



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 상호간섭을 고려한 안전통항거리에 관한 연구

**A Study on the Distance of Safe Passing
Considering Ship to Ship Interaction**



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

항해학과

이 상 도

본 논문을 이상도의 공학박사 학위논문으로 인준함

위원장 이 윤 석 (인)

위원 김 세 원 (인)

위원 박 성 현 (인)

위원 정 창 현 (인)

위원 공 길 영 (인)



2017년 02 월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	vi
List of Figures	x
Abstract	xiv
Nomenclature	xvi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구동향	2
1.2.1 근접한 선박 간의 간섭력 추정에 관한 연구	2
1.2.2 안전통항거리에 관한 연구	4
1.3 연구절차	5
1.4 논문의 구성	6
제 2 장 유체역학적 상호간섭에 관한 기술 분석	8
2.1 유체역학적 상호간섭(hydrodynamic interaction) 기술	8
2.1.1 2D 섭동법(Two-dimensional perturbation method)	8
2.1.2 3D 판넬법(Three-dimensional panel method)	8
2.1.3 비점성 RANS기법(Viscous RANS method)	9
2.1.4 수조실험기반 연구(Experimental method)	10
2.2 일본의 MLIT와 PIANC의 간섭력을 고려한 항로폭 산정	11
2.2.1 측벽 영향을 고려한 항로폭	13
2.2.2 마주치며 통과시 필요 항로폭	14
2.2.3 추월 통과시 필요 항로폭	15
2.3 간섭력 기술 종합 분석	15

제 3 장 선박조종시뮬레이터에 적용된 상호간섭 분석	17
3.1 Transas 선박조종시뮬레이터에 적용된 수학모델	17
3.1.1 선박조종방정식	18
3.1.2 근접 통항하는 선박과 선박의 간섭력을 구하는 일반적인 표현	20
3.1.3 선박조종시뮬레이터의 무차원계수	21
3.2 기타 시뮬레이터 현황	23
3.2.1 Kongsberg maritime	23
3.2.2 FORCE Technology	23
3.2.3 셰이프텍리서치(SafeTechResarch, STR)	24
3.3 선박조종시뮬레이터 선박모델의 상호간섭 기술 검증(Transas) ..	25
3.4 간섭 상황별 이론계산과 시뮬레이터 모델의 정확도 검증	30
3.4.1 이론계산과 유사한 크기의 대표 선박 선정	30
3.4.2 측벽 통과시 시뮬레이터 모델의 정확도 검증	34
3.4.3 마주치며 통과시 시뮬레이터 모델의 정확도 검증	40
3.4.4 추월 통과시 시뮬레이터 모델의 정확도 검증	46
3.5 시뮬레이터의 간섭력 추정기술의 검증에 관한 종합분석	52
제 4 장 시뮬레이션을 이용한 상황별 안전통항거리 분석	54
4.1 안전통항거리 산정 순서	54
4.1.1 시뮬레이션 대상선박	55
4.1.2 무차원 계수	58
4.2 계류선 통과시의 안전통항거리 분석	59
4.2.1 실험조건 설정	59
4.3 마주치며 통과시의 안전통항거리 분석	75
4.3.1 대상선박 선정 및 실험조건 설정	75
4.3.2 시뮬레이션 결과	76
4.3.3 타각계산	83

4.4	추월 통과시의 안전통항거리 분석	90
4.4.1	대상선박 선정 및 실험조건 설정	90
4.4.2	시뮬레이션 결과	91
4.4.3	타각계산	98
제 5 장	안전통항거리에 관한 표준화 방안	106
5.1	상황별 안전통항거리 표준화	106
5.1.1	계류선 통과시의 안전통항거리	106
5.1.2	마주치며 통과시의 안전통항거리	110
5.1.3	추월 통과시의 안전통항거리	115
5.2	수심에 따른 상황별 안전통항거리 표준화	120
5.2.1	동일 선박인 경우 수심별 표준화	120
5.2.2	다른 선박인 경우 수심별 표준화	122
5.3	흘수에 따른 상황별 안전통항거리 표준화	125
5.3.1	자선의 흘수가 큰 경우 표준화 ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$)	125
5.3.2	상대선의 흘수가 큰 경우 표준화 ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$)	130
제 6 장	결론	134
참고문헌	137

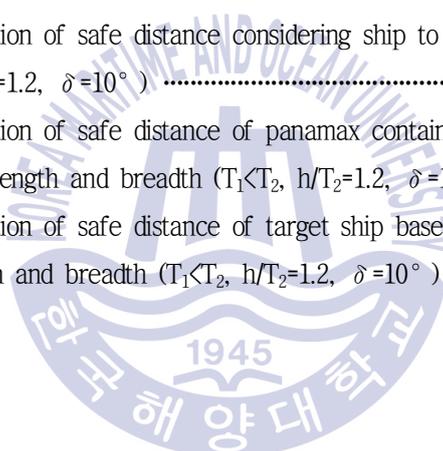
List of Table

Table 1.1 Recent papers for ship to ship interaction	4
Table 2.1 2D perturbation method	8
Table 2.2 3D panel method	9
Table 2.3 Viscous RANS method	10
Table 2.4 Experimental method	11
Table 2.5 Requisite width for ship-bank interaction ($h/T=1.2, \delta=5^\circ$)	13
Table 2.6 Requisite width for head-on encountering ($h/T=1.3, \delta=15^\circ$)	14
Table 2.7 Requisite width for overtaking ($h/T=1.2, \delta=5^\circ$)	15
Table 2.8 Comparison of prediction skill for ship to ship interaction	16
Table 3.1 Comparison of existing ship handling simulators	17
Table 3.2 Notation of SNAME for marine vessels (Fossen, 2011)	20
Table 3.3 Main particulars of the ship models and test condition (Ozersky and Rogozhina, 2016)	25
Table 3.4 Main particulars of the ship models and test condition (Ozersky and Rogozhina, 2016)	29
Table 3.5 Ship's particulars for theoretical calculation	31
Table 3.6 Hydrodynamic coefficients of representative ships	32
Table 3.7 Comparisons of selected models for verification	33
Table 3.8 Simulation scenarios for verification of ship bank interaction	34
Table 3.9 Rudder calculation of MCNTR 5	36
Table 3.10 Rudder calculation of CNTR 19	36
Table 3.11 Rudder calculation of BLK 7 Panamax	37
Table 3.12 Rudder calculation of CCR 6	37
Table 3.13 Rudder calculation of LNG 4	38
Table 3.14 Calculation comparison of ship bank interaction	39
Table 3.15 Error analysis of ship bank interaction	39
Table 3.16 Simulation scenarios for verification of head-on encountering	40
Table 3.17 Rudder calculation of MCNTR 5	42

Table 3.18 Rudder calculation of CNTR 19	42
Table 3.19 Rudder calculation of BLK 7 Panamax	43
Table 3.20 Rudder calculation of CCR 6	43
Table 3.21 Rudder calculation of LNG 4	44
Table 3.22 Calculation comparison of head-on encountering	45
Table 3.23 Error analysis of Head-on encountering	45
Table 3.24 Simulation scenarios for verification of overtaking	46
Table 3.25 Rudder calculation of MCNTR 5	48
Table 3.26 Rudder calculation of CNTR 19	48
Table 3.27 Rudder calculation of BLK 7 Panamax	49
Table 3.28 Rudder calculation of CCR 6	49
Table 3.29 Rudder calculation of LNG 4	50
Table 3.30 Calculation comparison of overtaking	51
Table 3.31 Error analysis of overtaking	51
Table 3.32 Final error analysis of hydrodynamic interaction in simulator	53
Table 4.1 Main particulars of different ships in size and type	55
Table 4.2 Main particulars of the ship models for simulation of length ratio ($0.7 < L_1/L_2 < 1.2, T_1 > T_2$)	56
Table 4.3 Main particulars of the ship models for simulation of length ratio ($1.4 < L_1/L_2 < 2.4, T_1 > T_2$)	57
Table 4.4 Main particulars of the ship models for simulation of length ratio ($0.7 < L_1/L_2 < 1.2, T_1 < T_2$)	58
Table 4.5 Rudder calculation of container ship passing on moored LNG carrier	69
Table 4.6 Rudder calculation of container ship passing on moored bulk carrier	69
Table 4.7 Rudder calculation of container ship passing on moored passenger car ferry	70
Table 4.8 Rudder calculation of container ship passing on moored fishery training ship	70
Table 4.9 Rudder calculation of VLCC passing on moored container ship	71
Table 4.10 Rudder calculation of container ship encountering LNG carrier	84
Table 4.11 Rudder calculation of container ship encountering bulk carrier	84
Table 4.12 Rudder calculation of container ship encountering passenger car ferry	85

Table 4.13 Rudder calculation of container ship encountering fishery training ship	85
Table 4.14 Rudder calculation of VLCC encountering container ship	86
Table 4.15 Rudder calculation of container ship overtaking LNG carrier	100
Table 4.16 Rudder calculation of container ship overtaking bulk carrier	100
Table 4.17 Rudder calculation of container ship overtaking passenger car ferry	101
Table 4.18 Rudder calculation of container ship overtaking fishery training ship	101
Table 4.19 Rudder calculation of VLCC overtaking container ship	102
Table 5.1 Comparison of safe distance according to the passing speed	107
Table 5.2 Comparison of safe distance of own ship according to the passing speed based on the own ship's breadth	108
Table 5.3 Safe distance of container panamax according to the ship's length in case of moored ship passing ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	109
Table 5.4 Comparison of safe distance according to the encountering speed	112
Table 5.5 Comparison of safe distance of own ship according to the encountering speed based on the own ship's breadth	112
Table 5.6 Comparison of safe distance of target ship according to the encountering speed based on the target ship's breadth	113
Table 5.7 Safe distance of container panamax according to the ship's length in case of head-on encountering ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	114
Table 5.8 Comparison of safe distance according to the overtaking and overtaken speeds	117
Table 5.9 Comparison of safe distance of own ship according to the overtaking and overtaken speeds based on the own ship's breadth	117
Table 5.10 Comparison of safe distance of target ship according to the overtaking and overtaken speed based on the target ship's breadth	118
Table 5.11 Safe distance of container panamax according to the ship's length in case of overtaking ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	119
Table 5.12 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio in case of same ship	121
Table 5.13 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio based on the own ship's length and breadth (same ship)	121
Table 5.14 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio in case of different two ships	123

Table 5.14 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio based on the own ship's length and breadth (different ship)	124
Table 5.16 Standardization of safe distance according to the ship' length ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	126
Table 5.17 Standardization of safe distance of panamax container ship based on the own ship's length and breadth ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	127
Table 5.18 Standardization of safe distance of target ships based on the target ship's length and breadth ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	128
Table 5.19 Safe distance of maximum deep draft ship model considering ship to ship interaction ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	130
Table 5.20 Safe distance of VLCC based on the own ship's length and breadth ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	130
Table 5.21 Standardization of safe distance considering ship to ship interaction ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	132
Table 5.22 Standardization of safe distance of panamax container ship based on the own ship's length and breadth ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	132
Table 5.23 Standardization of safe distance of target ship based on the target ship's length and breadth ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)	133



List of Figures

Fig. 1.1 Research flow	6
Fig. 2.1 Diagram of bank effect and ship to ship interaction (PIANC, 2014)	11
Fig. 2.2 Ship types for theoretical calculation (JAPAN)	12
Fig. 3.1 Coordinate frames	18
Fig. 3.2 Definition of ship to ship interaction modeling	20
Fig. 3.3 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (head-on encountering, large ship)	21
Fig. 3.4 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (overtaking, large ship)	22
Fig. 3.5 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (head-on encountering, small ship)	22
Fig. 3.6 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (overtaking, small ship)	22
Fig. 3.7 Head-on encounter : Effect of depth/draft (Dand, 1981)	24
Fig. 3.8 Test set-up for force measurement on captive vessel (Remery, 1974)	26
Fig. 3.9 Surge force induced by passing ship (Ozersky and Rogozhina, 2016)	27
Fig. 3.10 sway force induced by passing ship (Ozersky and Rogozhina, 2016)	27
Fig. 3.11 Yaw moment induced by passing ship (Ozersky and Rogozhina, 2016)	28
Fig. 3.12 Comparison of the simulated trajectories for overtaking manoeuvre against model basin measurements for similar models (Ozersky and Rogozhina, 2016)	30
Fig. 3.13 Coordinates of ship bank interaction (Andou, K. et al., 2012)	35
Fig. 3.14 Coordinates of Head-on encountering (Andou, K. et al., 2012)	41
Fig. 3.15 Coordinates of overtaking (Andou, K. et al., 2012)	47
Fig. 4.1 Research flow for distance of safe passing considering ship to ship interaction (Andou, K. et al., 2012)	54
Fig. 4.2 Diagram of passing ship and moored ship	60
Fig. 4.3 Definition of hydrodynamic interaction forces for moored ship passing	62
Fig. 4.4 Non-dimensional surge forces of moored LNG carrier and passing container ship	63
Fig. 4.5 Non-dimensional sway forces of moored LNG carrier and passing container ship	63

Fig. 4.6 Non-dimensional yaw moment of moored LNG carrier and passing container ship	64
Fig. 4.7 Non-dimensional surge forces of moored passenger car ferry and passing container ship	64
Fig. 4.8 Non-dimensional sway forces of moored passenger car ferry and passing container ship	65
Fig. 4.9 Non-dimensional yaw moment of moored passenger car ferry and passing container ship	65
Fig. 4.10 Non-dimensional surge force of passing container ship according to the water depth (Moored ship passing)	66
Fig. 4.11 Non-dimensional sway force of passing container ship according to the water depth (Moored ship passing)	67
Fig. 4.12 Non-dimensional yaw moment of passing container ship according to the water depth (Moored ship passing)	67
Fig. 4.13 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship passing on moored LNG carrier according to the ship's length (9knots)	72
Fig. 4.14 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship passing on moored LNG carrier according to the water depth (9knots)	74
Fig. 4.15 Diagram of head-on encountering two ships	75
Fig. 4.16 Definition of hydrodynamic interaction forces for head-on encountering	77
Fig. 4.17 Non-dimensional surge forces of LNG carrier and container ship	78
Fig. 4.18 Non-dimensional sway forces of LNG carrier and container ship	78
Fig. 4.19 Non-dimensional yaw moment of LNG carrier and container ship	79
Fig. 4.20 Non-dimensional surge forces of passenger car ferry and container ship	79
Fig. 4.21 Non-dimensional sway forces of passenger car ferry and container ship	80
Fig. 4.22 Non-dimensional yaw moment of passenger car ferry and container ship	80
Fig. 4.23 Non-dimensional surge force of container ship according to the water depth (head-on encountering)	81
Fig. 4.24 Non-dimensional sway force of container ship according to the water depth (head-on encountering)	82
Fig. 4.25 Non-dimensional yaw moment of container ship according to the water depth (head-on encountering)	82

Fig. 4.26 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship encountering LNG carrier according to the ship's length (12-12knots)	87
Fig. 4.27 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship encountering LNG carrier according to the water depth (12-12knots)	89
Fig. 4.28 Diagram of two ships in overtaking	90
Fig. 4.29 Definition of hydrodynamic interaction forces for two ships in overtaking	92
Fig. 4.30 Non-dimensional surge force of container ship and LNG carrier	93
Fig. 4.31 Non-dimensional sway force of container ship and LNG carrier	93
Fig. 4.32 Non-dimensional yaw moment of container ship and LNG carrier	94
Fig. 4.33 Non-dimensional surge force of container ship and passenger car ferry	94
Fig. 4.34 Non-dimensional sway force of container ship and passenger car ferry	95
Fig. 4.35 Non-dimensional yaw moment of container ship and passenger car ferry	95
Fig. 4.36 Non-dimensional surge force of container ship according to the water depth (Overtaking)	97
Fig. 4.37 Non-dimensional sway force of container ship according to the water depth (Overtaking)	97
Fig. 4.38 Non-dimensional yaw moment of container ship according to the water depth (Overtaking)	98
Fig. 4.39 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship overtaking LNG carrier according to the ship's length (12-8knots)	103
Fig. 4.40 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship overtaking LNG carrier according to the water depth (12-8knots)	105
Fig. 5.1 Diagram of moored passing ship	107
Fig. 5.2 Distance of safe passing according to the passing speed in case of moored ship passing ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	108
Fig. 5.3 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to the target ship's length (moored ship passing, $h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	110
Fig. 5.4 Diagram of head-on encountering	111
Fig. 5.5 Distance of safe passing according to the encountering speed in case of head-on encountering ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	113
Fig. 5.6 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to the target ship's length (head-on encountering, $h/T=1.2, \delta=10^\circ$)	115

Fig. 5.7 Diagram of two ships in overtaking116

Fig. 5.8 Distance of safe passing according to the overtaking and overtaken speeds
in case of overtaking ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)118

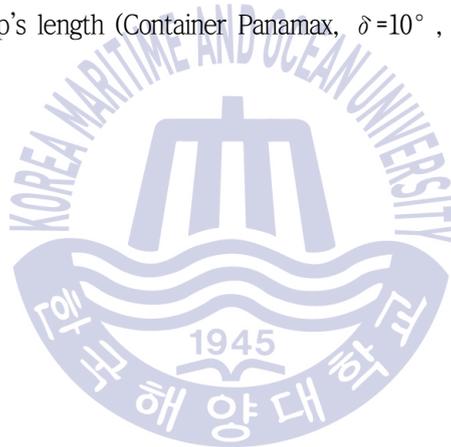
Fig. 5.9 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship length to
the target ship length (overtaking, $h/T=1.2, \delta=10^\circ$)120

Fig. 5.10 Distance of safe passing according to the depth/draft ratio in case of same
ship ($\delta=10^\circ$)122

Fig. 5.11 Distance of safe passing according to the depth/draft ratio in case of
different ship ($\delta=10^\circ$)124

Fig. 5.12 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to
the target ship's length (Container Panamax, $\delta=10^\circ, T_1>T_2$)129

Fig. 5.13 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to
the target ship's length (Container Panamax, $\delta=10^\circ, T_1<T_2$)133



A Study on the Distance of Safe Passing Considering Ship to Ship interaction

Lee, Sang Do

Department of Navigation System Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

This thesis suggests a standard distance of safe passing considering ship to ship interaction under circumstances such as moored ship passing, head-on encountering and two ships in overtaking. It may provides useful information to the ship's operators on the marine spot.

Ship handling simulator is employed to derive the non-dimensional coefficients of interaction forces and method of MLIT(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan) is used to calculate the rudder angle of course keeping and the separation of two ships.

For decades, prediction skill of hydrodynamic interaction between two ships in close proximity has been developed by many researchers at home and aboard. In order to validate the accuracy of interaction skill in ship handling simulator, error analyses for the representative five different ships under three situation of interaction are conducted by comparing the theoretical calculation and simulation calculation.

With the verified ship handling simulator, simulations are widely performed to

find the appropriate separation between two ships and course-keeping rudder angles under interaction circumstances. In order to derive the optimum distances of safe passing, diverse parameters such as the ship's length, ship's draft, speed of two ships, water depth, lateral distance between two ships, longitudinal distance between two ships are considered.

Also, this thesis handles many ship models as target ships such as container ship (Panamax and over Panamax), bulk carrier, VLCC (including Suezmax and Aframax), oil tanker, LNG carrier, passenger cruise ship, passenger car ferry, ro-ro passenger ferry, car carrier, fishery training ship, articulated tug-barge. Characteristics of ship's motions under interaction circumstances is represented by the non-dimensional coefficients of surge force, sway force and yaw moment.

Safe distances of panamax container ship under moored passing condition are suggested according to the passing speeds of 7 knots, 9 knots and 12 knots. Also, the safe distances of panamax container ship under head-on encountering and overtaking conditions are researched by considering the influence of speeds, ratio of own ship length to target ship length, ratio of water depth to the ship's draft.

Safe distances of panamax container ship according to the water depth are thought to be useful for the ship's operators on the marine spot. In addition, safe distances according to the own ship's draft and the target ship's draft are investigated with influence of the water depth.

Finally, safe distances of minimum 1 cable and $0.7 L$ (own ship's length overall) are required to pass the object ships using a rudder angle of 10 degree for the panamax container ship and VLCC of manoeuvring speed in harbour and waterways under circumstances such as moored ship passing, head-on encountering and overtaking conditions.

KEY WORDS: Distance of safe passing, Ship to ship interaction, Non-dimensional coefficient, Moored ship passing, Head-on encountering, Overtaking

Nomenclature

B_1, B_2	자선(own ship)과 상대선(target ship)의 폭
C_{XINT}	전후력의 무차원수(dimensionless surge force)
C_{YINT}	횡력의 무차원수(dimensionless sway force)
C_{NINT}	회두모멘트의 무차원수(dimensionless yaw moment)
h	해역의 수심(water depth)
L_1, L_2	자선(own ship)과 상대선(target ship)의 길이
L_{OA}	전장(Length overall)
L_{pp}	수선간장(Length between perpendiculars)
N_{INT}	상호간섭에 의한 회두모멘트(yaw moment)
N'_β	표류각 β 에 의해 선체로부터 받는 회두반력모멘트 계수 N_β 의 무차원수
N'_δ	타각 δ 일 때 발생하는 타력모멘트계수 N_δ 의 무차원수
S	안전통항거리(distance of safe passing)
T_1, T_2	자선(own ship)과 상대선(target ship)의 흘수
V_1, V_2	자선(own ship)과 상대선(target ship)의 속도
X_{INT}	상호간섭에 의한 전후력(surge force)
Y_{INT}	상호간섭에 의한 횡력(sway force)
Y'_β	표류각 β 에 의해 선체로부터 받는 횡방향의 반력계수 Y_β 의 무차원수
Y'_δ	타각 δ 일 때 발생하는 횡력계수 Y_δ 의 무차원수
β	표류각(drift angle)
δ	타각(rudder angle)
ξ	두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger between two ships)
ξ'	두 선박의 중심선 간의 종거리의 무차원수(dimensionless stagger)
η	자선(own ship)과 상대선(target ship)의 중심선 간의 수평거리
ρ	해수 밀도(water density)
∇	배수량(displacement)

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

항해장비의 발전으로 선박은 경제성을 고려한 최적 항로를 찾아 운항하게 되고 이에 따라 같은 항로에서 선박과 선박이 조우하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 선박이 통항하는 입출항 항로, 운하, 좁은 수로에서는 한 선박이 다른 선박을 가까이 통과하게 되는 상황이 자주 발생하게 된다. 오랜 현장 경험을 가진 선박의 운항자는 선박이 근접하여 통항할 때 발생하는 간섭력을 고려하여 항해하고 있으나, 실제 현장에 적용할 수 있는 두 선박 간의 안전통항거리에 관한 정량적인 지표가 마련되지 않은 상황이다. 일본의 Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism(MLIT)과 The World Association for Waterborne Transport Infrastructure(PIANC)에서는 선박이 측벽을 통과하는 상황(ship-bank interaction), 마주치며 통과하는 상황(head-on encountering), 추월하는 상황(overtaking)에 발생하는 간섭력을 고려한 추가 항로폭을 선박의 종류별로 제시하고 있다(MLIT, 2009; PIANC, 2014). 그러나 선박의 운항자들이 보다 효율적으로 사용하기 위해서는 다양한 선박과 영향 요소를 고려한 구체적인 표준화가 필요하다. 현대의 복잡한 해상환경에서 수많은 선박들이 각각의 특정 상황에 맞게 사용할 수 있는 선박 간의 안전통항거리를 제시하는 것은 어려운 문제이지만, 기준 선박에 대한 표준이 정해지면 운항자 입장에서는 상황별로 표준 간섭력을 고려한 안전통항거리를 인지하게 되므로 선박의 안전운항에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 항내에서 간섭력이 발생하는 3가지의 근접상황 즉, 부두에 접안한 계류선을 통과하는 상황, 두 선박이 마주치며 통과하는 상황 및 타 선박을 추월하는 상황에서 선박의 운항자들이 보다 간편하게 사용할 수 있는 표준화된 안전통항거리를 도출하였다. 선박의 상호간섭을 고려한 안전통항거리를 일반화하는 것을 목적으로 먼저 선박조종시뮬레이터의 간섭력 추정 기술의 정확도를 검증하고, 검증한 선박조종시뮬레이터를 이용하여 3가지 간섭이 상황에서 다양한 선박과 요소에 대한 간섭력을 도출하였다. 선박조종시뮬레이터로 도출한 간섭력과 MLIT의 타각계산을 이용하여 보침타각을 산정하고, 최종적으로 안전통항거리를 산출하였다.

1.2 연구동향

1.2.1 근접한 선박 간의 간섭력 추정에 관한 연구

최근에는 컴퓨터 기술의 발전과 함께 Computational Fluid Dynamics(CFD)기법에 의한 연구가 진행되고 있다. International Towing Tank Conference(ITTC)에서는 CFD기반의 컴퓨터 기법을 비점성 기법과 점성 기법으로 분류하고 있다(ITTC 25th, 2008).

주로 퍼텐셜유동 이론을 기반으로 하는 비점성 기법은 익이론, 세장체이론, 3D판넬법(경계요소법)을 포함한다. 퍼텐셜유동 CFD기법은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)기법에 비해 적은 노력을 요구하면서 측벽효과(bank suction)와 간섭력(ship to ship interaction)의 분야에서 좋은 결과를 도출하고 있다(ITTC 25th, 2008).

Kijima and Yasukawa(1984)는 세장체 이론(slender body theory)을 사용하여 제한수로에서 선박이 마주치는 경우와 추월하는 경우에 근접하는 선박의 유체역학적인 운동을 기술하였다. 또한, Kijima and Qing(1987) 동일한 기법으로 측벽을 근접통항하는 선박의 간섭력을 추정하였다. Korsmeyer et al.(1993)은 3D판넬 코드를 사용하여 직사각 형태의 수로에서 두 물체간의 상호간섭을 연구하였다. Varyani et al.(1998)은 이산와류분포(discrete vortex distribution) 기법을 사용하여 제한수로에서 마주치며 통과시의 간섭력을 계산하였다. 또한, 협수로에서 선박의 간섭력을 추정하는 경험식을 도출하여 선박조종시뮬레이터에 모델링하였고 이를 개선하는 연구를 진행하였다(Varyani et al., 2002, 2004). Varyani and Krishnankutty(2006)는 특이점분포 기술(singularity distribution technique)을 사용하여 선체형상(ship form)을 고려한 계류선의 운동을 연구하였다. 같은 기법으로, Varyani and Vantorre(2006)는 근접하는 통과선으로 인한 계류선에 작용하는 간섭력을 추정하는 일반식을 제시하였다.

Yasukawa(2003)는 퍼텐셜 이론을 사용하여 근접하는 두 선박의 조종운동이 충돌에 미치는 과정을 다루었는데, 3D판넬법으로 자유표면은 강벽(rigid wall)의 가정하에 선박의 상대위치에 대한 부가질량과 간섭력을 계산하였다. Pinkster(2004, 2009)는 이중모형(double body) 퍼텐셜 유동과 자유표면효과를 고려하는 퍼텐셜이론 기법을 사용하여 항만에서 선박이 계류선을 통과하는 경우 및 빠른 소형선의 반류파(wash wave)에 의한 계류선의 영향을 연구하였다. Pinkster and Bhawsinka(2013)은 이중모형 퍼텐셜유동 기법을 사용하여 선박조종시뮬레이터에 적용된 실시간 계산을 소개하였다. 또한, Pinkster(2016)는 3D 이중모형 퍼텐셜유동을 이용하

여 선박과 선박의 간섭력, 선박과 측벽의 간섭력을 추정하는 기술을 발전시켜 실시간 시뮬레이션에 적용하였다.

Sutulo and Soares(2009, 2016)는 Hess-Smith기법을 이용하여 근접하는 두 선박의 조종운동을 시뮬레이션하였고, 이러한 퍼텐셜유동 알고리즘을 개선하는 연구를 진행하였다. 또한, Sutulo et al.(2012)는 Hess-Smith기법을 동일 선속으로 전진하는 대형탱커선과 예인선에 작용하는 횡력과 회두모멘트의 추정에 응용하였다. Xiang and Faltinsen(2011)은 3D 경계요소법으로 두 선박이 간섭하는 유체역학적인 힘을 시뮬레이션하였다. Lee et al.(2016)은 VLCC의 선박이 추월하는 동안에 안전하게 곡선항로를 통항할 수 있는 방안을 조종운동의 관점에서 연구하였다. Ruggeri et al.(2016)은 랭킨판넬법(Rankine panel method)을 이용하여 오일터미널을 근접통항하는 선박에 대한 간섭력을 추정하였다. 그밖에도 Redondo et. al.(2016)은 특정수치모델을 이용하여 측벽에 의한 간섭력을 추정하고, 실제 현장에서 측벽영향에 의한 타각의 사용정도를 소개하였다.

점성 CFD기법(viscous CFD method)인 RANS기법은 포괄적인 예측을 할 수 있는 방법이다. 본래 80년대에 개발된 RANS 코드는 직진하는 선박 주위의 유동을 시뮬레이션하는데 쓰여졌으나 90년대 후반 이후, 이러한 기법은 더 복잡한 경우를 다루는 경우로 확장되어 활용되었다(ITTC 25th, 2008).

Chen et al.(2002) 비정상 RANS기법을 사용하여 선박 간 상호작용의 광범위한 계산을 수행하여 마주치며 통과시, 추월 통과시와 계류선 통과시의 간섭력을 만족스럽게 예측하였다. Chen et al.(2003)은 비정상 Chimera RANS코드로 계산된 선박 간 상호작용을 Dand(1981)의 모형시험과 비교한 결과 계산치와 측정값이 좋은 상관관계를 보였다. Huang and Chen(2006)은 chimera RANS코드를 응용하여 통과선에 의해 발생하는 유동과 계류선에 작용하는 힘을 시뮬레이션하였다. Fonfach et al.(2011)은 대형 탱커선에 근접하는 예인선을 지나가는 유동에 대한 CFD계산을 수행하였다. Lo(2012)는 RANS기법으로 추월 통과시와 마주치며 통과시의 상호간섭을 연구하였다. Zou and Larsson(2013a, 2013b) 역시 RANS기법을 사용하여 측벽의 영향 및 lightering 상황에 응용하였다.

Wang and Zou(2014)는 ANSYS FLUENT프로그램을 사용하여 갑문 입구의 계류선을 통과하는 선박 주위의 비정상 점성유동 문제를 다루었다. Lee(2015)는 계류선을 통과하는 상호작용의 문제에 대하여 이동격자 기술을 사용하여 RANS시뮬레이션을 수행하였다. Sian et al.(2016)은 RANS기법을 사용하여 제한수로에서 측벽에 근접한 두 선박에 대한 측벽 영향과

간섭 영향을 분석하였다.

근접하는 선박 간의 유체역학적인 힘과 모멘트를 구하는 실험적 연구(experimental method)는 수치적 기법에 비해 신뢰도가 높지만 상당한 시간과 비용이 요구된다. 이러한 모형시험은 주로 두 선박이 평행하게 움직이는 경우로 제한하여 연구가 수행되므로, 모든 상황에 대한 상호간섭을 다루지 못한다는 단점이 있다(Sutulo, 2012). 대표적으로 Dand(1981)은 두 모델선박의 추월의 상황과 마주치며 통과하는 상황에 대한 연구를 수행하였으며, Vantorre et al.(2002)은 천수예인수조에서 4종류의 선박 모델을 대상으로 다양한 간섭상황에 대한 실험 연구를 진행하였다. Lataire et al.(2009, 2012)은 lightering operation에 대한 구속모형시험(captive model test)을 수행하여 선박조종시뮬레이터의 수학모델을 도출하였다.

이와 같이 선박이 다른 선박이나 측벽을 근접통항시 발생하는 선박의 간섭력을 추정하는 기술을 Table 1.1에 사용 기법과 연구자별로 정리하였으며, 그 외에도 ITTC에서는 선박 간 상호간섭에 관한 연구 결과가 지속적으로 소개되고 있다(ITTC 26th, 2011; ITTC 27th, 2014).

Table 1.1 Recent papers for ship to ship interaction

비점성 기법 (퍼텐셜유동)	점성 기법 (RANS)	실험적 연구
Kijima and Yasukawa(1984)	Chen et al. (2002, 2003)	Dand(1981)
Korsmeyer et al.(1993)	Huang and Chen(2006)	Vantorre et al.(2002)
Varyani et al.(1998, 2002, 2004)	Lo(2012)	Lataire et al.(2009, 2012)
Yasukawa(2003)	Fonfach et al.(2011)	
Pinkster(2004, 2009, 2016)	Lu zou and	
Varyani and Vantorre(2006)	Lars larsson(2013)	
Sutulo and Soares(2009, 2016)	Wang and Zou(2014)	
Xiang and Faltinsen(2011)	Lee(2015)	
Sutulo et al.(2012)	Sian et al.(2016)	
Pinkster and Bhawsinka(2013)		
Lee et al.(2016)		
Ruggeri et al.(2016)		

1.2.2 안전통항거리에 관한 연구

Park et al.(2010)은 선박운항자를 대상으로 설문조사를 실시하여 안전통항거리를 도출하여 시계가 양호한 주간경우 선수전방 4.4L, 선미후방 3.1L, 정횡 2.6L를 제시하고 있다. 선

박 운항자의 주관적인 안전의식에 기초하여 도출한 결과로써 시계, 조류, 풍속 등의 영향을 고려하고 있으나 근접하는 상황에서 발생하는 상호간섭의 영향은 배제되어 있다.

Lee and Mun(2014)는 제한수로에서 추월하는 선박의 통항거리를 수평거리 0.6L의 조건에서 실시하였으며, 안전통항거리는 선박의 길이비와 수심, 속력에 따라 좌우된다고 기술하였다. Lee et al.(2016)의 연구에서는 제한수로에서 VLCC의 두 선박이 추월할 때 0.6L의 수평거리와 보침타각 15도를 안전 통항의 조건으로 제시하였다. 그러나 동일한 선박과 특정 조건에서만 수행하였으므로 전체 선박을 대상으로 하는 연구가 더해지면 보다 효율적인 지침이 될 것으로 분석된다.

또한, 일본과 PIANC에서는 선박이 측벽을 통과하는 경우, 마주치는 경우, 추월하는 경우에 놓일 때 타각계산을 통하여 선박의 종류별로 안전하게 통과할 수 있는 수평거리를 0.3~0.7L의 범위를 제시하고 있다. 일본과 PIANC에서 정한 범위는 Kijima의 2D 섭동법을 기반으로 계산한 기준으로 상호간섭을 고려한 횡거리를 정량적으로 제시한 결과로서 의미가 있지만, 선박이 크기가 달라도 같은 종류의 선박은 일정한 비를 보이기 때문에, 크기가 다른 선박이 다른 조건에서 근접상황에 놓일 때 양쪽의 운항자가 최소 안전통항거리를 확신하기 어려운 점이 있다. 이것은 선박의 종류만 다를 뿐 특정 모델을 기본으로 한 연구에 따른 결과라고 볼 수 있다.

1.3 연구절차

먼저 현재까지 발전한 간섭력 추정 기술에 대한 동향을 연구의 기법별로 분류하여 장단점을 분석하였다. 선박이 근접하여 통항할 때 발생하는 간섭력을 구하는 기술은 이론과 실험연구 등 다양하게 발전되어 왔다. 그러나 시뮬레이터를 제외한 이론이나 수조 실험을 통한 간섭력 추정은 비용과 시간의 측면에서 접근하기 어려우므로 본 연구에서는 먼저 간섭력 추정이 가능한 시뮬레이터를 검증하여 본 연구에 사용하였다. 시뮬레이션의 실험과 계산 결과를 기존의 이론계산과 비교 분석하여 시뮬레이터의 신뢰도를 확보하고, 3가지 간섭 현상 즉, 선박이 계류선을 통과하는 경우, 마주치며 통과하는 경우, 추월하는 경우에 대한 각각의 요소별로 무차원계수를 분석하고, MLIT의 계산방법으로 타각계산을 수행하였다. 최종적으로 기준 선박과 다양한 상대 선박을 대상으로 각각의 간섭의 상황 및 요소별로 안전통항거리를 도출하였다. Fig. 1.1은 본 연구의 절차를 도시한 것이다.

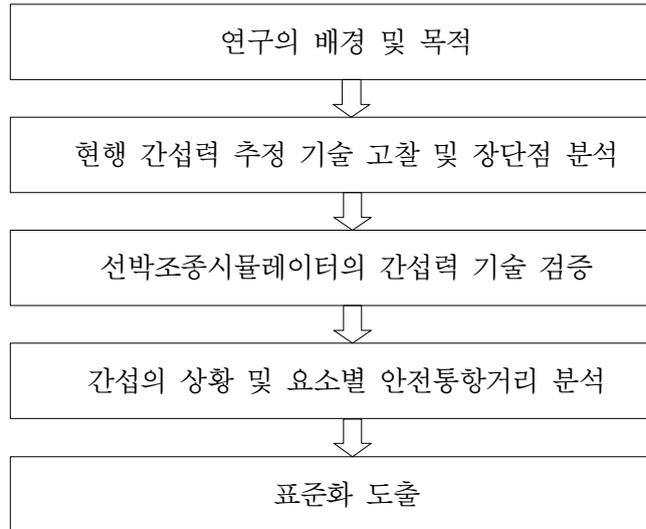


Fig. 1.1 Research flow

1.4 논문의 구성

본 연구는 시물레이터를 이용하여 근접하는 상황에 놓인 선박의 상호간섭을 고려한 적정 조건에서의 안전통항거리의 표준을 제시하였다. 다양한 선박을 대상으로 다양한 상황 및 조건에서의 표준화가 이루어지면 현장에서 선박을 운항하는 자가 각자의 상황에 맞게 이용할 수 있는 장점이 있으므로 선박 운항에 도움이 될 것으로 판단된다.

제 1장은 연구의 배경 및 목적을 기술하였고, 간섭현상과 이격거리에 관한 연구 동향을 소개하였다. 연구의 전체 흐름을 알 수 있도록 연구 절차를 제시하였다.

제 2장은 최근까지 개발된 간섭력을 추정하는 기술을 기법별로 분류하여 내용을 소개하고 장단점을 분석하였다. 현재 일본과 PIANC에서 제시한 간섭현상을 고려한 추가 항로폭의 기준을 상황별로 소개하였다.

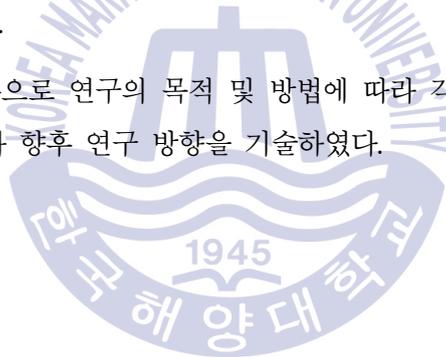
제 3장은 먼저 현재 상용되고 있는 선박조종시물레이터의 종류, 특징, 수학적모델을 소개하였다. 본 연구에서 사용한 시물레이터의 간섭력을 추정하는 기술에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 일본과 PIANC에서 실시한 이론계산 결과와 시물레이션을 통한 계산 결과를 비교분석하였다. 일본과 PIANC에서 제시한 15종류의 선박 중에서 시물레이터가 보유한 모델 중에 가장 유사한 크기의 선박 모델 5척을 종류별로 선정하여, 3가지 간섭 상황별로 각각의 선박에 대

한 횡거리를 도출하여 오차를 비교하였다. 선박이 측벽을 통과하는 경우, 선박이 다른 선박을 마주치며 통과하는 경우, 선박이 다른 선박을 추월하는 경우에 대해 5종류의 모델의 오차 결과를 분석하여 최종적으로 시뮬레이터의 정확도를 검증하였다.

제 4장은 검증된 시뮬레이터를 이용하여 다양한 상황별, 요소별, 선박별로 상호간섭에 영향을 미치는 정도를 분석하였다. 먼저, 기본적으로 각각의 요소들의 변화에 따른 힘과 모멘트의 변화 및 운동 특성을 분석하였다. 다음으로 각 요소들이 안전통항거리에 미치는 정도를 분석하였다. 파나마급 컨테이너선의 기준선과 길이 및 종류가 다른 선박을 대상으로 계류선을 통과하는 상황, 마주치며 통과하는 상황, 추월하는 상황에서 요소별로 시뮬레이션과 이론계산을 실시하고, 무차원 계수의 운동 특성을 분석하였다.

제 5장은 앞서 실시한 시뮬레이션과 이론계산을 통하여 얻은 결과를 통하여 부두에 접안한 계류선을 통과하는 상황, 두 선박이 마주치며 통과하는 상황 및 다른 선박을 추월하는 상황에서의 안전통항거리를 도출하였다. 또한 자선보다 흘수가 큰 선박과의 간섭상황을 고려한 안전통항거리를 제시하였다.

제 6장은 본 연구의 결론으로 연구의 목적 및 방법에 따라 각 장에서 도출된 결과를 요약하였고, 본 연구의 한계점과 향후 연구 방향을 기술하였다.



제 2 장 유체역학적 상호간섭에 관한 기술 분석

2.1 유체역학적 상호간섭(hydrodynamic interaction) 기술

선박이 측벽이나 다른 선박을 근접하여 통과할 때 발생하는 힘과 모멘트를 추정하는 간섭력 기술은 다수의 연구자들에 의해 발전하였고, 다양한 기법을 통하여 정확도가 높아졌다. 최근까지 개발된 간섭력 추정 기술을 기법별로 분류하여 연구자 및 연구 결과를 소개하고 장단점을 비교 분석하였다.

2.1.1 2D 섭동법(Two-dimensional perturbation method)

Table 2.1은 세장체 이론 기반의 2D 섭동법에 대해 소개하였다. 이 기법은 각 선박의 원방에 타 선박이 존재하고 유동은 자선 주변을 통과하는 선박에 의해 발생한다고 가정한다. 주요 연구자는 제한수로, 측벽 영향, 추월 및 계류선을 통과하는 경우에 대해 연구한 Kijima, Lee, Yeung, Varyani 등이 있다. 2D 섭동법은 세장체 선박에 대한 높은 정확도를 가지고 있고, Kijima와 Lee의 연구는 현재 MLIT와 PIANC의 추가 항로폭 산정에 활용되고 있다.

Table 2.1 2D perturbation method

연구 내용	Slender body 이론 기반 각 선박의 원방에 타 선박이 존재 유동은 타 선박(통과선)에 의해 발생
연구자	Restricted water/ Bank effect - Kijima, Lee, Yeung Moored ship passing -Varyani
연구결과	세장체 선박에 대한 정확도가 높음 PIANC, 일본의 항로폭 지침에 활용

2.1.2 3D 판넬법(Three-dimensional panel method)

세장체 기법은 퍼텐셜유동이 원방에 존재한다고 가정하는 원방의 기법이라면, 통과선과 계류선의 간섭력, 지형 및 제한수심의 영향을 고려한 근방 추정 기법은 일반적으로 선박과 지형을 판넬로 모델링하는 3D 퍼텐셜유동 기법을 기반으로 한다. Table 2.2는 6자유도에서 간

섭력을 계산하는데 적합한 이중모형유동을 사용하는 3D 퍼텐셜 이론 기반의 3D 판넬법을 정리하였다. 이중모형유동은 점성효과를 고려하지 않고, 자유수면 변형이 없고 바닥은 강체로 가정한다. 방정식의 수치해는 경계요소법을 기반으로 찾으며, 이러한 3D 판넬법은 선박조종 시뮬레이터의 실시간 계산에 활용되고 있다.

Table 2.2 3D panel method

연구 내용	3D 퍼텐셜 이론 기반 -Double body flow 판넬 모델 사용, 경계요소법 기반의 수치해 Rigid wall free surface(Yasukawa, 2003)
연구자	Korsmeyer(1993), Yasukawa(2003), Pinkster(2004, 2013)
연구결과	선박조종시뮬레이터의 실시간 계산에 활용(Pinkster, 2013) 근접하는 선박의 조종운동 구현(Yasukawa, 2003)

2.1.3 비점성 RANS기법(Viscous RANS method)

Table 2.3은 비점성 RANS 기법을 정리한 것으로, 이 기법은 다양한 간섭 현상에 대한 포괄적인 예측이 가능한 장점이 있다. 점성효과가 천수에서 중요한데, 천수역을 전진하는 선박은 점성지배 지역을 운항하게 된다. 이때 선체를 따르는 경계층과 수면 바닥 간의 상호작용에 의해 정상 유동패턴은 왜곡되며, 폭이 제한된 수로에서는 더 악화된다. 유동의 복잡한 점성의 성질은 낮은 수심-흘수 비에서 유동을 크게 지연시키고, 와류발산에 의해 주기적으로 완화된다(Varyani and Vantorre, 2006). Lee(2015)는 계류선을 통과하는 선박의 상호작용에 대하여 RANS 시뮬레이션을 수행하여 Kijima의 2차원 섭동법의 한계를 극복하는 방법론을 제안하였다. 그의 연구에서 2D 섭동법을 Dand(1981)의 실험 결과와 Chen et al.(2003)의 RANS 결과와 비교하였는데, 횡력은 RANS보다 2D 섭동법이 실험결과에 근접하였고, 회두모멘트는 RANS 값이 실험결과에 더 가까웠다. 이러한 비점성 RANS 기법은 한 개의 시나리오를 시뮬레이션하는데 많은 시간이 걸리고, 고성능 장비를 요구한다. 간섭력에 영향을 미치는 요소가 많으므로 표준화를 하기 위해 수많은 상황, 선박 및 각종 요소를 시뮬레이션하는 도구로 사용하기에는 무리가 있는 방법으로 여겨진다.

