에 상관없이 모든 풍향 조건에서 CH 값은 0이 되었으며, 이는 풍속 30kts 이상의 바람이 부두에서 접안선박 방향으로 불 때 10만톤급 벌크선의 경우 모든 계류요소의 안전성을 확보하기 어렵다는 의미로 해석할 수 있다.

풍속 20kts일 때 풍향 및 마루높이에 따른 CH 값은 Fig. 97과 같으며, 풍향 WD1에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.4, H_2 일 때 0.4, H_3 일 때 0.4, H_4 일 때 0.64로 적정 마루높이는 Moderate Risk인 0.4 이상의 최소 마루높이인 H_1 으로 선정할 수 있다. 풍향 WD2에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.5, H_2 일 때 0.5, H_3 일 때 0.5, H_4 일 때 0.8이며, 풍향 WD3에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.4, H_2 일 때 0.4, H_3 일 때 0.4, H_4 일 때 0.64이다. 모든 풍향 조건에서 CH 값이 0.4 이상이 되는 적정 최소 마루높이는 약최고고조위에서 1m 상향된 H_1 으로 설정할 수 있다.

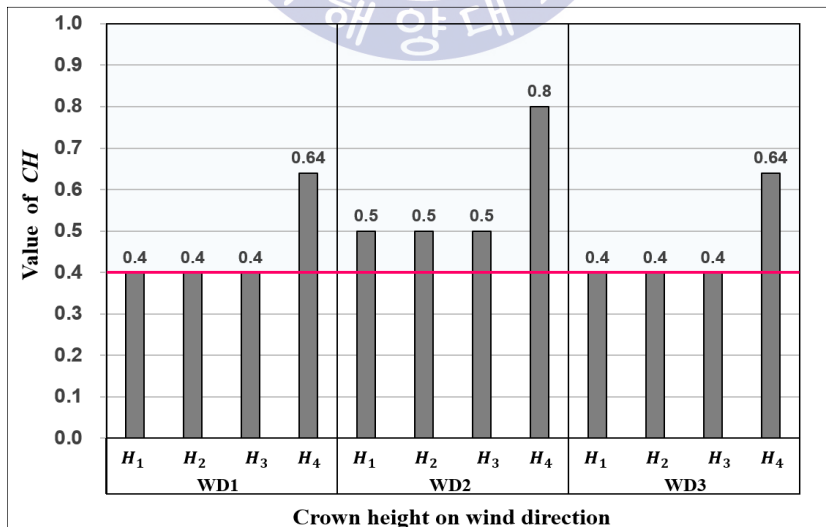


Fig. 97 Results of CH by environment condition (Group C)

Table 51 Results of risk level evaluation on ship index(Group C)

Item WD	H_i	Wind Speed (kts)	CS_1 (%)		CS_2 (%)		CS_3 (%)		CS_4 (%)		CH
			Max	VL	Max	VL	Max	VL	Max	VL	
WD1	H_1	20	17	1.0	43	0.8	38	1.0	43	0.5	0.4
		30	35	0.8	88	0	313	0	42	0.5	0
		40	58	0	143	0	591	0	41	0.5	0
	H_2	20	16	1.0	42	0.8	29	1.0	42	0.5	0.4
		30	34	0.8	85	0	291	0	41	0.5	0
		40	56	0	139	0	561	0	38	0.8	0
	H_3	20	15	1.0	41	0.8	23	1.0	40	0.5	0.4
		30	33	0.8	83	0	270	0	38	0.8	0
		40	54	0	135	0	531	0	37	0.8	0
	H_4	20	15	1.0	40	0.8	18	1.0	38	0.8	0.64
		30	32	0.8	80	0	250	0	37	0.8	0
		40	52	0	131	0	503	0	36	0.8	0
WD2	H_1	20	13	1.0	38	1.0	10	1.0	43	0.5	0.5
		30	26	1.0	70	0.2	203	0	42	0.5	0
		40	43	0.2	116	0	444	0	41	0.5	0
	H_2	20	14	1.0	38	1.0	10	1.0	42	0.5	0.5
		30	25	1.0	67	0.2	184	0	41	0.5	0
		40	42	0.2	112	0	417	0	38	0.8	0
	H_3	20	14	1.0	38	1.0	9	1.0	40	0.5	0.5
		30	24	1.0	65	0.2	166	0	38	0.8	0
		40	40	0.2	109	0	393	0	37	0.8	0
	H_4	20	14	1.0	38	1.0	8	1.0	38	0.8	0.8
		30	23	1.0	63	0.5	149	0	37	0.8	0
		40	39	0.5	106	0	369	0	36	0.8	0
WD3	H_1	20	17	1.0	45	0.8	36	1.0	43	0.5	0.4
		30	35	0.8	88	0	223	0	42	0.5	0
		40	58	0	144	0	471	0	41	0.5	0
	H_2	20	17	1.0	44	0.8	30	1.0	42	0.5	0.4
		30	34	0.8	85	0	204	0	41	0.5	0
		40	56	0	140	0	444	0	38	0.8	0
	H_3	20	16	1.0	43	0.8	25	1.0	40	0.5	0.4
		30	33	0.8	82	0	186	0	38	0.8	0
		40	54	0	136	0	418	0	37	0.8	0
	H_4	20	16	1.0	42	0.8	19	1.0	38	0.8	0.64
		30	32	0.8	80	0	168	0	37	0.8	0
		40	53	0	132	0	393	0	36	0.8	0

4) LNG선

D그룹의 대상선박인 10만톤급 LNG선의 각 환경외력 조건에서 마루높이 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 에 따른 CS_1 계류삭 장력, CS_2 계선주 견인력, CS_3 선체동요량, CS_4 계류라인 수직각의 최대값(Max)과 평가값(VL), 그에 따른 마루높이 안전성 평가 지표 CH 값은 Table 52와 같다.

풍속 30kts 이상의 조건에서는 마루높이 H_i 에 상관없이 모든 풍향 조건에서 CH 값은 0이 되었으며, 이는 풍속 30kts 이상의 바람이 부두에서 접안선박 방향으로 불 때 10만톤급 LNG선의 경우 모든 계류요소의 안전성을 확보하기 어렵다는 의미로 해석할 수 있다.

풍속 20kts일 때 풍향 및 마루높이에 따른 CH 값은 Fig. 98과 같으며, 풍향 WD1에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.2, H_2 일 때 0.64, H_3 일 때 0.64, H_4 일 때 0.8로 적정 마루높이는 Moderate Risk인 0.4 이상의 최소 마루높이인 H_2 로 선정할 수 있다. 풍향 WD2에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.8, H_2 일 때 1.0, H_3 일 때 1.0, H_4 일 때 1.0이며, 풍향 WD3에서 마루높이에 따른 CH 값은 H_1 일 때 0.64, H_2 일 때 0.8, H_3 일 때 1.0, H_4 일 때 1.0이다. WD2와 WD3의 풍향 조건에서 적정 마루높이는 Moderate Risk인 0.4 이상이 되는 최소 마루높이인 H_1 이 되며, 모든 풍향 조건에서 CH 값이 0.4 이상이 되는 적정 최소 마루높이는 약최고고조위에서 2m 상향된 H_2 로 설정할 수 있다.

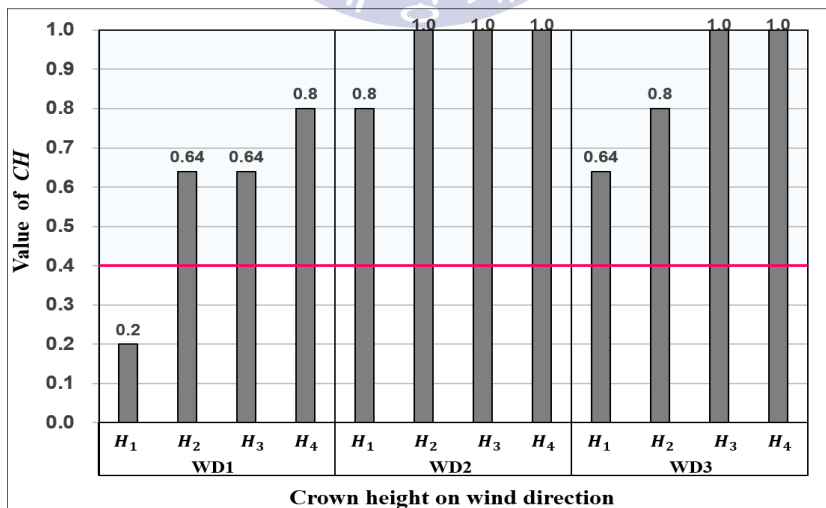


Fig. 98 Results of CH by environment condition (Group D)

Table 52 Results of risk level evaluation on ship index(Group D)

Item WD	H_i	Wind Speed (kts)	CS_1 (%)		CS_2 (%)		CS_3 (%)		CS_4 (%)		CH
			Max	VL	Max	VL	Max	VL	Max	VL	
WD1	H_1	20	21	1.0	48	0.5	63	0.5	33	0.8	0.2
		30	45	0.2	102	0	208	0	32	1.0	0
		40	74	0	173	0	362	0	31	1.0	0
	H_2	20	20	1.0	47	0.8	56	0.8	32	1.0	0.64
		30	43	0.2	100	0	197	0	31	1.0	0
		40	72	0	169	0	347	0	30	1.0	0
	H_3	20	19	1.0	45	0.8	51	0.8	30	1.0	0.64
		30	42	0.2	97	0	187	0	30	1.0	0
		40	70	0	165	0	332	0	29	1.0	0
	H_4	20	19	1.0	44	0.8	45	1.0	29	1.0	0.8
		30	41	0.2	95	0	177	0	28	1.0	0
		40	69	0	161	0	319	0	28	1.0	0
WD2	H_1	20	17	1.0	39	1.0	20	1.0	33	0.8	0.8
		30	37	0.5	86	0	139	0	32	1.0	0
		40	63	0	147	0	266	0	31	1.0	0
	H_2	20	16	1.0	37	1.0	17	1.0	32	1.0	1.0
		30	36	0.5	83	0	130	0	31	1.0	0
		40	62	0	143	0	254	0	30	1.0	0
	H_3	20	16	1.0	37	1.0	14	1.0	30	1.0	1.0
		30	35	0.8	81	0	122	0	30	1.0	0
		40	60	0	139	0	242	0	29	1.0	0
	H_4	20	15	1.0	36	1.0	12	1.0	29	1.0	1.0
		30	34	0.8	79	0.2	114	0	28	1.0	0
		40	58	0	136	0	230	0	28	1.0	0
WD3	H_1	20	17	1.0	41	0.8	17	1.0	33	0.8	0.64
		30	38	0.5	87	0	110	0	32	1.0	0
		40	64	0	150	0	225	0	31	1.0	0
	H_2	20	17	1.0	40	0.8	15	1.0	32	1.0	0.8
		30	37	0.5	85	0	102	0	31	1.0	0
		40	62	0	146	0	214	0	30	1.0	0
	H_3	20	17	1.0	39	1.0	13	1.0	30	1.0	1.0
		30	36	0.5	83	0	95	0.2	30	1.0	0
		40	61	0	143	0	204	0	29	1.0	0
	H_4	20	17	1.0	38	1.0	11	1.0	29	1.0	1.0
		30	35	0.8	81	0	89	0.2	28	1.0	0
		40	59	0	139	0	194	0	28	1.0	0

5.2.2 선종별 적정 마루높이 도출

선박 그룹별 대상선박의 마루높이 H_i 에 따른 $CH(H_i)$ 값과 $CH(H_i)$ 가 0.4 이상이 되는 적정 최소 마루높이 H_i 를 도출하면 Table 53과 같다.