Table 2.3 Viscous RANS method

연구내용	포괄적인 예측(head-on encountering, overtaking 등)이 가능 유동의 복잡한 점성의 성질은 낮은 h/T 비에서 유동을 크게 지연시킴 2D 기법을 보완하기 위해 RANS 시뮬레이션 수행(LEE, 2015)
연구자	Chen et al.(2002), Fonfach et al.(2011) Zou and Larsson(2013)
연구결과	Interaction, sinkage, trim 등에 대한 만족스러운 예측 타각, 프로펠러의 영향 예측 가능 장시간 소요, 고성능 장비 요구, 많은 수의 영향요소를 시뮬레이션하기에 비효율적

2.1.4 수조실험기반 연구(Experimental method)

Table 2.4는 수조실험을 기반으로 하는 연구기법의 내용을 정리하였다. 실험 기법은 신뢰도가 높고 시뮬레이터의 수학적모델에 활용되는 장점이 있지만, 비전문가가 장비를 사용하는 것은 한계가 있고, 다양한 선박과 수많은 영향요소에 대해 실험을 하기는 어려운 방법이다. 실험기법을 사용한 연구자로 Dand(1981)은 model 5232(cargo), model 5233(tanker)을 대상으로 추월과 마주치는 경우에 대한 연구를 수행하였고, Vantorre et al. (2002)는 천수예인수조에서 Bulker, Container, Tanker를 대상으로 마주치는 경우, 추월의 경우, 계류선을 통과하는 경우에 대한 실험 연구를 수행하였다. 모형시험은 추월, 속력, 거리, 수심 등 여러 가지 다양한 파라미터를 포함한 평행운동만을 다루었다. Vantorre et al.(2002)는 다양한 횡거리와 속력에 따른 전후력, 횡력, 회두모멘트를 구하였으며, 방대한 양의 자료를 기반으로 실시간 추적에서 상호작용의 최대 피크를 계산하는 경험적 기법을 제안하였고, 연구 결과는 ITTC에 소개되었다(ITTC 23rd, 2002). 그러나 두 선박이 통과하는 사이에 상호작용에 영향을 미치는 모든 가능한 파라미터를 고려하는 경험적 기법을 개발하는 것은 어려운 일이라고 기술하였다(ITTC 24th, 2005). Lataire et al.(2009, 2012)는 lightering operation에 대한 구속모형시험을 수행하였는데, 이러한 시험은 모델에 작용하는 힘을 측정하고 조종을 시뮬레이션하는 수학적모델을 만드는데 사용된다. 그의 연구에서 service 선박에 유발되는 힘과 모멘트에 주의하였으며, lightering 조종에 대한 수학적모델을 도출하였다.

Table 24 Experimental method

연구 내용	자선의 데이터만 측정/ 타선은 보조장치 Dand(1981) - model 5232(cargo), model 5233(tanker) Vantorre et al.(2002) - Bulker, Container, Tanker 간섭력은 선박의 길이비와 속력비에 좌우 Lataire et al.(2009) - VLCC, KVLCC2 실험
연구자	Dand(1981), Vantorre et al.(2002), Lataire et al.(2009, 2012)
연구결과	ITTC(2002)에 연구 결과 발표(Vantorre et al., 2002) PIANC 및 DMI 시뮬레이터에 활용(Dand, 1981)

2.2 일본의 MLIT와 PIANC의 간섭력을 고려한 항로폭 산정

일본의 MLIT와 PIANC에서는 선박과 측벽, 선박과 선박의 간섭력을 고려한 추가 항로폭을 선박의 종류별로 제시하였다. Fig. 2.1은 간섭력이 발생하는 주요 3가지 현상을 나타낸 것으로서 (a)는 선박이 측벽을 근접 항해할 때 측벽으로 인해 발생하는 측벽영향(bank effect), (b)는 선박이 다른 선박을 마주치며 근접 통항하는 경우이며, (c)는 선박이 상대선의 좌현을 근접하여 추월하는 경우를 도시한 것이다. Fig. 2.1 (a), (b), (c)의 η 는 선박의 중심선에서 측벽 및 타 선박의 중심선까지의 수평거리이며, S 는 선체와 측벽 또는 선체 간의 수평거리 즉, MLIT와 PIANC에서 제시한 추가 항로폭을 의미한다.

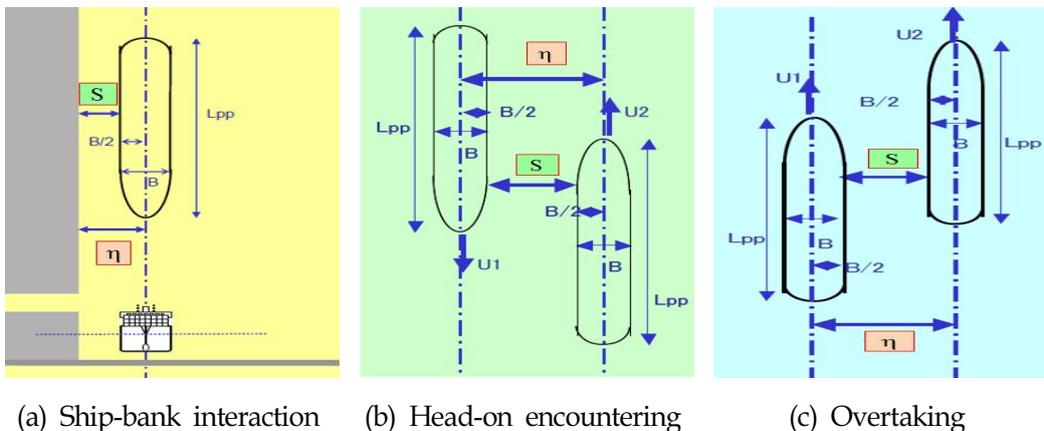


Fig. 2.1 Diagram of bank effect and ship to ship interaction (PIANC, 2014)

Fig. 2.2는 일본과 PIANC의 이론계산에 사용된 선박의 종류이다. 일반화물선, 컨테이너선, 벌크선, 유조선, 탱커선, LNG선, 카캐리어, 냉동화물선, 여객선 등 다양한 선박을 대상으로 상황별로 간섭력을 고려한 추가 항로폭을 산정하였다.



Cargo ship



Small cargo ship



Container ship



Very large bulk carrier



Small bulk carrier



VLCC



Small tanker



Large pure car carrier



LNG선



Refrigerated cargo carrier



Passenger ship
(2 shafts, 2 propellers)



Ferry boat
(2 shafts, 1 propellers)

Fig. 2.2 Ship types for theoretical calculation (출처 : www.google.com)

2.2.1 측벽 영향을 고려한 항로폭

일본과 PIANC에서 제시하고 있는 측벽영향을 고려한 선박의 종류별 추가 항로폭은 Table 2.5와 같다(PIANC, 2014). h/T (수심/흘수)=1.2의 조건에서 타각은 5도의 범위이며, η/L_{pp} 는 0.2~0.3의 범위인 것을 알 수 있다. 여기서 타각의 의미는 선박이 측벽을 통과하거나 다른 선박을 근접 통항할 때 선체에 발생하는 간섭력 즉, 횡력과 회두모멘트를 제어하여 정침(course keeping)할 수 있는 최대허용타각을 의미한다.

Table 2.5 Requisite width for ship-bank interaction ($h/T=1.2$, $\delta=5^\circ$)

	Ship Type	L_{pp} [m]	B [m]	η/L_{pp}	S [m]	S/B
1	Cargo ship	103.0	20.0	0.267	17.4	0.87
2	Small cargo ship	60.4	11.2	0.255	9.8	0.87
3	Container ship (over Panamax)	283.8	40.0	0.266	55.5	1.39
4	Container ship (Panamax)	273.0	32.2	0.261	55.2	1.71
5	Very large bulk carrier	279.0	45.0	0.269	52.6	1.17
6	Large bulk carrier(Panamax)	216.0	32.3	0.269	41.9	1.30
7	Small bulk carrier	119.2	21.5	0.261	20.3	0.95
8	VLCC	316.0	60.0	0.252	49.7	0.83
9	Small tanker	92.0	20.0	0.259	13.8	0.69
10	Large pure car carrier	190.0	32.2	0.265	34.3	1.06
11	Pure car carrier	180.0	32.2	0.263	31.2	0.97
12	LNG carrier	270.0	44.8	0.260	47.7	1.07
13	Refrigerated cargo carrier	144.0	23.5	0.267	26.6	1.13
14	Passenger ship (2 shafts, 2 propellers)	160.0	24.7	0.239	25.9	1.05
15	Ferry boat (2 shafts, 1 propellers)	181.0	29.4	0.250	30.5	1.04

2.2.2 마주치며 통과시 필요 항로폭

일본과 PIANC에서 제시하고 있는 마주치며 통과하는 선박 간의 간섭력을 고려한 선박의 종류별 추가 항로폭은 Table 2.6과 같다(PIANC, 2014). $h/T=1.3$ 의 조건에서 타각은 15도의 범위이며, η/L_{pp} 는 0.45~0.55의 범위인 것을 알 수 있다. 제 5장에서 본 연구 결과와 차이점을 기술하였다.

Table 2.6 Requisite width for head-on encountering ($h/T=1.3$, $\delta=15^\circ$)

	Ship Type	Lpp [m]	B [m]	η/L_{pp}	S [m]	S/B
1	Cargo ship	103.0	20.0	0.511	32.6	1.63
2	Small cargo ship	60.4	11.2	0.477	17.6	1.57
3	Container ship (over Panamax)	283.8	40.0	0.511	105.0	2.63
4	Container ship (Panamax)	273.0	32.2	0.498	103.6	3.22
5	Very large bulk carrier	279.0	45.0	0.516	98.8	2.20
6	Large bulk carrier(Panamax)	216.0	32.3	0.516	79.0	2.45
7	Small bulk carrier	119.2	21.5	0.501	38.2	1.77
8	VLCC	316.0	60.0	0.478	91.0	1.52
9	Small tanker	92.0	20.0	0.492	25.2	1.26
10	Large pure car carrier	190.0	32.2	0.510	64.6	2.01
11	Pure car carrier	180.0	32.2	0.504	58.4	1.81
12	LNG carrier	270.0	44.8	0.502	90.7	2.03
13	Refrigerated cargo carrier	144.0	23.5	0.514	50.5	2.15
14	Passenger ship (2 shafts, 2 propellers)	160.0	24.7	0.453	47.7	1.93
15	Ferry boat (2 shafts, 1 propellers)	181.0	29.4	0.478	57.1	1.94

2.2.3 추월 통과시 필요 항로폭

Table 2.7은 일본과 PIANC에서 제시하고 있는 두 선박이 추월하는 경우에 발생하는 간섭력을 고려한 추가 항로폭이다(PIANC, 2014). $h/T=1.2$ 의 조건에서 타각은 5도의 범위이며, η/L_{pp} 는 0.60~0.75의 범위인 것을 알 수 있다. 5장에서 본 연구의 결과와 차이점을 기술하였다.

Table 2.7 Requisite width for overtaking ($h/T=1.2$, $\delta=5^\circ$)

	Ship Type	L_{pp} [m]	B [m]	η/L_{pp}	S [m]	S/B
1	Cargo ship	103.0	20.0	0.735	55.7	2.79
2	Small cargo ship	60.4	11.2	0.683	30.0	2.63
3	Container ship (over Panamax)	283.8	40.0	0.737	169.1	4.23
4	Container ship (Panamax)	273.0	32.2	0.716	163.2	5.07
5	Very large bulk carrier	279.0	45.0	0.743	162.2	3.60
6	Large bulk carrier(Panamax)	216.0	32.3	0.744	128.4	3.98
7	Small bulk carrier	119.2	21.5	0.719	64.2	2.98
8	VLCC	316.0	60.0	0.683	155.7	2.60
9	Small tanker	92.0	20.0	0.705	44.9	2.24
10	Large pure car carrier	190.0	32.2	0.732	106.9	3.32
11	Pure car carrier	180.0	32.2	0.725	98.2	3.05
12	LNG carrier	270.0	44.8	0.722	150.1	3.35
13	Refrigerated cargo carrier	144.0	23.5	0.741	83.2	3.54
14	Passenger ship (2 shafts, 2 propellers)	160.0	24.7	0.644	78.3	3.17
15	Ferry boat (2 shafts, 1 propellers)	181.0	29.4	0.686	94.7	3.22

2.3 간섭력 기술 종합 분석

2.1에서 분석한 현재까지 개발된 간섭력을 추정하는 기술에 대한 장단점을 Table 2.8에 정

리하였다. 다수의 연구자들이 사용한 2D 섭동법, 3D 판넬법, 비점성 RANS 기법과 실험 기법은 연구자의 이론 및 수조실험을 통한 정확도가 높아졌지만 비전문가가 사용하기에는 경비, 시간, 장비 접근의 어려움이 있다. 현재 일본의 MLIT와 PIANC에서는 선박이 측벽을 향하는 경우, 선박이 다른 선박과 마주치는 경우, 선박이 다른 선박을 추월하는 경우에 대해 15 종류의 선박 별로 근접통항시 발생하는 간섭력을 고려한 추가 항로폭을 제시하고 있다. 그러나 같은 종류의 선박을 대상으로 실시하여 현장의 선박 운항자들이 사용할 수 있는 안전통항거리를 제시하기 위해서는 다양한 선박과 영향 요소에 대한 광범위한 시뮬레이션을 통한 일반화가 이루어져야 한다. 기존의 수치기법, 실험기법은 정확성은 높지만 전체를 다루기는 무리가 있는 방법이다. 반면, 선박조종시뮬레이터는 다양한 선박과 영향 요소들을 입출력할 수 있으므로 본 연구에서는 이를 통하여 다양한 선박과 요소들에 대한 간섭 영향을 분석하였고, 최종적으로 상황 및 요소별로 안전통항거리를 도출하였다. 선박조종시뮬레이터는 신뢰도가 부족하다는 인식과 버전업에 따른 수치 변화의 단점이 있으므로, 먼저 bank effect, ship to ship interaction에 대해 일본의 MLIT와 PIANC의 이론계산결과와 비교분석함으로써 간섭력의 오차분석을 통한 검증이 선행되어야 한다.

Table 2.8 Comparison of prediction skill for ship to ship interaction

현행 기술	장점/특징	단점/ 한계
2D 섭동법	세장체 선박에 대한 높은 정확도 일본, PIANC에 활용	계산 프로그램 필요 비전문가 접근 어려움 다양한 선박의 이용 한계
3D 판넬법	실시간 계산 및 시뮬레이터에 활용 해저 지형의 영향 고려	
RANS 기법	다양한 간섭력 현상에 대한 포괄적인 예측 가능 점성효과 고려 가능	장시간 소요, 고성능 장비 요구 많은 요소를 시뮬레이션하기에 비효율적
실험 기법	높은 신뢰도 시뮬레이터의 수학적모델에 활용	고가의 비용 비전문가 장비 사용 어려움
일본의 MLIT	간섭의 상황별로 이론계산에 따른 정량적인 항로폭 제시	같은 종류의 선박의 경우로 제한하여 상대적인 크기의 선박의 경우에는 적용하기 어려운 문제
선박조종 시뮬레이터	다양한 선박의 활용 가능 여러 요소들 입/출력 가능	제품별 수학적 모델, 신뢰도 부족 버전업에 따른 수치 변화

제 3 장 선박조종시뮬레이터에 적용된 상호간섭 분석

현재 국내에서 사용되고 있는 선박조종시뮬레이터는 Table 3.1과 같이 러시아의 Transas, 노르웨이의 Kongsberg, 덴마크의 Force technology, 한국의 STR 제품이 있다. 선박조종시뮬레이터의 수학적모델은 이론이나 수조실험을 기반으로 하고 있고, 무차원 계수에 영향을 미치는 파라미터에 제한을 두고 있다. 현재(2016년)까지 제품별 시뮬레이터의 특징을 살펴보면, Kongsberg는 계류선을 통과하는 경우는 적용이 안되며 상대선을 조정할 수 없는 단점이 있다. Force technology는 Dand(1981)의 제한적인 데이터에 기반을 두고 있고, STR은 이론기반의 수학적모델로 형태만 존재하고 있다. 반면, Transas는 체계적인 실험을 통한 모델링이 되어 있고, 계류선을 통과하는 경우, 마주치는 경우, 추월하는 경우에 대한 시뮬레이션이 가능하며 상대선을 자유롭게 조정이 가능한 장점이 있다.

Table 3.1 Comparison of existing ship handling simulators

Simulator	Formulas based	특징
Transas (Russia)	Experiment	체계적인 실험을 통한 간섭력 모델링 다양한 간섭 상황별 시뮬레이션 가능 상대선을 자유롭게 조정 가능
Kongsberg (Norway)	Experiment	무차원 계수에 영향을 미치는 parameter 제한 계류선을 통과하는 경우는 적용 안됨 상대선을 조정할 수 없음
FORCE Technology (Denmark)	Semi-empirical	Dand (1981)의 제한적인 데이터를 기반, 경험적 의존성
STR (S. Korea)	Theoretical	1970년 slender body 이론 기반, 형태만 존재

3.1 Transas 선박조종시뮬레이터에 적용된 수학적모델

본 연구에서 사용한 Transas 시뮬레이터의 ship bank interaction과 ship to ship interaction에 관한 수학적모델은 선박의 근처에 측벽이 존재할 때 압력장의 변화, 이동하는 상대 선박에 의해 유발되는 압력장을 고려하는 것을 기본으로 한다.

3.1.1 선박조종방정식

Transas 선박조종시뮬레이터의 기본적인 운동방정식은 Fig. 3.2와 같이 임의의 고정점에 원점 O_0 가 위치한 지구고정좌표계 $X_0Y_0Z_0$ 와 선박의 중력중심(center of gravity, CG)에 원점 O 가 있는 물체고정좌표계 XYZ 로 표현한다. 선박의 중력중심에 원점 O 가 있는 국부좌표계(local frame) $X_1Y_1Z_1$ 는 지구고정좌표계 $X_0Y_0Z_0$ 의 원점이 물체고정좌표계의 원점과 일치하도록 평행하게 이동시킨 것이다. 물체고정좌표계 X 축(longitudinal axis)은 선미에서 선수를 향하고, Y 축(transverse line)은 좌현에서 우현으로 향하고, Z 축(normal axis)은 수선면(waterplane)에 직각인 선저를 향하고 있다.

선박의 위치를 결정하기 위해서 지구고정좌표계의 중력중심 좌표 x_0, y_0, z_0 를 사용하였고, 선체 방향을 결정하기 위해 roll ϕ , pitch θ , heading angle ψ 을 사용하였다. 식 (1)~(3)은 선박운동모델에 사용되는 roll, pitch, yaw rate의 운동방정식으로 물체고정좌표계 위에 벡터 사영이 가능하다. 식 (4)~(6)과 같이 선속도의 운동방정식은 물체고정축에 속도벡터의 사영 (u_0, v_0, ω_0) 으로부터 중력중심 좌표계의 도함수 $(\dot{x}_0 = U_{X_0}, \dot{y}_0 = U_{Y_0}, \dot{z}_0 = U_{Z_0})$ 를 결정하게 한다.

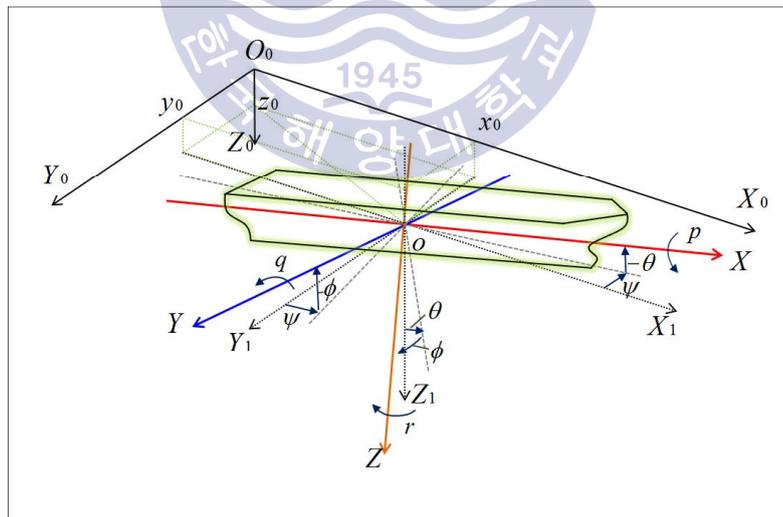


Fig. 3.1 Coordinate frames

$$p = \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin\theta \tag{1}$$

$$q = \dot{\theta} \cos\phi + \dot{\psi} \cos\theta \sin\phi \tag{2}$$

$$r = -\dot{\theta} \sin\phi + \dot{\psi} \cos\theta \cos\phi \quad (3)$$

$$\dot{x}_0 = u_0 \cos\psi \cos\theta + v_0 (\sin\phi \cos\psi \sin\theta - \cos\phi \sin\psi) \quad (4)$$

$$+ \omega_0 (\cos\phi \cos\psi \sin\theta + \sin\phi \sin\psi)$$

$$\dot{y}_0 = u_0 \sin\psi \cos\theta + v_0 (\sin\phi \sin\psi \sin\theta + \cos\phi \cos\psi) \quad (5)$$

$$+ \omega_0 (\cos\phi \sin\psi \sin\theta - \sin\phi \cos\psi)$$

$$\dot{z}_0 = -u_0 \sin\theta + v_0 \sin\phi \cos\theta + \omega_0 \cos\phi \cos\theta \quad (6)$$

식 (7)~(9)는 surge, sway, heave에 대한 기본식이며, 식 (10)~(12)는 6자유도 운동 중 roll, pitch, yaw에 대한 뉴턴의 운동방정식이다.

$$m(\dot{u}_0 - v_0 r + \omega_0 q) = X \quad (7)$$

$$m(\dot{v}_0 + u_0 r - \omega_0 p) = Y \quad (8)$$

$$m(\dot{w}_0 - u_0 q + v_0 p) = Z \quad (9)$$

$$I_{x_c} \dot{p} + (I_{z_c} - I_{y_c})qr = K \quad (10)$$

$$I_{y_c} \dot{q} + (I_{x_c} - I_{z_c})rp = M \quad (11)$$

$$I_{z_c} \dot{r} + (I_{y_c} - I_{x_c})pq = N \quad (12)$$



여기서, m 은 선박의 질량, I_x, I_y, I_z 는 각축에 대한 선박의 관성모멘트, u, v, w 과 p, q, r 는 물체고정좌표계에 대한 선박의 병진속도 성분 및 회전속도 성분을 나타내고, $\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$ 과 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ 는 중력 중심 좌표 및 선박의 오일러각의 미분을 의미한다. 또한, 식 (7)~(12)의 우변 항은 좌표계 각각의 방향으로 선박에 작용하는 유체력, 타력, 추력, 풍력 등에 의한 외력과 선박에 작용하는 모멘트의 합을 의미한다(Son, 2014, Lee, 2011). Table 3.2는 선박의 6자유도 운동에 대한 각 방향의 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)의 표준 기법이다.

Table 3.2 Notation of SNAME for marine vessels (Fossen, 2011)

DOF	Description	Forces and moments	Linear and angular velocities	Positions and Euler angles
1	motions in the x direction (surge)	X	u	x
2	motions in the y direction (sway)	Y	v	y
3	motions in the z direction (heave)	Z	w	z
4	rotation in the x axis (roll, heel)	K	p	ϕ
5	rotation in the y axis (pitch, trim)	M	q	θ
6	rotation in the z axis (yaw)	N	r	ψ

3.1.2 근접 통항하는 선박과 선박의 간섭력을 구하는 일반적인 표현

근접하여 통항하는 두 선박의 간섭력을 구하는 좌표계는 Fig. 3.2와 같고, 간섭력의 주요 성분인 횡력과 회두모멘트를 구하는 일반적인 표현은 식 (13)~(15)와 같다. 여기서, F_n 은 프루드 수이며, C_{YINT} , C_{NINT} 는 각각 횡력과 모멘트의 무차원수이다. 간섭력에 관한 방정식은 두 선박 사이에 제한된 유체의 흐름으로 인한 선체주변의 유동 변화를 고려해야 한다. Fig. 3.3의 좌표계에서 선박의 유체역학적인 간섭력의 힘과 모멘트가 결정되며, ξ 는 두 선박의 중력중심의 종거리(stagger between the ships), η 는 두 선박의 중심선 간의 횡거리(lateral distance between the centerline of the ships)를 의미한다.

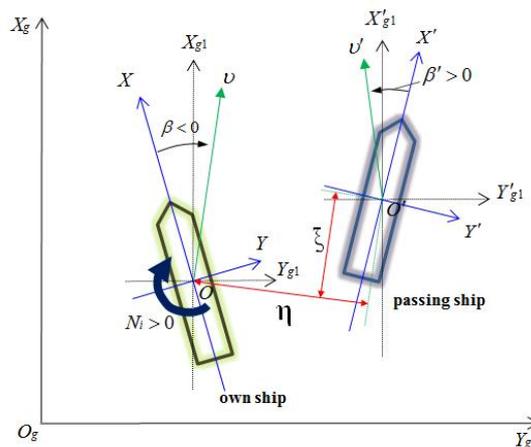


Fig. 3.2 Definition of ship to ship interaction modeling

$$X_{INT} = C_{X_{INT}} \left[Fn, (\eta - 0.5B - 0.5B') / (0.5B), \frac{2\xi}{L'}, \frac{\rho U^2}{2} LT \right] \left[\psi, \psi', \beta, \beta', \frac{H}{T}, \frac{V'}{V}, \frac{L'}{L}, \frac{B'}{B}, \frac{T'}{L'} \right] \quad (13)$$

$$Y_{INT} = C_{Y_{INT}} \left[Fn, (\eta - 0.5B - 0.5B') / (0.5B), \frac{2\xi}{L'}, \frac{\rho U^2}{2} LT \right] \left[\psi, \psi', \beta, \beta', \frac{H}{T}, \frac{V'}{V}, \frac{L'}{L}, \frac{B'}{B}, \frac{T'}{L'} \right] \quad (14)$$

$$N_{INT} = C_{N_{INT}} \left[Fn, (\eta - 0.5B - 0.5B') / (0.5B), \frac{2\xi}{L'}, \frac{\rho U^2}{2} L^2 T \right] \left[\psi, \psi', \beta, \beta', \frac{H}{T}, \frac{V'}{V}, \frac{L'}{L}, \frac{B'}{B}, \frac{T'}{L'} \right] \quad (15)$$

3.1.3 선박조종시물레이터의 무차원계수

Fig. 3.3~3.6은 Transas 선박조종시물레이터의 선박 모델에 입력된 간섭력을 구하는 무차원 계수를 나타낸 것이다. 두 선박이 마주치며 근접하여 통과하는 경우(head-on encountering)와, 같은 방향으로 추월하는 경우(overtaking)에 대형선과 소형선에 대한 간섭력의 무차원 계수가 입력되어 있다. 그래프는 두 선박 간의 종방향과 횡방향의 이격거리를 무차원화하여 도출한 것으로 여겨진다.

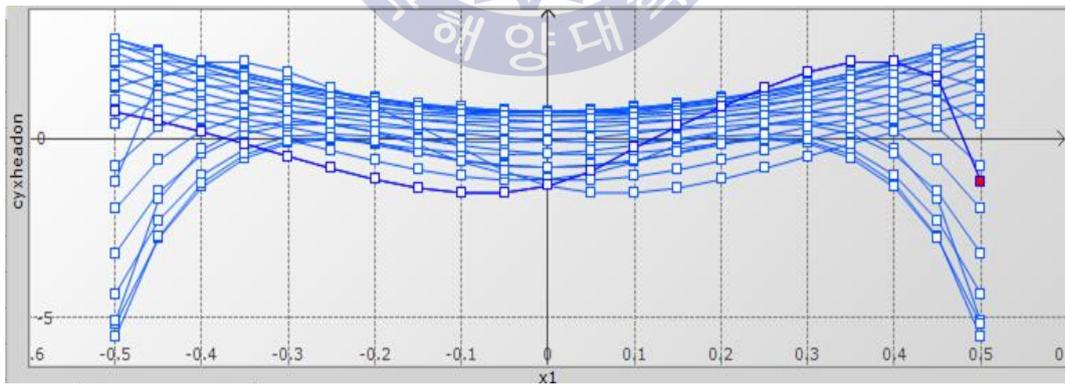


Fig. 3.3 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (head-on encountering, large ship)

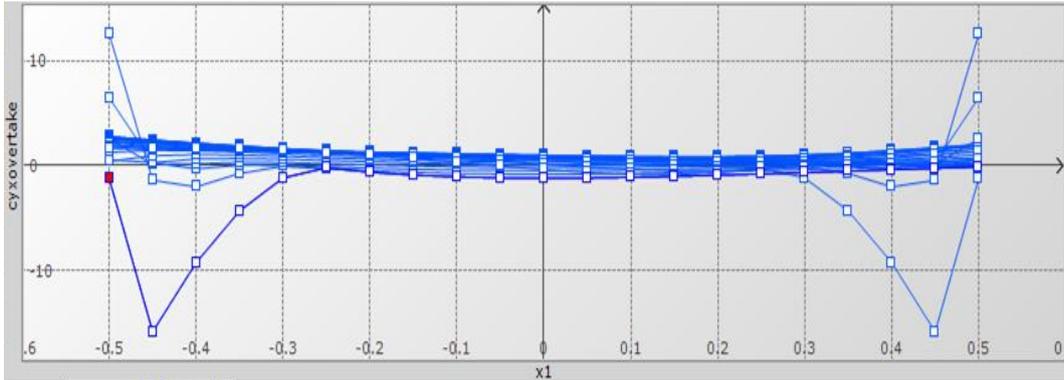


Fig. 3.4 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (overtaking, large ship)

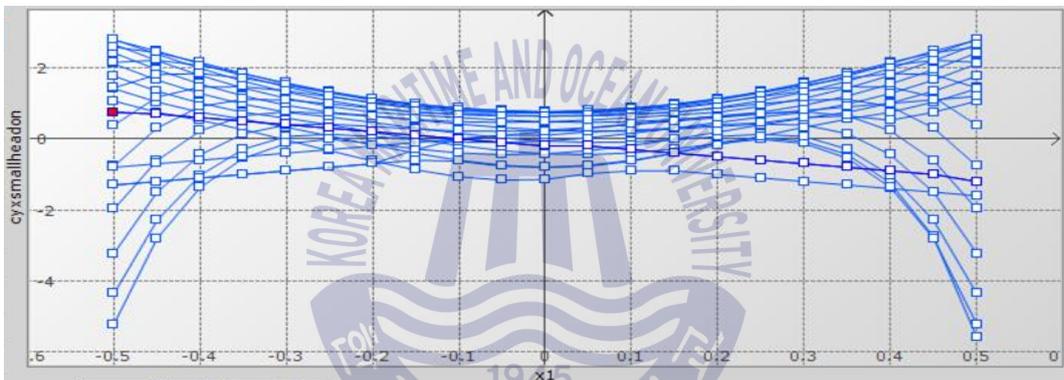


Fig. 3.5 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (head-on encountering, small ship)

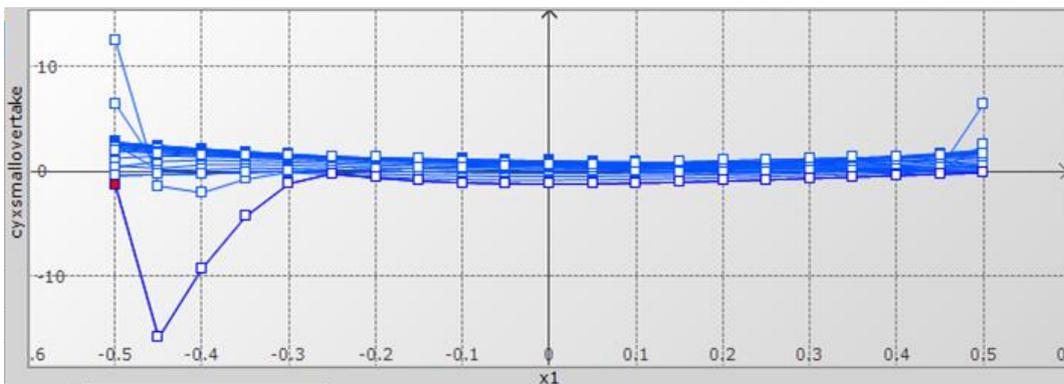


Fig. 3.6 Non-dimensional coefficients of ship to ship interaction (overtaking, small ship)

3.2 기타 시뮬레이터 현황

3.2.1 Kongsberg maritime

식 (16)의 X_{EXT} 에서 다른 선박에 의한 영향을 표현하고 있다. 식 (17)는 surge, sway, yaw 에 대한 뉴턴의 운동방정식을 의미한다. 식 (18)은 측벽을 통과하는 선박이 측벽으로 인해 발생하는 횡력과 회두모멘트에 대한 식이다. 식 (19)~(21)은 선박이 다른 선박을 근접 통항할 때 발생하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 구하는 식이다.

$$X = X_I + X_H + X_P + X_C + X_A + X_W + X_{EXT} \quad (16)$$

$$m(\dot{u} - vr + wq) = X, m(\dot{v} + wp + ur) = Y, I_{zz}\dot{r} - (I_{yy} - I_{xx})pq = N \quad (17)$$

$$Y = mg(Fr^2 C_{BY}), N = mgL Fr^2 C_{BN} \quad (18)$$

$$X = \frac{1}{2} \rho g f(\nabla, \nabla_s) U_S^2 (C_{SX}) \quad (19)$$

$$Y = \frac{1}{2} \rho g f(\nabla, \nabla_s) U_S^2 (C_{SY}) \quad (20)$$

$$N = \frac{1}{2} \rho f(\nabla, \nabla_s)^{3/2} U_S^2 C_{SN} \quad (21)$$

3.2.2 FORCE Technology

기본적인 수학모델을 보면, Kongsberg와 마찬가지로 식 (22)에서 보는 바와 같이 X 방향으로 작용하는 힘의 합력 중에서 다른 선박에 의한 힘을 X_{SS} , 측벽에 의한 영향은 X_{BP} 로 표현하고 있다. 식 (23)~(24)는 선박이 다른 선박을 근접통항할 때 발생하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 구하는 식이다. Fig. 3.7은 덴마크의 FORCE Technology에서 활용하고 있는 Dand(1981)의 연구결과로서, model 5232와 model 5233의 선박이 마주치며 통과하는 경우에 model 5233에 작용하는 횡력과 회두모멘트의 무차원수를 수심/흘수비에 따라 도시한 것이다.

$$X = X_{AC} + X_H + X_P + X_R + X_{HPR} + X_{AE} + X_{BP} + X_{SS} + X_{CS} + X_{SI} + etc. \quad (22)$$

$$X = C_X \frac{1}{2} \rho (\nabla \nabla_P)^{1/3} U_P^2 S_X, Y = C_Y \frac{1}{2} \rho (\nabla \nabla_P)^{1/3} U_P^2 S_Y \quad (23)$$

$$N = C_N \frac{1}{2} \rho (\nabla \nabla_P)^{1/2} U_P^2 S_Y \quad (24)$$

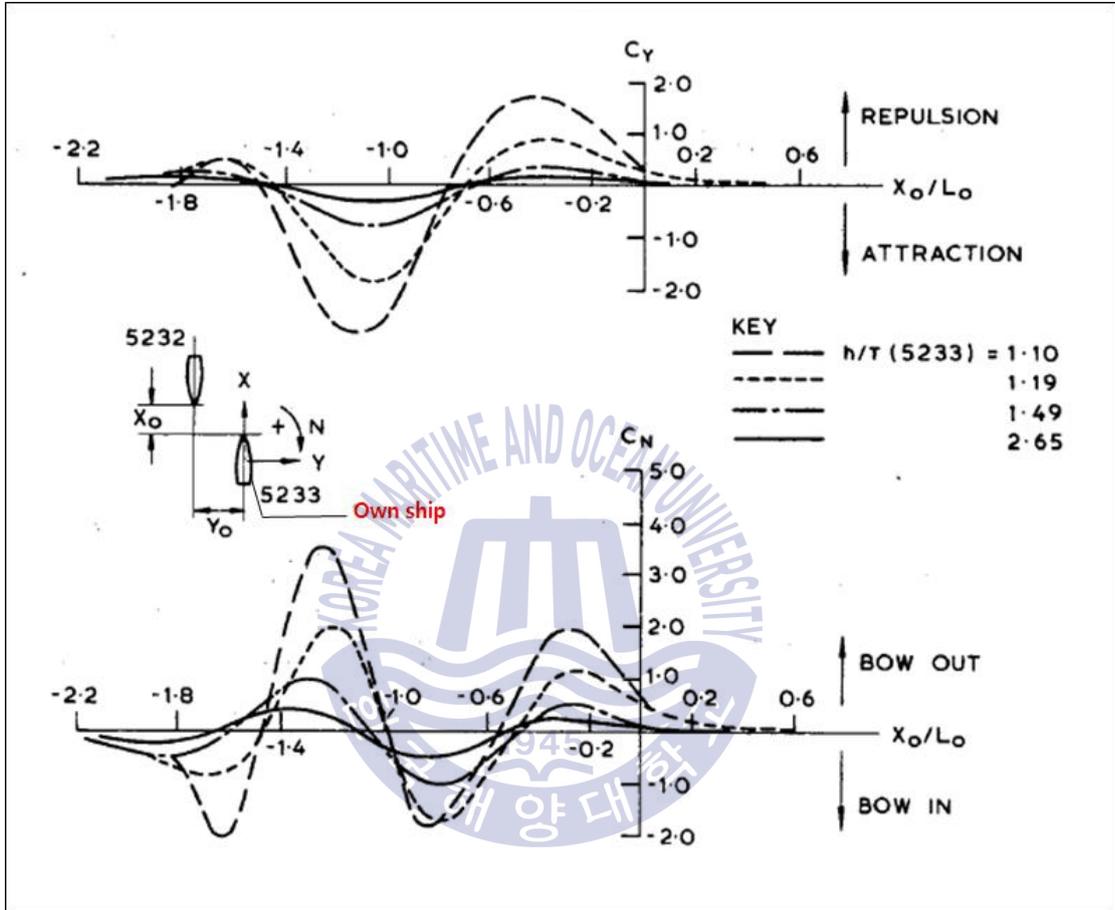


Fig. 3.7 Head-on encounter : Effect of depth/draft (Dand, 1981)

3.2.3 세이프테크리서치(SafeTechResearch, STR)

국내 회사인 STR에서 개발한 선박조종시뮬레이터는 식 (25)에서 보는 바와 같이 선박에 작용하는 유체력 중에서 F_{ship} 은 다른 선박에 의한 간섭력, $F_{channel}$ 은 측벽과 근접통항할 때 발생하는 힘에 대해 표현하고 있다.

$$F_{total} = F_{hull} + F_{rudder} + F_{propulsion} + F_{thruster} + F_{tug} + F_{wind} + F_{anchor} \quad (25)$$

$$+ F_{wave} + F_{current} + F_{wind} + F_{channel} + F_{ship} + F_{ground}$$

3.3 선박조종시뮬레이터 선박모델의 상호간섭 기술 검증(Transas)

1) 계류선과 통과선의 간섭 영향에 관한 모델 실험 비교 결과

Ozersky and Rogozhina(2016)는 Transas 시뮬레이터의 모델 실험을 Remery(1974)의 수조실험결과와 비교분석하여 간섭력에 대한 Transas 모델의 정확성을 검증하였다. Table 3.3은 비교대상선박의 제원을 나타내고 있고, Fig. 3.8~3.11은 통과선에 의해 작용하는 계류선의 간섭력에 관한 좌표 및 Transas 모델과의 실험결과를 비교한 것이다. 7knots의 속력으로 계류선을 30m, 60m, 120m를 간격으로 통과시킬 때 계류선에 작용하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 비교한 결과, Remery(1974)의 실험 결과와 Transas 모델의 운동패턴과 Peak값이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.3 Main particulars of the ship models and test condition (Ozersky and Rogozhina, 2016)

Particulars	Transas		Experiment (scale 1:60)	
	Moored vessel	Passing vessel	Moored vessel	Passing vessel
Model	Moored vessel	Passing vessel	Moored vessel	Passing vessel
Ship type	tanker	tanker	tanker	tanker
∇ , m ³	104,000	131,000	118,800	129,600
Lpp, m	239	270	257	250
B, m	44	49.9	36.8	40.4
T, m	12.2	12.2	15.7	15.2
h/T	1.15	1.15	1.15	1.15
Cb	0.81	0.8	0.8	0.85

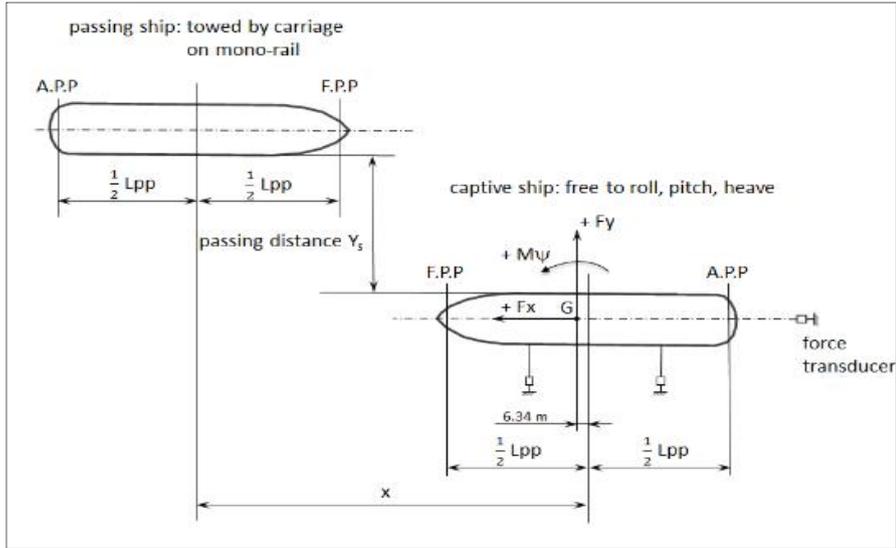


Fig. 3.8 Test set-up for force measurement on captive vessel (Remery, 1974)

Remery(1974)는 천수에서 대형탱커의 통과로 인해 계류선인 탱커에 작용하는 외력을 측정하기 위해 수조실험을 Fig. 3.8과 같이 수행하였다. 구속모형(captive ship)인 계류선에 작용하는 힘과 모멘트는 통과선의 속력의 제곱에 비례한다고 기술하였다. 계류선에 작용하는 간섭력은 Fig. 3.9~Fig. 3.11와 같이 V^2 으로 나누어 도시하였다. 그래프의 x 축은 $\frac{x}{1/2(L_1 + L_2)}$ 으로 나타내었고, 여기서 x 는 두 선박의 중심간의 종거리이고, L_1, L_2 는 각각 통과선과 계류선의 수선간장을 의미한다.