A그룹인 10만톤급 크루즈선의 적정 최소 마루높이는 H_3 로 도출되었으며, 이는 약최고고조위에서 3m 상향된 높이로 여객의 안전한 승하선과 크루즈선의 높은 건현, 풍압면적을 고려하였을 때 적절하다고 사료되었다. B그룹인 10만톤급 컨테이너선의 적정 최소 마루높이는 H_3 로 도출되었으며, A그룹과 마찬가지로 약최고고조위에서 3m 상향된 높이로 컨테이너선의 대형화에 따른 건현의 상승과 만재시 상갑판상 적재된 컨테이너로 인한 풍압면적을 고려하였을 때 적절하다고 사료되었다.

또한, C그룹인 10만톤급 벌크선의 적정 최소 마루높이는 H_1 로 도출되었으며, 이는 약최고고조위에서 1m 상향된 높이로 현재 대형접안시설의 항만 및 어항 설계기준 최소 기준과 일치한다. 벌크선의 경우 경하상태와 만재상태의 흡수 및 풍압면적의 차이가 크므로, 마루높이를 급격히 상향할 경우 오히려 만재상태나 저조시 벌크선의 계류안전성에 악영향을 줄 수 있다. D그룹인 10만톤급 LNG선의 적정 최소 마루높이는 H_2 로 도출되었으며, 이는 약최고고조위에서 2m 상향된 높이로 현재 대형접안시설의 항만 및 어항 설계기준 최대 기준과 일치한다. LNG선의 경우 화물작업설비인 로딩암과의 연결이 매우 중요하므로 이를 고려하였을 때 마루높이 H_2 는 적절하다고 사료되었다.

Table 53 Optimal min. crown height of ship's group

Group	$CH(H_1)$	$CH(H_2)$	$CH(H_3)$	$CH(H_4)$	Optimal min. H_i	Height above A.H.H.W.
A	0.20	0.32	0.50	0.50	H_3	A.H.H.W. + 3m
B	0.32	0.32	0.40	0.40	H_3	A.H.H.W. + 3m
C	0.40	0.40	0.40	0.64	H_1	A.H.H.W. + 1m
D	0.20	0.64	0.64	0.80	H_2	A.H.H.W. + 2m

5.3 마루높이 설계기준 제안

5.3.1 평가지표를 활용한 설계기준 제안

환경 및 선박의 특성을 반영한 적정 마루높이의 설계기준을 설정하기 위해, 환경 및 선박의 특성을 반영한 마루높이 값을 Value of Crown Height의 약자인 VH 로 정의하고, VH 는 식 (5-4)와 같이 환경요소 마루높이 값 VE (Value of Environment)와 선박요소 마루높이 값 VS (Value of Ship)의 합으로 나타내었다.

$$VH = VE + VS \quad (5-4)$$

여기서,

VE : 환경요소로 도출된 마루높이 값

VS : 계류안전성평가로 도출된 적정 마루높이 값

환경요소 마루높이 값 VE 는 식 (5-5)와 같이 VE_1, VE_2 의 합으로 표현된다.

$$VE_i = \sum_{i=1}^2 VE_i = VE_1 + VE_2 \quad (5-5)$$

여기서,

VE_1 : 마루높이 산출 해역의 최근 약최고고조위 값

VE_2 : 2080년 이후 RCP 6.0의 최대값 이상의 해수면 상승 예측값

환경요소 마루높이 값 산출시 해당 부두에서 승하선 및 하역 설비의 사용이 필히 고려되어야 하며, 특히 LPG선과 LNG선의 경우 부두 고정 하역시설인 로딩암의 작동범위를 고려하여 마루높이를 설정하여야 한다. 항만 및 어항 설계기준상 계류시설에 설치되는 하역기계는 하역작업을 원활하고 안전하게 수행할 수 있도록 설치되어야 한다고 명시되어 있으므로 이를 전제조건으로 만족하여야 할 것이다. 또한, 항만 및 어항 설계기준에 명시되어 있는 선종 및 크기별 선석 수심을 만족하여야 한다.

VE_1 는 대상해역의 연중 최고조위에 근접하는 고조위인 약최고고조위 값으로, 2017년 기준 속초 0.36m, 울산 0.61m, 부산 1.84m, 여수 3.51m, 목포 4.86m, 평택 9.36m 등의 값이다.

VE_2 는 대상부두 건설시 고려하고자 하는 해수면 상승 예측값으로, 이는 2080년 이후의 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실행되는 경우에 해당하는 RCP 6.0의 최대값(Max)을 반영한다. 국내 연안의 RCP 6.0 및 RCP 8.5에 해당하는 해수면 상승 평균값 및 최대값은 Table 54와 같으며, 각 해역에서 대상부두의 마루높이 설정시 RCP 6.0의 최대값인 동해안 0.760m, 남해안 0.770m, 서해안 0.690m 이상의 값을 고려해야 한다.

Table 54 Projections of sea level rise in domestic coast(2081~2100)

Area	RCP 6.0 (m)		RCP 8.5 (m)	
	Average	Max	Average	Max
Korea	0.477	0.740	0.650	0.960
East coast	0.476	0.760	0.654	0.970
South coast	0.495	0.770	0.671	0.990
West coast	0.457	0.690	0.637	0.910

출처 : 한국기상학회

선박요소 마루높이 값 VS 는 대상선박의 계류안전성 시뮬레이션 평가를 통해 산출되는 대상선박의 적정 최소 마루높이 H_i 에서 약최고고조위를 제외한 선박 특성을 반영한 고유의 값 i 를 의미한다. 이는 접안선박의 특성에 따라 약최고고조위에 더해지는 값이며, 설계 예정 부두에 접안선박이 확정되면 마루높이에 따른 계류안전성 평가를 수행하고, 이를 마루높이 위험도 평가기준에 따라 평가 후 적정 마루높이를 도출한다.

현재 신규 부두 건설시 해상교통안전진단에서 접안대상 선박의 계류안전성평가를 수행하여 접안 및 하역이 가능한 한계 풍속 및 파고를 산출하고 있으며, 추후 마루높이 건설시 계류안전성평가 항목에 적정 최소 마루높이 또한 산출하

도록 하여 이를 설계에 반영할 필요가 있다.

10만톤급 선박의 경우 본 논문의 5.2.2절에서 도출된 값을 사용할 수 있으며, 10만톤급 크루즈선과 10만톤급 컨테이너선의 경우 적정 마루높이로 도출된 H_3 에서 약최고고조위를 제외한 3m의 높이를 의미한다. 또한, 10만톤급 벌크선의 적정 마루높이인 H_1 에서 약최고고조위를 제외한 1m의 높이를 의미하며, 10만톤급 LNG선은 H_2 에서 약최고고조위를 제외한 2m의 높이를 의미한다.

부두환경 특성과 접안선박의 특성을 반영한 부두 마루높이 설계기준을 Table 55와 같이 제안하였다.

Table 55 Suggestion the design criteria of crown height

Category	Environment (VE)	Ship (VS)	Criteria of crown height
Factor	<ul style="list-style-type: none"> • Tidal range + S.L.R (Sea Level Rise) • $VE = A.H.H.W. + RCP6.0$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Derive optimal height(Ht) above A.H.H.W. • $VS = Ht$ above A.H.H.W. 	<ul style="list-style-type: none"> • Value of crown height(VH) • $VH = VE + VS$
Remark	<ul style="list-style-type: none"> - S.L.R should be higher than max. standard of RCP 6.0 by IPCC. - Appropriate crown height for cargo equipment should be considered. - Depth should be satisfied for standard of Harbour Design Criteria. - Ht of VS factor : Mooring safety assessment → Risk level evaluation - Factors of Mooring safety assessment : Mooring line, Bollard, Motion, Vertical angle of mooring line 		
해석	<ul style="list-style-type: none"> - 해수면 상승값은 IPCC의 RCP 6.0 최대값 기준 이상을 반영하여야 함 - 하역 설비 사용을 위한 적정 마루높이가 고려되어야 함 - 항만 및 어항 설계기준의 수심 기준을 만족하여야 함 - 선박요소의 높이는 계류안전성 평가 결과를 마루높이 위험도 기준에 대입하여 도출하여야 함 - 계류안전성 평가 항목 : 계류삭, 계선주, 선체동요량, 계류라인 수직각 		

5.3.2 설계기준 적용

본 논문의 5.3.1절에서 제안한 마루높이 설계기준에 따라 도출된 마루높이 값과 기존 설계기준에 따른 마루높이 값을 비교하기 위해 적정 예시를 들어 설명하였다.

예시 1) 2080년 RCP 6.0 최대값의 해수면 상승을 고려하였다고 가정하여, 부산항 10만톤급 크루즈선 전용부두의 적정 마루높이를 산출한 값은 다음과 같다.

부산항의 약최고고조위 값 $VE_1 = 1.84$, 2080년 남해안 RCP 6.0의 해수면 상승 예측 최대값 $VE_2 = 0.77$, 10만톤급 크루즈선의 적정 최소 마루높이 값 $VS = 3.0$ 이다.

이 때, $VH = VE_1 + VE_2 + VS = 1.84 + 0.77 + 3.0 = 5.61\text{m}$ 로 산출된다.

현재 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 기준에 따르면 부산항의 마루높이는 2.84~3.84m이므로 현재 항만 및 어항 설계기준 기준보다 1.77~2.77m 상향된 마루높이가 도출되었으며, 이는 부산항의 조위 특성, 2080년 RCP 6.0의 남해안 해수면 상승 정도, 크루즈부두의 갭웨이 설치 뿐 아니라 접안선박인 크루즈선의 특성이 반영된 마루높이 값으로 정의할 수 있다.

예시 2) 2080년 RCP 6.0 최대값의 해수면 상승을 고려하였다고 가정하여, 평택항 10만톤급 LNG선 전용부두의 적정 마루높이를 산출한 값은 다음과 같다.

이 때, LNG선, LPG선 등에서 돌핀부두 형태의 로딩암(하역 설비)의 설치로 인해 11.5m 또는 12.5m의 마루높이를 고려하였다고 가정하면, 평택항의 약최고고조위 값 $VE_1 = 9.36$, 2080년 서해안 RCP 6.0의 해수면 상승 예측 최대값 $VE_2 = 0.69$, 10만톤급 LNG선의 적정 최소 마루높이 값 $VS = 2.0$ 이다.

$VH = VE_1 + VE_2 + VS = 9.36 + 0.69 + 2.0 = 12.05\text{m}$ 로 산출되며, 이 때, 로딩암의 설치로 고려된 마루높이 값이 11.5m일 경우는 본 설계기준에 의해 도출된 값인 12.05m의 마루높이로 설계하여야 하고, 로딩암의 설치로 고려된 마루높이 값이 12.5m일 경우는 12.5m의 마루높이로 설계하여야 한다. 즉, 하역 설비의 사용을 위해 고려한 마루높이를 우선적으로 적용한다.

현재 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 기준에 따르면 평택항의 마루높이는 9.86~10.86m이므로 본 설계기준에서 도출된 12.05m는 현재 항만 및 어항 설계 기준 기준보다 1.19~2.19m 상향된 마루높이가 도출되었으며, 이는 평택항의 조위 특성, 2080년 RCP 6.0의 해수면 상승 정도, 하역 설비의 작동, 접안선박인 LNG선의 특성이 반영된 마루높이 값으로 정의할 수 있다.

2080년 RCP 6.0 해수면 상승 예측 최대값을 대입시 10만톤급 컨테이너선의 국내 주요항만 대형접안시설에서 기존 설계기준에 의한 마루높이 값(A), 제안된 설계기준에 의한 마루높이 값(B)과 그 차이값(B-A)은 Table 56과 같다.