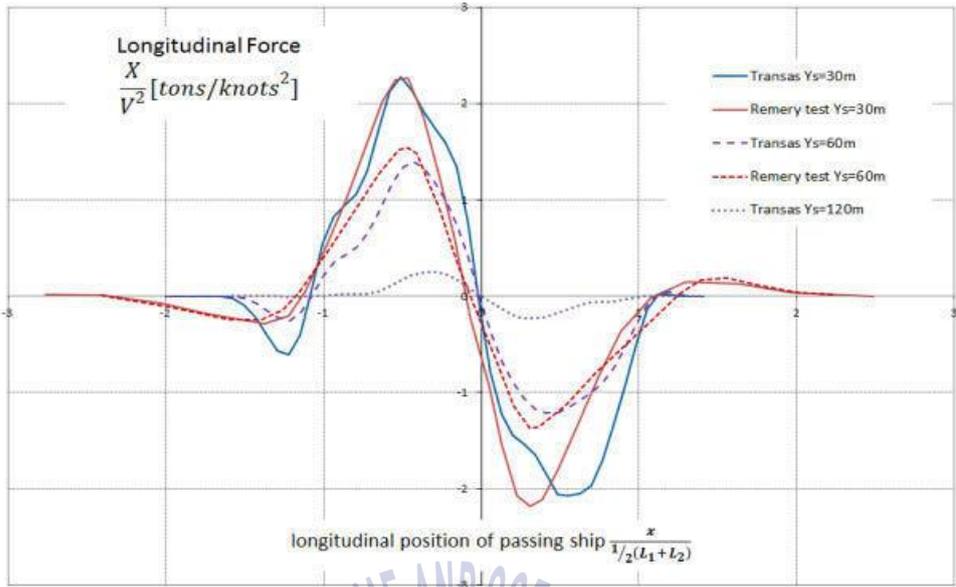


Fig. 3.9 Surge force induced by passing ship (Ozersky and Rogozhina, 2016)

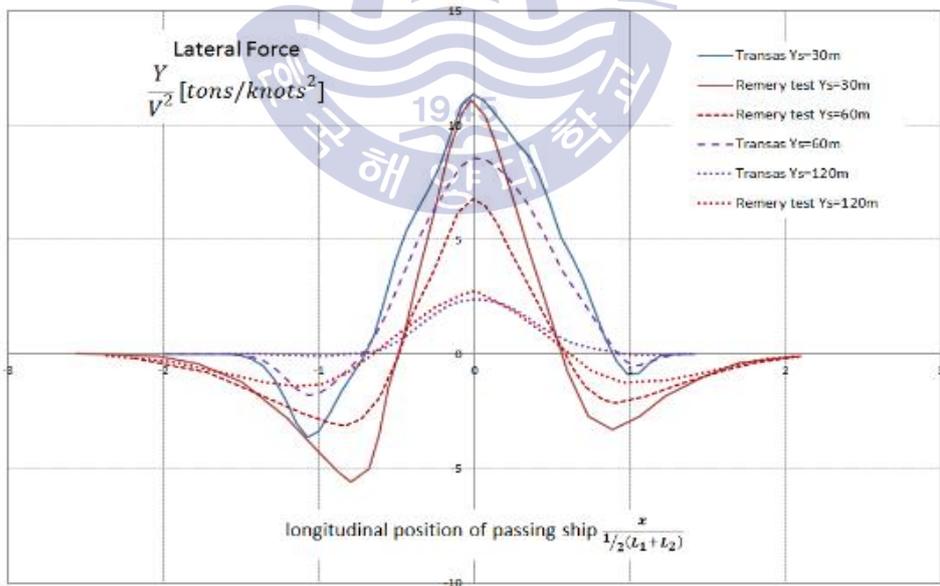


Fig. 3.10 sway force induced by passing ship (Ozersky and Rogozhina, 2016)

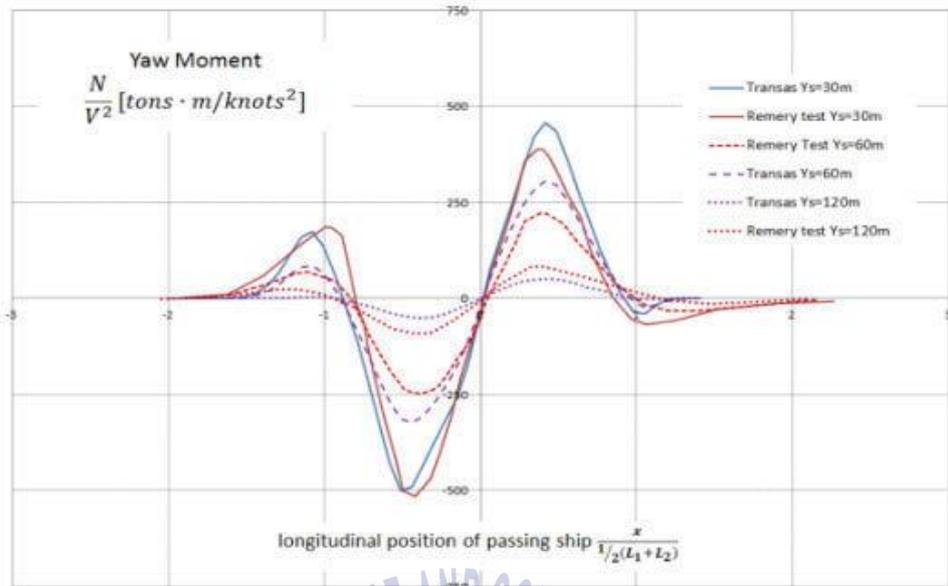


Fig. 3.11 Yaw moment induced by passing ship (Ozersky and Rogozhina, 2016)

2) 선박과 선박의 간섭 영향에 관한 수조 실험 결과

Ozersky and Rogozhina(2016)는 추월하는 경우에 대해 수조실험과 Transas 모델의 간섭력의 결과를 비교분석하여 모델의 정확성을 입증하였다. Table 3.4와 Fig. 3.12에서 보는 바와 같이, 유사한 크기의 컨테이너선과 카캐리어를 깊은 수심에서 추월시킨 결과, Transas의 수학기모델의 궤적이 수조실험의 궤적과 거의 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.4 Main particulars of the ship models and test condition (Ozersky and Rogozhina, 2016)

Model	Transas		Experiment	
	Container ship	Car carrier	TCH	CPT
∇ , m ³	32921.8	68217.4	0.96 10 ⁻³	1.73 10 ⁻³
Lpp, m	181.5	228.9	0.477	0.592
B, m	30	36.2	-0.094	0.12
T, m	8.5	10.88	0.0385	0.048
Initial x_c , m	155.07	-20.74	0.4	-0.05
Initial y_c , m	370.08	250.18	1.19	0.81
Course, deg	-7.42	-6.09	-9.57	-7.53
Speed, m/s	8.07	9.82	0.6	0.73
h/T	5.87	4.59	5.97	4.79
Fn	0.19	0.21	0.28	0.3
Fh	0.36	0.44	0.4	0.48



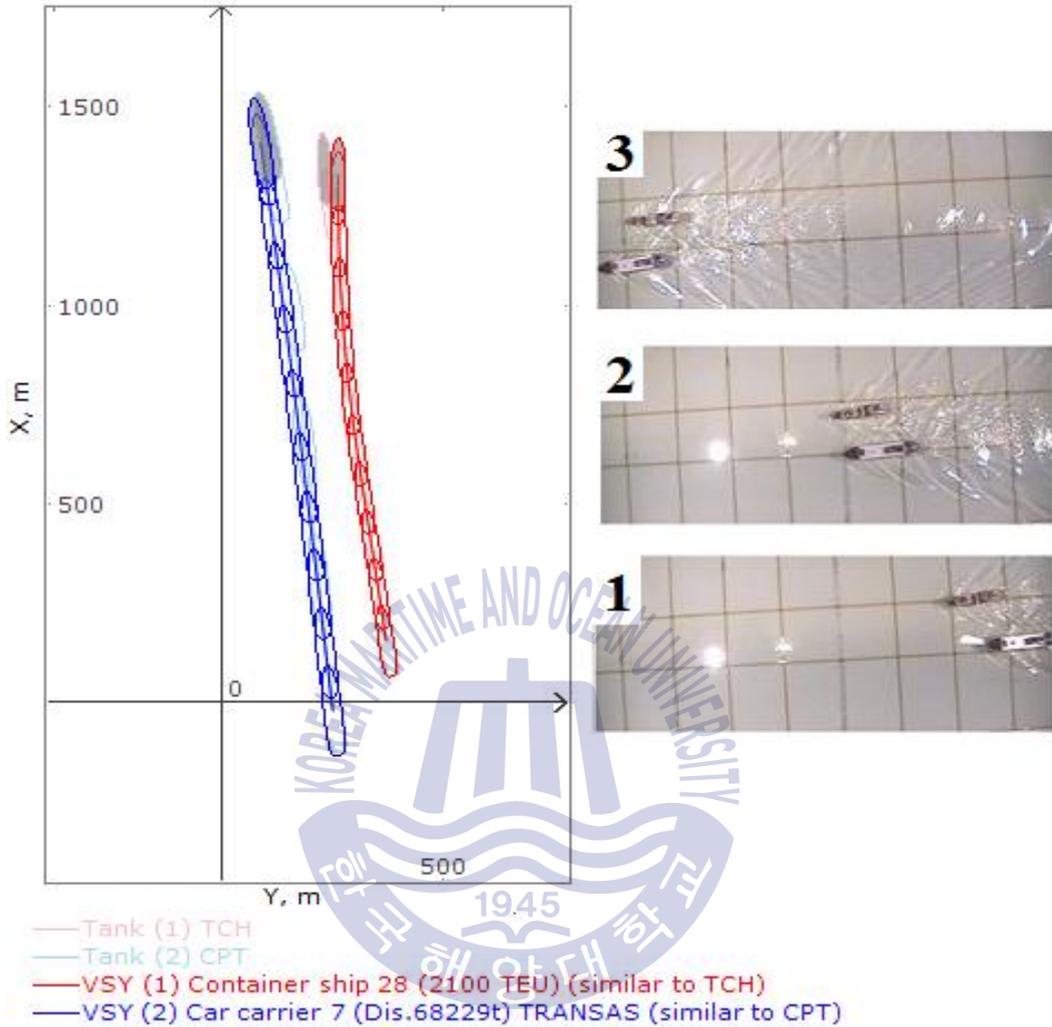


Fig. 3.12 Comparison of the simulated trajectories for overtaking manoeuvre against model basin measurements for similar models (Ozersky and Rogozhina, 2016)

3.4 간섭 상황별 이론계산과 시뮬레이터 모델의 정확도 검증

3.4.1 이론계산과 유사한 크기의 대표 선박 선정

1) 일본과 PIANC 이론계산의 대상선박 제원

Transas 모델과 이론계산의 정확도를 비교하기 위하여, 간섭의 상황별로 유사한 크기의 대

상선박을 선정하였다. Table 3.5는 일본과 PIANC에서 이론계산한 15종류의 선박의 제원과 계산에 사용된 기준 선박(general cargo ship)의 제원을 나타낸 것이다.

Table 3.5 Ship's particulars for theoretical calculation

No.	Ship Type	GT/DWT	L _{OA} [m]	L _{pp} [m]	Breadth [m]	Draft [m]	C _b
1	Cargo ship	5,000 GT	109.0	103.0	20.0	7.0	0.740
2	Small cargo ship	499 GT	63.8	60.4	11.2	4.2	0.540
3	Container ship (over panamax)	77,900 DWT	299.9	283.8	40.0	14.0	0.647
4	Container ship (panamax)	59,500 DWT	288.3	273.0	32.2	13.3	0.667
5	Very large bulk carrier	172,900 DWT	289.0	279.0	45.0	17.8	0.804
6	Large bulk carrier(Panamax)	74,000 DWT	225.0	216.0	32.3	13.5	0.838
7	Small bulk carrier	10,000 DWT	125.0	119.2	21.5	6.9	0.806
8	VLCC	280,000 DWT	333.0	316.0	60.0	20.4	0.794
9	Small tanker	6,000 DWT	100.6	92.0	20.0	7.0	0.797
10	Large pure car carrier	21,500 DWT	199.9	190.0	32.2	10.1	0.615
11	Pure car carrier	18,000 DWT	190.0	180.0	32.2	8.2	0.547
12	LNG carrier	69,500 DWT	283.0	270.0	44.8	10.8	0.700
13	Refrigerated cargo carrier	10,000 GT	152.0	144.0	23.5	7.0	0.753
14	Passenger ship (2 shafts, 2 propellers)	28,700 GT	192.8	160.0	24.7	6.6	0.603
15	Ferry boat (2 shafts, 1 propellers)	18,000 GT	192.9	181.0	29.4	6.7	0.555
	General cargo ship			155	26	8.7	0.698

2) 일본과 PIANC 이론계산의 선박 종류별 유체력 계수

Table 3.6은 이론계산에 사용된 15종류 선박의 유체력 계수를 나타내고 있다.

Table 3.6 Hydrodynamic coefficients of representative ships

No.	Ship Type	Y'_β	N'_β	Y'_δ	N'_δ
1	Cargo Ship	-1.688	-0.590	-0.0723	0.0362
2	Small Cargo Ship	-1.653	-0.597	-0.0881	0.0441
3	Container Ship (over Panamax)	-1.340	-0.457	-0.0720	0.0360
4	Container (Panamax)	-1.312	-0.0449	-0.0781	0.0391
5	Very Large Bulk Carrier	-1.612	-0.562	-0.0699	0.0350
6	Large Bulk carrier(Panamax)	-1.587	-0.553	-0.0696	0.0348
7	Small Bulk Carrier	-1.551	-0.519	-0.0773	0.0387
8	VLCC	-1.658	-0.564	-0.0880	0.0440
9	Small Tanker	-1.835	-0.640	-0.0811	0.0406
10	Large Pure Car Carrier	-1.417	-0.484	-0.0731	0.0365
11	Pure Car Carrier	-1.287	-0.427	-0.0753	0.0376
12	LNG carrier	-1.213	-0.382	-0.0762	0.0381
13	Refrigerated Cargo Carrier	-1.372	-0.451	-0.0705	0.0353
14	Passenger Ship (2 shafts, 2 propellers)	-1.214	-0.387	-0.0100	0.0500
15	Ferry Boat (2 shafts, 1 propellers)	-1.125	-0.354	-0.0875	0.0437

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

Y'_β : 선체가 표류각 β 에 의해 사항(斜航)할 때의 선체로부터 받는 횡방향의 반력계수 Y_β 의 무차원수

N'_β : 선체가 표류각 β 에 의해 사항(斜航)할 때의 선체로부터 받는 횡두반력모멘트 계수 N_β 의 무차원수

Y'_δ : 타를 δ 의 경우에 놓았을 때 타로부터 발생하는 횡력계수 Y_δ 의 무차원수

N'_δ : 타를 δ 의 경우에 놓았을 때 타로부터 발생하는 타력모멘트계수 N_δ 의 무차원수

3) 이론계산의 대상선박과 유사한 시뮬레이션 모델 비교

Table 3.7은 Tracas 모델의 정확도를 검증하기 위하여 일본과 PIANC의 이론계산과 유사한 모델을 선정하여 비교한 것이다. 15종류의 선박 중에서 이론계산에 사용된 선박과 유사한 크기의 시뮬레이터 모델은 5종류로 제한되었다.

Table 3.7 Comparisons of selected models for verification

	The ship models	LOA [m]	Breadth [m]	Draft [m]
이론계산	Container (O.P.)	299.9	40	14
	Container (P.)	288.3	32.2	13.3
	Bulk (P.)	225	32.3	13.5
	Car carrier	199.9	32.2	10.1
	LNG carrier	283	44.8	10.8
시뮬레이션	M CNTR 5 (O.P.)	299	37.1	13
	CNTR 19 (P.)	289	32.2	12
	BLK 7 (P.)	230	32	12
	CCR 6	199.1	32.26	11.02
	LNG 4	290	44.7	11.9

3.4.2 측벽 통과시 시뮬레이터 모델의 정확도 검증

1) 대상선박 선정 및 실험조건 설정

선박이 측벽을 근접 통항하는 경우(ship-bank interaction)에 대해 실시한 대상선박과 실험조건을 Table 3.8에서 나타내었다. 좌표계를 도시한 Fig. 3.13의 η 는 선박의 중심선에서 측벽까지의 수평거리를 의미하며, ξ 는 선수에서 측벽의 끝단까지의 종거리를 의미한다. 수심 조건은 $h/T=1.2$, 선박의 속력은 7knots로 실시하였다. 타각계산을 위해 $0.2L\sim 0.4L$ 의 횡거리를 두고 시뮬레이션을 실시하여 발생한 간섭력의 피크값과 유체력계수를 이용하여 타각 범위를 산출하고, 해당 타각에 대한 횡거리를 역으로 계산한다.

Table 3.8 Simulation scenarios for verification of ship bank interaction

Model	LOA [m]	Breadth [m]	Draft [m]	Depth [m]	η [m]	η/L
MCNTR 5	299	37.1	13	15.6	59.8	0.2
					89.7	0.3
					119.6	0.4
CNTR 19	289	32.2	12	13.2	57.8	0.2
					87.0	0.3
					115.6	0.4
BLK 7 panamax	230	32	12	14.4	46.0	0.2
					69.0	0.3
					92.0	0.4
CCR 6	199.1	32.26	11.02	13.2	39.8	0.2
					59.7	0.3
					79.6	0.4
LNG 4	289.9	44.7	11.9	14.28	58.0	0.2
					87.0	0.3
					116.0	0.4

2) 타각 산정방법

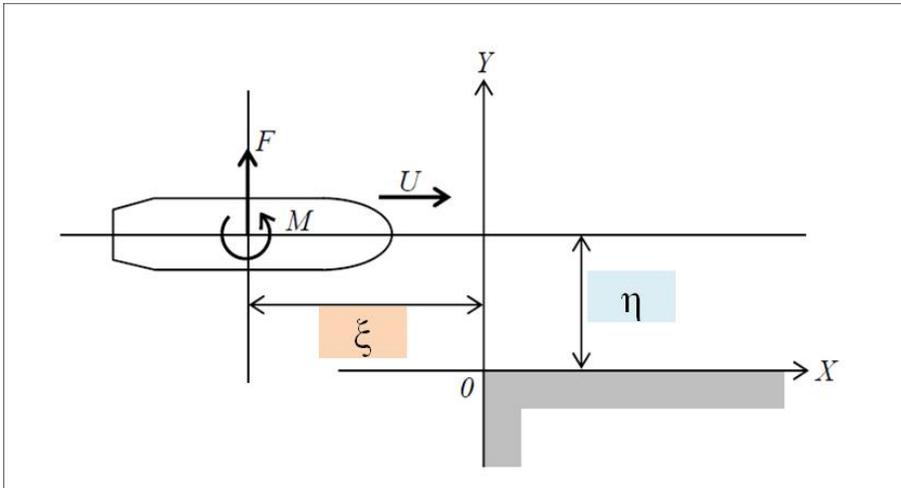


Fig. 3.13 Coordinates of ship bank interaction (Andou, K. et al., 2012)

타각 δ 와 표류각 β 의 조건으로 측벽을 근접통항하는 선박은 Fig. 3.13의 좌표계에서는 식 (26)~(27)과 같이 평형상태의 운동방정식을 나타낼 수 있다. 운동방정식을 이용하여 식 (28)~(29)와 같이 타각과 표류각의 산정이 가능하다(Andou, K. et al., 2012).

$$-C_{Fb} + Y'_\beta \beta + Y'_\delta \delta = 0 \quad (26)$$

$$-C_{Mb} + N'_\beta \beta + N'_\delta \delta = 0 \quad (27)$$

$$\delta = \frac{C_{Mb} Y'_\beta - C_{Fb} N'_\beta}{Y'_\beta N'_\delta - Y'_\delta N'_\beta} \quad (28)$$

$$\beta = -\frac{C_{Mb} Y'_\beta - C_{Fb} N'_\beta}{Y'_\beta N'_\delta - Y'_\delta N'_\beta} \quad (29)$$

δ : 타각(rad), β : 표류각(rad)

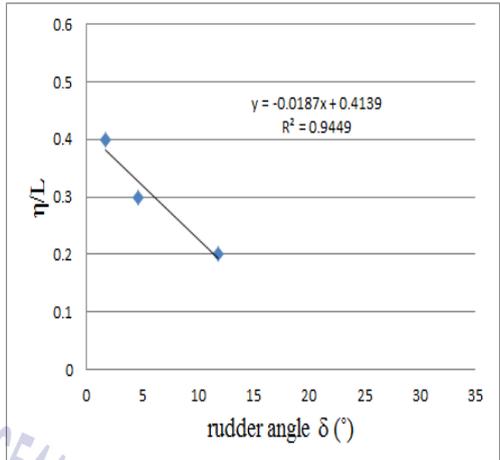
3) 타각계산 - Container over Panamax(MCNTR 5)

η/L 의 0.2~0.4에 해당하는 횡력과 회두모멘트의 피크값과 유체력계수를 구하고, 식 (28)을 이용하여 타각을 구할 수 있다. 이론계산에서는 5도에 해당하는 횡거리를 산출하였다. Table

3.9는 파나막스급 이상의 컨테이너선의 타각과 횡거리를 구하는 방법을 나타낸 것이다.

Table 3.9 Rudder calculation of MCNTR 5

CNTR 19	η/L		
	0.2	0.3	0.4
$C_{YINT}(\max)$	0.045692	0.018331	0.007020
$C_{NINT}(\max)$	0.028123	0.011206	0.004238
Y'_{β}	-1.34	-1.34	-1.34
N'_{β}	-0.457	-0.457	-0.457
Y'_{δ}	-0.072	-0.072	-0.072
N'_{δ}	0.036	0.036	0.036
타각(rad)	0.207	0.0818	0.0304
타각 (degree)	11.86	4.68	1.74

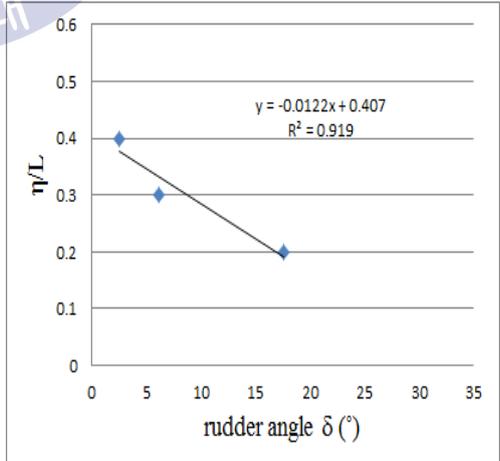


4) 타각계산 - Container Panamax(CNTR 19)

동일한 방법으로 Table 3.10은 파나막스급 컨테이너선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.10 Rudder calculation of CNTR 19

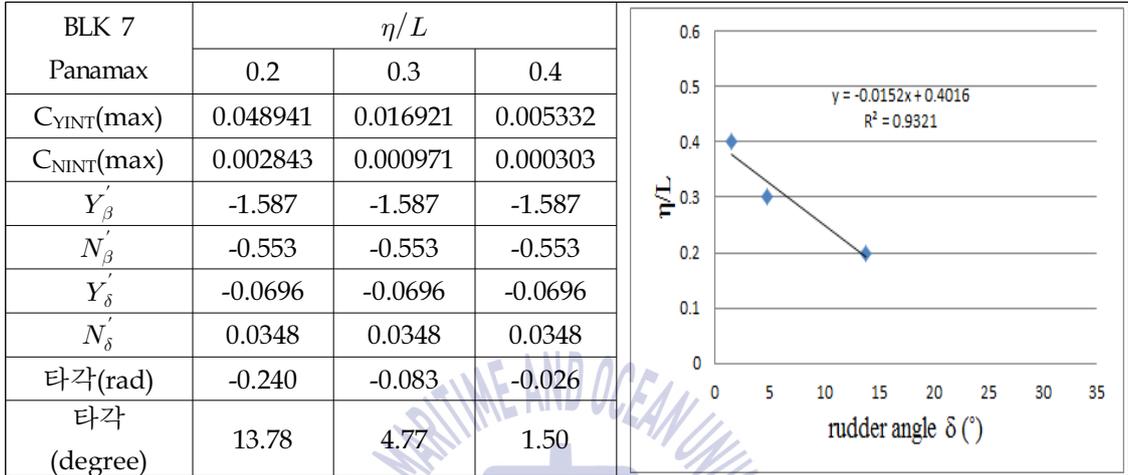
CNTR 19	η/L		
	0.2	0.3	0.4
$C_{YINT}(\max)$	0.0223705	0.008005	0.003303
$C_{NINT}(\max)$	0.013601	0.00479	0.00196
Y'_{β}	-1.312	-1.312	-1.312
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.307	0.108	0.044
타각 (degree)	17.60	6.19	2.53



5) 타각계산 - 대형벌크(BLK 7 Panamax)

동일한 방법으로 Table 3.11은 파나마스급 벌크선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

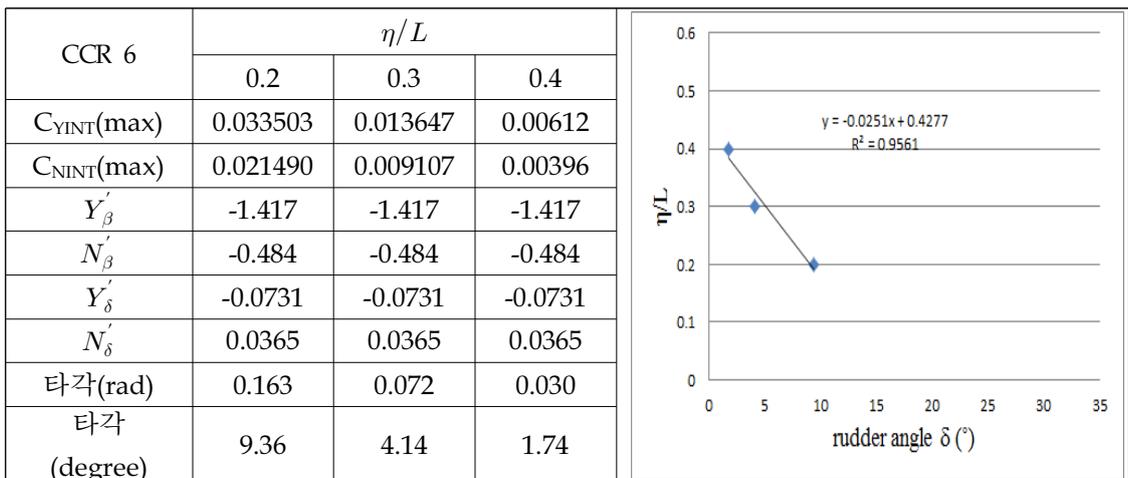
Table 3.11 Rudder calculation of BLK 7 Panamax



6) 타각계산 - 대형카캐리어(CCR 6)

동일한 방법으로 Table 3.12는 카캐리어의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.12 Rudder calculation of CCR 6



7) 타각계산 - LNG선(LNG 4)

동일한 방법으로 Table 3.13은 LNG선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.13 Rudder calculation of LNG 4

LNG 4	η/L		
	0.2	0.3	0.4
$C_{YINT}(\max)$	0.046488	0.01852	0.00713
$C_{NINT}(\max)$	0.02785	0.0109	0.00418
Y'_{β}	-1.213	-1.213	-1.213
N'_{β}	-0.382	-0.382	-0.382
Y'_{δ}	-0.0762	-0.0762	-0.0762
N'_{δ}	0.0381	0.0381	0.0381
타각(rad)	0.212	0.082	0.031
타각 (degree)	12.19	4.74	1.78

8) 오차분석

선박이 측벽을 근접통항하는 경우에 대해서, 이론계산과 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과를 Table 3.14에서 비교하였다. 여기서 S는 횡거리를 미터로 표시한 것이다. 이론계산의 횡거리 범위는 $0.250 < \eta/L < 0.270$ 과 $34 < S [m] < 56$ 이며, 시뮬레이션으로 계산한 횡거리 범위는 $0.280 < \eta/L < 0.32$ 와 $24 < S [m] < 58$ 으로 나타났다. Table 3.15는 이론계산과 시뮬레이션의 오차를 비교분석한 것이다. 선박에 따라 오차의 크기가 다르지만, 5종류 선박의 오차의 평균은 10.16%를 보여준다.

Table 3.14 Calculation comparison of ship bank interaction

Ship Type	η/L		S [m]	
	이론계산	시뮬레이션	이론계산	시뮬레이션
Container (over Panamax)	0.266	0.296	55.5	51.3
Container (Panamax)	0.261	0.31	55.2	57.5
Bulk carrier (Panamax)	0.269	0.298	41.9	36.4
Car carrier	0.265	0.283	34.3	24.2
LNG carrier	0.26	0.297	47.7	41.3

Table 3.15 Error analysis of ship bank interaction

Ship Type	이론계산 (A)	시뮬레이션 (B)	$(A-B/A)*100$	오차 (%)
Container (over Panamax)	55.5	58.6996	-5.76505	5.7
Container (Panamax)	55.2	67.794	-22.8152	22.8
Bulk carrier (Panamax)	41.9	41.26	1.527446	1.5
Car carrier	34.3	27.90802	18.63551	18.6
LNG carrier	47.7	48.79275	-2.29088	2.2
평균				10.16

3.4.3 마주치며 통과시 시뮬레이터 모델의 정확도 검증

1) 대상선박 선정 및 실험조건 설정

선박이 다른 선박을 마주치며 통과하는 경우(head-on encountering)에 대해 실시한 대상선박과 실험조건을 Table 3.16에서 나타내었다. 좌표계를 도시한 Fig. 3.14의 η 는 두 선박의 중심선의 수평거리를 의미하며, ξ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리를 의미한다. 수심 조건은 $h/T=1.3$, 선박의 속력은 12knots로 실시하였다. 타각계산을 위해 $0.5L\sim 0.7L$ 의 횡거리를 두고 시뮬레이션을 실시하여 발생한 간섭력의 피크값과 유체력계수를 이용하여 타각 범위를 산출하고, 해당 타각에 대한 횡거리를 역으로 계산한다.

Table 3.16 Simulation scenarios for verification of head-on encountering

Model	LOA [m]	Breadth [m]	Draft [m]	Depth [m]	η [m]	η/L
MCNTR 5	299	37.1	13	16.9	149.5	0.5
					173.4	0.6
					202.3	0.7
CNTR 19	289	32.2	12	15.6	144.95	0.5
					179.4	0.6
					209.3	0.7
BLK 7 Panamax	230	32	12	15.6	115	0.5
					138	0.6
					161	0.7
CCR 6	199.1	32.26	11.02	14.33	99.55	0.5
					119.5	0.6
					139.4	0.7
LNG 4	289.9	44.7	11.9	15.47	144.95	0.5
					173.94	0.6
					202.9	0.7

2) 타각 산정방법

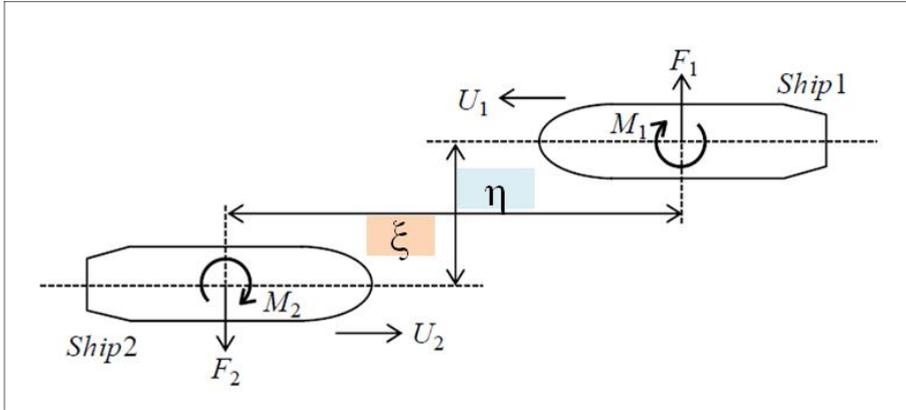


Fig. 3.14 Coordinates of Head-on encountering (Andou, K. et al., 2012)

타각 δ 와 표류각 β 의 조건으로 두 선박이 마주치는 경우에 있는 선박은 Fig. 3.14의 좌표계에서 식 (30)~(32)와 같이 평형상태의 운동방정식을 나타낼 수 있다. 선박의 측벽을 통과하는 경우와 달리, 마주치는 경우에는 표류각을 0으로 하고, 식 (33)을 이용하여 타각을 산정하였다(Andou, K. et al., 2012).

$$-C_{F_c} + Y'_\beta \beta + Y'_\delta \delta = 0 \quad (30)$$

$$-C_{M_c} + N'_\beta \beta + N'_\delta \delta = 0 \quad (31)$$

$$-C_{M_c} + N'_\delta \delta = 0 \quad (32)$$

$$\delta = \frac{C_{M_c}}{N'_\delta} \quad (33)$$

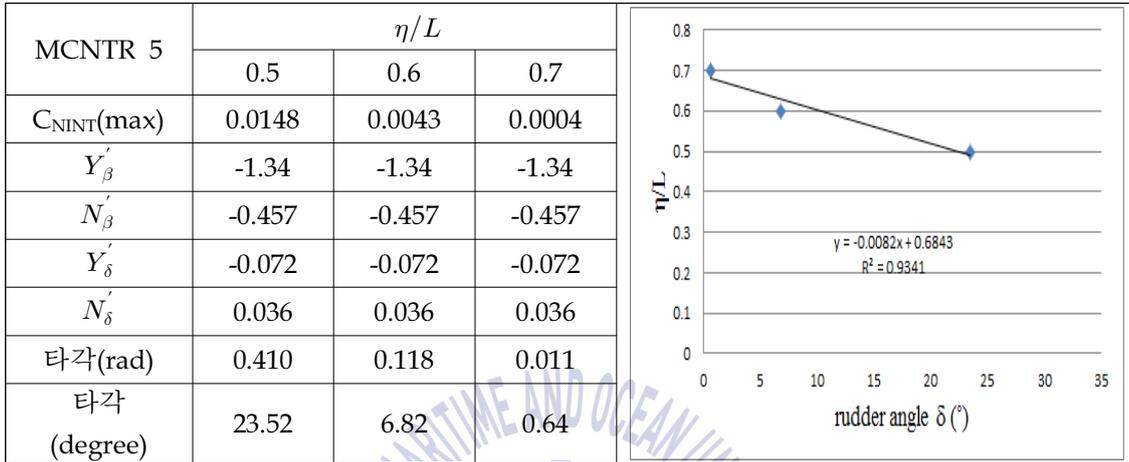
δ : 타각(rad), β : 표류각(rad)

3) 타각계산 - 타각 산정방법(MCNTR 5)

η/L 의 0.5~0.7에 해당하는 회두모멘트의 피크값과 유체력계수를 구하고, 식 (33)을 이용하여 타각을 구할 수 있다. 이론계산에서는 15도에 해당하는 횡거리를 산출하였다.

Table 3.17은 파나막스급 이상의 컨테이너선의 타각과 횡거리를 구하는 방법을 나타낸 것이다.

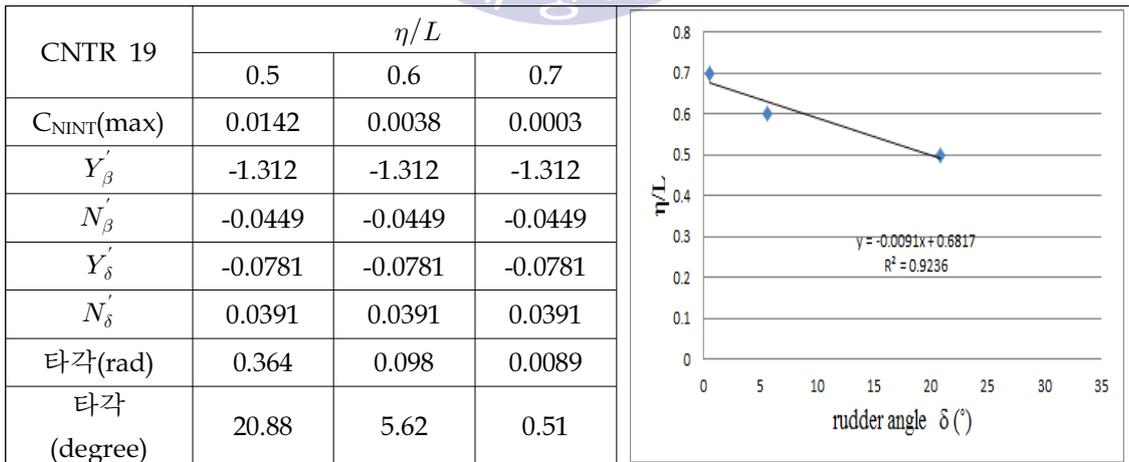
Table 3.17 Rudder calculation of MCNTR 5



4) 타각계산 - Container Panamax(CNTR 19)

동일한 방법으로 Table 3.18은 파나막스급 컨테이너선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.18 Rudder calculation of CNTR 19



5) 타각계산 - 대형벌크(BLK 7 panamax)

동일한 방법으로 Table 3.19는 파나막스급 벌크선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.19 Rudder calculation of BLK 7 Panamax

BLK 7 Panamax	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT(max)}$	0.0115	0.0027	0.0001
Y'_β	-1.587	-1.587	-1.587
N'_β	-0.553	-0.553	-0.553
Y'_δ	-0.0696	-0.0696	-0.0696
N'_δ	0.0348	0.0348	0.0348
타각(rad)	0.330	0.077	0.004
타각 (degree)	18.94	4.42	0.23

6) 타각계산 - 대형카캐리어(CCR 6)

동일한 방법으로 Table 3.20은 카캐리어의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.20 Rudder calculation of CCR 6

CCR 6	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT(max)}$	0.0210	0.0060	0.0008
Y'_β	-1.417	-1.417	-1.417
N'_β	-0.484	-0.484	-0.484
Y'_δ	-0.0731	-0.0731	-0.0731
N'_δ	0.0365	0.0365	0.0365
타각(rad)	0.574	0.165	0.022
타각 (degree)	32.91	9.46	1.27

7) 타각계산 - LNG선(LNG 4)

동일한 방법으로 Table 3.21은 LNG선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.21 Rudder calculation of LNG 4

LNG 4	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT}(\max)$	0.0176	0.0043	0.0003
Y'_β	-1.213	-1.213	-1.213
N'_β	-0.382	-0.382	-0.382
Y'_δ	-0.0762	-0.0762	-0.0762
N'_δ	0.0381	0.0381	0.0381
타각(rad)	0.460	0.113	0.007
타각 (degree)	26.41	6.48	0.41

8) 오차분석

선박이 다른 선박과 마주치는 경우에 대해서, 이론계산과 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과를 Table 3.22에서 비교하였다. 여기서 S는 횡거리를 미터로 표시한 것이다. 이론계산의 횡거리 범위는 $0.50 < \eta/L < 0.52$ 와 $64 < S [m] < 106$ 이며, 시뮬레이션으로 계산한 횡거리 범위는 $0.53 < \eta/L < 0.60$ 과 $70 < S [m] < 110$ 으로 나타났다. Table 3.23은 이론계산과 시뮬레이션의 오차를 비교분석한 것이다. 대상선박 모두 오차의 절대값이 비슷한 것을 알 수 있고, 5종류의 선박의 오차의 평균은 7.33%를 보였다.

Table 3.22 Calculation comparison of head-on encountering

Ship Type	η/L		S [m]	
	이론계산	시뮬레이션	이론계산	시뮬레이션
Container (over Panamax)	0.511	0.5613	105	112.2
Container (Panamax)	0.498	0.5452	103.6	109.3
Bulk carrier (Panamax)	0.516	0.5308	79	74.1
Car carrier	0.51	0.5968	64.6	70.5
LNG carrier	0.502	0.573	90.7	99.1

Table 3.23 Error analysis of Head-on encountering

Ship Type	이론계산 (A)	시뮬레이션 (B)	$(A-B/A)*100$	오차 (%)
Container (over Panamax)	105	112.2	-6.83686	6.83
Container (Panamax)	103.6	109.3	-5.46602	5.4
Bulk carrier (Panamax)	79	74.1	6.222785	6.22
Car carrier	64.6	70.5	-9.07567	9
LNG carrier	90.7	99.1	-9.22018	9.2
평균				7.33

3.4.4 추월 통과시 시뮬레이터 모델의 정확도 검증

1) 대상선박 선정 및 실험조건 설정

선박이 다른 선박을 추월하는 경우(two ships in overtaking)에 대해 실시한 대상선박과 실험조건을 Table 3.24에서 나타내었다. 좌표계를 도시한 Fig. 3.15의 η 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리를 의미하며, ξ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리를 의미한다. 수심 조건은 $h/T=1.2$ 추월하는 선박의 속력은 12knots, 피추월선의 속력은 8knots로 실시하였다. 타각계산을 위해 0.5L~0.7L의 횡거리를 두고 시뮬레이션을 실시하여 발생한 간섭력의 피크값과 유체력계수를 이용하여 타각 범위를 산출하고, 해당 타각에 대한 횡거리를 역으로 계산한다.

Table 3.24 Simulation scenarios for verification of overtaking

Model	L _{OA} [m]	Breadth [m]	Draft [m]	Depth [m]	η [m]	η/L
MCNTR 5	299	37.1	13	15.6	149.5	0.5
					179.4	0.6
					209.3	0.7
CNTR 19	289	32.2	12.5	14.4	144.95	0.5
					173.4	0.6
					202.3	0.7
BLK 7 Panamax	230	32	12	14.4	115	0.5
					138	0.6
					161	0.7
CCR 6	199.1	32.26	11.02	13.2	99.55	0.5
					119.46	0.6
					139.37	0.7
LNG 4	289.9	44.7	11.9	14.28	144.95	0.5
					173.94	0.6
					202.93	0.7

2) 타각 산정방법

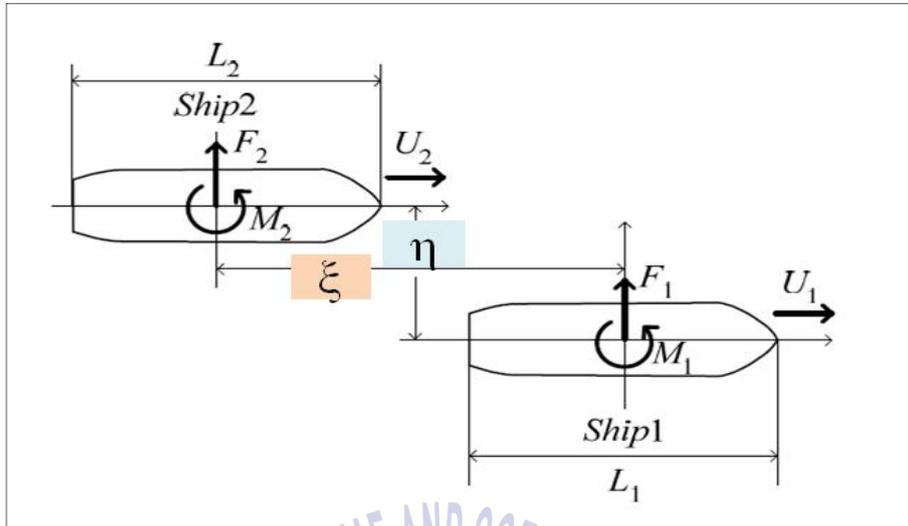


Fig. 3.15 Coordinates of overtaking (Andou, K. et al., 2012)

타각 δ 와 표류각 β 의 조건으로 추월하는 상태에 있는 선박은 Fig. 3.11의 좌표계에서 식 (34)~(36)와 같이 평형상태의 운동방정식을 나타낼 수 있다. 마주치는 경우와 마찬가지로 표류각을 0으로 하고, 식 (37)을 이용하여 타각을 산정하였다(Andou, K. et al., 2012).

$$-C_{Fov} + Y'_{\beta}\beta + Y'_{\delta}\delta = 0 \quad (34)$$

$$-C_{Mov} + N'_{\beta}\beta + N'_{\delta}\delta = 0 \quad (35)$$

$$-C_{Mov} + N'_{\delta}\delta = 0 \quad (36)$$

$$\delta = \frac{C_{Mov}}{N'_{\delta}} \quad (37)$$

δ : 타각(rad), β : 표류각(rad)

3) 타각계산 - 타각 산정방법(MCNTR 5)

η/L 의 0.5~0.7에 해당하는 회두모멘트의 피크값과 유체력계수를 구하고, 식 (37)을 이용하여 타각을 구할 수 있다. 이론계산에서는 5도에 해당하는 횡거리를 산출하였다. Table

3.25는 파나막스급 이상의 컨테이너선의 타각과 횡거리를 구하는 방법을 나타낸 것이다.

Table 3.25 Rudder calculation of MCNTR 5

MCNTR 5	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT}(\max)$	0.0135	0.0039	0.00031
Y'_{β}	-1.34	-1.34	-1.34
N'_{β}	-0.457	-0.457	-0.457
Y'_{δ}	-0.072	-0.072	-0.072
N'_{δ}	0.036	0.036	0.036
타각(rad)	0.375	0.1083	0.0086
타각 (degree)	21.4875	6.2075	0.493

4) 타각계산 - Container Panamax(CNTR 19)

동일한 방법으로 Table 3.26은 파나막스급 컨테이너선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.26 Rudder calculation of CNTR 19

CNTR 19	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT}(\max)$	0.0189	0.0038	0.0003
Y'_{β}	-1.312	-1.312	-1.312
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.4843	0.098	0.008
타각 (degree)	27.75	5.67	0.45

5) 타각계산 - 대형벌크(BLK 7 Panamax)

동일한 방법으로 Table 3.27은 파나마스급 벌크선의 타각 범위와 횡거리를 산출하였다.

Table 3.27 Rudder calculation of BLK 7 Panamax

BLK 7 Panamax	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT(max)}$	-0.0076	-0.0021	-0.000085
Y'_β	-1.587	-1.587	-1.587
N'_β	-0.553	-0.553	-0.553
Y'_δ	-0.0696	-0.0696	-0.0696
N'_δ	0.0348	0.0348	0.0348
타각(rad)	-0.2183	-0.0603	-0.0024
타각 (degree)	12.513	3.45	0.13

6) 타각계산 - 대형카캐리어(CCR 6)

동일한 방법으로 Table 3.28은 카캐리어의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.28 Rudder calculation of CCR 6

CCR 6	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT(max)}$	-0.01491	-0.00418	-0.0004
Y'_β	-1.417	-1.417	-1.417
N'_β	-0.484	-0.484	-0.484
Y'_δ	-0.0731	-0.0731	-0.0731
N'_δ	0.0365	0.0365	0.0365
타각(rad)	-0.4101	-0.1145	-0.0113
타각 (degree)	23.49	6.56	0.65

7) 타각계산 - LNG선(LNG 4)

동일한 방법으로 Table 3.29는 LNG선의 타각과 횡거리를 산출하였다.

Table 3.29 Rudder calculation of LNG 4

LNG 4	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT(max)}$	-0.0158	-0.0041	0.0003
Y'_{β}	-1.213	-1.213	-1.213
N'_{β}	-0.382	-0.382	-0.382
Y'_{δ}	-0.0762	-0.0762	-0.0762
N'_{δ}	0.0381	0.0381	0.0381
타각(rad)	-0.4146	-0.1076	0.0078
타각 (degree)	23.76	6.16	0.45

8) 오차분석

선박이 다른 선박을 추월하는 경우에 대해서, 이론계산과 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과를 Table 3.30에서 비교하였다. 여기서 S는 횡거리를 미터로 표시한 것이다. 이론계산의 횡거리 범위는 $0.71 < \eta/L < 0.75$ 와 $106 < S [m] < 170$ 이며, 시뮬레이션으로 계산한 횡거리 범위는 $0.60 < \eta/L < 0.65$ 와 $95 < S [m] < 155$ 으로 나타났다. Table 3.31은 이론계산과 시뮬레이션의 오차를 비교분석한 것이다. BLK Panamax의 선박을 제외한 4척의 선박은 10% 이하를 유지하였고, 5종류의 선박의 오차의 평균은 9.47%를 보였다.

Table 3.30 Calculation comparison of overtaking

Ship Type	η/L		S [m]	
	이론계산	시뮬레이션	이론계산	시뮬레이션
Container (over Panamax)	0.74	0.64	169.1	154.0
Container (Panamax)	0.72	0.64	163.2	153.0
Bulk carrier (Panamax)	0.74	0.61	128.4	108.3
Car carrier	0.73	0.64	106.9	95.8
LNG carrier	0.72	0.64	150.1	140.8

Table 3.31 Error analysis of overtaking

Ship Type	이론계산 (A)	시뮬레이션 (B)	$(A-B/A)*100$ = 오차 (%)
Container (over Panamax)	169.1	154.0	8.917327
Container (Panamax)	163.1	153.0	6.180196
Bulk carrier (Panamax)	128.4	108.3	15.65421
Car carrier	106.9	95.8	10.41949
LNG carrier	150.1	140.8	6.171885
평균			9.47

3.5 시뮬레이터의 간섭력 추정기술의 검증에 관한 종합분석

선박조종시뮬레이터의 간섭력 추정 기술의 정확도를 검증하기 위하여 일본과 PIANC의 이론계산과 유사한 선박조종시뮬레이터의 선박모델을 선정하였다. 15종류의 선박 중에서 이론계산에 사용된 선박과 유사한 크기의 시뮬레이터 모델은 5종류로 제한되었다. 선박이 측벽을 근접 통항하는 상황(ship-bank interaction)은 $h/T=1.2$ 의 해역에서 선박의 속력을 7knots로 실시하였다. 타각계산을 위해 0.2L~0.4L의 횡거리를 두고 시뮬레이션을 수행하여 발생한 간섭력의 피크값과 유체력계수를 이용하여 타각 범위를 산출하고, 해당 타각 5도에 대한 횡거리를 역으로 계산하였다.

이론계산과 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과, 이론계산의 횡거리는 $34 < S [m] < 56$ 이며, 시뮬레이션으로 계산한 횡거리는 $24 < S [m] < 58$ 으로 나타났다. 이론계산과 시뮬레이션의 오차를 비교한 결과, 5종류 선박의 오차의 평균은 10.16%로 산정되었다.