Table 56 Comparison between present and suggested crown height on the domestic major port(Container ship)

Coast	Port	Spring range (m)	A.H. H.W. (m)	A	B	B-A
				Present crown height (m)	Suggested crown height (m)	Difference value between present and suggested (m)
East	Sokcho	0.3	0.36	1.36~2.36	4.12	1.76~2.76
	Donghae	0.3	0.38	1.38~2.38	4.14	1.76~2.76
	Pohang	0.2	0.25	1.25~2.25	4.01	1.76~2.76
	Ulsan	0.5	0.61	1.61~2.61	4.37	1.76~2.76
South	Busan	1.2	1.84	2.84~3.84	5.61	1.77~2.77
	Busan New port	1.7	1.98	2.98~3.98	5.75	1.77~2.77
	Masan	1.8	1.96	2.96~3.96	5.73	1.77~2.77
	Tongyeong	2.4	2.87	3.87~4.87	6.64	1.77~2.77
	Yeosu	3.0	3.51	4.01~5.01	7.28	2.27~3.27
	Gwangyang	3.2	3.64	4.14~5.14	7.41	2.27~3.27
	Wando	3.4	4.00	4.50~5.50	7.77	2.27~3.27
West	Mokpo	4.3	4.86	5.36~6.36	8.55	2.19~3.19
	Gunsan	6.6	7.23	7.73~8.73	10.92	2.19~3.19
	Daesan	7.6	8.28	8.78~9.78	11.97	2.19~3.19
	Pyeongtaek	8.7	9.36	9.86~10.86	13.05	2.19~3.19
	Incheon	8.7	9.27	9.77~10.77	12.96	2.19~3.19

10만톤급 컨테이너선의 경우 기존 설계기준의 마루높이 값과 제안된 설계기준의 마루높이 값의 차이는 항만에 따라 1.76~3.27m로 분석되었다.

2080년 RCP 8.5 해수면 상승 예측 최대값을 대입시 10만톤급 벌크선의 국내 주요항만 대형접안시설에서 기존 설계기준에 의한 마루높이 값(A), 제안된 설계기준에 의한 마루높이 값(B)과 그 차이값(B-A)은 Table 57과 같다. 대상선박의 경우 기존 설계기준의 마루높이 값과 제안된 설계기준의 마루높이 값의 차이는 항만에 따라 -0.03~1.49m정도로 분석되었다.

Table 57 Comparison between present and suggested crown height on the domestic major port(Bulker)

Coast	Port	Spring range (m)	A.H. H.W. (m)	A	B	B-A
				Present crown height (m)	Suggested crown height (m)	Difference value between present and suggested (m)
East	Sokcho	0.3	0.36	1.36~2.36	2.33	-0.03~0.97
	Donghae	0.3	0.38	1.38~2.38	2.35	-0.03~0.97
	Pohang	0.2	0.25	1.25~2.25	2.22	-0.03~0.97
	Ulsan	0.5	0.61	1.61~2.61	2.58	-0.03~0.97
South	Busan	1.2	1.84	2.84~3.84	3.83	-0.01~0.99
	Busan New port	1.7	1.98	2.98~3.98	3.97	-0.01~0.99
	Masan	1.8	1.96	2.96~3.96	3.95	-0.01~0.99
	Tongyeong	2.4	2.87	3.87~4.87	4.86	-0.01~0.99
	Yeosu	3.0	3.51	4.01~5.01	5.50	0.49~1.49
	Gwangyang	3.2	3.64	4.14~5.14	5.63	0.49~1.49
	Wando	3.4	4.00	4.50~5.50	5.99	0.49~1.49
West	Mokpo	4.3	4.86	5.36~6.36	6.77	0.41~1.41
	Gunsan	6.6	7.23	7.73~8.73	9.14	0.41~1.41
	Daesan	7.6	8.28	8.78~9.78	10.19	0.41~1.41
	Pyeongtaek	8.7	9.36	9.86~10.86	11.27	0.41~1.41
	Incheon	8.7	9.27	9.77~10.77	11.18	0.41~1.41

제 6 장 결 론

최근 국내에서는 지구온난화로 인한 해수면 상승과 이에 따른 태풍 및 해일의 증가로 인해 방파제 보강 및 방호시설 설치 등의 공사를 시행중에 있다. 또한, 지속적인 선박대형화로 인해 대형선 접안을 위한 수심 준설, 접안부두 확장 등의 항만 공사를 수행하고 있으나, 접안선박의 안전한 계류와 밀접한 영향이 있는 마루높이의 상향 및 보강 등의 뚜렷한 공사 계획은 없는 실정이다.

또한, 항만 및 어항 설계기준에 의거하여 접안선박의 선종, 크기에 따라 선석의 치수, 마루높이, 계선주, 방충설비 등이 선정되는데, 그 설계기준을 보면 선석길이는 선종 및 톤수, 계선주는 총톤수, 방충설비는 선종 및 재화중량톤수를 포함하고 있다. 그러나 계류라인의 각도, 선박의 풍압면적, 선체동요량에 밀접한 영향을 주는 마루높이 설계기준은 부두의 환경적 특성인 수심 및 조차만 포함되어 있으며, 접안선박의 선종 및 크기 기준은 고려되지 않고 있다.

따라서 접안부두의 수심 및 조차 등의 환경요소 뿐 아니라 선종 및 크기 등 선박요소를 반영한 부두 마루높이 기준을 제안하기 위해 국내·외 마루높이 설계기준을 조사하여 마루높이 결정요소를 분석하였다. 그리고 선종별 특징에 따라 선박 그룹을 분류하고 각 그룹별 대상선박을 선정하여, 마루높이 상향에 따른 계류안전성 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 선종별 특징에 따른 계류요소 민감도를 분석하였다. 또한, 환경요소와 선박요소로 나누어 마루높이 평가지표를 개발하고, 이를 반영한 마루높이 설계기준을 제안하였다.

이상과 같은 논문의 목적과 방법하에서 수행한 연구결과는 다음과 같다.

첫 번째로 부두 설계시 적정 마루높이 설정을 위한 결정요소와 마루높이에 의해 영향을 받는 요소를 도출하였다. 국내 마루높이 설계기준은 조차 3.0m, 수심 4.5m에 따라 구분하고, 해당 해역의 약최고고조위에서 0.3~2.0m를 더하여 설정하고 있다. 그러나 미국, 영국, 홍콩 및 Port Designer's Handbook의 마루높

이 설계기준은 조차, 조위 등의 환경기준 외에 접안선박의 특성, 승하선 및 하역 설비 및 해수면 상승 요소를 반영하고 있음을 분석하였다. 또한 설정된 마루높이에 의해 변화하는 접안선박의 계류요소로 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각을 정의하였다.

두 번째로 항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2017년)과 PIANC 기준의 선종별 주요치수를 사용하여 접안선박의 선종 및 크기 기준을 선박 특성에 따라 A, B, C, D의 4개 그룹으로 분류하였다. A그룹은 여객선, 크루즈선, 자동차 운반선으로 화물적재량에 따른 홀수 변화가 적고 풍압면적이 비교적 고정적이며 큰 특징이 있다. B그룹은 컨테이너선으로 갑판에 컨테이너 선적을 하므로 화물적재량에 따라 풍압면적이 유동적이고 선박의 초대형화가 활발히 이루어지는 선종으로 마루높이의 상향이 필요한 그룹이다. C그룹은 벌크선 및 유조선으로 화물적재량에 따라 홀수, 건현 높이 및 풍압면적이 매우 유동적인 특징이 있다. D그룹은 LNG선, LPG선으로 동일 톤수의 타선종과 비교하였을 때 선박의 제원과 풍압면적이 컨테이너선 다음으로 비교적 크며, 접안시 본선의 매니폴더 위치와 육상 로딩암 위치를 고려해야 한다. 마루높이 상향에 따른 접안선박의 계류안전성 수치 시뮬레이션을 수행함에 있어, 단일 선박이 아니라 선박 특성별로 그룹화를 하고 대표선종을 선정하여 선박 특성에 따른 계류요소의 민감도를 분석하였다.

세 번째로 마루높이 변화에 따른 각 대상선박의 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각의 민감도를 비교한 결과, 마루높이가 상향됨에 따라 계류요소의 값이 감소하는 추세로 나타났으며, 그 감소율은 환경조건 및 선종에 따라 차이가 있는 것으로 분석되었다. 계류삭 장력의 마루높이 상향에 따른 각 그룹별 최대 감소율을 보면, A그룹 9.2%, B그룹 4.7%, C그룹 4.3%, D그룹 3.8%로 A그룹의 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다. 계선주 견인력의 각 그룹별 최대 감소율은 A그룹 9.2%, B그룹 4.4%, C그룹 3.6%, D그룹 3.1%로 A그룹의 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다. 선체동요량 중 Sway 운동의 마루높이 상향에 따른 각 그룹별 최대 감소율을 보면 A그룹 26.3%, B그룹 27.8%, C그룹 24.0%, D그룹 17.9%로 B그룹의 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다. 계

류라인의 수직각의 각 그룹별 최대 감소율은 A그룹 14.3%, B그룹 13.3%, C그룹 11.8%, D그룹 12.5%로 A그룹의 민감도가 가장 큰 것으로 분석되었다. 따라서 마루높이가 상향됨에 따라 A그룹의 계류요소 민감도가 대체적으로 가장 큰 것으로 분석되었다.

네 번째로 환경요소와 선박요소로 나누어 마루높이 평가지표 및 평가방법을 개발하였다. 환경평가지표는 4개로 설정하였으며, 각각의 요소는 조위 및 조차, 해수면 상승, 승하선 및 하역 설비, 수심이다. 선박평가지표 또한 4개로 설정하였고, 각각은 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각을 나타낸다. 특히, 선박평가지표는 각 요소의 국내·외 기준에서 권고하는 한계기준을 적용하여 5개의 등급으로 구성된 선박평가지표 평가기준을 개발하였으며, 이를 종합하여 마루높이 위험 정도에 따라 5단계로 구성된 마루높이 위험도 평가기준을 개발하였다.

다섯 번째로 선박평가지표의 평가기준에 4장에서 수행한 계류안전성 수치 시물레이션 결과를 적용 및 평가하여, 각 그룹 대상선박의 적정 마루높이를 도출하였다. 선박 그룹별 적정 마루높이는 A그룹과 B그룹은 약최고고조위에서 3m 상향된 높이인 H_3 , C그룹은 약최고고조위에서 1m 상향된 높이인 H_1 , D그룹은 약최고고조위에서 2m 상향된 높이인 H_2 이다.

여섯 번째로 환경 및 선박의 특성을 반영한 적정 마루높이의 설계기준을 제안하고, 이를 국내 주요항만에 대입하여 각 항만의 대형접안시설에서 기존 설계기준에 의한 마루높이 값, 제안된 설계기준에 의한 마루높이 값을 도출하고 그 차이값을 비교하였다.

본 연구는 마루높이 상향에 따른 접안선박의 계류요소 민감도를 계류안전성 수치 시물레이션을 통해 분석하고, 국내·외 설계기준과 연구동향을 반영한 마루높이 평가지표, 평가방법 및 설계기준을 제안하였다. 마루높이 상향에 따라 접안선박의 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체동요량, 계류라인 수직각 등이 감소하며, 그 감소율은 선박 특성별로 차이가 있음을 정량적으로 제시하여, 접안선박의 계류안전성을 향상시키기 위해서는 선박의 특성을 반영하여 마루높이를

설정하여야 함을 증명하였다.