선박이 다른 선박을 마주치며 통과하는 경우(head-on encountering)는 $h/T=1.3$ 의 해역에서 두 선박의 속력을 12knots로 실시하였다. 타각계산을 위해 0.5L~0.7L의 횡거리를 두고 시뮬레이션을 수행하여 발생한 간섭력의 피크값과 유체력계수를 이용하여 타각 범위를 산출하고, 해당 타각 15도에 대한 횡거리를 역으로 계산하였다. 이론계산과 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과, 이론계산의 횡거리는 $64 < S [m] < 106$ 이며, 시뮬레이션으로 계산한 횡거리는 $70 < S [m] < 110$ 으로 나타났다. 이론계산과 시뮬레이션의 오차를 비교한 결과, 5종류의 선박의 오차의 평균은 7.33%를 보였다.

선박이 다른 선박을 추월하는 경우(two ships in overtaking)는 $h/T=1.2$ 의 해역에서 추월선의 속력은 12knots, 피추월선의 속력은 8knots로 실시하였다. 타각계산을 위해 0.5L~0.7L의 횡거리를 두고 시뮬레이션을 실시하여 발생한 간섭력의 피크값과 유체력계수를 이용하여 타각 범위를 산출하고, 해당 타각 5도에 대한 횡거리를 역으로 계산하였다. 이론계산과 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과, 이론계산의 횡거리는 $106 < S [m] < 170$ 이며, 시뮬레이션으로 계산한 횡거리 범위는 $95 < S [m] < 155$ 으로 나타났다. 벌크선을 제외한 4척의 선박은 10% 이하를 유지하였고, 5종류의 선박의 오차의 평균은 9.47%를 보였다.

Table 3.32는 3가지 간섭 상황에서 5종류의 비슷한 선박을 대상으로 이론계산의 수치와 시뮬레이션을 이용하여 계산한 수치의 평균 오차를 정리한 것이다. Table 3.32에서 보는 바와 같이 선박조종시뮬레이터의 간섭력 추정기술은 최소 7.33%, 최대 10.16%로 평균 8.99%를 보

였다. 일본의 MLIT에 수행한 방법과 비교한 결과 10% 이내의 오차를 가진 것을 확인하였다.

Table 3.32 Final error analysis of hydrodynamic interaction in simulator

Hydrodynamic interaction situation	수심/흘수, 보침타각	평균 오차 (%)
Ship-bank interaction	$h/T=1.2, \delta=5^\circ$	10.16
Head-on encountering	$h/T=1.3, \delta=15^\circ$	7.33
Overtaking	$h/T=1.2, \delta=5^\circ$	9.47

이와 같이 검증된 선박조종시뮬레이터를 활용하여 선박이 계류선을 통과하는 상황, 마주치며 통과하는 상황, 추월하는 상황에서 다양한 선박과 요소별로 간섭력을 도출하고 타각계산을 실시하여 안전통항거리를 도출하고자 한다.



제 4 장 시뮬레이션을 이용한 상황별 안전통항거리 분석

4.1 안전통항거리 산정 순서

일본의 MLIT에서는 15종류의 선박에 대해서 상황별로 간섭력을 고려한 항로폭을 산출하였다. 실제 해상에서는 서로 다른 조건의 상태에서 통항하게 되므로, 본 연구에서는 서로 다른 크기, 종류의 선박을 대상으로 속력과 수심, 흘수의 크기에 따른 안전통항거리를 산출하였다.

Fig. 4.1과 같이 간섭상황별 안전통항거리를 산출하기 위해서 선박조종시뮬레이터를 이용하여 간섭력을 도출하고 일본의 MLIT에서 수행한 이론계산의 방법으로 보침타각 10도에 해당하는 안전통항거리를 산정하였다. 먼저 간섭의 상황별로 대상선박을 선정하고 실험조건을 설정하였다. 선박조종시뮬레이터를 수행하여 도출된 간섭력 유차원 계수를 무차원화하여 MLIT에서 수행한 평형방정식을 이용하여 타각계산을 수행하였다. 본 연구에서는 계류선을 통과하는 상황, 마주치며 통과하는 상황, 추월 통과하는 상황에서 회두모멘트가 발생하였을 때 10도로 정침(course keeping)이 가능한 거리를 안전통항거리로 도출하였다. 또한, 외력이 없는 조건에서 실시하였고, 두 선박이 평행하게 통항하며 표류각이 없는 조건을 가정하였다.

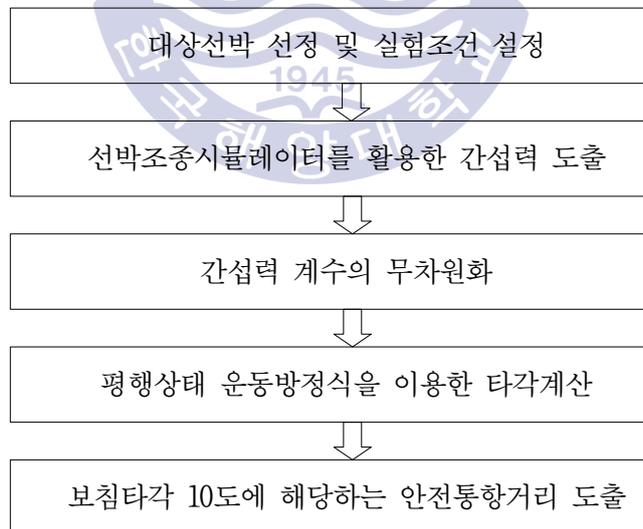


Fig. 4.1 Research flow for distance of safe passing considering ship to ship interaction (Andou, K. et al., 2012)

4.1.1 시뮬레이션 대상선박

Table 4.1~4.4는 시뮬레이션을 수행한 전체 대상선박의 제원을 정리한 것으로 Table 4.1은 속력별 안전통항거리를 도출하기 위해 기준선인 파나막스급 컨테이너선과 상대선인 4척의 선박의 제원이며, Table 4.2와 Table 4.3은 길이별 안전통항거리를 도출하기 위해 파나막스급 컨테이너선보다 크고 작은 다양한 종류의 선박을 선정된 것이다. Table 4.4는 파나막스급 컨테이너선보다 흘수가 큰 선박을 선정된 것으로 초대형선 컨테이너선과 VLCC의 제원을 소개하였다. 여기서 CNTR은 container ship, BLK는 bulk carrier, PCF는 passenger car ferry, FTS는 fishery training ship을 의미하고, OT는 oil tanker, PCS는 passenger cruise ship, ITB는 integrated tug barge, RRPF는 ro-ro passenger ferry를 의미한다.

Table 4.1 Main particulars of different ships in size and type

Designation	Own ship(L_1)	Target ships(L_2)			
		LNG 6	BLK 7	PCF 2	FTS 1
Model no.	CNTR 19	LNG 6	BLK 7	PCF 2	FTS 1
Ship type	Container ship	LNG	Bulk carrier Panamax	Passenger car ferry	Fishery training ship
L_1/L_2	-	0.80	1.26	1.65	3.11
Disp. [ton]	66,700	171,300	69,580	20,300	3,300
DWT [ton]	59,500	125,700	50,100	3,832	-100
L_{OA} [m]	289	360	230	175.4	93
L_{pp} [m]	273	346	218	154.2	83
Breadth [m]	32.2	55	32	31.5	14.9
Draft [m]	12	12	12	6.65	5.22
Image					

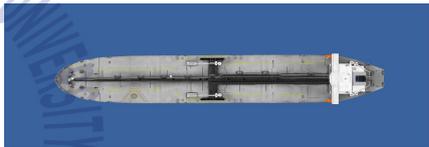
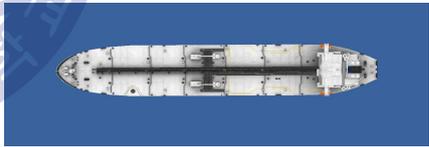
Table 4.2 Main particulars of the ship models for simulation of length ratio
 ($0.7 < L_1/L_2 < 1.2$, $T_1 > T_2$)

Designation	Target ships(L ₂)			
	CNTR 8	PCS 6	LNG 4	OT 3
Model no.	CNTR 8	PCS 6	LNG 4	OT 3
Ship type	Container ship	Passenger cruise ship	LNG	Oil tanker
L_1/L_2	0.76	0.80	1.19	1.19
Disp. [ton]	166,397	71,222	110,710	67,850
DWT [ton]	153,500	11020	72,300	59,708
L _{OA} [m]	382	350	289.9	242.8
L _{pp} [m]	366	315	276	228
Breadth [m]	54.2	38	44.7	32.2
Draft [m]	11	8.5	11.9	11
Image				
	CNTR 8		LNG 4	
				
	PCS 6		CCR 6	

Table 4.3 Main particulars of the ship models for simulation of length ratio
 ($1.4 < L_1/L_2 < 2.4$, $T_1 > T_2$)

Designation	Target ships(L ₂)		
	CCR 6	ITB 450	RRPF 11
Model no.	CCR 6	ITB 450	RRPF 11
Ship type	Car carrier	Integrated tug barge	Ro-ro passenger ferry
L_1/L_2	1.45	2.02	2.31
Disp. [ton]	39,282	19,960	6,110
DWT [ton]	-100	16,459.96	1,204.5
L _{OA} [m]	199.1	142.8	125
L _{pp} [m]	189.9	138.82	107
Breadth [m]	32.26	30.33	18.25
Draft [m]	11.02	6.06	5.25
Image			

Table 4.4 Main particulars of the ship models for simulation of length ratio
($0.7 < L_1/L_2 < 1.2$, $T_1 < T_2$)

Designation	Target ships(L_2)			
	CNTR 20	CNTR 12	VLCC 7	VLCC 6
Model no.	CNTR 20	CNTR 12	VLCC 7	VLCC 6
Ship type	Container ship	Container ship	VLCC suezmax	VLCC aframax
L_1/L_2	0.73	0.83	1.03	1.16
Disp. [ton]	211,405	144,500	189,406	125,537
DWT [ton]	198,000	131,938	163,545.3	106,896.4
L_{OA} [m]	397.7	347	280.5	249.9
L_{pp} [m]	376	331	270	239
Breadth [m]	56.4	45.2	50	44
Draft [m]	15.2	13.5	16.62	14.4
Image				
	CNTR 20		VLCC 7	
				
	CNTR 12		VLCC 6	

4.1.2 무차원 계수

두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger, ξ)는 식 (38)과 같이 무차원화하였다. 여기서 L_1 은 자선(own ship)의 전장이며, L_2 는 상대선(target ship)의 전장이다.

$$\xi' = \frac{2\xi}{L_1 + L_2} \quad (38)$$

선박조종시뮬레이션을 수행하여 도출한 두 선박의 간섭력 X_{INT} , Y_{INT} , N_{INT} 는 식 (39)와

같이 무차원화하였다.

$$C_{XINT} = \frac{X_{INT}}{\frac{1}{2}\rho U^2 L T}, \quad C_{YINT} = \frac{Y_{INT}}{\frac{1}{2}\rho U^2 L T}, \quad C_{NINT} = \frac{N_{INT}}{\frac{1}{2}\rho U^2 L^2 T} \quad (39)$$

4.2 계류선 통과시의 안전통항거리 분석

본 연구의 목적은 선박과 선박의 간섭력을 고려한 안전통항거리를 산정하는 것이므로 4.2에서는 부두와 선박의 간섭력(ship to bank interaction)이 아닌 부두에 접안한 계류선을 통과하는 상황에서 간섭력(moored ship passing interaction)을 도출하고, 타각계산을 통하여 안전통항거리를 도출하고자 한다.

4.2.1 실험조건 설정

1) 속력별 안전통항거리 산정을 위한 시뮬레이션 구성

Fig. 4.2와 같이 부두에 좌현 접안한 계류선의 우측을 부두와 평행한 방향인 053.5° 로 통과하는 선박의 속력에 따른 안전통항거리를 도출하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 η 는 통과선(passing ship)의 중심선에서 계류선(moored ship)의 중심선까지의 수평거리이며, ξ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger)이고, S 는 두 선박의 선체(hull) 간의 수평거리인 안전통항거리(distance of safe passing)이며, 식 (40)과 같이 구할 수 있다.

$$S = \eta - \left(\frac{B_1 + B_2}{2} \right) \quad (40)$$

해역의 수심이 $h/T=1.2$ 인 조건에서 파나마급 컨테이너선이 7knots, 9knots, 12knots로 계류선인 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 통과하는 시뮬레이션을 수행하였다. 통과선의 속력은 국내 항만의 접이안 속력과 제한속력을 고려하였다(Kim et al., 2012). 타각계산에 필요한 간섭력을 구하기 위해서 η/L 의 범위는 약 0.2~0.7로 두고 실시하였으며, 각각의 η/L 에 해당하는 간섭력을 도출한 후 타각을 계산하여 0~35도 이내의 값만을 선택하였다.



Fig. 4.2 Diagram of passing ship and moored ship

2) 길이별 안전통항거리 산정을 위한 시뮬레이션 구성

Fig. 4.2의 상황과 같이 계류선 통과시의 안전통항거리를 통과선과 계류선의 길이비에 따라 도출하기 위해 시뮬레이션을 구성하였다. Table 4.1의 파나막스급 컨테이너선을 기준으로 정하였으며, Table 4.1의 4척의 선박을 포함한 Table 4.2와 Table 4.3의 선박을 상대선으로 선정하였다.

해역의 수심을 manoeuvring speed에서 타효가 가능한 $h/T=1.2$ 의 조건으로 실시할 경우에 기준선인 파나막스급 컨테이너선보다 상대선이 흘수가 큰 경우와 작은 경우로 나눌 수 있다. Table 4.2와 Table 4.3은 자선과 상대선의 길이비의 범위가 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 이며, 상대선의 흘수가 기준선인 파나막스급 컨테이너선보다 작은 경우($T_1 > T_2$)이며, Table 4.4는 상대선이 자선의 흘수보다 큰 선박의 경우($T_1 < T_2$)로 분류하였다. Table 4.4의 경우 수심/상대선 흘수의 비가 $h/T_2 = 1.2$ 일 때, 수심/기준선의 흘수의 비는 $1.4 < h/T_1 < 1.6$ 의 범위이다.

수심조건 $h/T=1.2$ 에서 파나막스급 컨테이너선이 9knots로 계류선인 컨테이너선, 여객선, LNG선, 탱커선, 벌크선, 카캐리어, 예부선, 카페리, 로로여객선을 통과하는 시뮬레이션을 수행하였다. 타각계산에 필요한 간섭력을 구하기 위해서 η/L 의 범위는 약 0.2~0.7로 두고 실시

하였으며, 각각의 η/L 에 해당하는 간섭력을 도출한 후 타각을 계산하여 0~35도 이내의 값만을 선택하였다.

4.2.2 시뮬레이션 결과

수심 $h/T=1.2$ 에서 부두에 계류된 다양한 선박을 파나마급 컨테이너선이 7knots, 9knots, 12knots로 통과할 때 안전하게 통과할 수 있는 거리를 산출하였다. 수심은 $h/T=1.2$ 의 조건으로 두 선박 중에 흘수가 보다 깊은 선박을 기준으로 정하였고, 도출된 안전통행거리는 대상 선박의 흘수가 파나마급 컨테이너선보다 작은 경우와 큰 경우로 분류하였다.

1) 상호간섭에 의한 각 선박의 영향 분석

Fig. 4.3은 부두에 접안한 계류선을 통과할 때 각 선박에 작용하는 간섭력(hydrodynamic interaction forces)을 도시한 것으로, 선박조종시뮬레이터의 간섭력 계산을 참조하여 본 연구에 해당하도록 표시하였다(Ozersky and Rogozhina, 2016).

Fig. 4.3에서 보는 바와 같이 통과선이 계류선을 통과할 때 교차지역(intersection)이 발생하고, 상대선으로 인한 간섭력(F)이 각각의 선박에 작용한다. Fig. 4.3의 X는 전후력(surge force), Y는 횡력(sway force), N은 회두모멘트(yaw moment)를 의미하며, X는 전진방향이 양의 방향이며, Y는 상대선에 의한 반발력의 방향이 양의 방향이고, N은 각 선박의 시계방향이 양의 방향이다.

계류선과 통과선에 작용하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 Fig. 4.4~Fig. 4.9에 도시하였다. 시뮬레이션 결과 중에 컨테이너선이 자선보다 큰 상대선과 작은 상대선인 경우를 비교하기 위하여 상대선이 LNG선과 카페리(passenger car ferry)의 경우만을 도시하였다. 그래프의 x축은 두 선박의 중심선 간의 중거리(stagger)이며 y축은 전후력, 횡력, 회두모멘트의 무차원값인 C_{XINT} , C_{YINT} , C_{NINT} 를 나타낸 것이다.

Fig. 4.4~Fig. 4.6은 $h/T=1.2$ 에서 파나마급 컨테이너선이 계류선인 LNG선을 7kts로 통과시에 $\eta/L_1=0.3, 0.4, 0.5$ 인 경우의 전후력, 횡력, 회두모멘트를 도시한 것이다. 여기서 η 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이며, L_1 은 통과선인 컨테이너선의 전장(Length overall, L_{OA})를 의미한다. 3장의 검증과정에서는 수선간장(Length between perpendiculars, L_{pp})으로 수행하였으나, 본 연구에서는 전장(L_{OA})의 길이로 계산하였다.

Fig. 4.4와 같이 통과선이 근접하면 계류선은 전진방향으로 힘이 작용하고, 통과선은 후진

방향으로 힘이 작용한다. 계류선이 통과선보다 대형선인 경우에는 계류선에 의해 통과선에 전후력이 정황 이전에 크게 발생한다. Fig. 4.5와 같이 통과선에 반발력(repulsion force)이 작용하고 흡인력(attraction force)이 작용하는 것을 볼 수 있다. 회두모멘트는 Fig. 4.6과 같이 통과선에는 외방모멘트(bow-outward moment)가 작용하며 점점 줄어들지만, 계류선에는 통과선쪽으로 내방모멘트(bow-inward moment)-외방모멘트-내방모멘트 순으로 변화하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.7~Fig. 4.9는 $h/T=1.2$ 에서 파나막스급 컨테이너선이 계류선인 카페리를 7kts로 통과 시에 $\eta/L_1=0.3, 0.4, 0.5$ 인 경우의 전후력, 횡력, 회두모멘트를 도시한 것이다. 컨테이너선이 자선보다 작은 선박을 통과하는 경우에는 대형선을 통과하는 경우와 달리 전후력과 회두모멘트는 정황의 지점에서 0으로 나타나고, 횡력은 정황의 지점에서 최대로 나타난 것을 볼 수 있다.

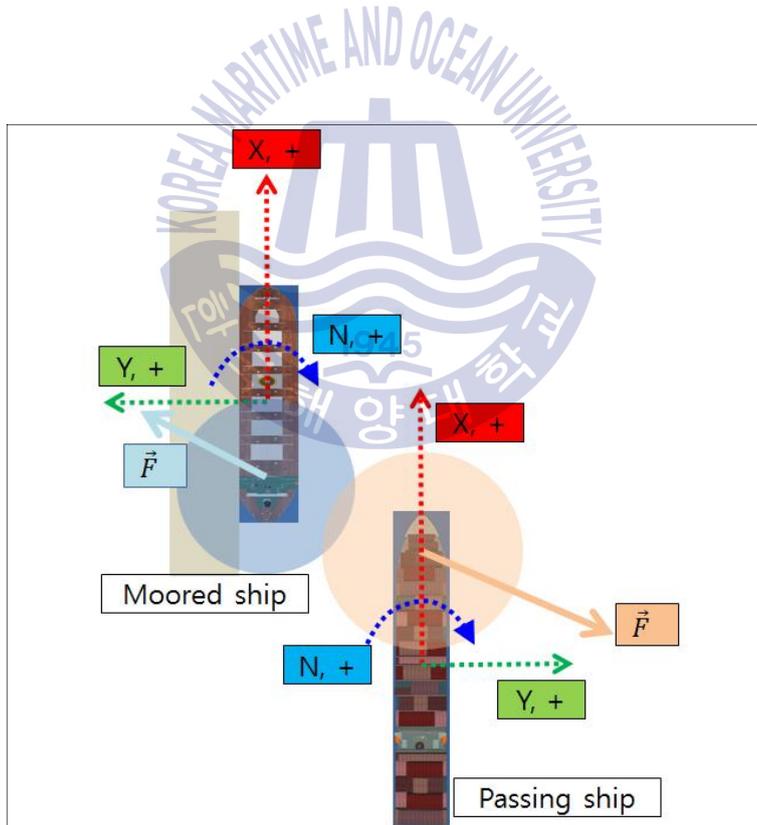
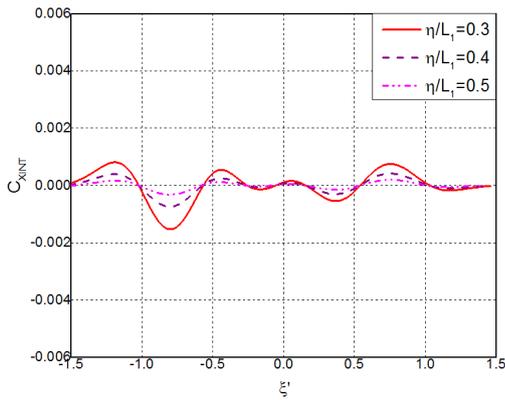
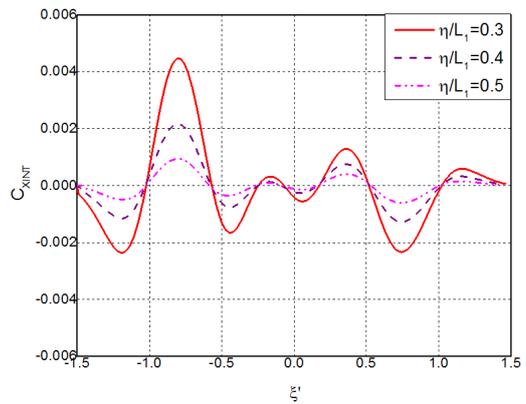


Fig. 4.3 Definition of hydrodynamic interaction forces for moored ship passing

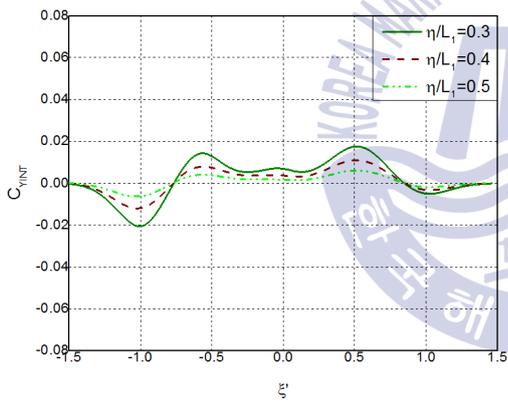


(a) moored LNG carrier

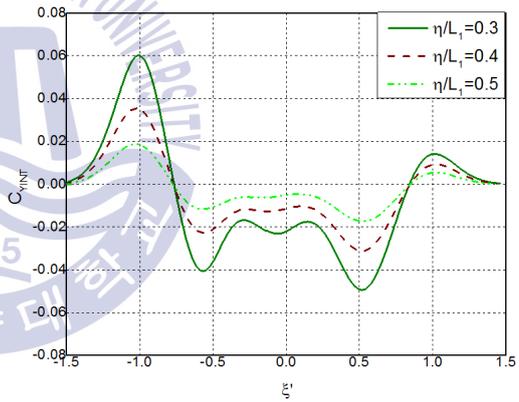


(b) passing container ship

Fig. 4.4 Non-dimensional surge forces of moored LNG carrier and passing container ship

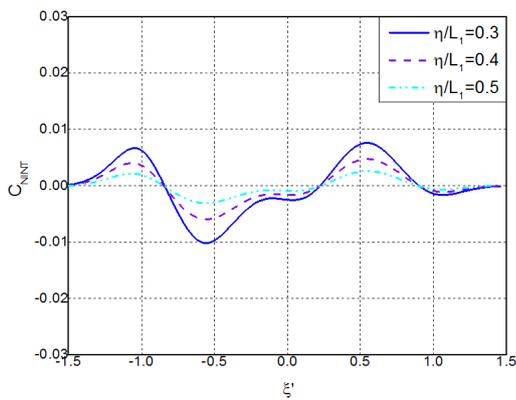


(a) moored LNG carrier

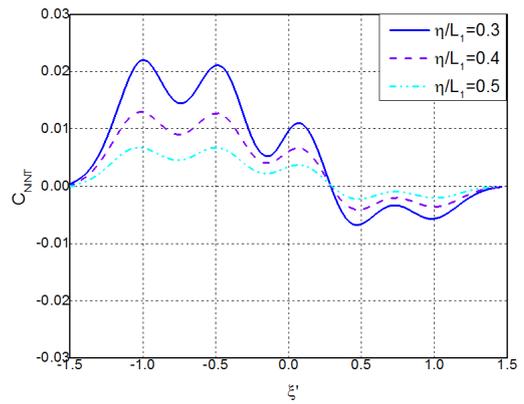


(b) passing container ship

Fig. 4.5 Non-dimensional sway forces of moored LNG carrier and passing container ship

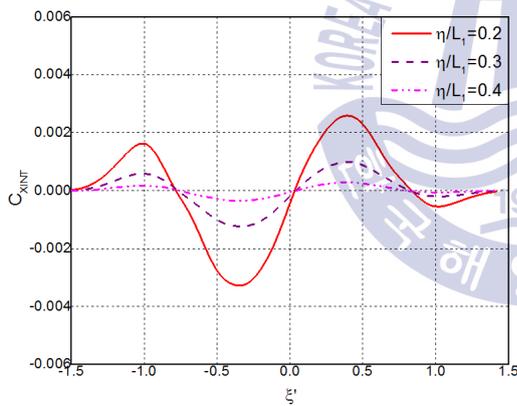


(a) moored LNG carrier

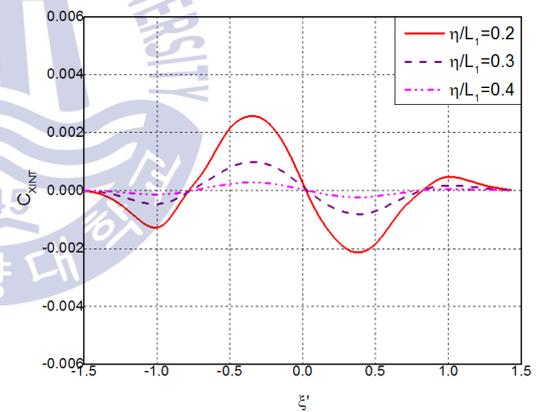


(b) passing container ship

Fig. 4.6 Non-dimensional yaw moment of moored LNG carrier and passing container ship

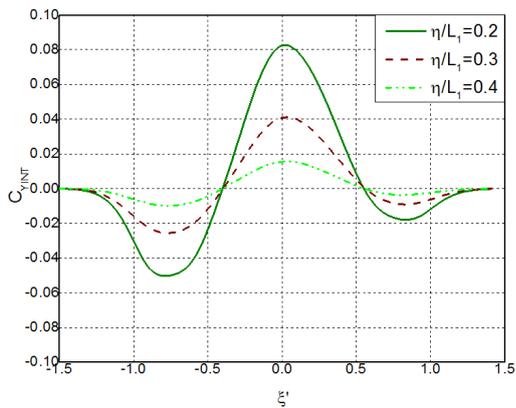


(a) moored passenger car ferry

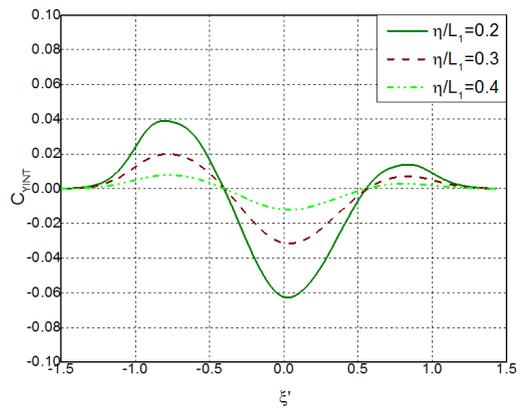


(b) passing container ship

Fig. 4.7 Non-dimensional surge forces of moored passenger car ferry and passing container ship

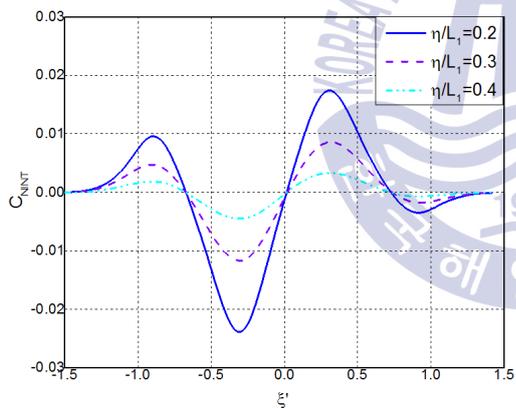


(a) moored passenger car ferry

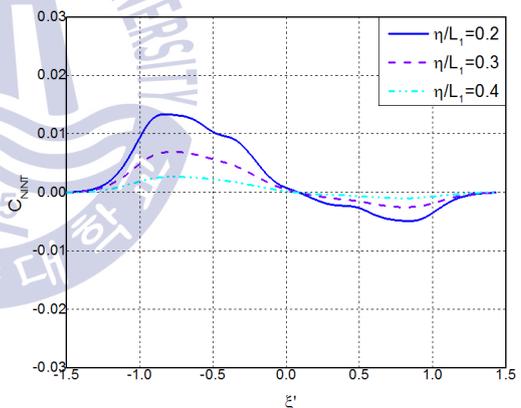


(b) passing container ship

Fig. 4.8 Non-dimensional sway forces of moored passenger car ferry and passing container ship



(a) moored passenger car ferry



(b) passing container ship

Fig. 4.9 Non-dimensional yaw moment of moored passenger car ferry and passing container ship

2) 수심별 시뮬레이션 결과 분석

Fig. 4.10~Fig. 4.12는 파나마급 컨테이너선의 중심선에서 부두에 계류된 LNG선의 중심선까지의 수평거리(η)를 $0.3L$ 로 두고 9knots로 통과할 때 파나마급 컨테이너선에 작용하는

전후력, 횡력, 회두모멘트를 무차원화하여 수심별로 도시한 것이다.

Fig. 4.10에서 최대 전후력이 나타나는 수심을 비교해 보면, $h/T=1.1$ 일 때 최대 전후력은 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 6배 크고, 그래프의 중간에 해당하는 $h/T=2.0$ 인 경우의 최대 전후력은 $h/T=1.1$ 인 경우보다 2배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 3배 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.11에서 최대 횡력이 나타나는 수심을 비교해 보면, 앞서 기술한 전후력의 경우와 마찬가지로 $h/T=1.1$ 인 경우의 최대 횡력은 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 6배 크고, $h/T=2.0$ 인 경우의 최대 횡력은 $h/T=1.1$ 인 경우보다 2배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 3배 크게 나타났다. 또한, 초기에 작용하는 최대 반발력과 반발력 이후에 작용하는 최대 흡인력의 수심을 비교해 보면 약 1.5배 차이가 났다.

Fig. 4.12에서 최대 회두모멘트가 발생하는 지점의 수심별 회두모멘트를 비교해보면, 전후력, 횡력의 경우와 동일한 크기의 차이는 것을 알 수 있다. 또한, 초기에 발생하는 최대 외방모멘트와 정회 이후에 발생하는 최대 내방모멘트의 지점을 비교해보면 약 3배의 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

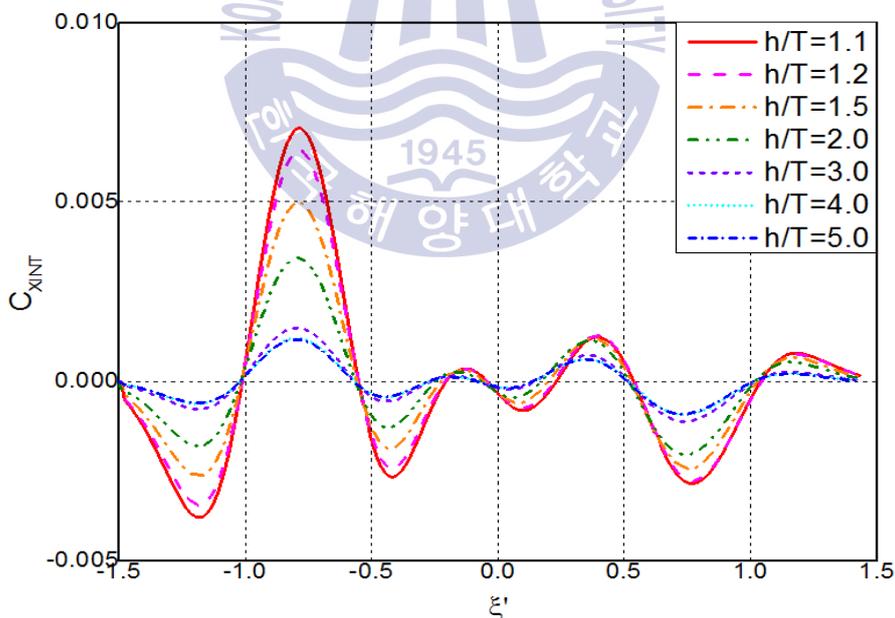


Fig. 4.10 Non-dimensional surge force of passing container ship according to the water depth (Moored ship passing)

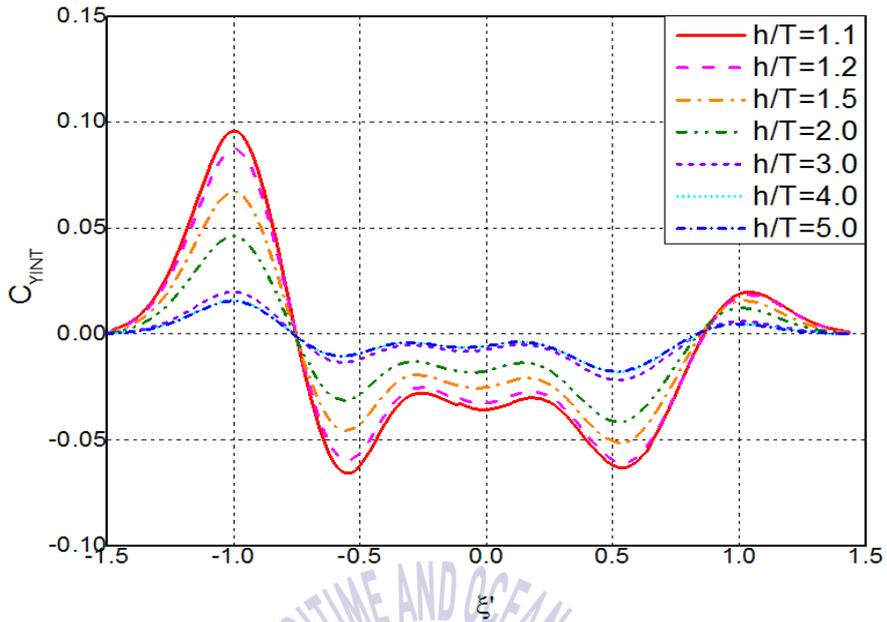


Fig. 4.11 Non-dimensional sway force of passing container ship according to the water depth (Moored ship passing)

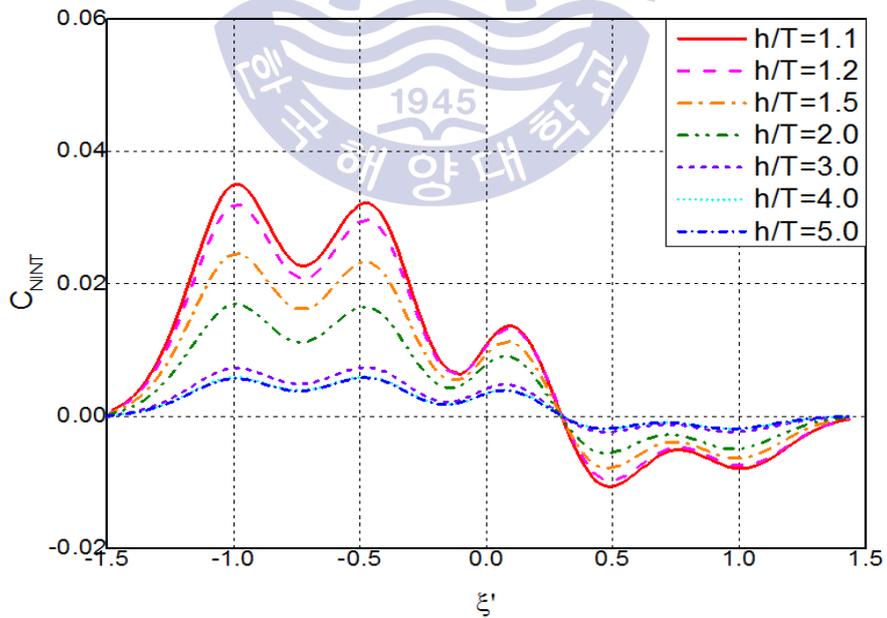


Fig. 4.12 Non-dimensional yaw moment of passing container ship according to the water depth (Moored ship passing)

4.2.3 타각계산

1) 속력별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

3장에서 시뮬레이터 모델의 정확도 검증을 위해 사용한 MLIT의 계산방법으로 타각을 계산하고, 표준화를 위한 보침타각 10도에 해당하는 안전통항거리를 도출하였다.

파나막스급 컨테이너선이 계류선인 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 7knots, 9knots, 12knots로 통과하는 시뮬레이션을 수행하여 도출한 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 이용하여 타각을 계산하였다. 통과선의 중심선에서 계류선의 중심선까지의 수평거리(η)를 통과선의 길이로 나눈 η/L 의 범위를 선택하고 시뮬레이션을 실시하여 통과선의 회두모멘트를 무차원화하여 C_{NINT} 의 최대값을 구한다. 시뮬레이션을 수행하여 도출한 통과선의 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 MLIT의 평형방정식에 대입하면 η/L 에 해당하는 타각이 산정되고, 회귀분석을 통해 보침타각 10도에 해당하는 η/L 을 역으로 도출이 가능하다. 최종적으로 선체(hull)간의 수평거리인 안전통항거리를 구할 수 있다.

Table 4.5를 보면 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)이 계류선인 LNG선(LNG 6)을 9knots로 통과할 때, 컨테이너선에 작용하는 최대 회두모멘트는 $\eta/L=0.4$ 일 때 0.018946이고, $\eta/L=0.5$ 일 때 0.009447이며, $\eta/L=0.6$ 일 때 0.003689로 도출되었다. 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.4-0.6$ 에 해당하는 타각은 각각 27.8도, 13.8도, 5.4도로 산정되었다. 엑셀 그림의 추세선($y=-0.0088x + 0.6374$)을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축의 η/L 을 구할 수 있다.

동일한 방법으로 계산한 Table 4.6을 보면, 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)이 계류선인 벌크선(BLK7 Panamax)을 9knots로 통과할 때, 컨테이너선에 작용하는 최대 회두모멘트는 $\eta/L=0.3$ 일 때 0.0146이고, $\eta/L=0.4$ 일 때 0.0063이며, $\eta/L=0.5$ 일 때 0.0017로 도출되었다. 3장에서 사용한 MLIT의 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.3-0.5$ 에 해당하는 타각은 각각 21.5도, 9.3도, 2.5도로 산정되었다. 엑셀 그림의 추세선($y=-0.0103x + 0.5139$)을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축의 η/L 을 구할 수 있다.

Table 4.7과 Table 4.8은 파나막스급 컨테이너선이 계류선인 카페리와 어업실습선을 9knots로 통과하는 경우에 대한 타각계산을 실시한 결과이다. 계류선이 카페리인 경우의 타각은 $\eta/L=0.3-0.5$ 의 구간에서 15.4도, 5.7도, 0.8도로 산정되었고, 계류선이 어업실습선인 경우의 타각은 $\eta/L=0.2-0.4$ 의 구간에서 12.9도, 6.1도, 1.1도로 산정되었다.

Table 4.9는 시뮬레이터가 보유한 최대 흘수선(VLCC 8)이 초대형 컨테이너선(CNTR 20)을 9knots로 통과하는 경우에 대한 타각계산을 실시한 결과이다. VLCC에 발생하는 최대 회두모멘트와 VLCC의 유체력 계수를 이용하여 $\eta/L=0.6\sim 0.7$ 에 해당하는 타각을 계산하였다. 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.6\sim 0.7$ 에 해당하는 타각은 각각 16.7도, 9.0도, 3.9도로 산정되었다.

Table 4.5 Rudder calculation of container ship passing on moored LNG carrier

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.4	0.5	0.6
$C_{NINT}(\max)$	0.018946	0.009447	0.003689
Y'_β	-1.312	-1.312	-1.312
N'_β	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_δ	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_δ	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.4845	0.2416	0.0943
타각 (degree)	27.8	13.8	5.4

Table 4.6 Rudder calculation of container ship passing on moored bulk carrier

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_{NINT}(\max)$	0.0146	0.0063	0.0017
Y'_β	-1.312	-1.312	-1.312
N'_β	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_δ	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_δ	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.3751	0.1626	0.0436
타각 (degree)	21.5	9.3	2.5

Table 4.7 Rudder calculation of container ship passing on moored passenger car ferry

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_{NINT}(\max)$	0.0105	0.00387	0.00055
Y'_β	-1.312	-1.312	-1.312
N'_β	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_δ	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_δ	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.26901	0.0990	0.0142
타각 (degree)	15.4	5.7	0.8

Table 4.8 Rudder calculation of container ship passing on moored fishery training ship

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.2	0.3	0.4
$C_{NINT}(\max)$	0.0087	0.0041	0.0007
Y'_β	-1.312	-1.312	-1.312
N'_β	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_δ	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_δ	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.22462	0.10721	0.01887
타각 (degree)	12.9	6.1	1.1

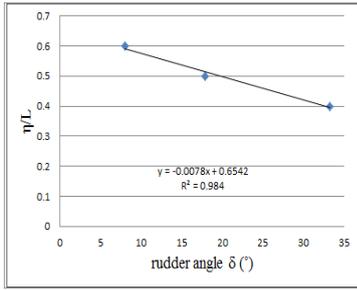
Table 4.9 Rudder calculation of VLCC passing on moored container ship

VLCC 8	η/L		
	0.6	0.65	0.7
$C_{NINT(max)}$	0.01285	0.00691	0.003
Y'_{β}	-1.658	-1.658	-1.658
N'_{β}	-0.564	-0.564	-0.564
Y'_{δ}	-0.088	-0.088	-0.088
N'_{δ}	0.044	0.044	0.044
타각(rad)	0.2922	0.1571	0.0682
타각 (degree)	16.7	9.0	3.9

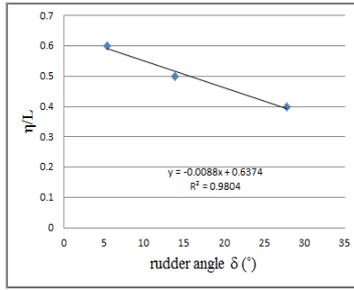
2) 길이별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

앞서 기술한 계산방법을 이용하여 상대선의 길이가 다양한 경우에 대한 계류선 통과시의 안전통항거리를 산정할 수 있다. Fig. 4.13은 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)이 다양한 길이의 상대선을 9knots로 통과할 때, 통과선에 발생하는 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 이용하여 계산한 컨테이너선의 보침타각을 그래프로 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 수행하여 x축의 타각이 35도를 넘지 않은 최대 회두모멘트를 도출하였다. 앞서 계산한 LNG선, 벌크선, 카페리의 결과를 Fig. 4.13에 추가하였다.

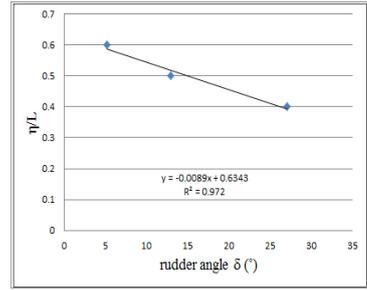
대형크기의 선박 모델(CNTR 8, LNG 6, PCS 6, LNG 4)은 η/L 의 구간이 0.4~0.6에 추세선이 위치하고, 중형크기의 선박 모델(OT 3, BLK 7, CCR 6)은 η/L 의 구간이 0.3~0.5에 추세선이 위치하고 있다. 상대선의 길이가 작아질수록 추세선의 y축 η/L 구간이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 추세선을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축 η/L 을 구할 수 있고, 최종적으로 선체 간의 수평거리인 안전통항거리를 도출할 수 있다.



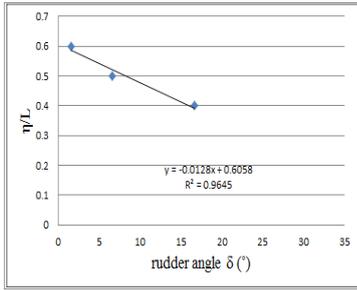
CNTR 8 ($L_1/L_2=0.76$)



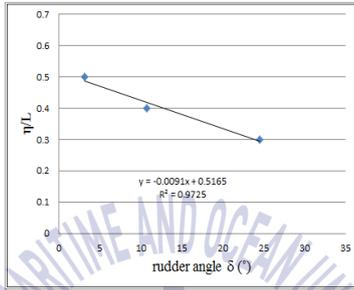
LNG 6 ($L_1/L_2=0.80$)



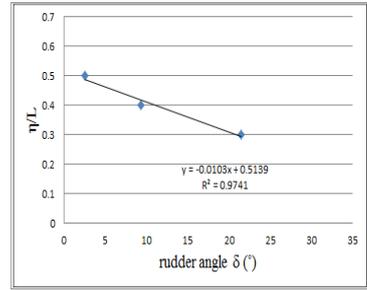
PCS 6 ($L_1/L_2=0.83$)



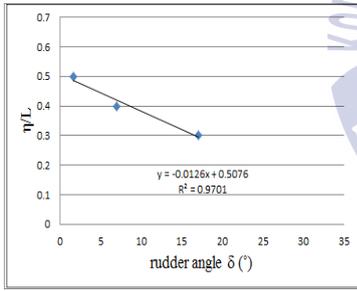
LNG 4 ($L_1/L_2=1.00$)



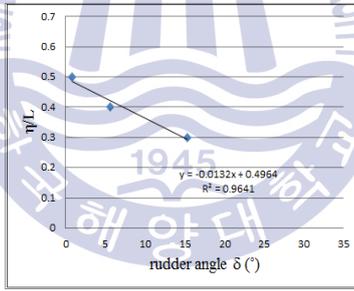
OT 3 ($L_1/L_2=1.19$)



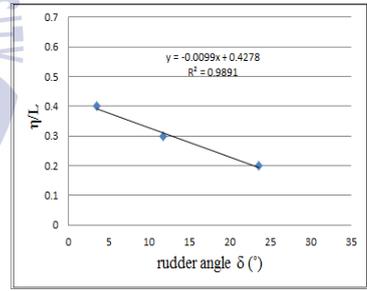
BLK 7 ($L_1/L_2=1.26$)



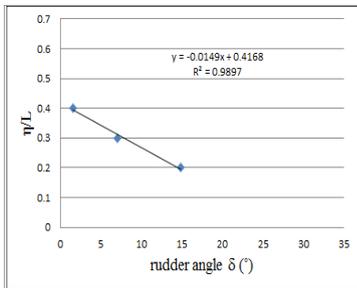
CCR 6 ($L_1/L_2=1.45$)



PCF 2 ($L_1/L_2=1.65$)



ITB 450 ($L_1/L_2=2.02$)



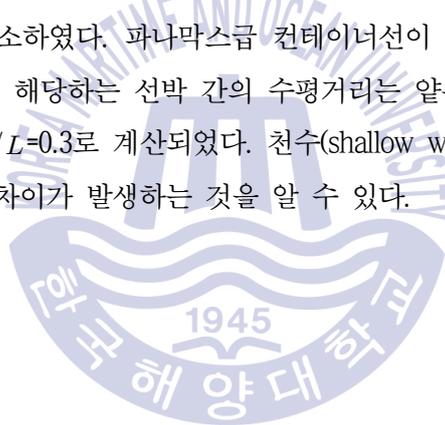
RRPF 11 ($L_1/L_2=2.31$)

Fig. 4.13 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship passing on moored LNG carrier according to the ship's length (9knots)

3) 수심별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

Fig. 4.14는 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)의 중심선에서 계류선(LNG 6)의 현측까지의 수평거리(η)를 $0.3\sim 0.6L$ 로 두고 9knots로 통과할 때, 통과선에 발생하는 최대 회두모멘트와 통과선의 유체력 계수를 이용하여 계산한 보침타각을 수심별로 나타낸 것이다. x축 타각의 범위는 35도를 넘지 않은 η/L 에서 시뮬레이션을 수행하였다. 계류선과의 상호간섭으로 통과선에 발생하는 회두모멘트를 10도의 타각으로 제어하는 것을 표준으로 정하였다.

Fig. 4.14를 보면 수심이 $h/T=1.1$ 에서 $h/T=2.0$ 일 때 추세선은 $\eta/L=0.4\sim 0.6$ 에 위치하고, 수심이 $h/T=3.0$ 에서 $h/T=5.0$ 일 때 추세선은 $\eta/L=0.3\sim 0.5$ 에 위치하고 있다. 각 수심별로 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축 η/L 의 값을 추세선을 이용하여 역으로 도출할 수 있다. 수심이 깊어질수록 추세선의 기울기가 가파르게 변하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.14를 통해 수심이 $h/T=4.0$ 과 $h/T=5.0$ 으로 증가하면 기준선과 상대선의 중심선의 거리를 선박의 길이로 나눈 η/L 의 값이 0.3까지 감소하였다. 파나막스급 컨테이너선이 자선보다 큰 LNG선을 9knots로 통과시 보침타각 10도에 해당하는 선박 간의 수평거리는 얇은 수심의 경우 약 $\eta/L=0.5$ 이고 깊은 수심의 경우 약 $\eta/L=0.3$ 로 계산되었다. 천수(shallow water area)와 심수(deep water area)의 경우에 약 $0.2L$ 의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.



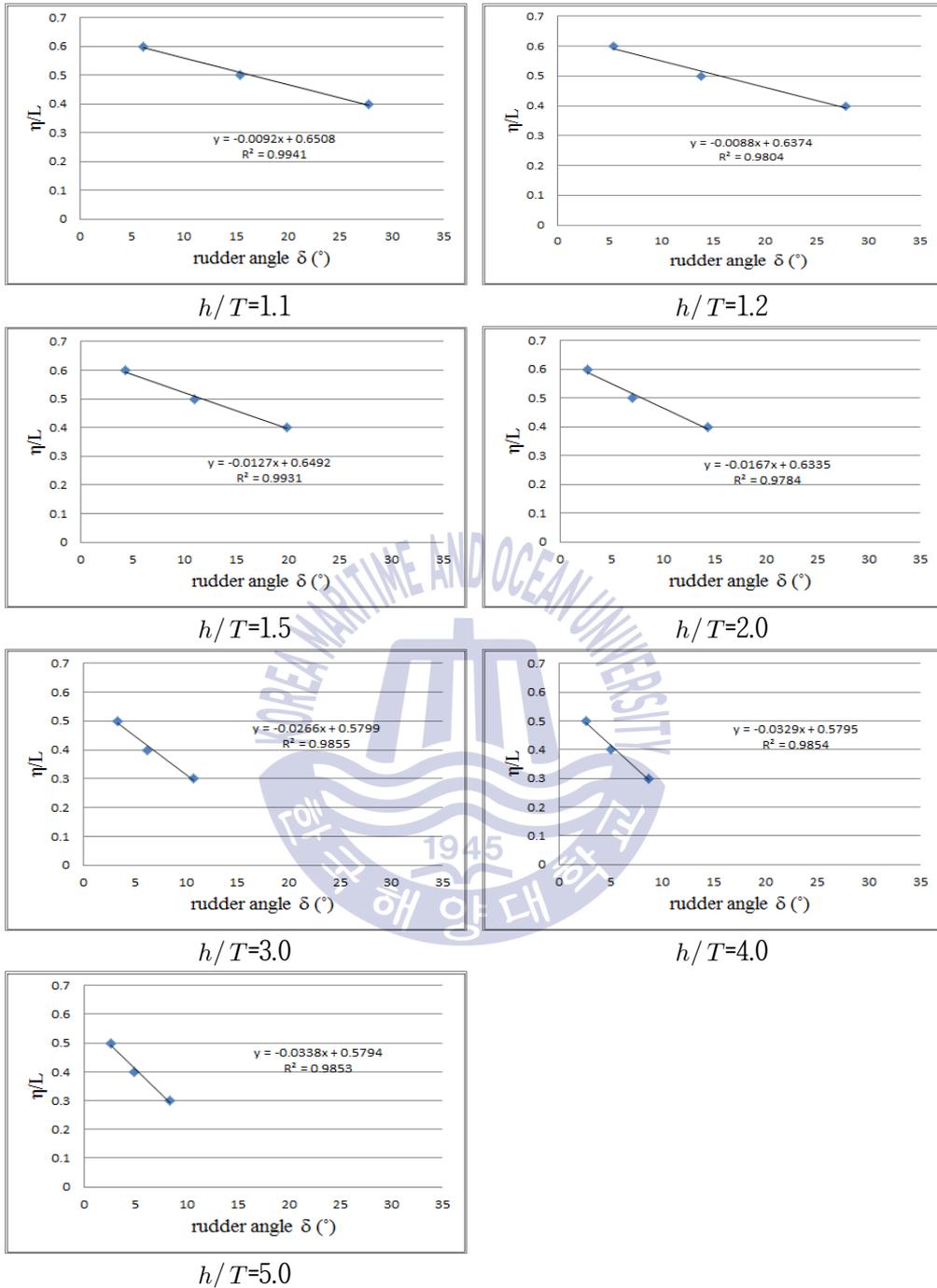


Fig. 4.14 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship passing on moored LNG carrier according to the water depth (9knots)

4.3 마주치며 통과시의 안전통항거리 분석

4.3.1 대상선박 선정 및 실험조건 설정

1) 속력별 안전통항거리 산정을 위한 시뮬레이션 구성

Fig. 4.15와 같이 두 선박이 마주치며 통과하는 상황(head-on encountering)에서 선박의 속력에 따른 안전통항거리를 도출하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 η 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이며, ξ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger)이고, S 는 두 선박의 선체(hull) 간의 수평거리인 안전통항거리(distance of safe passing)를 나타낸다. 자선인 컨테이너선의 침로는 000° 이고, 상대선의 침로는 180° 로 두 선박이 마주치며 통과하는 상황이다. 상대선은 Table 4.1의 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 대상으로 $h/T=1.2$ 인 해역에서 자선인 파나막스급 컨테이너선의 속력은 10, 12, 14knots이고, 상대선은 7, 10, 12.6knots의 다른 속력으로 실시하였다.

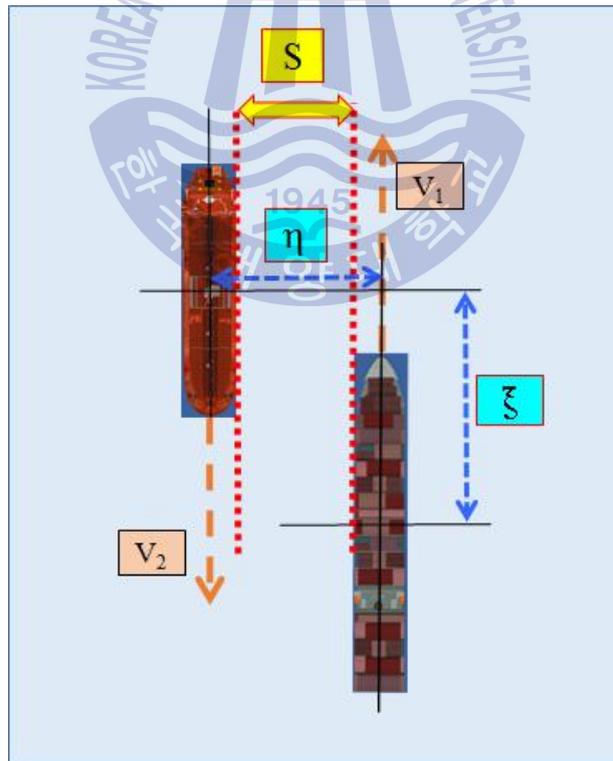


Fig. 4.15 Diagram of head-on encountering two ships

2) 길이별 안전통항거리 산정을 위한 시뮬레이션 구성

두 선박이 마주치며 통과할 때 선박의 길이비에 대한 안전통항거리를 산출하기 위하여, Table 4.1~4.3의 대상선박으로 마주치며 통과하는 경우에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 두 선박간의 수평거리는 자선인 파나막스급 컨테이너선을 기준으로 하였고, 수심은 $h/T_1=1.2$ 의 조건으로 자선인 컨테이너선을 기준으로 정하였다. 파나막스급 컨테이너선이 12knots로 동일한 속력의 상대선인 컨테이너선, 여객선, LNG선, 탱커선, 벌크선, 카캐리어, 예부선, 카페리, 로로여객선을 마주치며 통과하는 시뮬레이션을 수행하였다.

4.3.2 시뮬레이션 결과

1) 상호간섭에 의한 각 선박의 영향 분석

Fig. 4.16은 두 선박이 정면으로 마주치며 통과하는 경우에 각 선박에 작용하는 간섭력을 도시한 것으로, 선박조종시뮬레이터의 간섭력 계산을 참조하여 본 연구에 해당하도록 표시하였다(Ozersky and Rogozhina, 2016).

Fig. 4.16에서 보는 바와 같이 두 선박이 마주치며 통과할 때 교차지역(intersection)이 발생하고, 상대선으로 인한 간섭력(F)이 각각의 선박에 작용한다. Fig. 4.16의 X 는 전후력(surge force), Y 는 횡력(sway force), N 은 회두모멘트(yaw moment)를 의미하며, X 는 전진방향이 양의 방향이며, Y 는 상대선에 의한 반발력의 방향이 양의 방향이고, N 은 각 선박의 시계방향이 양의 방향이다.

두 선박에 작용하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 Fig. 4.17~Fig. 4.22에 도시하였다. 시뮬레이션 결과 중에 컨테이너선이 자선보다 큰 상대선과 작은 상대선인 경우를 비교하기 위하여 상대선이 LNG선과 카페리(passenger car ferry)의 경우만을 도시하였다. 그래프의 x 축은 두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger)이며 y 축은 전후력, 횡력, 회두모멘트의 무차원값인 C_{XINT} , C_{YINT} , C_{NINT} 를 나타낸 것이다.

Fig. 4.17~Fig. 4.19는 대상해역의 수심 $h/T=1.2$ 에서 10knots의 속력으로 항해중인 파나막스급 컨테이너선(course 000°)과 7knots의 속력으로 항해중인 LNG선(course 180°)이 정면으로 마주치며 통과할 때, $\eta/L_1=0.3, 0.4, 0.5$ 인 경우의 전후력, 횡력, 회두모멘트를 도시한 것이다. 여기서 η 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이며, L_1 은 000 도로 항해중인 파나막스급 컨테이너선의 전장이고, L_2 는 180 도로 항해중인 LNG선의 전장을 의미한다.

Fig. 4.17~4.19에서 보는 바와 같이 두 선박이 마주치며 통과하는 경우에는 각 선박에 작용하는 전후력과 횡력은 패턴이 비슷하고, 회두모멘트는 속력이 느린 선박에서 초기의 외방모멘트 이후에 내방모멘트가 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.20~Fig. 4.22는 대상해역의 수심 $h/T=1.2$ 에서 10knots의 속력으로 항해중인 파나마스급 컨테이너선(course 000°)과 7knots의 속력으로 항해중인 카페리(course 180°)이 정면으로 마주치며 통과할 때, $\eta/L_1=0.3, 0.4, 0.5$ 인 경우의 전후력, 횡력, 회두모멘트를 도시한 것이다.

Fig. 4.20~Fig. 4.22에서 보는 바와 같이 컨테이너선이 자선보다 작은 선박을 통과하는 경우에는 크기가 작은 선박은 정횡의 지점에서 흡인력이 최대가 되는 것을 알 수 있다.

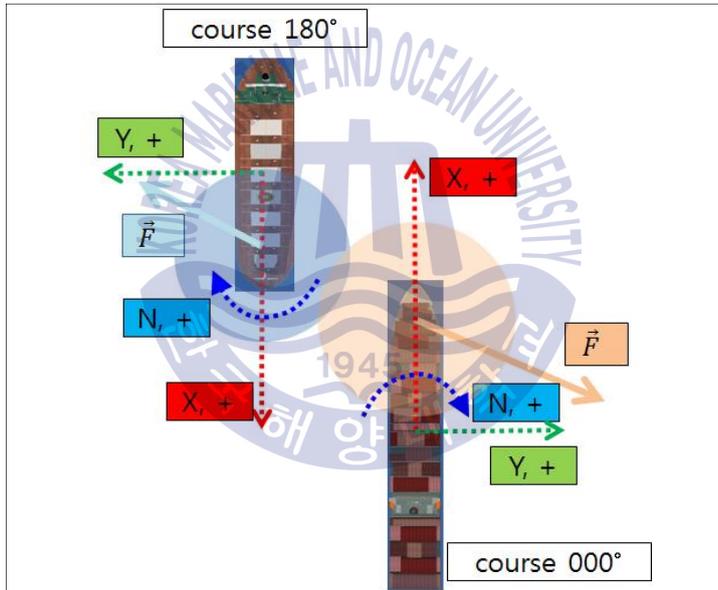
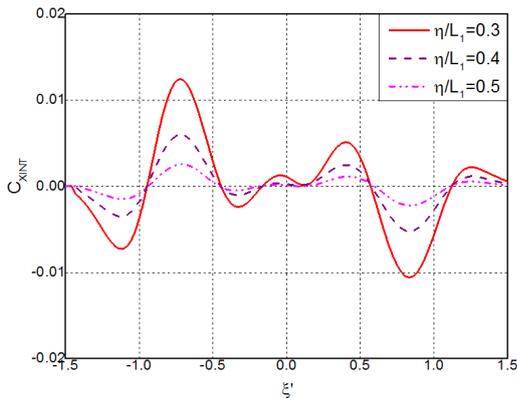
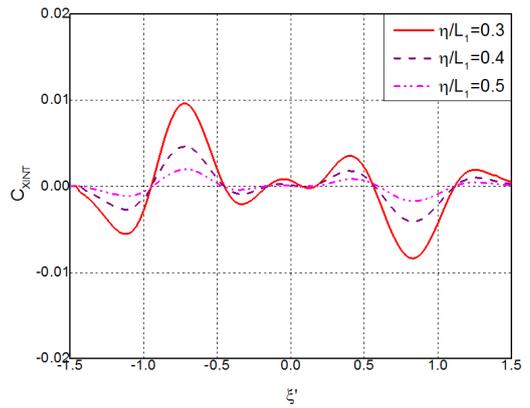


Fig. 4.16 Definition of hydrodynamic interaction forces for head-on encountering

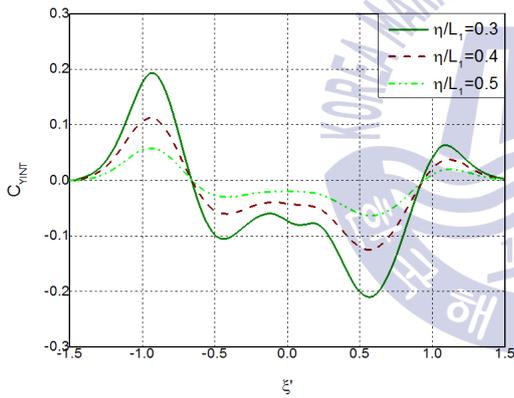


(a) LNG carrier (course 180°)

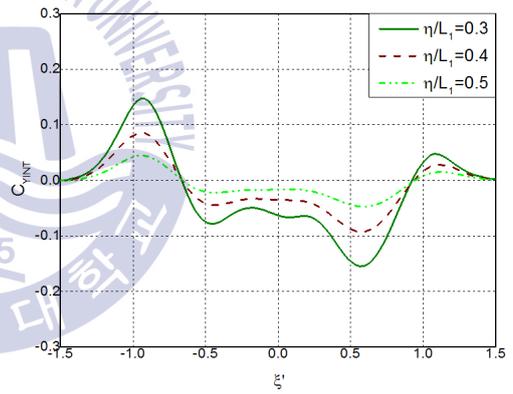


(b) container ship (course 000°)

Fig. 4.17 Non-dimensional surge forces of LNG carrier and container ship

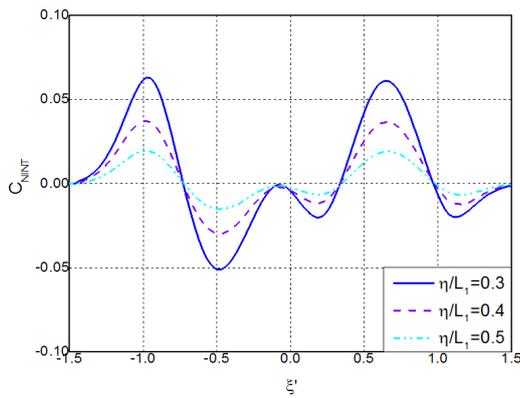


(a) LNG carrier (course 180°)

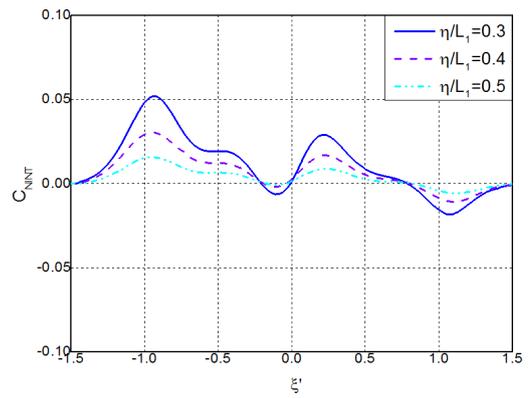


(b) container ship (course 000°)

Fig. 4.18 Non-dimensional sway forces of LNG carrier and container ship

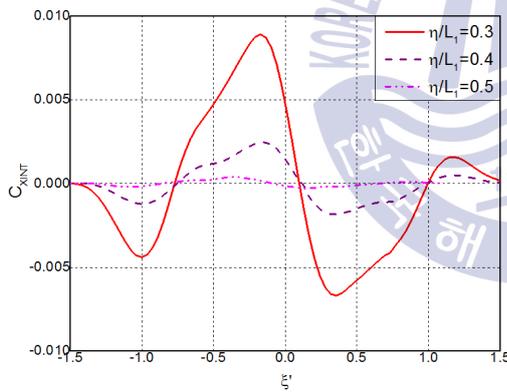


(a) LNG carrier (course 180°)

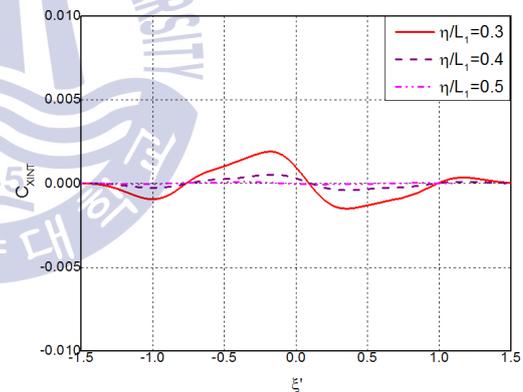


(b) container ship (course 000°)

Fig. 4.19 Non-dimensional yaw moment of LNG carrier and container ship

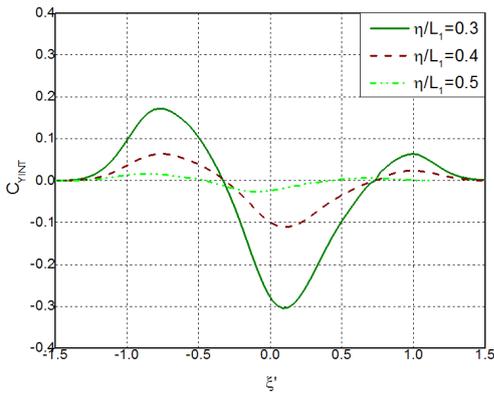


(a) passenger car ferry (course 180°)

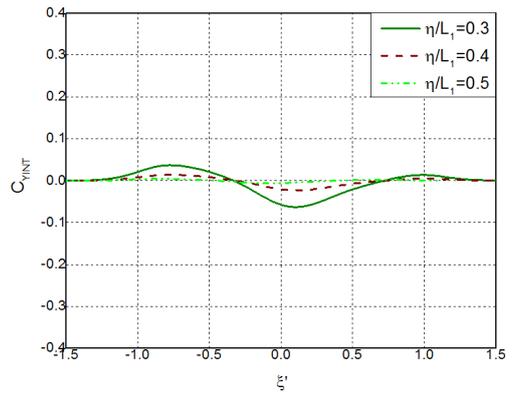


(b) container ship (course 000°)

Fig. 4.20 Non-dimensional surge forces of passenger car ferry and container ship

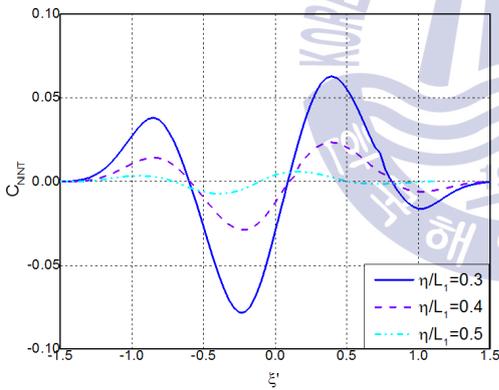


(a) passenger car ferry (course 180°)

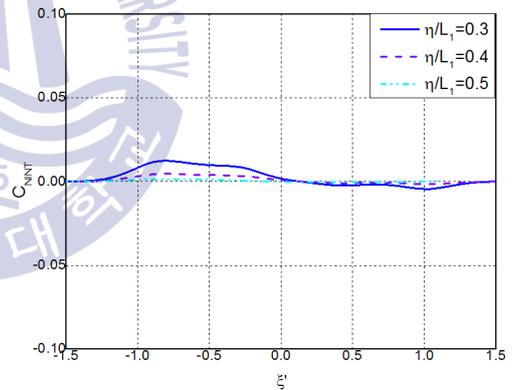


(b) container ship (course 000°)

Fig. 4.21 Non-dimensional sway forces of passenger car ferry and container ship



(a) passenger car ferry (course 180°)



(b) container ship (course 000°)

Fig. 4.22 Non-dimensional yaw moment of passenger car ferry and container ship

3) 수심별 시뮬레이션 결과 분석

Fig. 4.23~Fig. 4.25는 파나막스급 컨테이너선의 중심선과 LNG선의 중심선 간의 수평거리 (η)를 0.4L로 두고 두 선박이 12knots의 동일한 속력으로 마주치며 통과할 때, 파나막스급 컨

테이너선에 작용하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 무차원화하여 수심별로 도시한 것이다.

Fig. 4.23에서 최대 전후력이 나타나는 수심을 비교해 보면, $h/T=1.1$ 일 때 최대 전후력은 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 약 9배 크고, 그래프의 중간에 해당하는 $h/T=2.0$ 인 경우의 최대 전후력은 $h/T=1.1$ 인 경우보다 2배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 5배 크게 나타났다.

Fig. 4.24에서 최대 횡력이 나타나는 수심을 비교해 보면, $h/T=1.1$ 인 경우의 최대 횡력은 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 약 9배 크고, $h/T=2.0$ 인 경우의 최대 횡력은 $h/T=1.1$ 인 경우보다 2배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 4.5배 크다.

Fig. 4.25에서 최대 회두모멘트가 발생하는 지점의 수심별 회두모멘트를 비교해보면, 전후력과 횡력의 경우와 유사한 결과를 보여주었다. 최대 회두모멘트는 $h/T=1.1$ 일 때 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 약 9.5배 크고, $h/T=2.0$ 인 경우는 $h/T=1.1$ 인 경우보다 2배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 4.5배 크게 나타났다.

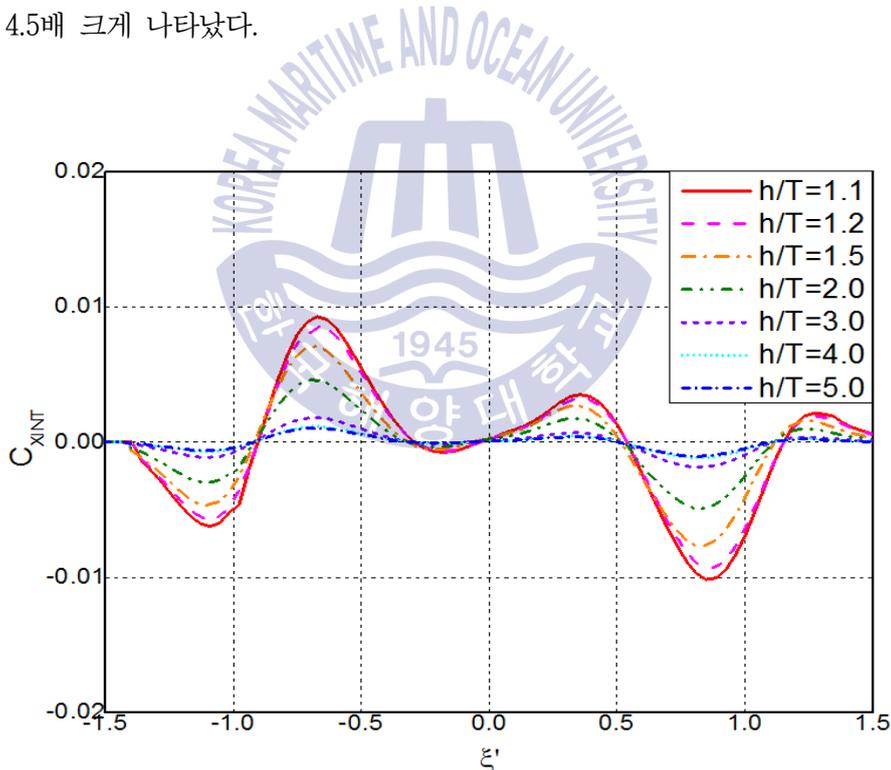


Fig. 4.23 Non-dimensional surge force of container ship according to the water depth (head-on encountering)

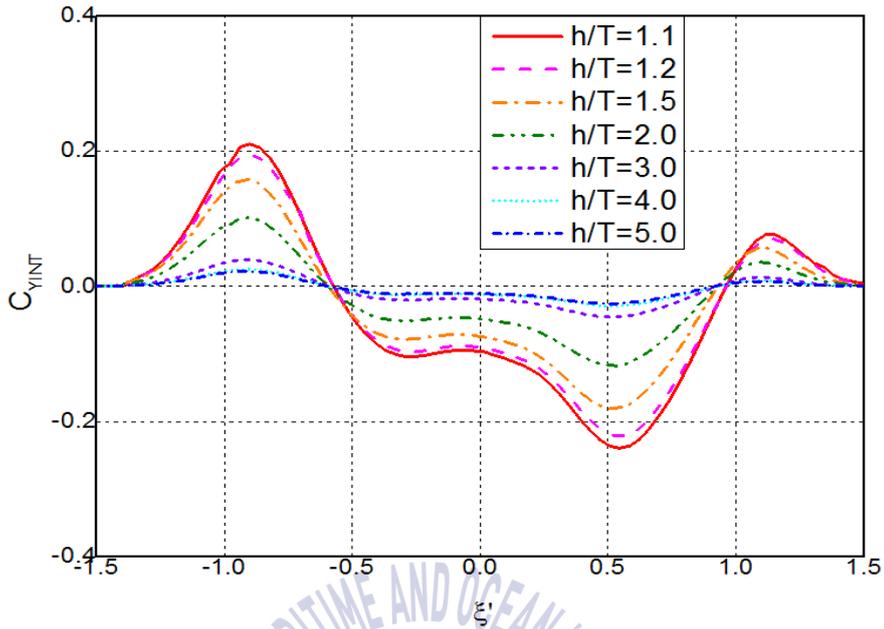


Fig. 4.24 Non-dimensional sway force of container ship according to the water depth (head-on encountering)

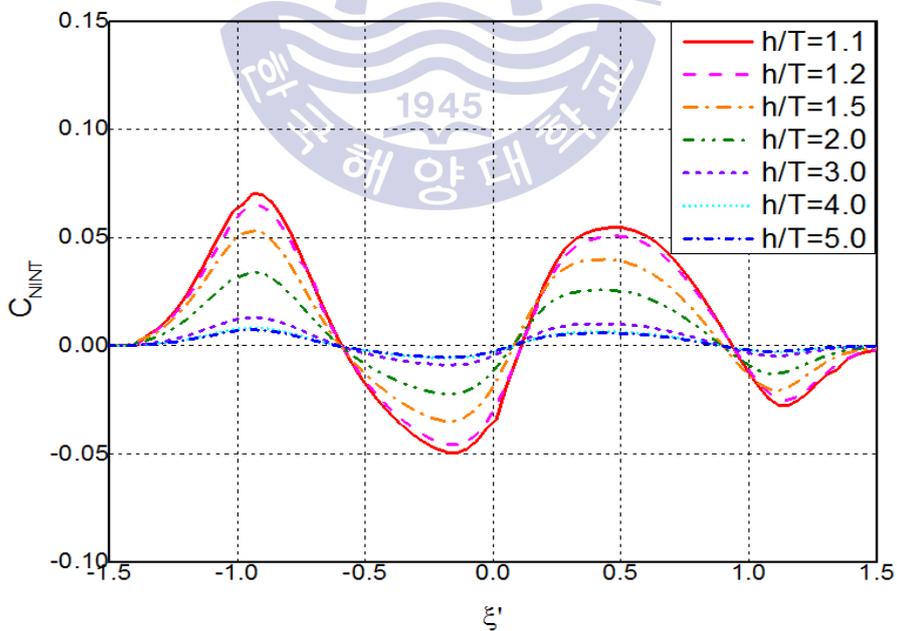


Fig. 4.25 Non-dimensional yaw moment of container ship according to the water depth (head-on encountering)

4.3.3 타각계산

1) 속력별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

3장에서 시뮬레이터 모델의 정확도 검증을 위해 사용한 MLIT의 계산방법으로 타각을 계산하고, 표준화를 위한 보침타각 10도에 해당하는 안전통항거리를 도출하였다.

Table 4.10~4.14는 두 선박이 12knots로 마주치며 통과할 때 발생하는 최대 회두모멘트와 선박의 유체력 계수를 이용하여 보침타각을 계산한 결과이다. 선박의 중심선에서 상대선의 중심선까지의 수평거리(η)를 선박의 길이로 나눈 η/L 의 범위를 선택하고 시뮬레이션을 실시하여 발생하는 선박의 회두모멘트를 무차원화하여 C_{NINT} 의 최대값을 구한다. 시뮬레이션을 수행하여 얻은 기준선(course 000°)의 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 MLIT의 평형방정식에 대입하면 η/L 에 해당하는 타각이 산정되고, 회귀분석을 통해 보침타각 10도에 해당하는 η/L 을 역으로 도출이 가능하다. 최종적으로 선체(hull) 간의 수평거리인 안전통항거리를 구할 수 있다.

Table 4.10은 파나마급 컨테이너선(CNTR 19)과 상대선인 LNG선(LNG 6)이 12knots로 마주치며 통과시의 타각계산을 실시한 결과이다. 컨테이너선에 작용하는 최대 회두모멘트는 $\eta/L=0.55$ 일 때 0.0216이고, $\eta/L=0.6$ 일 때 0.0125이며, $\eta/L=0.65$ 일 때 0.0066으로 도출되었다. 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.55\sim 0.65$ 에 해당하는 타각은 각각 31.7도, 18.3도, 9.6도로 산정되었다. 엑셀 그림의 추세선($y=-0.0045x + 0.6886$)을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축의 η/L 을 구할 수 있다.

동일한 방법으로 계산한 Table 4.11을 보면, 파나마급 컨테이너선(CNTR 19)이 상대선인 벌크선(BLK7 Panamax)을 12knots로 마주치며 통과할 때, 컨테이너선에 작용하는 최대 회두모멘트는 $\eta/L=0.4$ 일 때 0.0224이고, $\eta/L=0.5$ 일 때 0.0068이며, $\eta/L=0.6$ 일 때 0.00083로 도출되었다. 3장에서 사용한 MLIT의 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.4\sim 0.6$ 에 해당하는 타각은 각각 32.9도, 10.0도, 1.2도로 산정되었다. 엑셀 그림의 추세선($y=-0.0059x + 0.587$)을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축의 η/L 을 구할 수 있다.

Table 4.12과 Table 4.13은 파나마급 컨테이너선이 상대선인 카페리와 어업실습선을 12knots로 마주치며 통과하는 경우에 대한 타각계산을 실시한 결과이다. 상대선이 카페리인 경우의 타각은 $\eta/L=0.3\sim 0.5$ 의 구간에서 각각 23.5도, 8.5도, 1.5도로 산정되었고, 상대선이 어업실습선인 경우의 타각은 $\eta/L=0.3\sim 0.5$ 의 구간에서 각각 10.5도, 2.6도, 0.3도로 산정되었다.

Table 4.14는 시뮬레이터가 보유한 최대 흘수선(VLCC 8)과 초대형 컨테이너선(CNTR 20)이 12knots로 마주치며 통과하는 경우에 대한 타각계산을 실시한 결과이다. VLCC에 발생하는 최대 회두모멘트와 VLCC의 유체력 계수를 이용하여 $\eta/L=0.6\sim 0.8$ 에 해당하는 타각을 계산하였다. 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.6\sim 0.8$ 에 해당하는 타각은 각각 24.0도, 9.4도, 2.2도로 산정되었다.

Table 4.10 Rudder calculation of container ship encountering LNG carrier

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.55	0.6	0.65
$C_{NINT}(\max)$	0.0216	0.0125	0.0066
Y'_β	-1.3120	-1.3120	-1.3120
N'_β	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_δ	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_δ	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.5529	0.3184	0.1680
타각 (degree)	31.7	18.3	9.6

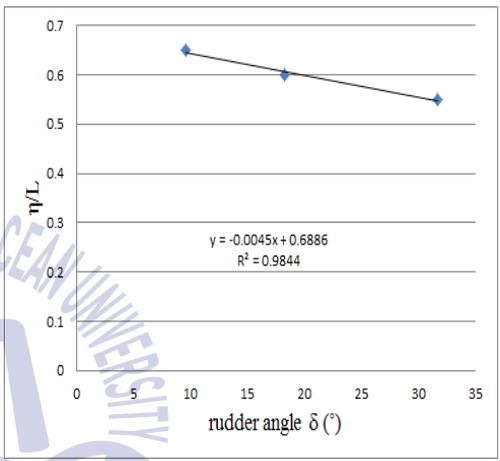


Table 4.11 Rudder calculation of container ship encountering bulk carrier

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.4	0.5	0.6
$C_{NINT}(\max)$	0.0224	0.0068	0.00083
Y'_β	-1.312	-1.312	-1.312
N'_β	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_δ	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_δ	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.5745	0.17416	0.0213
타각 (degree)	32.9	10.0	1.2

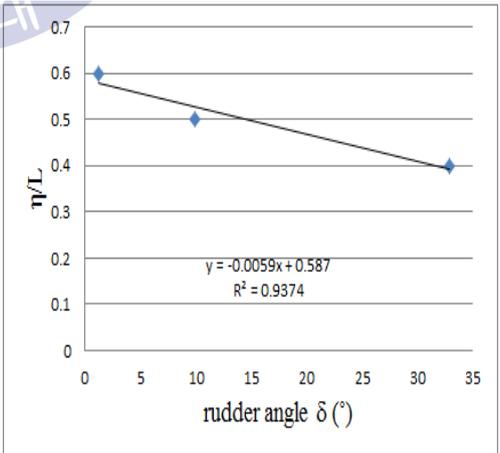


Table 4.12 Rudder calculation of container ship encountering passenger car ferry

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_{NINT}(\max)$	0.0161	0.0058	0.0010
Y'_{β}	-1.3120	-1.3120	-1.3120
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.4107	0.1488	0.0266
타각 (degree)	23.5	8.5	1.5

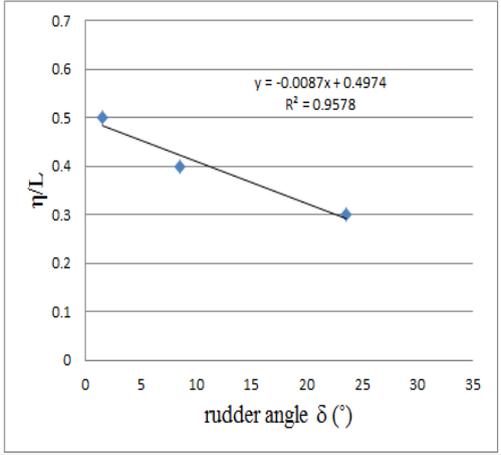


Table 4.13 Rudder calculation of container ship encountering fishery training ship

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_{NINT}(\max)$	0.0071	0.0018	-0.0002
Y'_{β}	-1.3120	-1.3120	-1.3120
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	0.1827	0.0450	-0.0055
타각 (degree)	10.5	2.6	0.3

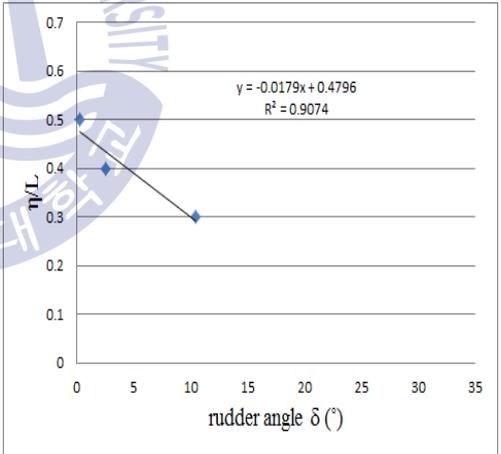


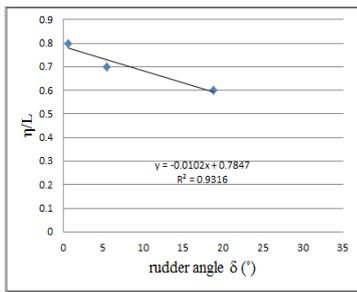
Table 4.14 Rudder calculation of VLCC encountering container ship

VLCC 8	η/L		
	0.6	0.7	0.8
$C_{NINT(max)}$	0.0184	0.0072	0.0016
Y'_β	-1.658	-1.658	-1.658
N'_β	-0.564	-0.564	-0.564
Y'_δ	-0.088	-0.088	-0.088
N'_δ	0.044	0.044	0.044
타각(rad)	0.4196	0.1643	0.0383
타각 (degree)	24.0	9.4	2.2

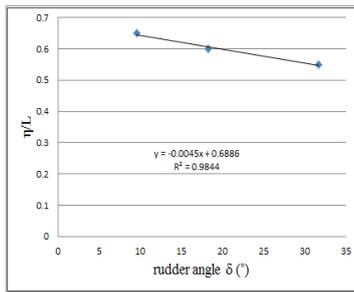
2) 길이별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

앞서 기술한 계산방법을 이용하여 상대선의 길이가 다양한 경우에 대한 마주치며 통과시의 안전통항거리를 산정할 수 있다. Fig. 4.26은 파나마스급 컨테이너선(CNTR 19)과 다양한 길이의 상대선이 각각 12knots로 마주치며 통과할 때, 기준선(course 000°)에 발생하는 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 이용하여 계산한 컨테이너선의 보침타각을 그래프로 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 수행하여 x축의 타각이 35도를 넘지 않은 최대 회두모멘트를 도출하였다. 앞서 계산한 LNG선, 벌크선, 카페리의 결과를 Fig. 4.26에 추가하였다.

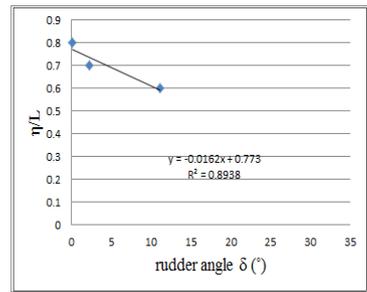
대형크기의 선박 모델(CNTR 8, PCS 6, LNG 4)은 η/L 의 구간이 0.6~0.8에 추세선이 위치하고, 중형크기의 선박 모델(OT 3, BLK 7, CCR 6)은 η/L 의 구간이 0.4~0.7에 추세선이 위치하고 있다. 소형선(ITB 450, RPPF 11)은 η/L 의 구간이 0.2~0.4에 추세선이 위치하였다. 상대선의 길이가 작을수록 추세선의 y축 η/L 구간이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 추세선을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축 η/L 을 구할 수 있고, 최종적으로 선체 간의 수평거리인 안전통항거리를 도출할 수 있다.



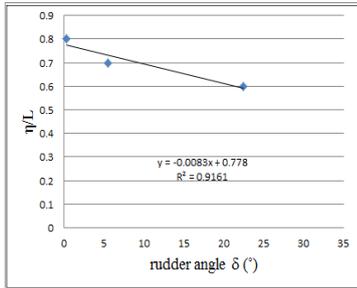
CNTR 8 ($L_1/L_2=0.76$)



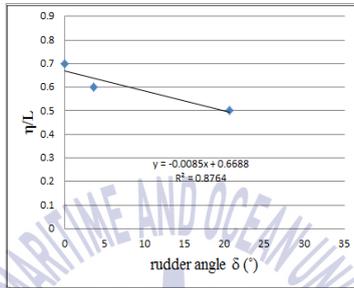
LNG 6 ($L_1/L_2=0.80$)



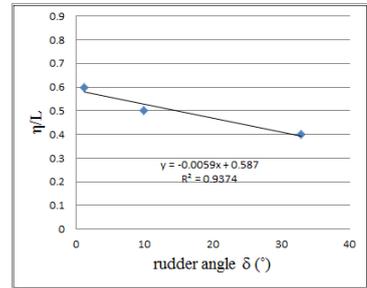
PCS 6 ($L_1/L_2=0.83$)



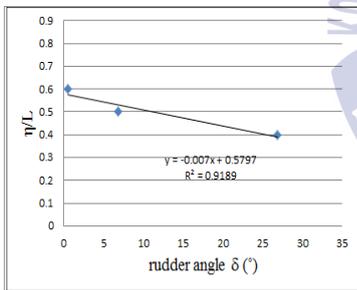
LNG 4 ($L_1/L_2=1.00$)



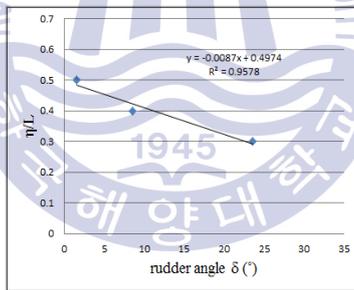
OT 3 ($L_1/L_2=1.19$)



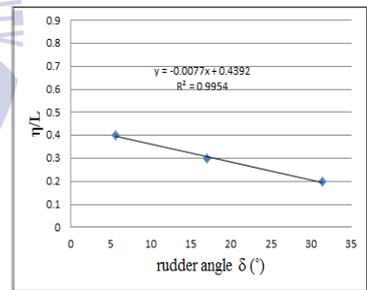
BLK 7 ($L_1/L_2=1.26$)



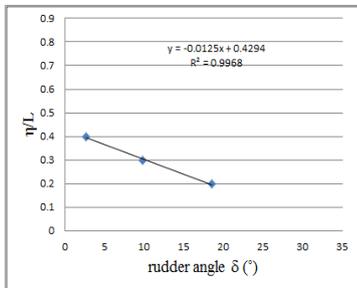
CCR 6 ($L_1/L_2=1.45$)



PCF 2 ($L_1/L_2=1.65$)



ITB 450 ($L_1/L_2=2.02$)



RRPF 11 ($L_1/L_2=2.31$)

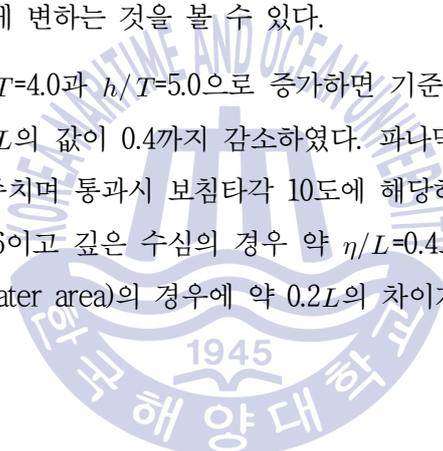
Fig. 4.26 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship encountering LNG carrier according to the ship's length (12-12knots)

3) 수심별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

Fig. 4.27은 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)의 중심선에서 상대선(LNG 6)의 중심선까지의 수평거리(η)를 $0.4\sim 0.65L$ 로 두고 두 선박이 12knots로 마주치며 통과할 때, 기준선 (course 000°)에 발생하는 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 이용하여 계산한 보침타각을 수심별로 나타낸 것이다. x축 타각의 범위는 35도를 넘지 않은 η/L 에서 시뮬레이션을 수행하였고, 두 선박의 상호간섭으로 기준선에 발생하는 회두모멘트를 10도의 타각으로 제어하는 것을 표준으로 정하였다.