또한, 마루높이 상향에 따른 계류요소 민감도 시뮬레이션을 위해 특정선박 및 특정부두를 선정하지 않고 다양한 접안선박의 특성을 반영할 수 있도록 선박 그룹화를 수행하였으며, 국내·외 설계기준을 바탕으로 계선주, 방충재를 배치한 가상의 부두를 설계하고 계류형태 및 계류라인 배치를 일반화하여 본 연구결과의 활용범위를 확대하였다.

향후 연구과제로는 국내 여러 항만에 본 마루높이 설계기준을 적용하여 도출한 마루높이와 현재 설계된 마루높이의 차이를 분석하는 추가적인 연구를 통하여, 항만의 물동량 및 입항 척수 등의 특징과 연계한 마루높이 상향 범위를 제시할 필요가 있다. 또한, 접안선박의 적재상태 및 조위를 다양하게 변화하여 각 조건에 따른 계류 및 하역 안전성을 검증하고 약최고고조위 및 약최저저조위 등 조위 상태에 따른 계류안전성 분석과 항만가동률에 대한 연구가 필요할 것이다. 마찬가지로 해수면 상승속도 증가에 따라 각 항만의 연도별 미래 해수면 상승값과 약최고고조위를 예측하고, 현재 각 항만의 부두별 마루높이와 연도별 해수면의 차이를 분석하는 연구가 필요할 것이다.

그 외에 본 연구의 선종별 마루높이 민감도 분석을 바탕으로 선박 크기에 따른 마루높이 민감도 분석을 수행하여 선종 및 선박 크기별로 적정 최소 마루높이를 제시하면, 부두개발자가 마루높이 설계시 접안선박에 따라 이를 반영할 수 있을 것이다.

이번 연구는 부두의 적정 마루높이를 접안선박의 특징 및 환경특성과 연계하여 도출하였고, 이를 반영한 설계기준을 제안하는데 그 의의가 있으며, 처음으로 수행된 연구로 사료된다. 향후 국내 여러 항만에 적용해 타당성을 검증해 볼 예정이며, 마루높이에 따른 접안선박의 계류안전성 시뮬레이션 알고리즘에 있어 다양한 변수를 적용하여 실제 부두 현황을 정확히 반영한 마루높이 설계기준을 제시할 수 있도록 세부적으로 정비할 계획이다.

참고문헌

- [1] 강석진, 2013. *탱커선대의 실행분석에 따른 돌핀부두의 설계조건에 관한 연구*. 박사학위논문. 부산: 한국해양대학교.
- [2] 광문수, 문용호, 2014. 계류선박의 동요량을 고려한 하역한계과고 산정 방법에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, 34(3), pp.873-883.
- [3] 국립해양조사원, 2017. *2017년 조석표(한국연안)*, 세종: 해양수산부.
- [4] 기상청, 2014. *IPCC 제5차 평가 종합보고서 중 정책결정자를 위한 요약보고서*, 서울: 기상청.
- [5] 김세원, 2000. *선박계류 안정성의 평가에 관한 연구*. 박사학위논문. 부산: 부경대학교.
- [6] 김세원, 이윤석, 정창현, 2012. *선박 계류안전성 평가론*. 다솜출판사: 부산.
- [7] 김세원, 2014. *최신선체구조정비론*. 다솜출판사: 부산.
- [8] 류창혁, 1999. *계류시스템 설계를 위한 3차원 정적해석 범용 수치프로그램 개발*. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교.
- [9] 박대춘, 2016. 해수면 상승에 따른 항만시설의 안전성, 항만기능의 저하 가능성 분석. *한국연안방재학회지*, 3(3), pp.149-154.
- [10] 염덕준, 2012. *선박의 운동과 조종*. 울산대학교 출판부: 울산.
- [11] 원승환, 조성우, 이주호, 2015. 컨테이너선 대형화에 따른 부산항의 대응 방안. *해운물류연구학회지*, 31(2), pp.249-274.
- [12] 이리나, 2016. *해일 발생시 정박선박의 계류안전성에 관한 연구*. 석사학위논문. 목포: 목포해양대학교.
- [13] 이해미, 2017. *기후변화에 따른 해수면 상승 범람지역 영향평가 및 적응전략 연구*. 박사학위논문 서울: 성신여자대학교.

- [14] 조성우, 원승환, 이주호, 2015. 선박 대형화에 따른 선박 제원 예측에 관한 연구. *해운물류연구학회지*, 31(3), pp.507-528.
- [15] 조익순, 이윤석, 이충로, 2006. 쓰나미의 공진주기파를 고려한 항내 계류선박의 시계열 해석. *한국항해항만학회지*, 30(6), pp.433-438.
- [16] 조익순, 2017. 전용부두 계류중인 실습선의 선체거동 해석 및 제어에 관한 연구. *해양환경안전학회지*, 23(2), pp.139-145.
- [17] 지구과학사전, 2009. *네이버 지식백과 북스힐 조위면도*. [Online] (Updated on 30 August 2009) Available at: <https://terms.naver.com> [Accessed 14 July 2018].
- [18] 한국환경정책·평가연구원, 2011. *국가 해수면 상승 사회·경제적 영향평가 I*, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- [19] 한국환경정책·평가연구원, 2015. *기후변화에 따른 국가 리스크 정량화 연구 (II) : 연안시스템을 중심으로*, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- [20] 한국환경정책·평가연구원, 2016. *기후변화에 따른 국가 리스크 정량화 연구 (III) : 연안시스템을 중심으로*, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- [21] 해양수산부, 2015. 2015년 12월 24일 보도자료 : *군산 해수청, 군산항 폭풍 해일 침수방지시설 추진*, 세종: 해양수산부.
- [22] 해양수산부, 2016. *제3차 전국 항만기본계획 수정계획*, 해양수산부 고시 제 2016-122호, 세종: 해양수산부.
- [23] 해양수산부, 2017a. 2017년 12월 20일 보도자료 : *우리나라 연안 해수면 상승속도, 점차 빨라지고 있다*, 세종: 해양수산부.
- [24] 해양수산부, 2017b. *항만 및 어항 설계기준·해설 상권*, 세종: 해양수산부.
- [25] 해양수산부, 2017c. *항만 및 어항 설계기준·해설 하권*, 세종: 해양수산부.
- [26] 허태경 등, 2018. CMIP5 자료를 활용한 우리나라 미래 해수면 상승. *한국기상학회지*, 28(1), pp.25-35.