수심 $h/T=1.1$ 과 $h/T=1.2$ 의 경우에는 $\eta/L=0.5\sim 0.7$ 의 구간에서 타각이 10~32도까지 넓게 분포하고, 수심 $h/T=3.0$ 에서는 표준 타각 10도로 보침이 가능한 η/L 의 값이 위치하도록 수평거리 $\eta/L=0.4$ 까지 시뮬레이션과 타각계산을 실시하였다. 전체적으로 수심이 깊어질수록 추세선의 기울기가 가파르게 변하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.27에서 수심이 $h/T=4.0$ 과 $h/T=5.0$ 으로 증가하면 기준선과 상대선의 중심선의 거리를 선박의 길이로 나눈 η/L 의 값이 0.4까지 감소하였다. 파나막스급 컨테이너선이 자선보다 큰 LNG선을 12knots로 마주치며 통과시 보침타각 10도에 해당하는 선박 간의 수평거리는 얕은 수심의 경우 약 $\eta/L=0.6$ 이고 깊은 수심의 경우 약 $\eta/L=0.4$ 으로 계산되었다. 천수(shallow water area)와 심수(deep water area)의 경우에 약 $0.2L$ 의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.



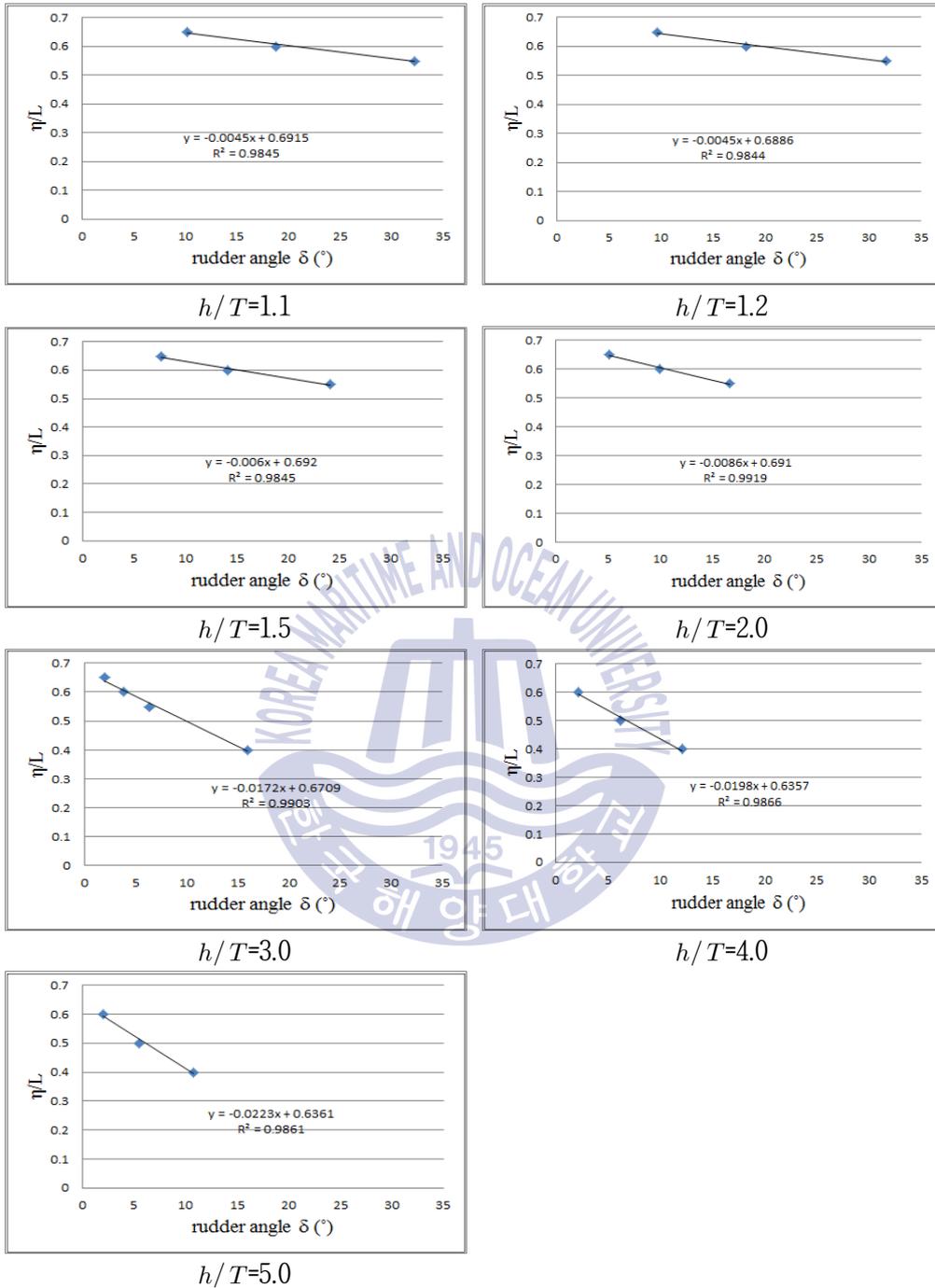


Fig. 4.27 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship encountering LNG carrier according to the water depth (12-12knots)

4.4 추월 통과시의 안전통항거리 분석

4.4.1 대상선박 선정 및 실험조건 설정

1) 속력별 안전통항거리 산정을 위한 시뮬레이션 구성

Fig. 4.28과 같이 두 선박이 마주치며 통과하는 상황(two ships in overtaking)에서 선박의 속력에 따른 안전통항거리를 도출하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 η 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이며, ξ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger)이고, S 는 두 선박의 선체(hull) 간의 수평거리인 안전통항거리(distance of safe passing)를 나타낸다. Table 4.1의 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 대상으로 $h/T=1.2$ 인 해역에서 자선인 파나막스급 컨테이너선은 10, 12, 14knots의 속력으로 7, 8, 7knots의 상대선을 추월한다.

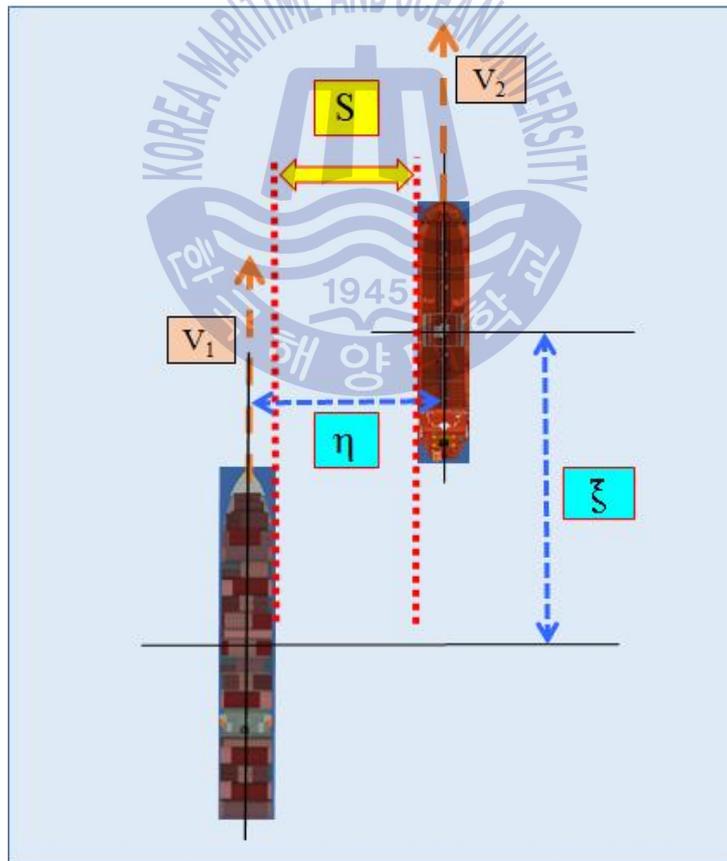


Fig. 4.28 Diagram of two ships in overtaking

2) 길이별 안전통항거리 산정을 위한 시뮬레이션 구성

한 선박이 다른 선박을 추월하면 통과하는 상황에서 선박의 길이비에 대한 안전통항거리를 산출하기 위하여, Table 4.1~4.3의 대상선박으로 추월 통과시의 시뮬레이션을 실시하였다. 두 선박간의 수평거리는 자선인 파나막스급 컨테이너선을 기준으로 하였고, 수심은 $h/T_1 = 1.2$ 의 조건으로 자선인 컨테이너선을 기준으로 정하였다. 파나막스급 컨테이너선이 12knots로 8knots의 상대선인 컨테이너선, 여객선, LNG선, 탱커선, 벌크선, 카캐리어, 예부선, 카페리, 로로여객선을 추월 통과하는 시뮬레이션을 수행하였다.

4.4.2 시뮬레이션 결과

1) 상호간섭에 의한 각 선박의 영향 분석

Fig. 4.29는 한 선박이 다른 선박을 추월하는 경우에 각 선박에 작용하는 간섭력을 도시한 것으로, 선박조종시뮬레이터의 간섭력 계산을 참조하여 본 연구에 해당하도록 표시하였다 (Ozersky and Rogozhina, 2016).

Fig. 4.29에서 보는 바와 같이 한 선박이 다른 선박을 추월할 때 교차지역(intersection)이 발생하고, 상대선으로 인한 간섭력(\vec{F})이 각각의 선박에 작용한다. Fig. 4.29의 X는 전후력(surge force), Y는 횡력(sway force), N은 회두모멘트(yaw moment)를 의미하며, X는 전진방향이 양의 방향이며, Y는 상대선에 의한 반발력의 방향이 양의 방향이고, N은 각 선박의 시계방향이 양의 방향이다.

두 선박에 작용하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 Fig. 4.30~Fig. 4.35에 도시하였다. 시뮬레이션 결과 중에 컨테이너선이 자선보다 큰 상대선과 작은 상대선인 경우를 비교하기 위하여 상대선이 LNG선과 카페리(passenger car ferry)의 경우만을 도시하였다. 그래프의 x축은 두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger)이며 y축은 전후력, 횡력, 회두모멘트의 무차원값인 C_{XINT} , C_{YINT} , C_{NINT} 를 나타낸 것이다.

Fig. 4.30~Fig. 4.32는 대상해역의 수심 $h/T=1.2$ 에서 10knots의 속력으로 항해중인 파나막스급 컨테이너선이 7knots의 속력으로 항해중인 LNG선을 추월할 때, $\eta/L_1=0.3, 0.4, 0.5$ 인 경우의 전후력, 횡력, 회두모멘트를 도시한 것이다. 여기서 η 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이며, L_1 은 추월선인 파나막스급 컨테이너선의 전장이고, L_2 는 피추월선인 LNG선의 전장을 의미한다.

Fig. 4.30~4.32에서 보는 바와 같이 한 선박이 다른 선박을 추월하는 경우에는 각 선박에 작용하는 전후력과 횡력은 패턴이 반대로 작용하고, 회두모멘트는 피추월선에서 초기의 내방모멘트 이후에 추월선이 접근하면서 외방모멘트로 변화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.33~Fig. 4.35는 대상해역의 수심 $h/T=1.2$ 에서 7knots의 속력으로 항해중인 카페리를 파나마급 컨테이너선이 10knots의 속력으로 추월하며 통과할 때, $\eta/L_1=0.3, 0.4, 0.5$ 인 경우의 전후력, 횡력, 회두모멘트를 도시한 것이다.

Fig. 4.33~Fig. 4.35에서 보는 바와 같이 컨테이너선이 자선보다 작은 선박을 추월하는 경우에는 대형선박이 소형선을 추월하는 정황지점 이후에 작은 선박에서 간섭력이 높게 발생하는 것을 볼 수 있다.

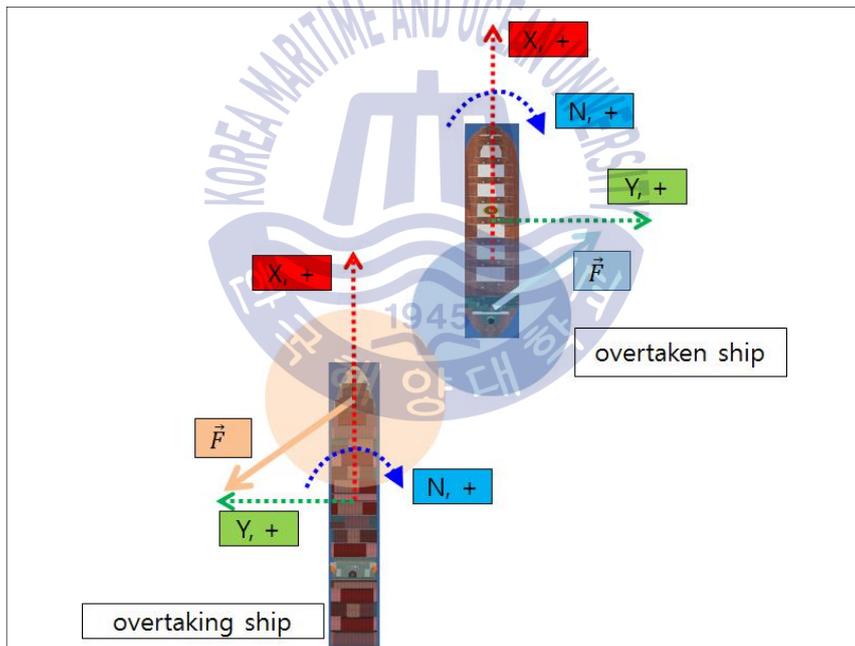
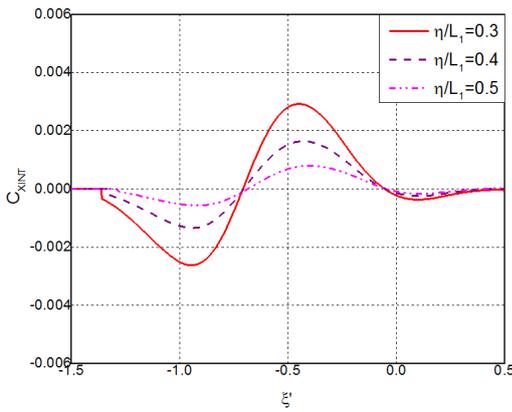
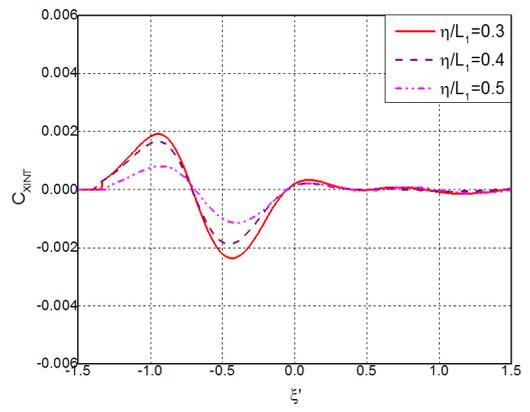


Fig. 4.29 Definition of hydrodynamic interaction forces for two ships in overtaking

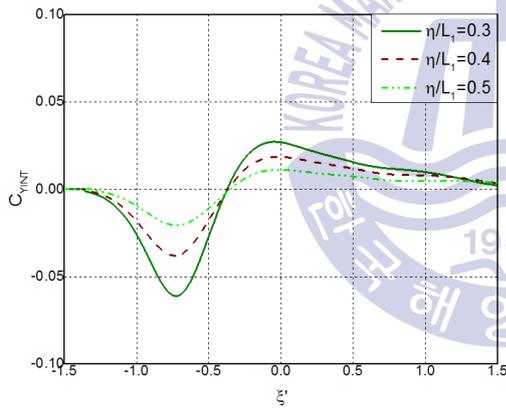


(a) container ship (overtaking)

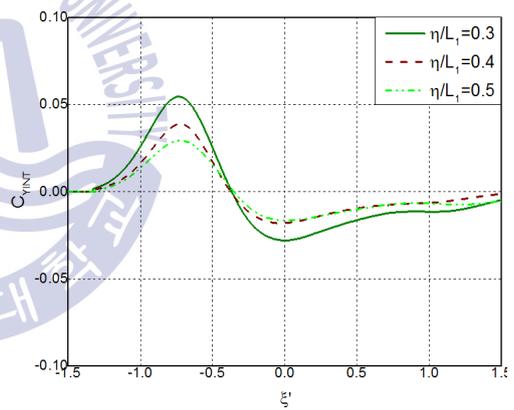


(b) LNG carrier (overtaken)

Fig. 4.30 Non-dimensional surge force of container ship and LNG carrier

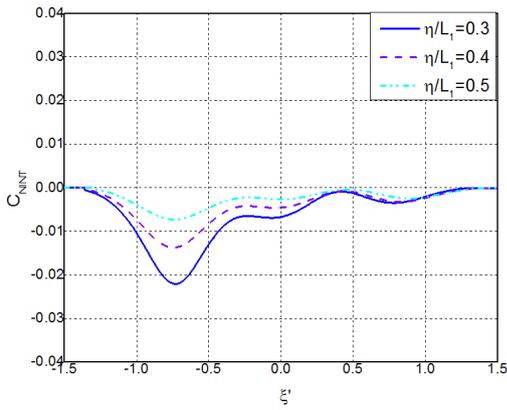


(a) container ship (overtaking)

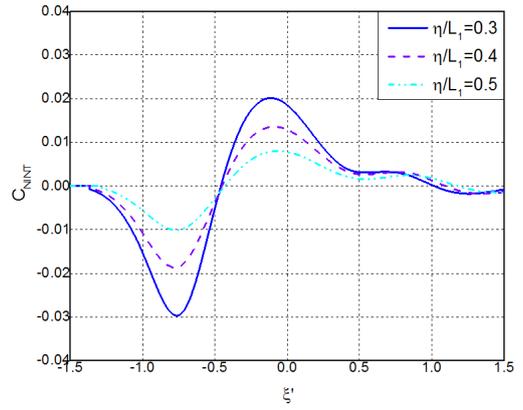


(b) LNG carrier (overtaken)

Fig. 4.31 Non-dimensional sway force of container ship and LNG carrier

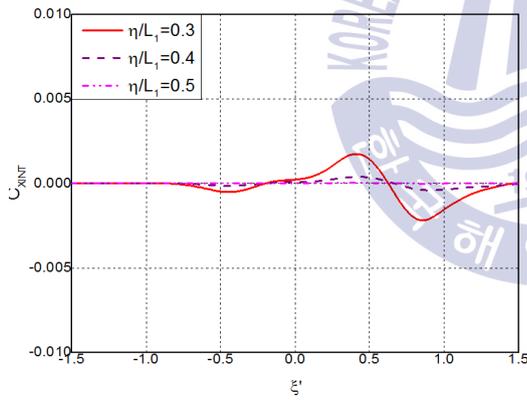


(a) container ship (overtaking)

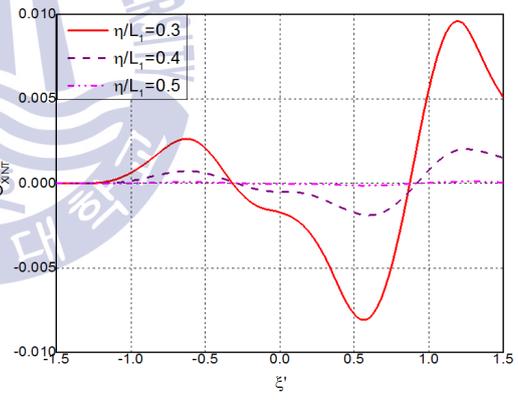


(b) LNG carrier (overtaken)

Fig. 4.32 Non-dimensional yaw moment of container ship and LNG carrier

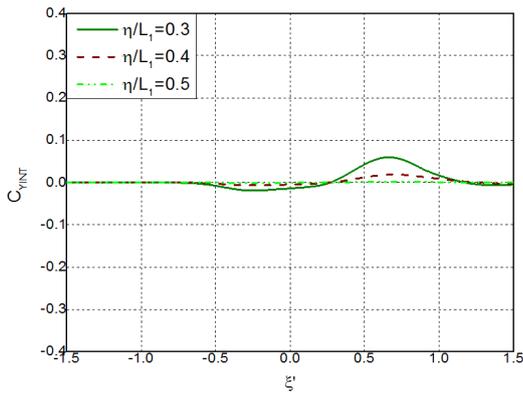


(a) container ship (overtaking)

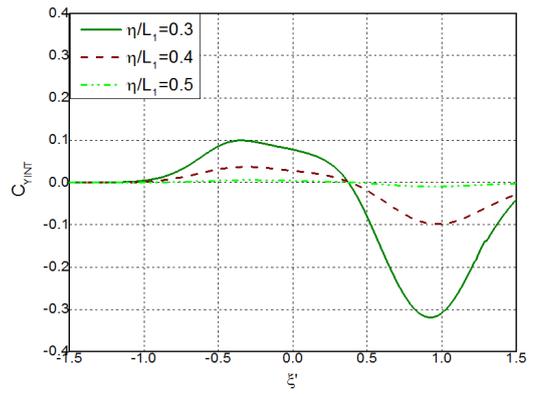


(b) passenger car ferry (overtaken)

Fig. 4.33 Non-dimensional surge force of container ship and passenger car ferry

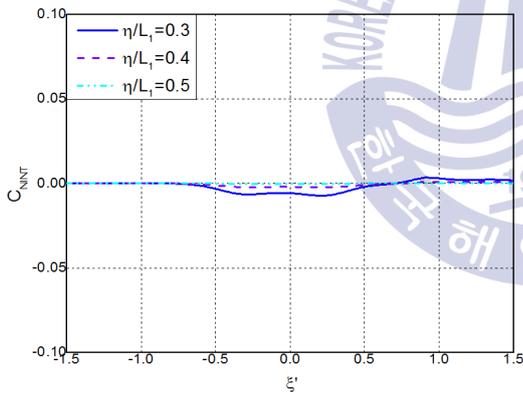


(a) container ship (overtaking)

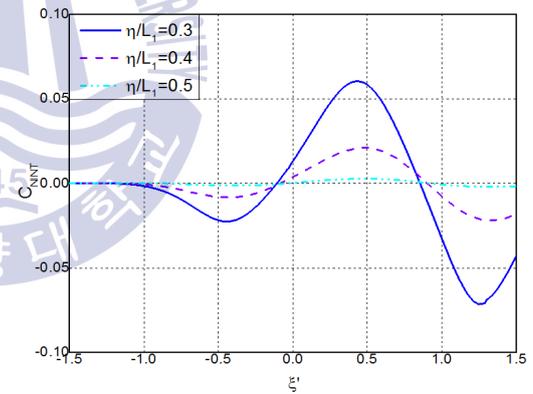


(b) passenger car ferry (overtaken)

Fig. 4.34 Non-dimensional sway force of container ship and passenger car ferry



(a) container ship (overtaking)



(b) passenger car ferry (overtaken)

Fig. 4.35 Non-dimensional yaw moment of container ship and passenger car ferry

3) 수심별 시뮬레이션 결과 분석

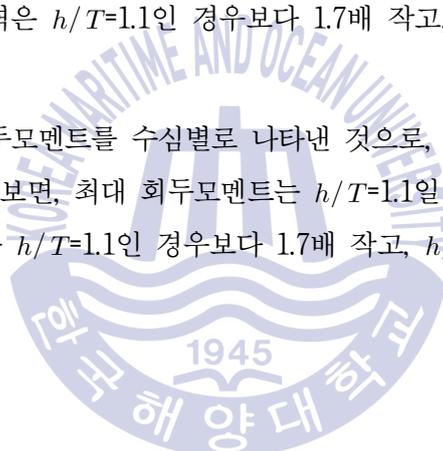
Fig. 4.36~Fig. 4.38은 12knots의 파나막스급 컨테이너선이 8knots의 LNG선을 추월 통과시 파나막스급 컨테이너선에 작용하는 전후력, 횡력, 회두모멘트를 무차원화하여 수심별로 도시

한 것이다. 파나막스급 컨테이너선의 중심선과 LNG선의 중심선 간의 수평거리(η)를 0.4L인 경우만 수심별로 비교하였다.

Fig. 4.36은 추월선의 전후력을 수심별로 나타낸 것으로, 초기에 피추월선에 근접하면서 최대 전후력이 발생하는 지점을 비교해보면, $h/T=1.1$ 일 때 최대 전후력은 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 8배 크고, 그래프의 중간에 해당하는 $h/T=2.0$ 인 경우의 최대 전후력은 $h/T=1.1$ 인 경우보다 1.8배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 4.4배 크게 나타났다. 전후력의 방향이 선수쪽으로 향하면서 다시 최대가 되는 지점을 비교해보면, $h/T=1.1$ 과 $h/T=5.0$ 의 경우는 5배의 차이가 나고, $h/T=2.0$ 과 $h/T=5.0$ 인 경우는 3배의 차이가 났다.

Fig. 4.37는 추월선의 횡력을 수심별로 나타낸 것으로, 추월 초기에 최대 횡력이 발생하는 지점을 비교해보면, $h/T=1.1$ 인 경우의 최대 횡력은 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 7배 크고, $h/T=2.0$ 인 경우의 최대 횡력은 $h/T=1.1$ 인 경우보다 1.7배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 4배 크게 나타났다.

Fig. 4.38은 추월선의 회두모멘트를 수심별로 나타낸 것으로, 추월 초기에 최대 회두모멘트가 발생하는 지점을 비교해보면, 최대 회두모멘트는 $h/T=1.1$ 일 때 $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 7배 크고, $h/T=2.0$ 인 경우는 $h/T=1.1$ 인 경우보다 1.7배 작고, $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 4배 크게 나타났다.



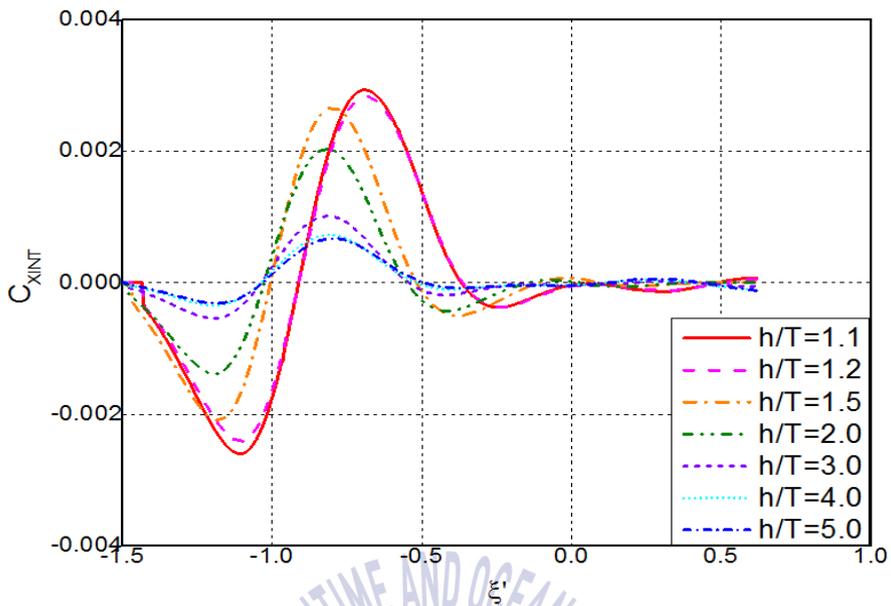


Fig. 4.36 Non-dimensional surge force of container ship according to the water depth (Overtaking)

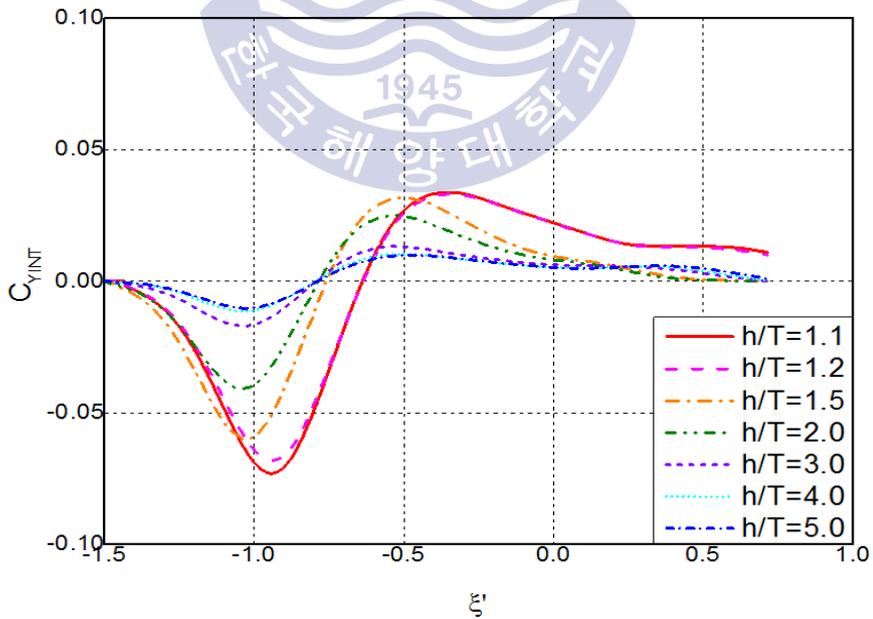


Fig. 4.37 Non-dimensional sway force of container ship according to the water depth (Overtaking)

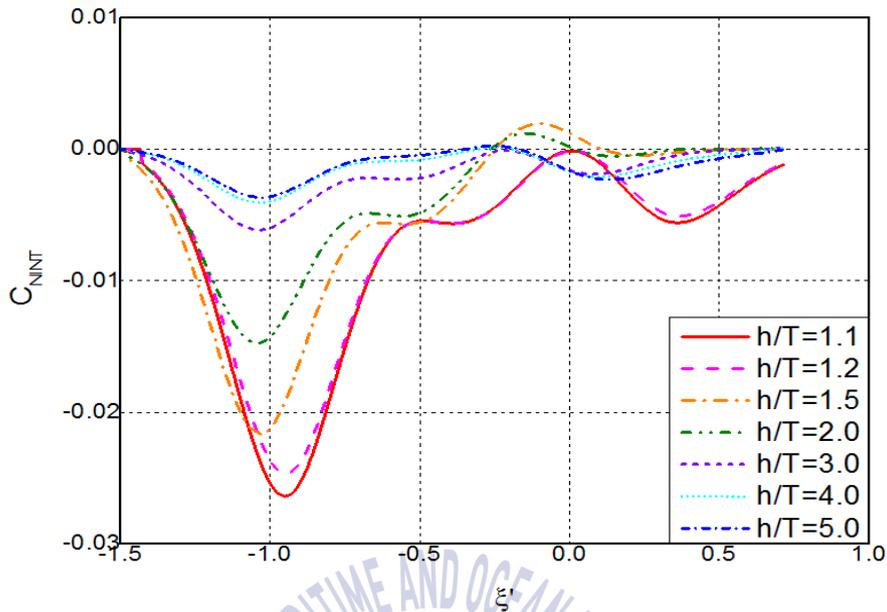


Fig. 4.38 Non-dimensional yaw moment of container ship according to the water depth (Overtaking)

4.4.3 타각계산

1) 속력별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

3장에서 시뮬레이터 모델의 정확도 검증을 위해 사용한 MLIT의 계산방법으로 타각을 계산하고, 표준화를 위한 보침타각 10도에 해당하는 안전통항거리를 도출하였다.

Table 4.15~4.19는 12knots의 선박이 8knots의 선박을 추월하며 통과할 때 발생하는 최대 회두모멘트와 선박의 유체력 계수를 이용하여 보침타각을 계산한 결과이다. 3장에서 간섭력의 정확도를 검증하는 과정에서는 피추월선의 최대 회두모멘트를 사용하였으나, 4장에서는 추월선의 최대 회두모멘트를 이용하였다.

추월선의 중심선에서 피추월선의 중심선까지의 수평거리(η)를 추월선의 길이로 나눈 η/L 의 범위를 선택하고 시뮬레이션을 실시하여 발생하는 추월선의 회두모멘트를 무차원화하여 C_{NINT} 의 최대값을 구한다. 시뮬레이션을 수행하여 얻은 추월선의 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 MLIT의 평형방정식에 대입하면 η/L 에 해당하는 타각이 산정되고, 회귀분석을 통해

보침타각 10도에 해당하는 η/L 을 역으로 도출이 가능하다. 최종적으로 선체(hull) 간의 수평 거리인 안전통항거리를 구할 수 있다.

Table 4.15는 12knots의 파나마급 컨테이너선(CNTR 19)이 상대선인 8knots의 LNG선(LNG 6)을 추월 통과시의 타각계산을 실시한 결과이다. 컨테이너선에 작용하는 최대 회두모멘트는 $\eta/L=0.5$ 일 때 -0.0136 이고, $\eta/L=0.6$ 일 때 -0.0054 이며, $\eta/L=0.7$ 일 때 -0.0013 으로 도출되었다. 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.5\sim 0.7$ 에 해당하는 타각은 각각 20.0도, 7.9도, 2.0도로 산정되었다. 엑셀 그림의 추세선($y=-0.0107x + 0.7066$)을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축의 η/L 을 구할 수 있다.

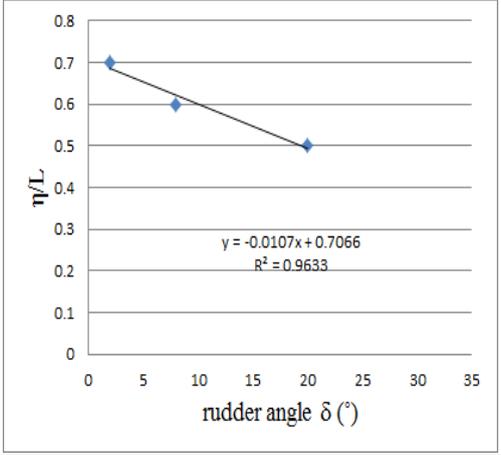
동일한 방법으로 계산한 Table 4.16을 보면, 12knots의 파나마급 컨테이너선(CNTR 19)이 8knots의 벌크선(BLK7 Panamax)을 추월 통과할 때, 컨테이너선에 작용하는 최대 회두모멘트는 $\eta/L=0.3$ 일 때 -0.0206 이고, $\eta/L=0.4$ 일 때 -0.0093 이며, $\eta/L=0.5$ 일 때 -0.0027 로 도출되었다. 3장에서 사용한 MLIT의 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.3\sim 0.5$ 에 해당하는 타각은 각각 30.3도, 13.7도, 4.0도로 산정되었다. 엑셀 그림의 추세선($y=-0.0075x + 0.5193$)을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축의 η/L 을 구할 수 있다.

Table 4.17과 Table 4.18은 12knots의 파나마급 컨테이너선이 상대선인 8knots의 카페리와 어업실습선을 추월 통과하는 경우에 대한 타각계산을 실시한 결과이다. 상대선이 카페리인 경우의 타각은 $\eta/L=0.3\sim 0.5$ 의 구간에서 각각 20.3도, 6.6도, 0.9도로 산정되었고, 상대선이 어업실습선인 경우의 타각은 $\eta/L=0.2\sim 0.4$ 의 구간에서 각각 17.9도, 9.0도, 1.5도로 산정되었다.

Table 4.19는 12knots의 시물레이터가 보유한 최대 흘수선(VLCC 8)이 상대선인 8knots의 초대형 컨테이너선(CNTR 20)을 추월 통과하는 경우에 대한 타각계산을 실시한 결과이다. VLCC에 발생하는 최대 회두모멘트와 VLCC의 유체력 계수를 이용하여 $\eta/L=0.6\sim 0.7$ 에 해당하는 타각을 계산하였다. 평형방정식을 이용하여 계산한 $\eta/L=0.6\sim 0.7$ 에 해당하는 타각은 각각 25.7도, 13.0도, 6.4도로 산정되었다.

Table 4.15 Rudder calculation of container ship overtaking LNG carrier

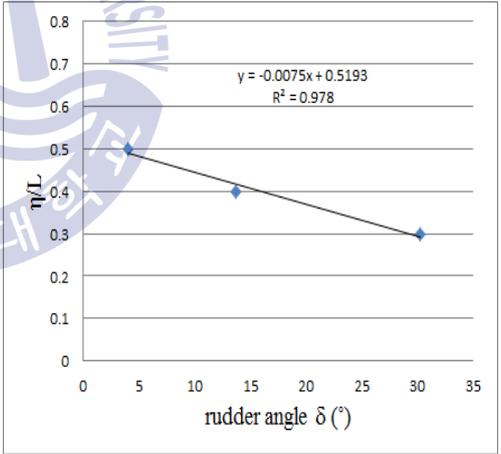
CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT}(\max)$	-0.0136	-0.0054	-0.0013
Y'_{β}	-1.312	-1.312	-1.312
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	-0.3492	-0.1386	-0.0344
타각 (degree)	20.0	7.9	2.0



Scatter plot showing η/L (Y-axis, 0 to 0.8) versus rudder angle δ (°) (X-axis, 0 to 35). The data points are approximately (20, 0.7), (8, 0.6), and (2, 0.5). The regression line is $y = -0.0107x + 0.7066$ with $R^2 = 0.9633$.

Table 4.16 Rudder calculation of container ship overtaking bulk carrier

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_{NINT}(\max)$	-0.0206	-0.0093	-0.0027
Y'_{β}	-1.312	-1.312	-1.312
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	-0.5280	-0.2396	-0.0701
타각 (degree)	30.3	13.7	4.0



Scatter plot showing η/L (Y-axis, 0 to 0.8) versus rudder angle δ (°) (X-axis, 0 to 35). The data points are approximately (30, 0.5), (14, 0.4), and (4, 0.3). The regression line is $y = -0.0075x + 0.5193$ with $R^2 = 0.978$.

Table 4.17 Rudder calculation of container ship overtaking passenger car ferry

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_{NINT}(\max)$	-0.0138	-0.0044	-0.0006
Y'_{β}	-1.312	-1.312	-1.312
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	-0.3551	-0.1144	-0.0162
타각 (degree)	20.3	6.6	0.9

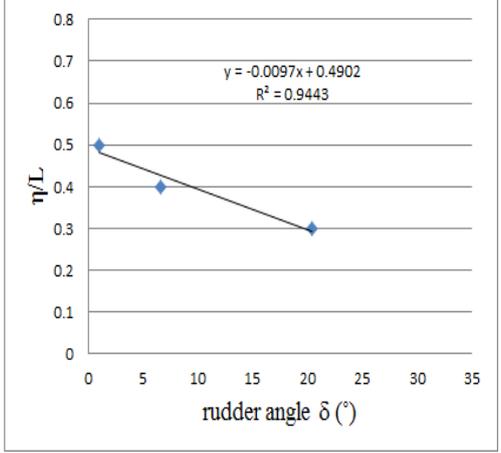


Table 4.18 Rudder calculation of container ship overtaking fishery training ship

CNTR 19 Panamax	η/L		
	0.2	0.3	0.4
$C_{NINT}(\max)$	-0.0122	-0.0061	-0.0010
Y'_{β}	-1.312	-1.312	-1.312
N'_{β}	-0.0449	-0.0449	-0.0449
Y'_{δ}	-0.0781	-0.0781	-0.0781
N'_{δ}	0.0391	0.0391	0.0391
타각(rad)	-0.3126	-0.1569	-0.0268
타각 (degree)	17.9	9.0	1.5

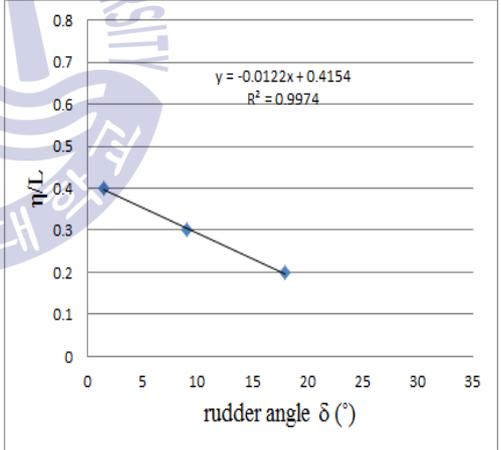


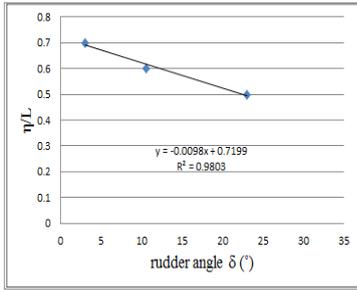
Table 4.19 Rudder calculation of VLCC overtaking container ship

VLCC 8	η/L		
	0.6	0.65	0.7
$C_{NINT}(\max)$	-0.0197	-0.0099	-0.0049
Y'_β	-1.658	-1.658	-1.658
N'_β	-0.564	-0.564	-0.564
Y'_δ	-0.088	-0.088	-0.088
N'_δ	0.044	0.044	0.044
타각(rad)	-0.4478	-0.2263	-0.1120
타각 (degree)	25.7	13.0	6.4

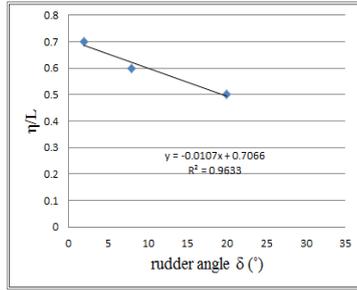
2) 길이별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

앞서 기술한 계산방법을 이용하여 상대선의 길이가 다양한 경우에 대한 추월 통과시의 안전통항거리를 산정할 수 있다. Fig. 4.39는 12knots의 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)과 다양한 길이의 상대선(8knots)을 추월 통과할 때, 추월선에 발생하는 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 이용하여 계산한 컨테이너선의 보침타각을 그래프로 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 수행하여 x축의 타각이 35도를 넘지 않은 최대 회두모멘트를 도출하였다. 앞서 계산한 LNG선, 벌크선, 카페리의 결과를 Fig. 4.39에 추가하였다.

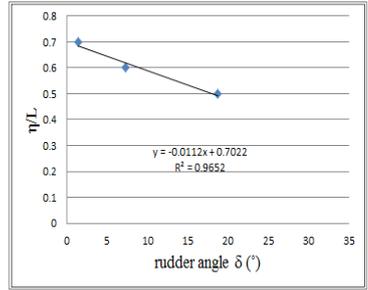
대형크기의 선박 모델(CNTR 8, PCS 6, LNG 4)은 η/L 의 구간이 0.6~0.8에 추세선이 위치하고, 중형크기의 선박 모델(OT 3, BLK 7, CCR 6)은 η/L 의 구간이 0.4~0.7에 추세선이 위치하고 있다. 소형선(ITB 450, RPPF 11)은 η/L 의 구간이 0.2~0.4에 추세선이 위치하였다. 상대선의 길이가 작을수록 추세선의 y축 η/L 구간이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 추세선을 이용하여 x축의 보침타각 10도에 해당하는 y축 η/L 을 구할 수 있고, 최종적으로 선체 간의 수평거리인 안전통항거리를 도출할 수 있다.



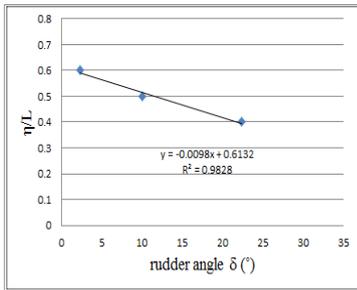
CNTR 8 ($L_1/L_2=0.76$)



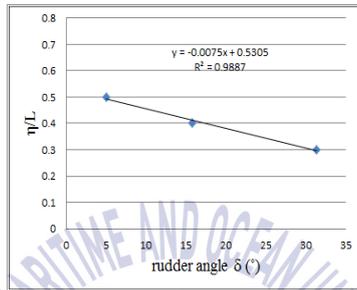
LNG 6 ($L_1/L_2=0.80$)



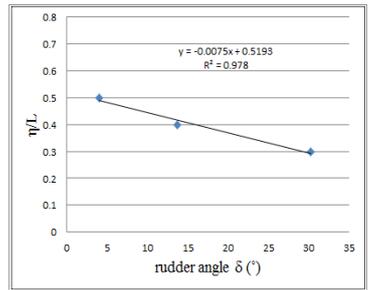
PCS 6 ($L_1/L_2=0.83$)



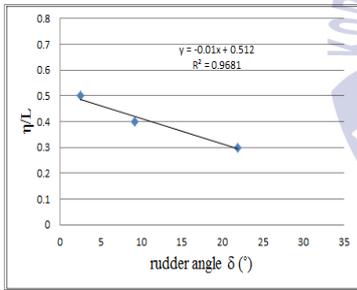
LNG 4 ($L_1/L_2=1.00$)



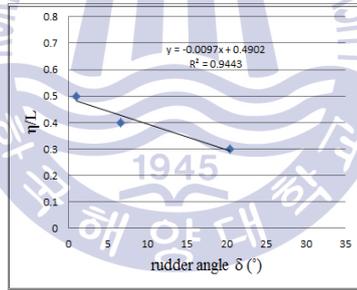
OT 3 ($L_1/L_2=1.19$)



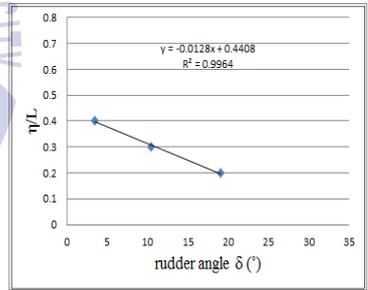
BLK 7 ($L_1/L_2=1.26$)



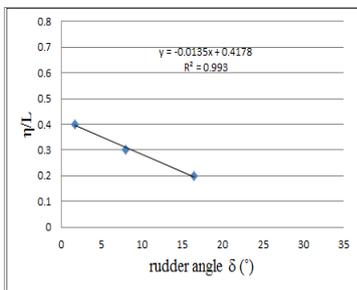
CCR 6 ($L_1/L_2=1.45$)



PCF 2 ($L_1/L_2=1.65$)



ITB 450 ($L_1/L_2=2.02$)



RRPF 11 ($L_1/L_2=2.31$)

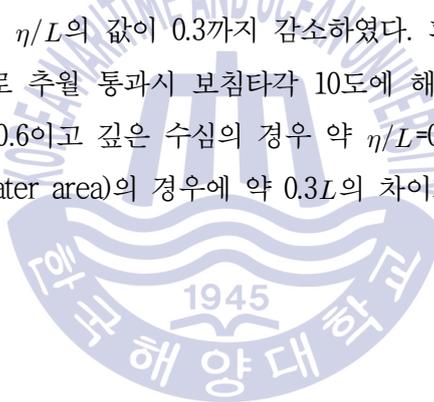
Fig. 4.39 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship overtaking LNG carrier according to the ship's length (12-8knots)

3) 수심별 안전통항거리 산정을 위한 타각계산

Fig. 4.40은 파나막스급 컨테이너선(CNTR 19)의 중심선에서 피추월선(LNG 6)의 중심선까지의 수평거리(η)를 $0.3\sim 0.7L$ 로 두고 12knots의 컨테이너선이 8knots의 LNG선을 추월 통과시 추월선에 발생하는 최대 회두모멘트와 유체력 계수를 이용하여 계산한 보침타각을 수심별로 나타낸 것이다. x축 타각의 범위는 35도를 넘지 않은 η/L 에서 시뮬레이션을 수행하였고, 두 선박의 상호간섭으로 기준선에 발생하는 회두모멘트를 10도의 타각으로 제어하는 것을 표준으로 정하였다.

수심조건 $h/T=1.1, 1.2, 1.5, 2.0$ 의 경우에는 $\eta/L=0.5\sim 0.7$ 의 범위에 추세선이 위치하고 있고, $h/T=5.0$ 의 경우에는 $\eta/L=0.3\sim 0.5$ 에 추세선이 위치하고 있다. 전체적으로 수심이 깊어질수록 추세선의 기울기가 가파르게 변하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.27을 통해 수심이 $h/T=4.0$ 과 $h/T=5.0$ 으로 증가하면 기준선과 상대선의 중심선의 거리를 선박의 길이로 나눈 η/L 의 값이 0.3까지 감소하였다. 파나막스급 컨테이너선이 자선보다 큰 LNG선을 12knots로 추월 통과시 보침타각 10도에 해당하는 선박 간의 수평거리는 얕은 수심의 경우 약 $\eta/L=0.6$ 이고 깊은 수심의 경우 약 $\eta/L=0.3$ 로 계산되었다. 천수(shallow water area)와 심수(deep water area)의 경우에 약 $0.3L$ 의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.



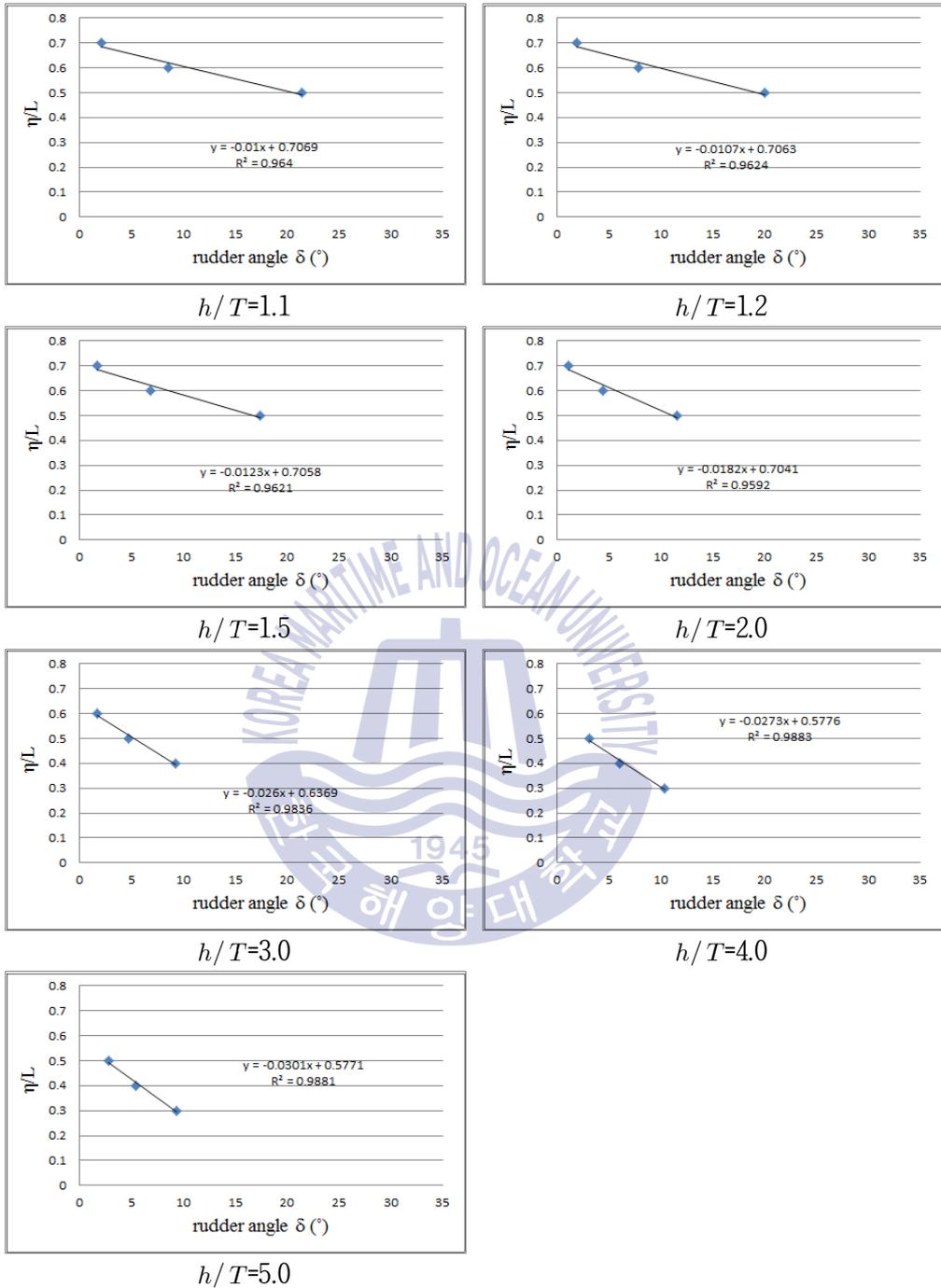


Fig. 4.40 Range of rudder angle and lateral distance of panamax container ship overtaking LNG carrier according to the water depth (12-8knots)

제 5 장 안전통항거리에 관한 표준화 방안

간섭력이 발생하는 3가지 근접 상황 즉, 부두에 접안 중인 계류선을 통과하는 상황, 두 선박이 마주치며 통과하는 상황, 한 선박이 다른 선박을 추월하는 상황에 대하여 다양한 선박을 대상으로 간섭력(전후력, 횡력, 회두모멘트)를 파악하고, 타각계산을 통한 안전통항거리를 도출하였다. 두 선박은 평행방향으로 표류각과 외력이 없는 정수의 조건에서 실시하였고, 타각계산은 일본의 MLIT에서 사용한 이론계산 방법을 이용하였다.

5.1 상황별 안전통항거리 표준화

5.1.1 계류선 통과시의 안전통항거리

1) 속력별 표준화

Fig. 5.1과 같이 파나마스급 컨테이너선이 계류선인 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 7knots, 9knots, 12knots로 통과시 통과선과 계류선의 간섭력을 고려한 안전통항거리를 도출하였다. 통과선의 속력은 국내 항만의 접이안속도, 평균속도를 고려하였다(Kim et al., 2012).

Table. 5.1은 $h/T=1.2$ 의 해역에서 계류선 통과시 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침(course-keeping)이 가능한 파나마스급 컨테이너선의 안전통항거리를 계류선의 크기와 통과속력별로 정리한 것이다.

자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 에서 계류선 통과시 컨테이너선의 안전통항거리는 7knots인 경우에 $31 < S [m] < 126$ 이고, 9knots인 경우에 $54 < S [m] < 143$ 이며, 12knots인 경우에 $70 < S [m] < 154$ 의 범위이다. 통과선의 속력이 7knots에서 9knots로 증가시 안전통항거리는 최소 1.1배에서 최대 1.7배 증가하였고, 7knots에서 12knots로 증가시에는 최소 1.2배에서 최대 2.2배 증가하였다. 크기가 작은 선박을 통과할수록 통과선의 속력의 증가에 따른 안전통항거리는 증가한 것을 알 수 있다.

Table. 5.2는 Table 5.1의 계류선 통과시 속력과 선박의 크기에 따른 파나마스급 컨테이너선의 안전통항거리를 통과선의 폭의 크기(S/B_1)로 나타낸 결과로서, 7knots로 통과시 안전통항거리는 $1.0B_1 \sim 3.9B_1$ 이고, 9knots로 통과시는 $1.7B_1 \sim 4.4B_1$ 이며, 12knots로 통과시 $2.2B_1 \sim 4.8B_1$ 이다. 또한, 7knots에서 12knots의 속력구간에서 자선보다 큰 LNG선 통과시 $3.9B_1 \sim 4.8B_1$

이고, 파나막스급 벌크선 통과시 $2.8B_1 \sim 3.5B_1$ 이며, 카페리 통과시 $2.2B_1 \sim 3.2B_1$ 이고, 어업실습선 통과시 $1.0B_1 \sim 2.2B_1$ 인 것을 알 수 있다.

Fig. 5.2는 Table. 5.1의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 x축은 통과선의 속력이며, y축은 안전통항거리이다. 크기가 다른 4종류의 계류선을 통과할 경우, 안전통항거리는 속력에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

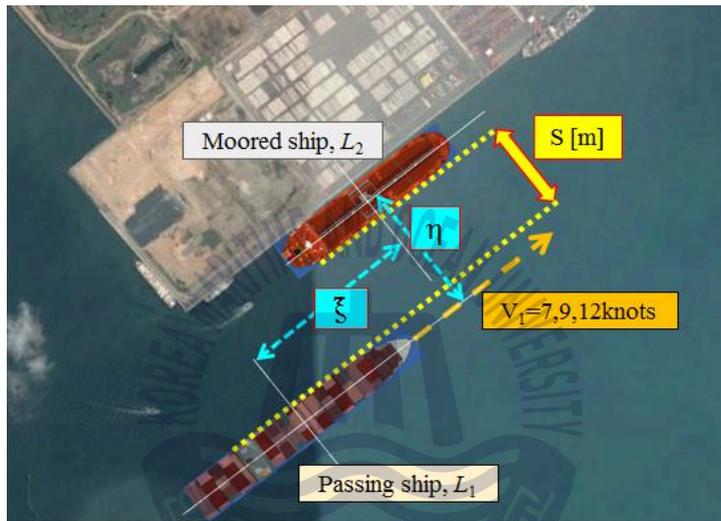


Fig. 5.1 Diagram of moored passing ship

Table 5.1 Comparison of safe distance according to the passing speed

Moored ship passing, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$				
Container Panamax (L_1)		S [m]		
Moored ships (L_2)	L_1/L_2	7knots	9knots	12knots
LNG carrier	0.8	125.0	142.7	153.3
Bulk carrier (Panamax)	1.26	88.7	102.7	112.6
Passenger car ferry	1.65	71.5	89.2	101.9
Fishery training ship	3.11	31.8	54.4	70.8

Table 5.2 Comparison of safe distance of own ship according to the passing speed based on the own ship's breadth

Moored ship passing, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$				
Container Panamax		Safe distance of own ship (Panamax, $L_1=289$, $B_1=32.2$)		
Moored ships	L_1/L_2	7knots	9knots	12knots
LNG carrier	0.80	$3.9B_1$	$4.4B_1$	$4.8B_1$
Bulk carrier (Panamax)	1.26	$2.8B_1$	$3.2B_1$	$3.5B_1$
Passenger car ferry	1.65	$2.2B_1$	$2.8B_1$	$3.2B_1$
Fishery training ship	3.11	$1.0B_1$	$1.7B_1$	$2.2B_1$

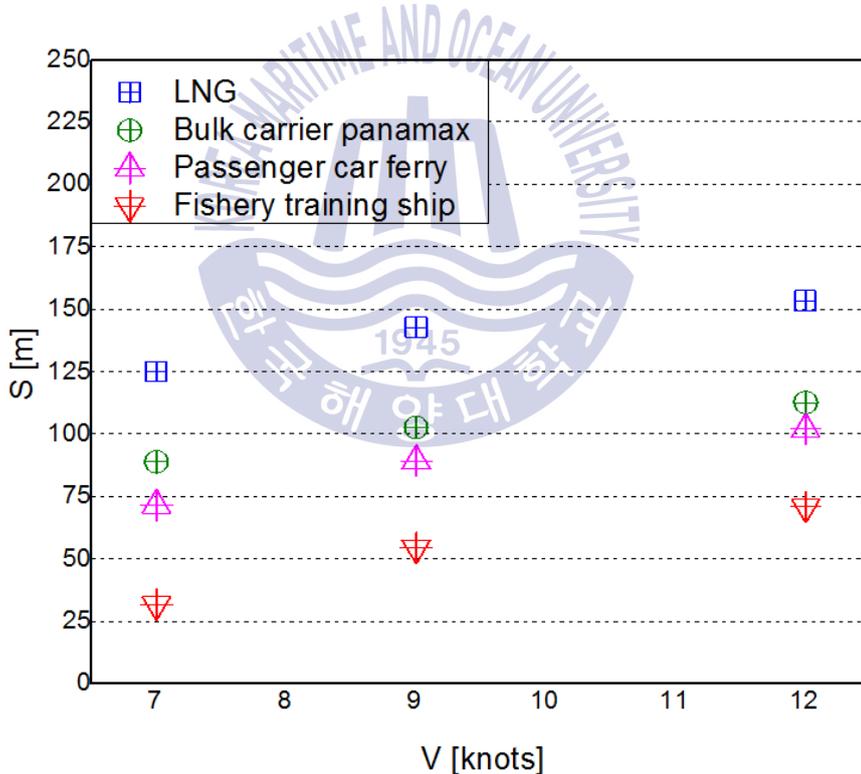


Fig. 5.2 Distance of safe passing according to the passing speed in case of moored ship passing ($h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

2) 길이별 표준화

Table. 5.3은 $h/T=1.2$ 의 해역에서 9knots로 계류선 통과시 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침(course-keeping)이 가능한 파나마급 컨테이너선의 안전통항거리를 계류선의 크기별로 정리한 것이다. 앞서 정리한 Table. 5.1에서 3종류의 선박(LNG carrier, Bulk carrier, Passenger car ferry)을 9knots로 통과한 경우의 안전통항거리를 포함한 것이다. 여기서, η/L_1 는 통과선과 계류선의 중심선 간의 수평거리를 통과선의 길이로 나눈 것을 의미한다.

Table. 5.3에서 자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 일 때, 안전통항거리는 $0.2 < \eta/L_1 < 0.6$ 의 범위를 보이고 있다. 파나마급 컨테이너선보다 비슷하거나 큰 초대형선의 경우에 안전통항거리는 약 $\eta/L_1=0.5\sim 0.6$ 이며, 200미터 이하 선박의 경우에는 약 $\eta/L_1=0.2\sim 0.4$ 인 것을 알 수 있다. Fig. 5.3은 통과선의 속력이 7knots인 경우와 9knots인 경우에 대해 선박의 상호간섭을 고려한 상대선의 길이별 안전통항거리를 지수함수(exponential function)로 비교한 것이다. 모집단의 크기는 일정한 상대 감소율(relative decay rate)에 따라 지수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 5.3 Safe distance of container panamax according to the ship's length in case of moored ship passing ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)

Moored ship type	L_2 [m]	L_1/L_2	η/L_1
Container ship	382	0.76	0.576
LNG carrier	360	0.80	0.550
Passenger cruise ship	350	0.83	0.545
LNG carrier	289.9	1.00	0.478
Oil tanker	242.8	1.19	0.426
Bulk carrier (Panamax)	230	1.26	0.411
Car carrier	199.1	1.45	0.382
Passenger car ferry	175.4	1.65	0.364
Tug barge	142.8	2.02	0.329
Ro-Ro passenger Ferry	125	2.31	0.268

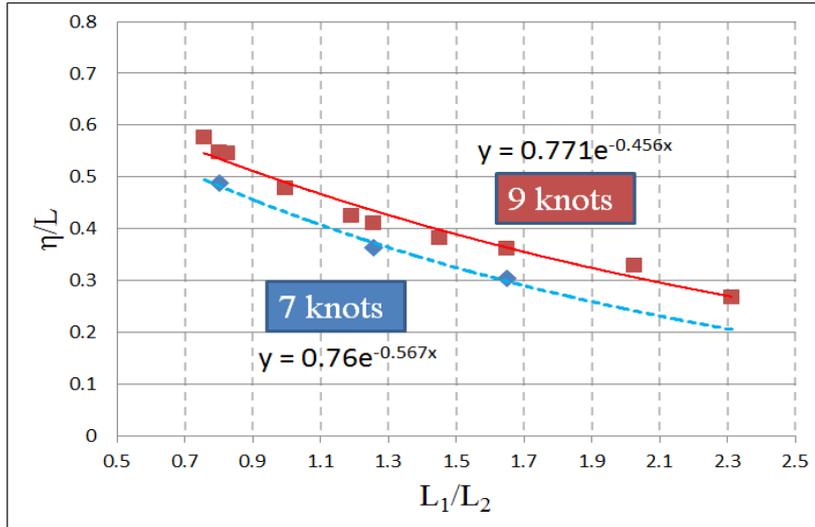


Fig. 5.3 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to the target ship's length (moored ship passing, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

5.1.2 마주치며 통과시의 안전통항거리

1) 속력별 표준화

Fig. 5.4와 같이 파나마급 컨테이너선이 상대선(course 180°)인 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 10knots, 12knots, 14knots로 마주치며 통과시 두 선박의 간섭력을 고려한 안전통항거리를 도출하였다. 상대선과 자선의 속력비(V_2/V_1)가 다른 경우를 비교하기 위하여 상대선의 속력은 자선의 속력과 다른 7knots, 10knots, 12.6knots로 지정하였다.

Table. 5.4는 $h/T=1.2$ 의 해역에서 마주치며 통과시 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침(course-keeping)이 가능한 파나마급 컨테이너선의 안전통항거리를 속력과 크기별로 정리한 것이다. 자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 에서 마주치며 통과시 컨테이너선의 안전통항거리는 $V_2/V_1=0.7$ 인 경우에 $63 < S [m] < 158$ 이고, $V_2/V_1=0.83$ 인 경우에 $70 < S [m] < 168$ 이며, $V_2/V_1=0.9$ 인 경우에 $76 < S [m] < 175$ 의 범위이다. 속력이 10knots에서 14knots로 증가시 파나마급 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선의 크기에 따라 1.1~1.2배 증가하였다. 계류선 통과시에 비해 크기가 작은 선박인 경우 안전통항거리의 증가폭이 작았다.

Table. 5.5와 Table. 5.6은 Table 5.4의 마주치며 통과시 속력과 선박의 크기에 따른 파나마스급 컨테이너선의 안전통항거리를 자선의 폭의 크기(S/B_1)와 상대선의 폭의 크기(S/B_2)로 나타낸 결과로서, $V_2/V_1=0.7$ 인 경우에 $2.0B_1\sim 4.9B_1$ 이고, $V_2/V_1=0.83$ 인 경우에 $2.2B_1\sim 5.2B_1$ 이며, $V_2/V_1=0.9$ 인 경우에 $2.4B_1\sim 5.4B_1$ 이다. 또한, $0.6 < V_2/V_1 < 1.0$ 의 속도구간에서 상대선이 자선보다 큰 LNG선인 경우에 $4.9B_1\sim 5.4B_1$ 이고, 파나마스급 벌크선인 경우에 $3.8B_1\sim 4.2B_1$ 이며, 카페리인 경우에 $2.9B_1\sim 3.3B_1$ 이고, 어업실습선인 경우에 $2.0B_1\sim 2.4B_1$ 인 것을 알 수 있다.

Table. 5.6을 통해 파나마스급 컨테이너선과 마주치며 통과하는 선박(target ship)의 폭으로 안전통항거리를 생각할 수 있다. LNG선인 경우는 $2.9B_2\sim 3.2B_2$ 이고, 벌크선의 경우는 $3.8B_2\sim 4.2B_2$ 이며, 카페리인 경우 $3.0B_2\sim 3.4B_2$ 이고, 어업실습선인 경우는 $4.2B_2\sim 5.1B_2$ 이다.

Fig. 5.5는 Table. 5.4의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 x축은 자선(course 000°)의 속력이며, y축은 안전통항거리이다. 크기가 다른 4종류의 상대선을 마주치며 통과할 경우, 안전통항거리는 속력에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

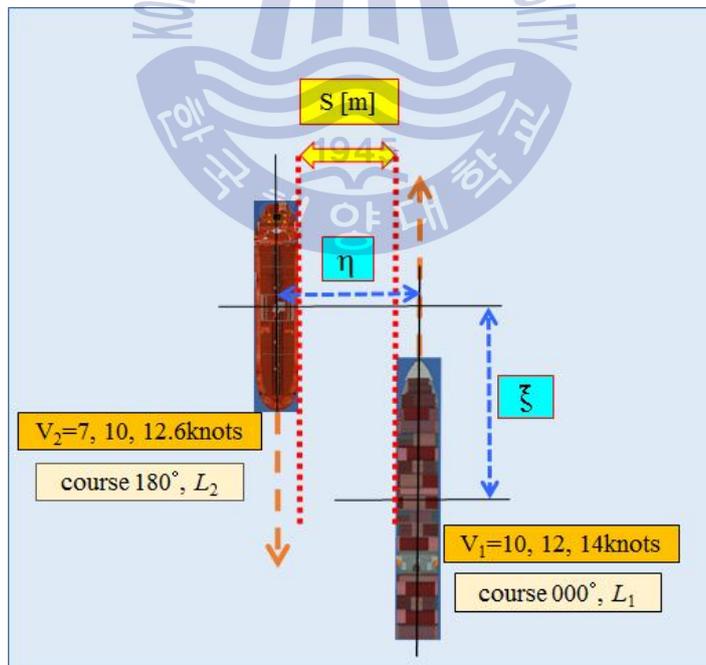


Fig. 5.4 Diagram of head-on encountering

Table 5.4 Comparison of safe distance according to the encountering speed

Head-on encountering, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$					
Container Panamax (L_1)			S [m]		
Target ships (L_2)	L_2 [m]	L_1/L_2	$V_2/V_1=0.7$ $V_1=10$ knots $V_2=7$ knots	$V_2/V_1=0.83$ $V_1=12$ knots $V_2=10$ knots	$V_2/V_1=0.9$ $V_1=14$ knots $V_2=12.6$ knots
LNG carrier	360	0.80	157.1	167.6	174.3
Bulk carrier (Panamax)	230	1.26	120.8	129.4	135.1
Passenger car ferry	175.4	1.65	94.3	100.8	105.8
Fishery training ship	93	3.11	63.1	70.7	76.4

Table 5.5 Comparison of safe distance of own ship according to the encountering speed based on the own ship's breadth

Head-on encountering, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$					
Container Panamax (L_1)			Safe distance of own ship (Panamax, $L_1=289$, $B_1=32.2$)		
Target ships	L_2 [m]	L_1/L_2	$V_2/V_1=0.7$ $V_1=10$ knots $V_2=7$ knots	$V_2/V_1=0.83$ $V_1=12$ knots $V_2=10$ knots	$V_2/V_1=0.9$ $V_1=14$ knots $V_2=12.6$ knots
LNG carrier	360	0.8	$4.9B_1$	$5.2B_1$	$5.4B_1$
Bulk carrier (Panamax)	230	1.26	$3.8B_1$	$4.0B_1$	$4.2B_1$
Passenger car ferry	175.4	1.65	$2.9B_1$	$3.1B_1$	$3.3B_1$
Fishery training ship	93	3.11	$2.0B_1$	$2.2B_1$	$2.4B_1$

Table 5.6 Comparison of safe distance of target ship according to the encountering speed based on the target ship's breadth

Head-on encountering, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$				
Container Panamax (L_1)		Safe distance of target ship		
Target ships	B_2 [m]	$V_2/V_1=0.7$ $V_1=10\text{knots}$ $V_2=7\text{knots}$	$V_2/V_1=0.83$ $V_1=12\text{knots}$ $V_2=10\text{knots}$	$V_2/V_1=0. V_1$ $V_1=14\text{knots}$ $V_2=12.6\text{knots}$
LNG carrier	55	$2.9B_2$	$3.0B_2$	$3.2B_2$
Bulk carrier (Panamax)	32	$3.8B_2$	$4.0B_2$	$4.2B_2$
Passenger car ferry	31.5	$3.0B_2$	$3.2B_2$	$3.4B_2$
Fishery training ship	14.9	$4.2B_2$	$4.7B_2$	$5.1B_2$

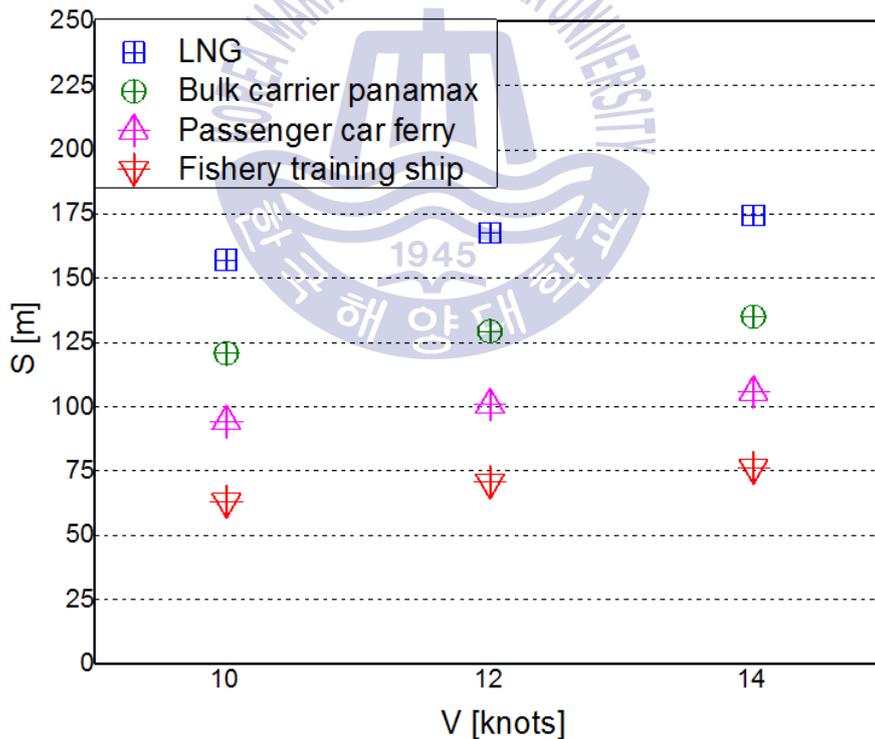


Fig. 5.5 Distance of safe passing according to the encountering speed in case of head-on encountering ($h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

2) 길이별 표준화

Table. 5.7은 $h/T=1.2$ 의 해역에서 12knots로 두 선박이 마주치며 통과할 때 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침이 가능한 파나마급 컨테이너선의 안전통항거리를 상대선의 크기별로 정리한 것이다. 여기서, η/L_1 는 마주치며 통과하는 두 선박의 중심선 간의 수평거리를 자선(course 000°)의 길이로 나눈 것을 의미한다.

Table. 5.7에서 자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 일 때, 안전통항거리는 $0.3 < \eta/L_1 < 0.7$ 의 범위를 보이고 있다. 파나마급 컨테이너선보다 비슷하거나 큰 초대형선의 경우에 안전통항거리는 약 $\eta/L_1=0.6-0.7$ 이며, 200미터 이하 선박의 경우에는 약 $\eta/L_1=0.3-0.5$ 인 것을 알 수 있다.

Fig. 5.6은 Table 5.4에서 자선의 속력이 10knots(상대선의 속력은 7knots)인 경우와 Table 5.7에서 두 선박의 속력이 12knots인 경우에 대해 선박의 상호간섭을 고려한 상대선의 길이별 안전통항거리를 지수함수(exponential function)로 비교한 것이다. 모집단의 크기는 일정한 상대 감소율(relative decay rate)에 따라 지수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 5.7 Safe distance of container panamax according to the ship's length in case of head-on encountering ($h/T=1.2, \delta=10^\circ$)

Target ships	L_2 [m]	L_1/L_2	η/L_1
Container ship	382	0.76	0.683
LNG carrier	360	0.80	0.644
Passenger cruise ship	350	0.83	0.611
LNG carrier	289.9	1.00	0.595
Oil tanker	242.8	1.19	0.584
Bulk carrier (Panamax)	230	1.26	0.517
Car carrier	199.1	1.45	0.510
Passenger car ferry	175.4	1.65	0.412
Tug barge	142.8	2.02	0.362
Ro-Ro passenger Ferry	125	2.31	0.304

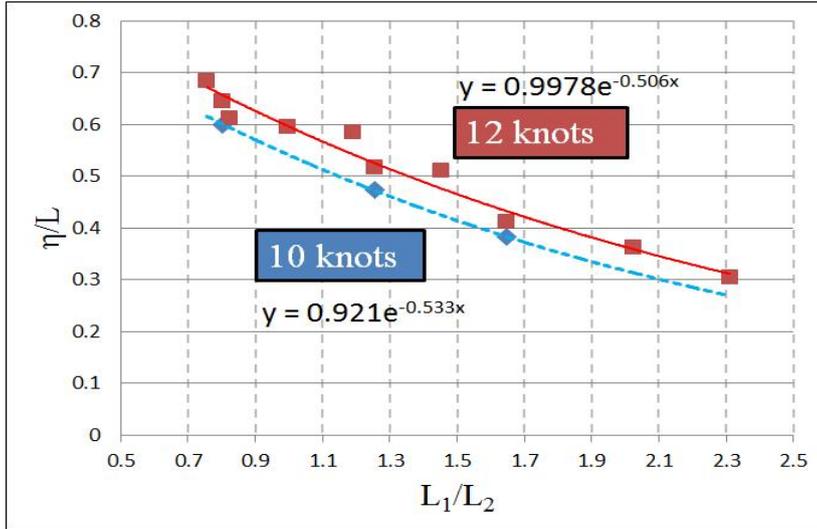


Fig. 5.6 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to the target ship's length (head-on encountering, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

5.1.3 추월 통과시의 안전통항거리

1) 속력별 표준화

Fig. 5.7은 파나막스급 컨테이너선이 피추월선인 LNG선, 벌크선, 카페리, 어업실습선을 10knots, 12knots, 14knots로 추월 통과시 두 선박의 간섭력을 고려한 안전통항거리를 도출한 결과이다. 상대선과 자선의 속력비(V_2/V_1)가 다른 경우를 비교하기 위하여 상대선의 속력은 자선의 속력과 다른 7knots, 8knots, 7knots로 지정하였다.

Table. 5.8은 $h/T=1.2$ 의 해역에서 추월 통과시 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침(course-keeping)이 가능한 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리를 속력과 크기별로 정리한 것이다.

자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 에서 추월 통과시 컨테이너선의 안전통항거리는 $V_2/V_1=0.7$ 인 경우에 $59 < S [m] < 150$ 이고, $V_2/V_1=0.67$ 인 경우에 $68 < S [m] < 158$ 이며, $V_2/V_1=0.5$ 인 경우에 $75 < S [m] < 163$ 의 범위이다. 속력이 10knots에서 14knots로 증가시 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선의 크기에 따라 1.1~1.3배 증가하였다.

Table. 5.9와 Table. 5.10은 Table 5.8의 추월 통과시 속력과 선박의 크기에 따른 파나막스

급 컨테이너선의 안전통항거리를 자선의 폭의 크기(S/B_1)와 상대선의 폭의 크기(S/B_2)로 나타낸 것이다. Table. 5.9를 보면 $V_2/V_1=0.7$ 인 경우에 $1.9B_1\sim 4.6B_1$ 이고, $V_2/V_1=0.83$ 인 경우에 $2.2B_1\sim 5.2B_1$ 이며, $V_2/V_1=0.9$ 인 경우에 $2.4B_1\sim 5.4B_1$ 이다. 또한, $0.4 < V_2/V_1 < 0.8$ 의 속력구간에서 상대선이 자선보다 큰 LNG선인 경우에 $4.6B_1\sim 5.0B_1$ 이고, 파나막스급 벌크선인 경우에 $3.3B_1\sim 3.6B_1$ 이며, 카페리인 경우에 $2.8B_1\sim 3.2B_1$ 이고, 어업실습선인 경우에 $1.9B_1\sim 2.3B_1$ 이다.

Table. 5.10을 통해 파나막스급 컨테이너선에 의해 추월되는 선박의 안전통항거리를 알 수 있다. LNG선인 경우는 $2.7B_2\sim 3.0B_2$ 이고, 벌크선의 경우는 $3.3B_2\sim 3.6B_2$ 이며, 카페리인 경우 $2.8B_2\sim 3.3B_2$ 이고, 어업실습선인 경우는 $4.0B_2\sim 5.1B_2$ 로 산정되었다.

Fig. 5.8은 Table. 5.8의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 x축은 추월선의 속력이며, y축은 안전통항거리이다. 크기가 다른 4종류의 상대선을 추월 통과할 경우, 안전통항거리는 속력에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

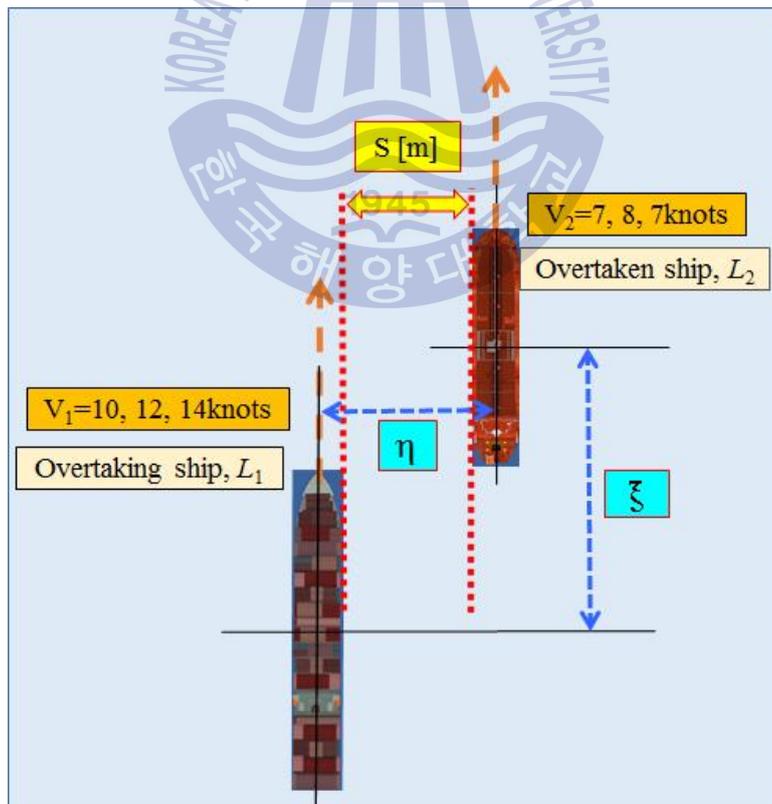


Fig. 5.7 Diagram of two ships in overtaking

Table 5.8 Comparison of safe distance according to the overtaking and overtaken speeds

Overtaking, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$				
Container Panamax (L_1)		S [m]		
Overtaken ships (L_2)	L_1/L_2	$V_2/V_1=0.7$ $V_1=10\text{knots}$ $V_2=7\text{knots}$	$V_2/V_1=0.67$ $V_1=12\text{knots}$ $V_2=8\text{knots}$	$V_2/V_1=0.5$ $V_1=14\text{knots}$ $V_2=7\text{knots}$
LNG carrier	0.80	149.5	157.2	162.5
Bulk carrier (Panamax)	1.26	106.8	111.6	114.8
Passenger car ferry	1.65	89.2	97.5	102.6
Fishery training ship	3.11	59.6	68.7	75.4

Table 5.9 Comparison of safe distance of own ship according to the overtaking and overtaken speeds based on the own ship's breadth

Overtaking, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$				
Container Panamax (L_1)		Safe distance of own ship (Panamax, $L_1=289$, $B_1=32.2$)		
Overtaken ships (L_2)	L_1/L_2	$V_2/V_1=0.7$ $V_1=10\text{knots}$ $V_2=7\text{knots}$	$V_2/V_1=0.67$ $V_1=12\text{knots}$ $V_2=8\text{knots}$	$V_2/V_1=0.5$ $V_1=14\text{knots}$ $V_2=7\text{knots}$
LNG carrier	0.80	$4.6B_1$	$4.9B_1$	$5.0B_1$
Bulk carrier (Panamax)	1.26	$3.3B_1$	$3.5B_1$	$3.6B_1$
Passenger car ferry	1.65	$2.8B_1$	$3.0B_1$	$3.2B_1$
Fishery training ship	3.11	$1.9B_1$	$2.1B_1$	$2.3B_1$

Table 5.10 Comparison of safe distance of target ship according to the overtaking and overtaken speed based on the target ship's breadth

Overtaking, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$				
Container Panamax (L_1)		Safe distance of target ship		
Overtaken ships	B_2 [m]	$V_2/V_1=0.7$	$V_2/V_1=0.67$	$V_2/V_1=0.5$
		$V_1=10$ knots $V_2=7$ knots	$V_1=12$ knots $V_2=8$ knots	$V_1=14$ knots $V_2=7$ knots
LNG carrier	55	$2.7B_2$	$2.9B_2$	$3.0B_2$
Bulk carrier (Panamax)	32	$3.3B_2$	$3.5B_2$	$3.6B_2$
Passenger car ferry	31.5	$2.8B_2$	$3.1B_2$	$3.3B_2$
Fishery training ship	14.9	$4.0B_2$	$4.6B_2$	$5.1B_2$

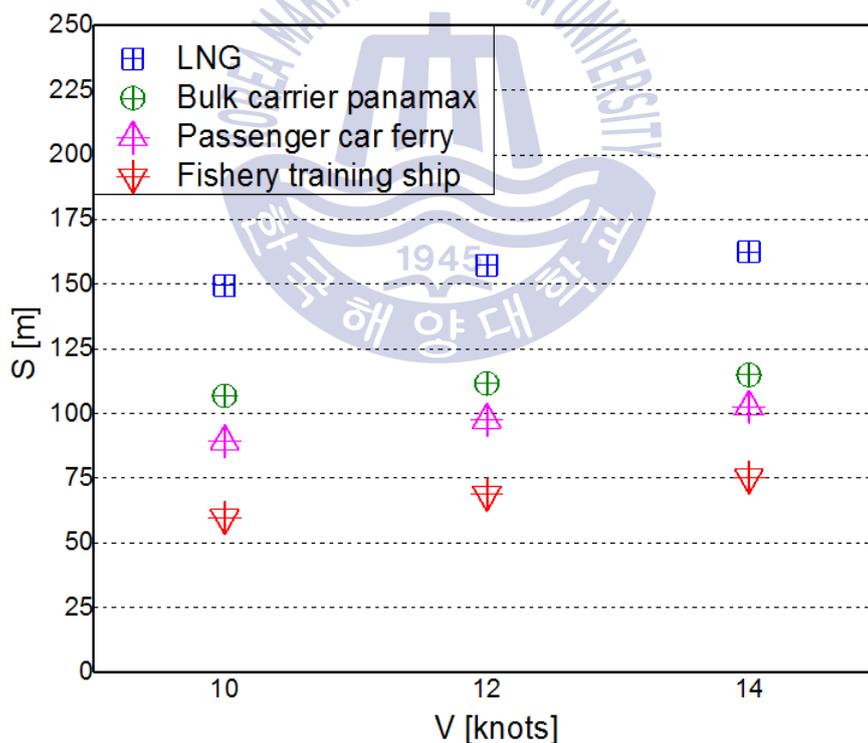


Fig. 5.8 Distance of safe passing according to the overtaking and overtaken speeds in case of overtaking ($h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

2) 길이별 표준화

Table. 5.11은 $h/T=1.2$ 의 해역에서 12knots의 선박이 8knots의 선박을 추월 통과시에 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침이 가능한 파나마급 컨테이너선의 안전통항거리를 상대선의 크기별로 정리한 것이다. 여기서, η/L_1 는 추월 통과하는 두 선박의 중심선 간의 수평거리를 추월선의 길이로 나눈 것을 의미한다.

Table. 5.11에서 자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 일 때, 안전통항거리는 $0.2 < \eta/L_1 < 0.7$ 의 범위를 보이고 있다. 파나마급 컨테이너선보다 비슷하거나 큰 초대형선의 경우에 안전통항거리는 약 $\eta/L_1=0.5-0.6$ 이며, 200미터 이하 선박의 경우에는 약 $\eta/L_1=0.2-0.4$ 인 것을 알 수 있다.

Fig. 5.9는 Table 5.8에서 추월선의 속력이 10knots(피추월선의 속력은 7knots)인 경우와 Table 5.11에서 추월선의 속력이 12knots(피추월선의 속력은 8knots)인 경우에 대해 선박의 상호간섭을 고려한 상대선의 길이별 안전통항거리를 지수함수(exponential function)로 비교한 것이다. 모집단의 크기는 일정한 상대 감소율(relative decay rate)에 따라 지수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 5.11 Safe distance of container panamax according to the ship's length in case of overtaking ($h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

Overtaken ships	L_2 [m]	L_1/L_2	η/L_1
Container ship	382	0.76	0.622
LNG carrier	360	0.80	0.600
Passenger cruise ship	350	0.83	0.590
LNG carrier	289.9	1.00	0.515
Oil tanker	242.8	1.19	0.455
Bulk carrier (Panamax)	230	1.26	0.442
Car carrier	199.1	1.45	0.415
Passenger car ferry	175.4	1.65	0.393
Tug barge	142.8	2.02	0.313
Ro-Ro passenger Ferry	125	2.31	0.283

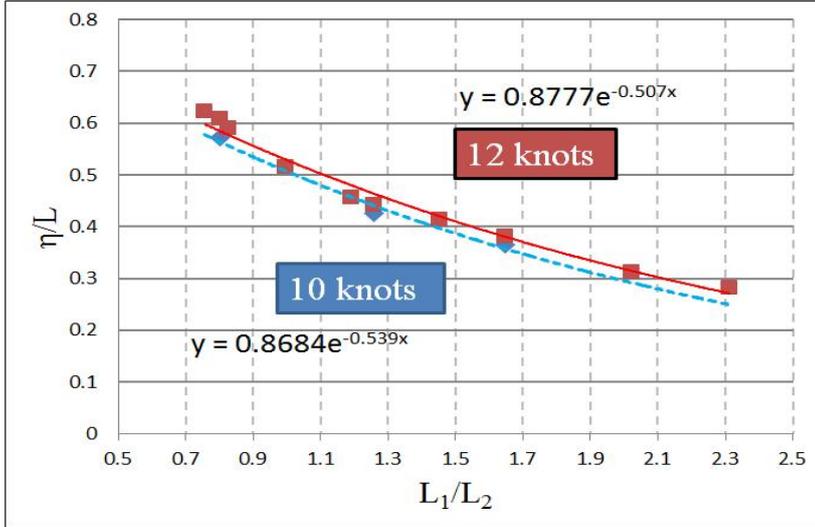


Fig. 5.9 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship length to the target ship length (overtaking, $h/T=1.2$, $\delta=10^\circ$)

5.2 수심에 따른 상황별 안전통항거리 표준화

5.2.1 동일 선박인 경우 수심별 표준화

Table. 5.12는 동일한 선박을 대상으로 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침이 가능한 파나마급 컨테이너선의 안전통항거리를 수심별로 정리한 것이다. 컨테이너선이 9knots로 계류선을 통과하는 경우, 7knots와 12knots로 마주치며 통과하는 경우, 12knots로 8knots의 선박을 추월하는 경우로 분류하였다.

수심이 $h/T=1.2\sim 2.0$ 인 경우에 동일 선박에 대한 컨테이너선의 안전통항거리는 9knots로 계류선 통과시 $94 < S [m] < 127$ 이고, 7knots로 마주치며 통과시는 $107 < S [m] < 136$ 이며, 12knots로 마주치며 통과시는 $136 < S [m] < 157$ 이고, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 $121 < S [m] < 140$ 으로 산정되었다.

Table. 5.13은 Table. 5.12의 수심별($h/T=1.2\sim 2.0$) 안전통항거리를 파나마급 컨테이너선의 길이와 폭의 크기(S/L_1 , S/B_1)로 나타낸 결과로서, 9knots로 계류선 통과시 $2.9B_1\sim 3.9B_1$ 이고, 7knots로 마주치며 통과시는 $3.3B_1\sim 4.2B_1$ 이며, 12knots로 마주치며 통과시는 $4.2B_1\sim 4.9B_1$

이며, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 $3.8B_1 \sim 4.3B_1$ 으로 도출되었다.

Fig. 5.10은 Table. 5.12의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 x축은 수심과 흘수의 비이며, y축은 안전통항거리이다. 선박의 상호간섭이 발생하는 4가지 경우를 수심별로 비교할 결과, 수심이 증가할수록 안전통항거리는 감소한 것을 볼 수 있다. 9knots로 계류선을 통과하는 경우를 보면 수심이 $h/T=2.0$ 에서 $h/T=1.2$ 로 감소할 때 안전통항거리는 33.5% 증가하여 다른 간섭의 상황에 비해 계류선 통과시가 수심의 변화에 민감한 것으로 나타났다. 이는 계류선 통과시는 접안한 부두에 의해 물의 흐름이 제한된 결과로 여겨진다.