- [27] Allianz Global Corporate & Specialty (AGCP), 2015. *Safe and Shipping Review 2015*, Munich: Allianz Global Corporate & Specialty.
- [28] Associated British Ports (ABP), 2007. *Port of Southampton Master Plan 2009-2030*, Southampton: Associated British Ports Southampton.
- [29] Associated British Ports (ABP), 2016. *Port of Southampton Port Master Plan 2016-2035 Consultation Draft*, Southampton: Associated British Ports Southampton.
- [30] British Standard Institute, 2000. *BS 6349-1:2010 Maritime structures - Part 1 : Code of practice for general criteria*, London: British Standard Institute.
- [31] British Standard Institute, 2010. *BS 6349-2:2010 Maritime Works-Part 2 : Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins*, London: British Standard Institute.
- [32] City and County of San Francisco, 2016. *San Francisco Sea Level Rise Action Plan*, San Francisco: City and Country of San Francisco.
- [33] Gerard van Oortmerssen, 1977. The Behaviour of moored ships in waves. *Offshore Technology Conference*, 2882, pp.39-41.
- [34] International Maritime Organization (IMO), 2005. *Guidance on shipboard towing and mooring equipment*, MSC/Circ.1175, London: International Maritime Organization.
- [35] International Transport Forum, 2015. *The Impact of Mega-Ships : Case-Specific Policy Analysis*, Paris: International Transport Forum.
- [36] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

- [37] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [38] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [39] JOC Group Inc., 2014. *Berth Productivity : The Trends, Outlook and Market Forces Impacting Ship Turnaround Times*, New york: JOC Group Inc.
- [40] Masahiko Isobe, 2013. Impact of global warming on coastal structures in shallow water. *International Journal of Ocean Engineering*, 71(2013), pp.51-57.
- [41] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2014. *Sea Level Rise and Nuisance Flood Frequency Changes around the United States*, NOAA Technical Report NOS CO-OPS 073, Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- [42] Nicolas Chini et al., 2010. The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate: A case study for East Anglia(UK). *International Journal of Coastal Engineering*, 57(2010), pp.973-984.
- [43] OCIMF, 2008. *Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition*, Livingston: Witherby Seamanship International.
- [44] Otto Weiler et al., 2009. Motions and mooring loads of an LNG-carrier moored at a jetty in a complex bathymetry. *Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, OMAE 2009-79420, pp.1-11.

- [45] Paulo Rosa-Santos, Francisco Taveira-Pinto & Fernando Veloso-Gomes, 2014. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. *International Journal of Coastal Engineering*, 85(2014), pp.60-71.
- [46] Maritime Navigation Commission of the World Association for Water-borne Transport Infrastructure(PIANC MARCOM), 2014. *Harbour approach channels design guidelines*, Bruxelles: PIANC MARCOM.
- [47] Porter, J., 2014. *Global container ports could handle 840m teu a year by 2018*, [Online] (Updated on 5 September, 2014) Available at: <https://www.lloydsloadinglist.com/freight-directory/sea/Global-container-ports-could-handle-840m-teu-a-year-by-2018/1704.htm#.W017TssUmAg> [Accessed 17 July 2018].
- [48] Sakakibara, S. & Kubo, M., 2008. Characteristics of low-frequency motions of ships moored inside ports and harbors on the basis of field observations. *International Journal of Marine Structure*, 21(2 - 3), pp.196-223.
- [49] Sriram Balasubramanian, 2017. *Construction and Operation of Loading Arms Used for LNG Carriers*, Marine Insight, [Online] (Updated on 9 September, 2017) Available at: <https://www.marineinsight.com/tech%20/construction-and-operation-of-loading-arms-used-for-lng-carriers/> [Accessed 17 July 2018].
- [50] The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2004. *PORT WORKS DESIGN MANUAL PART 2 Guide to Design of Piers and Dolphins*, Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- [51] The Maritime Executive, 2015. *Filling Ultra-Large Container Ships* [Online] (Updated on 16 March 2015) Available at: <https://www.maritime->

executive.com/article/filling-ultra-large-container-ships#gs.9Gsc4xy
[Accessed on 7 July 2018].

- [52] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI), 2009. *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, Tokyo: OCDI.
- [53] Thoresen, C.A., 2003. *Port designer's handbook: recommendations and guidelines*. Thomas Telford: London.
- [54] Tension Technology International (TTI), *Computer Mooring Load Analysis to Improve Port Operations and Safety* [Online] Available at: <https://www.tensiontech.com/papers/optimoor> [Accessed on 14 July 2018].
- [55] United Nations Conference on Trade Development (UNCTAD), 2017. *Review of maritime transport : 2017*, New York : United Nations.
- [56] U. S. Department of defense, 2005. *UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) DESIGN: Moorings*, Washington: Department of defense.
- [57] U. S. Department of defense, 2017. *UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) DESIGN: Piers and wharves*, Washington: Department of defense.
- [58] Wikipedia, 2018, *OOCL Hong Kong* [Online] (Updated on 23 January 2018) Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/OOCL_Hong_Kong [Accessed 14 July 2018].
- [59] Wim van der Molen & Ivo Wenneker, 2008. Time-domain calculation of moored ship motions in nonlinear waves. *International Journal of Coastal Engineering*, 55(2008), pp.409-422.
- [60] Zayer Thein, 2011. *Practical Source Code for Ship Motions Time Domain Numerical Analysis and Its Mobile Device Application*. Master of Science Thesis, Gothenburg: Chalmers University of Technology.