Table 5.12 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio in case of same ship

Depth/Draft (h/T)	S [m], $\delta=10^\circ$			
	Moored ship passing 9knots	Head-on encountering		Overtaking 12-8knots
		7-7knots	12-12knots	
1.2	126.6	135.8	156.3	139.5
1.4	119.7	129.1	154.4	136.8
1.7	108.1	115.0	147.2	130.9
2.0	94.8	107.2	136.8	121.6

Table 5.13 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio based on the own ship's length and breadth (same ship)

Depth/Draft (h/T)	Safe distance of container ship (Panamax, $L_1=289$, $B_1=32.2$)							
	Moored ship passing 9knots		Head-on encountering				Overtaking 12-8knots	
			7-7knots		12-12knots			
1.2	$0.4L_1$	$3.9B_1$	$0.5L_1$	$4.2B_1$	$0.5L_1$	$4.9B_1$	$0.5L_1$	$4.3B_1$
1.4	$0.4L_1$	$3.7B_1$	$0.4L_1$	$4.0B_1$	$0.5L_1$	$4.8B_1$	$0.5L_1$	$4.2B_1$
1.7	$0.4L_1$	$3.4B_1$	$0.4L_1$	$3.6B_1$	$0.5L_1$	$4.6B_1$	$0.5L_1$	$4.1B_1$
2.0	$0.3L_1$	$2.9B_1$	$0.4L_1$	$3.3B_1$	$0.5L_1$	$4.2B_1$	$0.4L_1$	$3.8B_1$

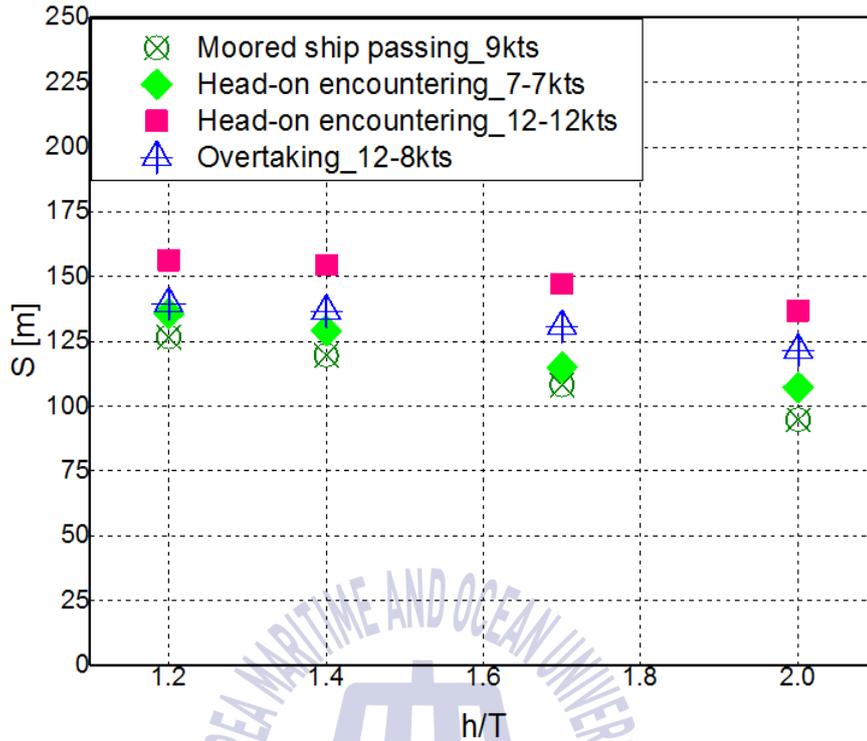


Fig. 5.10 Distance of safe passing according to the depth/draft ratio in case of same ship ($\delta=10^\circ$)

5.2.2 다른 선박인 경우 수심별 표준화

Table. 5.14는 선박의 상호간섭을 타각 10도로 제어하여 정침이 가능한 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리를 수심별로 정리한 것으로, 대상선박은 자선보다 전장이 길고 흘수가 작은 LNG선으로 정하였다. 컨테이너선이 9knots로 계류선을 통과하는 경우, 동일한 12knots로 마주치며 통과하는 경우, 12knots로 8knots의 LNG선을 추월하는 경우로 분류하였고, 수심과 흘수의 비는 $h/T=1.1\sim 5.0$ 의 범위로 하였다.

Table. 5.14에서 상대선이 LNG선인 경우에 $h/T=1.1\sim 5.0$ 의 범위에서 컨테이너선의 안전통항거리를 보면, 9knots로 계류선 통과시 $53 < S [m] < 146$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 $101 < S [m] < 171$ 이며, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 $63 < S [m] < 160$ 으로 산정되었다. 수심이 $h/T=5.0$ 에서 $h/T=1.1$ 로 감소하면, 컨테이너선의 안전통항거리

는 9knots로 계류선 통과시 2.7배 증가하고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 1.7배 증가하며, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 2.5배 증가하였다.

Table. 5.15는 Table. 5.14의 수심별($h/T=1.1\sim 5.0$) 안전통항거리를 파나마스급 컨테이너선의 길이와 폭의 크기($S/L_1, S/B_1$)로 나타낸 것으로서, 9knots로 계류선 통과시 $1.7B_1\sim 4.5B_1$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 $3.2B_1\sim 5.3B_1$ 이며, 12knots로 8knots의 LNG선을 추월 통과시는 $2.0B_1\sim 4.3B_1$ 로 도출되었다.

Fig. 5.11은 Table. 5.14의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 x축은 수심과 흘수(T_1)의 비이며, y축은 안전통항거리이다. 선박의 상호간섭이 발생하는 3가지 경우를 수심별로 비교할 결과, 수심이 $h/T=5.0$ 에서 $h/T=1.1$ 로 감소하면 안전통항거리는 계류선을 통과하는 경우 2.7배 증가하고, 마주치며 통과하는 경우는 1.7배 증가하며, 추월의 경우는 2.5배 증가하였다. 상대선이 대형선이 경우의 안전통항거리는 추월 통과와 계류선 통과와 같이 수심의 변화에 민감한 것을 알 수 있다.

Table 5.14 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio in case of different two ships

Depth/Draft (h/T)	S [m], $\delta=10^\circ$		
	Moored ship passing 9knots	Head-on encountering 12-12knots	Overtaking 12-8knots
1.1	145.4	170.7	159.3
1.2	142.8	169.9	157.2
1.5	134.8	166.5	152.3
2.0	118.7	158.7	134.8
3.0	74.6	127.2	92.8
4.0	56.3	109.6	71.9
5.0	53.7	101.7	63.7

Table 5.15 Standardization of safe distance according to the depth/draft ratio based on the own ship's length and breadth (different ship)

Depth/Draft (h/T)	Safe distance of container ship (Panamax, $L_1=289$, $B_1=32.2$)					
	Moored ship passing 9knots		Head-on encountering 12-12knots		Overtaking 12-8knots	
1.1	$0.5L_1$	$4.5B_1$	$0.6L_1$	$5.3B_1$	$0.6L_1$	$4.9B_1$
1.2	$0.5L_1$	$4.4B_1$	$0.6L_1$	$5.3B_1$	$0.5L_1$	$4.9B_1$
1.5	$0.5L_1$	$4.2B_1$	$0.6L_1$	$5.2B_1$	$0.5L_1$	$4.7B_1$
2.0	$0.4L_1$	$3.7B_1$	$0.5L_1$	$4.9B_1$	$0.5L_1$	$4.2B_1$
3.0	$0.3L_1$	$2.3B_1$	$0.4L_1$	$4.0B_1$	$0.3L_1$	$2.9B_1$
4.0	$0.2L_1$	$1.7B_1$	$0.4L_1$	$3.4B_1$	$0.2L_1$	$2.2B_1$
5.0	$0.2L_1$	$1.7B_1$	$0.4L_1$	$3.2B_1$	$0.2L_1$	$2.0B_1$

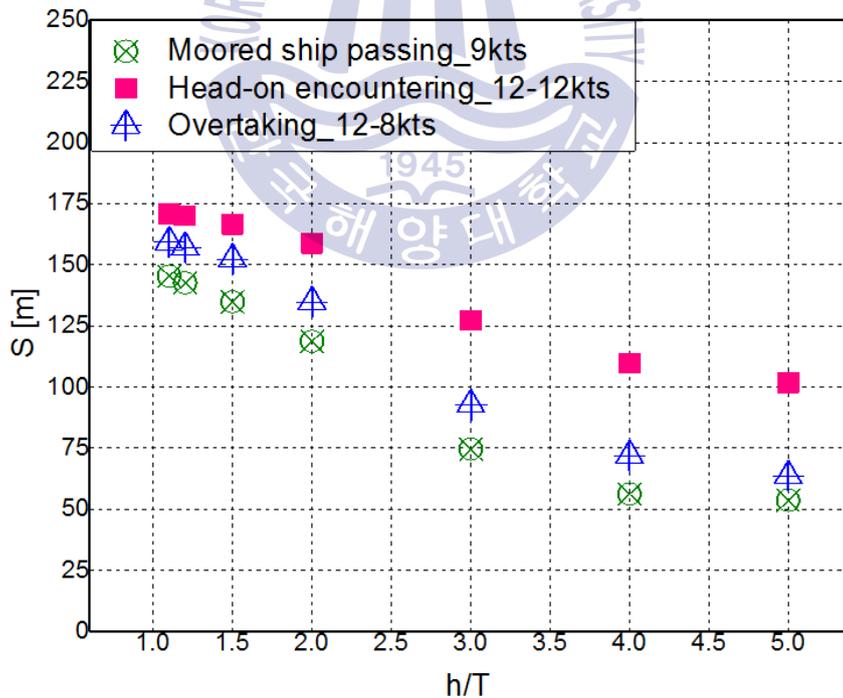


Fig. 5.11 Distance of safe passing according to the depth/draft ratio in case of different ship ($\delta=10^\circ$)

5.3 흘수에 따른 상황별 안전통항거리 표준화

5.3.1 자선의 흘수가 큰 경우 표준화 ($T_1 > T_2$, $h/T_1=1.2$)

1) 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리

해역의 수심이 $h/T=1.2$ 인 경우를 기준으로 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리를 표준화하면, 상대선이 자선보다 흘수가 큰 선박인 경우는 다루지 못하게 된다. 앞서 기술한 상황별 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선의 흘수(T_2)가 자선의 흘수(T_1)보다 작은 경우 ($T_1 > T_2$)로 대상 선박을 제한하였다.

선박의 상호 간섭의 상황별 안전통항거리는 자선의 흘수가 상대선의 흘수보다 큰 경우 ($T_1 > T_2$)와 작은 경우($T_1 < T_2$)로 분류할 수 있다. 즉, 해역의 수심이 $h/T_1=1.2(T_1 > T_2)$ 인 경우와 $h/T_2=1.2(T_1 < T_2)$ 의 경우에 대해 자선과 상대선의 기준으로 안전통항거리를 산정할 수 있다.

Table. 5.16은 $h/T_1=1.2(T_1 > T_2)$ 의 해역에서 파나막스급 컨테이너선에 대한 상황별 안전통항거리를 표준화한 것으로, 9knots로 계류선 통과시 $61 < S \text{ [m]} < 151$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $71 < S \text{ [m]} < 182$ 이며, 12knots로 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $65 < S \text{ [m]} < 164$ 이다.

Table. 5.17은 Table. 5.16의 상황별 안전통항거리를 자선인 파나막스급 컨테이너선의 길이와 폭의 크기(S/L_1 , S/B_1)로 나누어 나타낸 것으로, 9knots로 계류선 통과시 $0.3L_1 \sim 0.6L_1$ 과 $1.9B_1 \sim 4.7B_1$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $0.3L_1 \sim 0.7L_1$ 과 $2.2B_1 \sim 5.6B_1$ 이며, 12knots로 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $0.3L_1 \sim 0.6L_1$ 과 $2.0B_1 \sim 5.1B_1$ 로 산정되었다.

Table. 5.18은 Table. 5.16의 상황별 안전통항거리를 상대선의 길이와 폭의 크기(S/L_2 , S/B_2)로 나누어 나타낸 것이다. 자선과 상대선의 길이비가 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 의 범위에 해당하는 다양한 선박들(target ships)이 파나막스급 컨테이너선을 근접 통항하는 경우에 안전통항거리는 컨테이너선이 9knots로 계류선인 상대선을 통과시 $0.4L_2 \sim 0.7L_2$ 과 $2.6B_2 \sim 3.4B_2$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $0.5L_2 \sim 0.7L_2$ 과 $2.9B_2 \sim 4.7B_2$ 이며, 12knots로 컨테이너선이 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $0.5L_2 \sim 0.7L_2$ 과 $2.4B_2 \sim 4.1B_2$ 로 산정되었다.

Fig. 5.12는 Table 5.16에 제시된 $h/T_1=1.2(T_1 > T_2)$ 의 해역에서 파나막스급 컨테이너선의 상황별 안전통항거리를 도시한 것으로, x축은 자선과 상대선의 길이비(L_1/L_2)이며, y축은 안전통항거리이다. 자선과 상대선의 길이비가 증가하면 안전통항거리는 각각의 상황별로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 5.16 Standardization of safe distance according to the ship' length ($T_1>T_2$, $h/T_1=1.2$, $\delta=10^\circ$)

Model no.	Target ship type	S [m]		
		Moored ship passing 9knots	Head-on encountering 12-12knots	Overtaking 12-8knots
CNTR 8	Container ship	150.4	181.2	163.6
LNG 6	LNG carrier	142.8	169.9	157.2
PCS 6	Passenger cruise ship	141.5	160.5	154.5
LNG 4	LNG carrier	122.0	155.9	132.8
OT 3	Oil tanker	106.9	152.6	115.5
BLK 7	Bulk carrier panamax	102.7	133.3	111.6
CCR 6	Car carrier	94.2	131.2	103.8
PCF 2	Passenger car ferry	89.2	103.0	97.5
ITB 450	Tug barge	78.9	88.6	74.3
RRPF11	Ro-Ro passenger Ferry	61.3	71.9	65.6

Table 5.17 Standardization of safe distance of panamax container ship based on the own ship's length and breadth ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Target ships (L_2)	L_1/L_2	Safe distance of container ship (Panamax, $L_1 = 289$, $B_1 = 32.2$)					
		Moored ship passing 9knots		Head-on encountering 12-12knots		Overtaking 12-12knots	
Container ship	0.76	$0.6L_1$	$4.7B_1$	$0.7L_1$	$5.6B_1$	$0.6L_1$	$5.1B_1$
LNG carrier	0.80	$0.5L_1$	$4.4B_1$	$0.7L_1$	$5.3B_1$	$0.6L_1$	$4.9B_1$
Passenger cruise ship	0.83	$0.5L_1$	$4.4B_1$	$0.6L_1$	$5.0B_1$	$0.6L_1$	$4.8B_1$
LNG carrier	1.00	$0.5L_1$	$3.8B_1$	$0.6L_1$	$4.8B_1$	$0.5L_1$	$4.1B_1$
Oil tanker	1.19	$0.4L_1$	$3.3B_1$	$0.6L_1$	$4.7B_1$	$0.5L_1$	$3.6B_1$
Bulk carrier (Panamax)	1.26	$0.4L_1$	$3.2B_1$	$0.5L_1$	$4.1B_1$	$0.4L_1$	$3.5B_1$
Car carrier	1.45	$0.4L_1$	$2.9B_1$	$0.5L_1$	$4.1B_1$	$0.4L_1$	$3.2B_1$
Passenger car ferry	1.65	$0.4L_1$	$2.8B_1$	$0.4L_1$	$3.2B_1$	$0.4L_1$	$3.0B_1$
Tug barge	2.02	$0.3L_1$	$2.5B_1$	$0.4L_1$	$2.8B_1$	$0.3L_1$	$2.3B_1$
Ro-Ro passenger Ferry	2.31	$0.3L_1$	$1.9B_1$	$0.3L_1$	$2.2B_1$	$0.3L_1$	$2.0B_1$

Table 5.18 Standardization of safe distance of target ships based on the target ship's length and breadth ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Target ships	L_2 [m]	B_2 [m]	Safe distance of target ships					
			Moored ship passing 9knots		Head-on encountering 12-12knots		Overtaking 12-8knots	
Container ship	382	54.2	$0.4L_2$	$2.8B_2$	$0.5L_2$	$3.3B_2$	$0.5L_2$	$3.0B_2$
LNG carrier	360	55	$0.4L_2$	$2.6B_2$	$0.5L_2$	$3.1B_2$	$0.5L_2$	$2.9B_2$
Passenger cruise ship	350	38	$0.5L_2$	$3.2B_2$	$0.5L_2$	$4.2B_2$	$0.5L_2$	$4.1B_2$
LNG carrier	289.9	44.7	$0.5L_2$	$2.7B_2$	$0.6L_2$	$3.5B_2$	$0.5L_2$	$3.0B_2$
Oil tanker	242.8	32.2	$0.5L_2$	$3.3B_2$	$0.7L_2$	$4.7B_2$	$0.5L_2$	$3.6B_2$
Bulk carrier (Panamax)	230	32	$0.5L_2$	$3.2B_2$	$0.6L_2$	$4.2B_2$	$0.6L_2$	$3.5B_2$
Car carrier	199.1	32.26	$0.6L_2$	$2.9B_2$	$0.7L_2$	$4.1B_2$	$0.6L_2$	$3.2B_2$
Passenger car ferry	175.4	30.3	$0.6L_2$	$2.8B_2$	$0.7L_2$	$3.3B_2$	$0.6L_2$	$3.1B_2$
Tug barge	142.8	30.3	$0.7L_2$	$2.6B_2$	$0.7L_2$	$2.9B_2$	$0.6L_2$	$2.4B_2$
Ro-Ro passenger Ferry	125	18.25	$0.7L_2$	$3.4B_2$	$0.7L_2$	$3.9B_2$	$0.7L_2$	$3.6B_2$

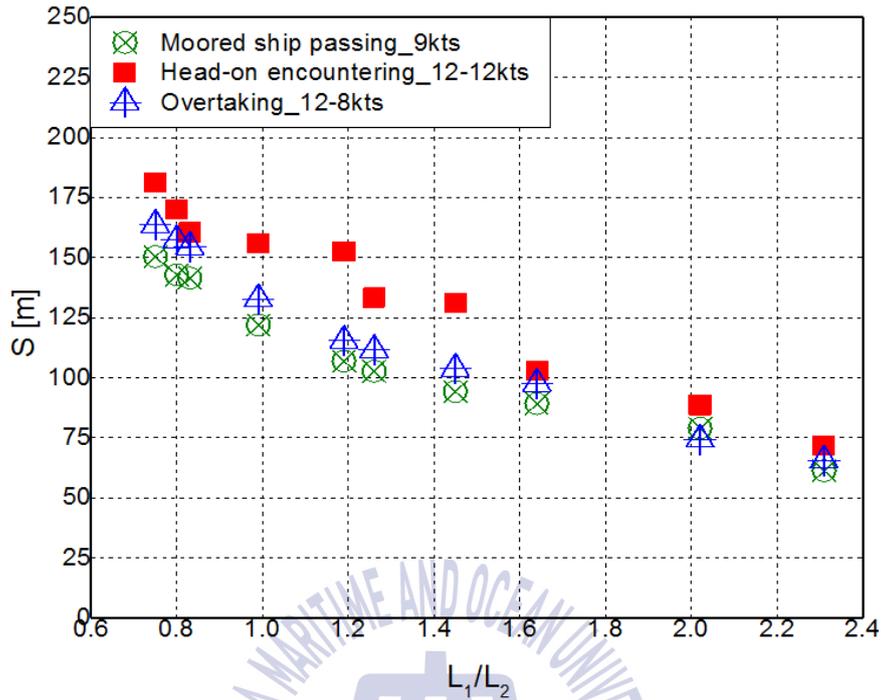


Fig. 5.12 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to the target ship's length (Container Panamax, $\delta=10^\circ$, $T_1>T_2$)

2) 최대 흘수선의 안전통항거리

앞서 기술한 파나마급 컨테이너선에 대한 상황별 안전통항거리와 비교하기 위해 시물레이션이 보유한 최대 흘수선과 초대형 컨테이너선을 대상으로 상황별 안전통항거리를 도출하였다.

Table. 5.19는 $h/T_1=1.2(T_1 > T_2)$ 의 해역에서 최대 흘수선인 VLCC에 대한 상황별 안전통항거리를 도출한 것으로, 9knots로 계류선인 초대형 컨테이너선을 통과시 $186.1m(0.65L_1)$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $208.7m(0.72L_1)$ 이며, 12knots로 8knots의 초대형 컨테이너선을 추월 통과시는 $194.9m(0.68L_1)$ 로 산정되었다.

Table. 5.20은 Table. 5.19의 최대 흘수선인 VLCC의 안전통항거리를 자선인 VLCC의 길이와 폭의 크기(S/L_1 , S/B_1)로 나누어 나타낸 것으로, 9knots로 계류선인 초대형 컨테이너선을 통과시 $0.65L_1$ 과 $3.1B_1$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 $0.72L_1$ 과 $3.5B_1$ 이며,

12knots로 8knots의 초대형 컨테이너선을 추월 통과시는 $0.68L_1$ 과 $3.2B_1$ 로 도출되었다. Table. 5.17에서 파나막스급 컨테이너선이 최대 크기의 선박(CNTR 8)을 대상으로 도출한 결과와 유사한 범위의 S/L_1 을 보이고 있다.

Table 5.19 Safe distance of maximum deep draft ship model considering ship to ship interaction ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Own ship model	Target ship model	S [m]		
		Moored ship passing 9knots	Head-on encountering 12-12knots	Overtaking 12-8knots
VLCC 8 ($L_1 = 333\text{m}$, $B_1 = 60\text{m}$, $T_1 = 22.5\text{m}$)	CNTR 20 ($L_2 = 397.7\text{m}$, $B_2 = 56.4\text{m}$, $T_2 = 15.2\text{m}$)	186.1	208.7	194.9

Table 5.20 Safe distance of VLCC based on the own ship's length and breadth ($T_1 > T_2$, $h/T_1 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Target ship (L_2)	L_1/L_2	Safe distance of VLCC ($L_1 = 333\text{m}$, $B_1 = 60\text{m}$, $T_1 = 22.5\text{m}$)					
		Moored ship passing 9knots		Head-on encountering 12-12knots		Overtaking 12-8knots	
Container ship	0.84	$0.65L_1$	$3.1B_1$	$0.72L_1$	$3.5B_1$	$0.68L_1$	$3.2B_1$

5.3.2 상대선의 흘수가 큰 경우 표준화 ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$)

자선의 흘수가 상대선의 흘수보다 작은 경우($T_1 < T_2$) 즉, $h/T_2 = 1.2$ 의 해역에서 자선인 파나막스급 컨테이너선에 대한 상황별 안전통항거리를 도출하였다. 자선보다 상대선이 흘수가 큰 경우에 $h/T_2 = 1.2$ 의 해역을 기준으로 안전통항거리를 산정하면, 자선인 파나막스급 컨테이너선은 $h/T_1 = 1.2$ 인 경우에 비해 수심이 증가하므로 간섭력과 안전통항거리는 감소할 것

을 예상할 수 있다.

Table. 5.21은 $h/T_2=1.2(T_1 < T_2)$ 의 해역에서 파나막스급 컨테이너선에 대한 상황별 안전통항거리를 표준화한 것으로, 9knots로 계류선 통과시 $100 < S [m] < 146$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $154 < S [m] < 185$ 이며, 12knots로 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $119 < S [m] < 165$ 이다.

해역의 수심을 자선인 컨테이너선 기준으로 보면 $1.4 < h/T_2 < 1.7$ 의 범위이다. 자선인 컨테이너선 기준으로 해역의 수심을 약 $h/T_1=1.5$ 로 보고 Table. 5.16의 결과와 비교해보면, Table. 5.21에서 선박모델 CNTR 20과 CNTR 9인 경우에 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 Table. 5.16의 상대선이 CNTR 8인 경우에 비해 계류선 통과시는 작고, 마주치며 통과시와 추월 통과시는 유사하다. 이것은 Table. 5.14에서 파나막스급 컨테이너선이 자선보다 큰 LNG선을 대상으로 한 수심별 안전통항거리를 볼 때, 수심이 $h/T=1.2$ 에서 $h/T=1.5$ 로 증가시 계류선 통과시는 8m 감소하고, 마주치며 통과시와 추월 통과시는 각각 3.4m와 4.9m로 작게 감소한 것을 통하여 확인할 수 있다.

Table. 5.22는 Table. 5.21의 상황별 안전통항거리를 자선인 파나막스급 컨테이너선의 길이와 폭의 크기(S/L_1 , S/B_1)로 나누어 나타낸 것으로, 9knots로 계류선 통과시는 $0.3L_1 \sim 0.5L_1$ 과 $3.1B_1 \sim 4.5B_1$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 $0.5L_1 \sim 0.6L_1$ 과 $4.8B_1 \sim 5.7B_1$ 이며, 12knots로 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $0.4L_1 \sim 0.6L_1$ 과 $3.7B_1 \sim 5.1B_1$ 로 산정되었다.

Table. 5.23은 Table. 5.21의 상황별 안전통항거리를 상대선의 길이와 폭의 크기(S/L_2 , S/B_2)로 나누어 나타낸 것으로, 9knots로 계류선 통과시는 $0.4L_2$ 과 $2.1B_2 \sim 2.9B_2$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 $0.5L_2 \sim 0.6L_2$ 과 $3.2B_2 \sim 3.7B_2$ 이며, 12knots로 컨테이너선이 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $0.4L_2 \sim 0.5L_2$ 과 $2.7B_2 \sim 3.4B_2$ 로 산정되었다.

Fig. 5.13은 Table 5.21에 제시된 $h/T_2=1.2(T_1 < T_2)$ 의 해역에서 파나막스급 컨테이너선의 상황별 안전통항거리를 도시한 것으로, x축은 자선과 상대선의 길이비(L_1/L_2)이며, y축은 안전통항거리이다. 자선과 상대선의 길이비가 증가하면 안전통항거리는 각각의 상황별로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 5.21 Standardization of safe distance considering ship to ship interaction ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Model no.	T_2 [m]	h/T_2	h/T_1 ($T_1 = 12\text{m}$)	S [m]		
				Moored ship passing 9knots	Head-on encountering 12-12knots	Overtaking 12-8knots
CNTR 20	15.2	1.2	1.52	145.7	184.9	164.7
CNTR 9	15	1.2	1.50	142.7	182.5	162.5
CNTR 12	13.5	1.2	1.55	132.4	167.7	153.1
VLCC 7	16.62	1.2	1.66	104.8	157.5	142.3
VLCC 6	14.4	1.2	1.44	100.6	154.1	119.6

Table 5.22 Standardization of safe distance of panamax container ship based on the own ship's length and breadth ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Target ship (L_2)	L_1/L_2	h/T_1	Safe distance of container ship (Panamax, $L_1 = 289$, $B_1 = 32.2$)						
			Moored ship passing 9knots		Head-on encountering 12-12knots		Overtaking 12-8knots		
Container ship	0.73	1.52	$0.5L_1$	$4.5B_1$	$0.6L_1$	$5.7B_1$	$0.6L_1$	$5.1B_1$	
	0.76	1.50	$0.5L_1$	$4.4B_1$	$0.6L_1$	$5.7B_1$	$0.6L_1$	$5.0B_1$	
	0.83	1.55	$0.5L_1$	$4.1B_1$	$0.6L_1$	$5.2B_1$	$0.5L_1$	$4.8B_1$	
VLCC	suezmax	1.03	1.66	$0.4L_1$	$3.3B_1$	$0.5L_1$	$4.9B_1$	$0.5L_1$	$4.4B_1$
	afamax	1.16	1.44	$0.3L_1$	$3.1B_1$	$0.5L_1$	$4.8B_1$	$0.4L_1$	$3.7B_1$

Table 5.23 Standardization of safe distance of target ship based on the target ship's length and breadth ($T_1 < T_2$, $h/T_2 = 1.2$, $\delta = 10^\circ$)

Target ship (L_2)		L_2 [m]	B_2 [m]	L_1/L_2	Safe distance of target ship					
					Moored ship passing 9knots		Head-on encountering 12-12knots		Overtaking 12-8knots	
Container ship		397.7	56.4	0.73	$0.4L_2$	$2.6B_2$	$0.5L_2$	$3.3B_2$	$0.4L_2$	$2.9B_2$
		382.0	54.2	0.76	$0.4L_2$	$2.6B_2$	$0.5L_2$	$3.4B_2$	$0.4L_2$	$3.0B_2$
		347.0	45.2	0.83	$0.4L_2$	$2.9B_2$	$0.5L_2$	$3.7B_2$	$0.4L_2$	$3.4B_2$
VLCC	suezmax	280.5	50.0	1.03	$0.4L_2$	$2.1B_2$	$0.6L_2$	$3.2B_2$	$0.5L_2$	$2.8B_2$
	afamax	249.9	44.0	1.16	$0.4L_2$	$2.3B_2$	$0.6L_2$	$3.5B_2$	$0.5L_2$	$2.7B_2$

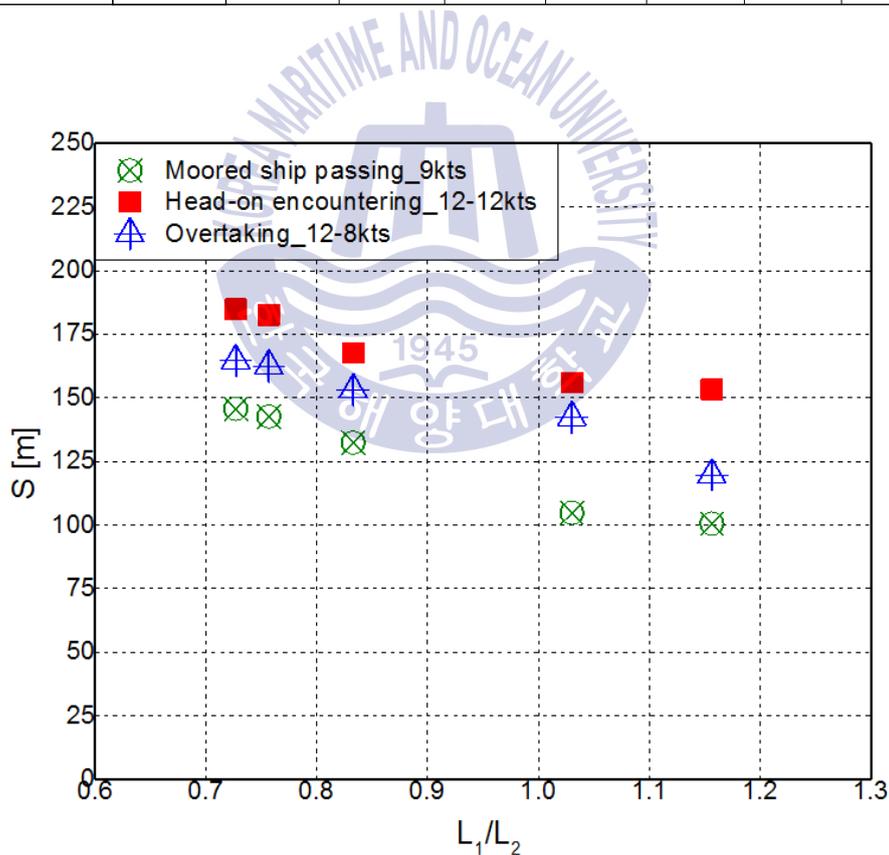


Fig. 5.13 Distance of safe passing according to the ratio of the own ship's length to the target ship's length (Container Panamax, $\delta = 10^\circ$, $T_1 < T_2$)

제 6 장 결론

본 연구에서는 항내에서 간섭력이 발생하는 3가지의 근접상황 즉, 부두에 접안한 계류선을 통과하는 상황, 두 선박이 마주치며 통과하는 상황 및 타 선박을 추월하는 상황에서 선박의 운항자들이 보다 간편하게 사용할 수 있도록 안전통항거리를 도출하여 표준화하였다. 선박의 상호간섭으로 발생하는 간섭력 즉, 전후력, 횡력, 회두모멘트를 예측하는 기술은 다양한 연구자들에 의해 정확도가 높아졌다. 본 연구에서는 선박의 운항자가 선박의 상호간섭으로 발생하는 힘과 모멘트에 대처하여 안전하게 통항할 수 있는 선박 간의 수평거리를 구체적인 상황 및 요소별로 제시하였다.

먼저 선박조종시물레이터의 간섭력 기술을 검증하기 위해, 2D 섭동법을 기반으로 하는 일본의 MLIT의 이론계산과 수조실험을 기반으로 하는 선박조종시물레이터의 수학모델을 통한 계산을 비교하였다. 그 결과 5척의 선박에 대한 3가지 시나리오별(ship-bank interaction, head-on encountering, overtaking) 오차범위는 최소 7.33%, 최대 10.16%, 평균 8.99%를 보였다. 검증된 선박조종시물레이터를 이용하여 상황 및 요소별로 간섭력을 구하고, MLIT의 타각 계산의 방법으로 안전통항거리를 산정하였다. 본 연구에서 도출한 최종 결론은 다음과 같다.

1) 계류선 통과시 보침타각 10도에 해당하는 파나막스급 컨테이너선의 속력별 안전통항거리는 $h/T=1.2$ 의 해역에서 상대선이 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 의 크기인 경우에, 7knots로 통과시 $31 < S [m] < 126$ 이고, 9knots로 통과시 $54 < S [m] < 143$ 이며, 12knots로 통과시 $70 < S [m] < 154$ 의 범위이다. 통과선의 속력이 7knots에서 9knots로 증가시 안전통항거리는 상대선이 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 의 크기인 경우에 약 1.1~1.7배 증가하였다. 크기가 작은 선박을 통과할수록 통과선의 속력의 증가에 따른 안전통항거리는 증가하였다. 또한, 자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 일 때, 안전통항거리는 $0.2 < \eta/L_1 < 0.6$ 의 범위로 도출되었다.

2) 마주치며 통과시 보침타각 10도에 해당하는 파나막스급 컨테이너선의 속력별 안전통항거리는 $h/T=1.2$ 의 해역에서 상대선이 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 의 크기일 때, $V_2/V_1=0.7$ 인 경우 $63 < S [m] < 158$ 이고, $V_2/V_1=0.83$ 인 경우는 $70 < S [m] < 168$ 이며, $V_2/V_1=0.9$ 인 경우에 $76 < S [m] < 175$ 의 범위이다. 속력이 10knots에서 14knots로 증가시 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선이 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 의 크기인 경우에 약 1.1~1.2배 증가하였다. 계류선 통과시에 비해 크기가 작은 선박인 경우 안전통항거리의 증가폭이 작았다. 또한, 자선과 상

대선의 길이비가 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 일 때, 안전통항거리는 $0.3 < \eta/L_1 < 0.7$ 의 범위를 보였다.

3) 추월 통과시 보침타각 10도에 해당하는 파나막스급 컨테이너선의 속력별 안전통항거리는 $h/T=1.2$ 의 해역에서 상대선이 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 의 크기일 때, $V_2/V_1=0.7$ 인 경우 $59 < S [m] < 150$ 이고, $V_2/V_1=0.67$ 인 경우는 $68 < S [m] < 158$ 이며, $V_2/V_1=0.5$ 인 경우에 $75 < S [m] < 163$ 의 범위이다. 속력이 10knots에서 14knots로 증가시 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선이 $0.7 < L_1/L_2 < 3.2$ 의 크기인 경우에 약 1.1~1.3배 증가하였다. 또한, 자선과 상대선의 길이비 $0.7 < L_1/L_2 < 2.4$ 일 때, 안전통항거리는 $0.2 < \eta/L_1 < 0.7$ 의 범위로 도출되었다.

4) 동일한 선박을 대상으로 하고 보침타각 10도에 해당하는 파나막스급 컨테이너선의 수심별 안전통항거리는 수심이 $h/T=1.2\sim 2.0$ 의 범위일 때, 9knots로 계류선 통과시 $94 < S [m] < 127$ 이고, 7knots로 마주치며 통과시는 $107 < S [m] < 136$ 이며, 12knots로 마주치며 통과시는 $136 < S [m] < 157$ 이고, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 $121 < S [m] < 140$ 으로 산정되었다. 계류선 통과시는 수심이 $h/T=2.0$ 에서 $h/T=1.2$ 로 감소할 때 안전통항거리가 33.5% 증가한 것을 통하여, 동일한 선박을 대상으로 한 경우 다른 간섭의 상황에 비해 계류선 통과시가 수심의 변화에 민감한 것을 알 수 있었다.

5) 크기와 종류가 다른 선박을 대상으로 하고 보침타각 10도에 해당하는 파나막스급 컨테이너선의 수심별 안전통항거리는 수심이 $h/T=1.1\sim 5.0$ 의 범위일 때, 9knots로 계류선 통과시 $53 < S [m] < 146$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 $101 < S [m] < 171$ 이며, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 $63 < S [m] < 160$ 으로 산정되었다. 수심이 $h/T=5.0$ 에서 $h/T=1.1$ 로 감소할 때 파나막스급 컨테이너선의 수심별 안전통항거리는 9knots로 계류선 통과시 2.7배 증가하고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시는 1.7배 증가하며, 12knots로 8knots의 선박을 추월 통과시는 2.5배 증가하였다. 또한, 상대선이 대형선이 경우의 수심별 안전통항거리는 추월 통과시의 경우도 계류선 통과시와 같이 수심의 변화에 민감한 것으로 나타났다.

6) 자선의 흘수가 상대선의 흘수보다 큰 경우($T_1 > T_2$) 즉, $h/T_1=1.2$ 의 해역에서 파나막스급 컨테이너선에 대한 상황별 안전통항거리를 도출하면, 9knots로 계류선 통과시 $61 < S [m] < 151$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $71 < S [m] < 182$ 이며, 12knots로 8knots의 상

대선을 추월 통과시는 $65 < S \text{ [m]} < 164$ 이다. 자선과 상대선의 길이비가 증가하면 안전통항 거리는 계류선 통과시, 마주치며 통과시, 추월 통과시에 감소하는 경향을 보였다.

7) 초대형 컨테이너선을 대상으로 하고 보침타각 10도에 해당하는 최대 흘수선 VLCC의 안전통항거리는 $h/T_1=1.2(T_1 > T_2)$ 의 해역에서 9knots로 계류선 통과시 $186.1m(0.65L_1)$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $208.7m(0.72L_1)$ 이며, 12knots로 8knots의 초대형 컨테이너선을 추월 통과시는 $194.9m(0.68L_1)$ 로 산정되었다. 이 결과는 파나마스급 컨테이너선이 최대 크기의 선박을 대상으로 도출한 각 상황별 S/L_1 의 범위와 유사하였다.

8) 자선의 흘수가 상대선의 흘수보다 작은 경우($T_1 < T_2$) 즉, $h/T_2=1.2$ 의 해역에서 파나마스급 컨테이너선에 대한 상황별 안전통항거리를 도출하면, 9knots로 계류선 통과시 $100 < S \text{ [m]} < 146$ 이고, 동일한 12knots로 마주치며 통과시 $154 < S \text{ [m]} < 185$ 이며, 12knots로 8knots의 상대선을 추월 통과시는 $119 < S \text{ [m]} < 165$ 이다. 수심이 $h/T_2=1.2$ 인 해역($T_1 < T_2$)을 자선의 기준으로 보면 $h/T_1=1.2$ 인 경우에 비해 수심이 깊으므로, 상대선의 흘수가 자선보다 큰 경우에 파나마스급 컨테이너선의 안전통항거리는 본 연구에서 제시한 수심별 안전통항거리를 통해 감소량을 예상할 수 있다.

9) 최종적으로 해역의 수심 $h/T_1=1.2\sim 1.5$ 에서 항내 manoeuvring speed로 통항하는 파나마스급 컨테이너선이나 VLCC는 계류선 통과시, 마주치며 통과시, 추월 통과시에 발생하는 간섭력을 타각 10도로 제어하여 정침할 수 있는 최소 1 cable, 약 $0.7L_1$ 의 안전통항거리가 요구된다.

본 연구에서는 파나마스급 컨테이너선을 기준으로 간섭의 상황별로 다양한 선박과 요소별로 안전통항거리를 도출하였다. 선박의 상호간섭으로 발생하는 횡력과 회두모멘트는 $1L$ 이상의 수평거리에서 급격히 줄어들게 된다. 선박이 근접하여 통과해야 하는 불가피한 상황에 직면하게 될 경우에는 상대선의 크기와 상황에 따라 최소한의 안전통항거리를 인식해야 한다. 특히 본 연구에서 제시한 수심별 안전통항거리는 현장에서 유용하게 사용될 것으로 보인다. 본 연구에서 계산한 보침타각은 선박조종시물레이터로 도출한 간섭력과 유체력 계수를 이용한 것이므로, 선박의 상호간섭이 발생하는 현장에서 항해기록장치의 데이터를 분석하여 실제 타각이 사용되는 정도를 검토하는 방향으로 향후 간섭력을 고려한 안전통항거리를 도출하는 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Andou, K., Akakura, Y. and ABE, M., 2012. A calculation of the parameters for planning of the width of fairway for very large vessels. *Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management*, 696, Japan, pp.1-30.
- [2] Chen, H.C., Lin, W.M. and Hwang W.Y., 2002. Application of chimera RANSE method for multiple-ship interactions in a navigation channel. *Proceedings of the 12th International Conference on ISOPE*, Kitakyushu, Japan, pp.330-337.
- [3] Chen, H.C., Lin, W.M., Liut, D.A. and Hwang, W.Y., 2003. An advanced viscous flow computation method for ship-ship dynamic interactions in shallow and restricted waterway. *Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '03)*, Kanazawa, Japan.
- [4] Dand, I.W., 1981. Some measurements of interaction between ship models passing on parallel courses, *National Maritime Institute NMI R108*. United Kingdom.
- [5] Fonfach, J., Sutulo, S. and Guedes Soares, C., 2011. Numerical study of ship-to-ship interaction forces on the basis of various flow models. *Proceedings of the 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Trondheim, Norway, May 18-20, 2011, pp.137-146.
- [6] Fossen, T.I., 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. A John Wiley & Sons. pp.5-58.
- [7] Huang, E.T. and Chen, H.C., 2006. Passing ship effects on moored vessels at piers. *Proceedings of Prevention First 2006: An Onshore and Offshore Pollution Prevention Symposium and Technology Exhibition*, Long Beach, California, USA.
- [8] International Towing Tank Conference (ITTC), 2002. The manoeuvring committee: final report and recommendations to the 23rd ITTC. *Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference*, Venice, Italy, pp.153-234.

- [9] International Towing Tank Conference (ITTC), 2005. The manoeuvring committee: final report and recommendations to the 24th ITTC. *Proceedings of the 24th International Towing Tank Conference*, Edinburgh, United Kingdom pp.137-198.
- [10] International Towing Tank Conference (ITTC), 2008. The manoeuvring committee: final report and recommendations to the 25th ITTC. *Proceedings of the 25th International Towing Tank Conference*, Fukuoka, Japan, pp.143-208.
- [11] International Towing Tank Conference (ITTC), 2011. The manoeuvring committee: final report and recommendations to the 26th ITTC. *Proceedings of the 26th International Towing Tank Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, pp.123-181.
- [12] International Towing Tank Conference (ITTC), 2014. The manoeuvring committee: final report and recommendations to the 27th ITTC. *Proceedings of the 27th International Towing Tank Conference*, Copenhagen, Denmark.
- [13] Kijima, K. and Yasukawa, H., 1984. Manoeuvrability of ships in narrow waterway. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 156, pp.171-179.
- [14] Kijima, K. and Qing, H., 1987. Manoeuvring motion of a ship in the proximity of bank wall. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1987(162), pp.125-132.
- [15] Kim, D.B. et al. 2012. A fundamental study on the improvements of speed limit at the ports and fairway in Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 18(5), pp.423-430.
- [16] Korsmeyer, F.T., Lee, C.H. and Newman, J.N., 1993. Computation of ship interaction forces in restricted waters. *Journal of Ship Research*, 37(4), pp.298-306.
- [17] Lataire, E., Vantorre, M. and Delefortrie, G., 2009. Captive model testing for ship-to-ship operations. *Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '09)*, Panama City, Panama.
- [18] Lataire, E., Vantorre, M., Delefortrie, G. and Candries, M., 2012. Mathematical modelling of forces acting on ships during lightering operations. *Journal of Ocean Engineering*, 55, pp.101-115.

- [19] Lee, C.K. and Moon, S.B., 2014. A study on the minimum safe distance between two vessels in confined waters. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 38(6), pp.561-565.
- [20] Lee, C.K., Moon, S.B. and Jeong, T.G., 2016. The investigation of ship maneuvering with hydrodynamic effects between ships in curved narrow channel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8, pp.102-109.
- [21] Lee, S.K., 2011. *Ship Motion Dynamics*. Pusan National University Press, pp. 171-175.
- [22] Lee, S.W., 2015. A numerical study on ship-ship interaction in shallow and restricted waterway. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(5), pp.920-938.
- [23] Lo, D.C., 2012. Numerical simulation of hydrodynamic interaction produced during the overtaking and the head-on encounter process of two ships. *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 29(1), pp.83-101.
- [24] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), 2009. *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, Tokyo: MLIT.
- [25] Ozersky, A. and Rogozhina, E. 2016. Shallow water and interaction effects in ECDIS real-time motion prediction system. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Hamburg, Germany, pp.186-196.
- [26] Park, Y.S., Jeong, J.Y. and Kim, J.S., 2010. A study on the minimum safety distance between navigation vessels based on vessel operator's safety consciousness. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 16(4), pp.401-406.
- [27] Pinkster, J.A., 2004. The influence of a free surface on passing ship effects. *International Shipbuilding Progress*, 51(4). pp.313-338.
- [28] Pinkster, J.A., 2009. Suction, seiche and wash effects of passing ships. *SNAME Annual Meeting & Expo and Ship Production Symposium*, Providence, RI, pp.99-124.
- [29] Pinkster, J.A. and Bhawsinka, K., 2013. A real-time simulation technique for ship-ship

and ship-port interactions. *Proceedings of the 28th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, L'isle sur la Sorgue, France.

- [30] Pinkster, J.A., 2016. Progress on real-time prediction of ship-ship-shore interactions based on potential flow. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Hamburg, Germany, pp.157-167.
- [31] Redondo, R. et al., 2016. Bank effects modelling in real-time manoeuvring simulations. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Hamburg, Germany, pp.217-224.
- [32] Remery, G.F.M., 1974. Mooring forces induced by passing ships. *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Paper OTC 2066, Houston, Texas, USA.
- [33] Ruggeri, F., Watai, R.A. and Tannuri, E.A., 2016. Passing ships interaction in the oil terminal SAO SEBASTIAO(BRAZIL): an applied study to define the operational limits. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Hamburg, Germany, pp.168-176.
- [34] Sian, A.Y., Maimun, A. and Ahmed. Y., 2016. Simultaneous ship-to-ship interaction and bank effect on a vessel in restricted water. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Hamburg, Germany, pp.197-207.
- [35] Son, K.H., 2014. *Motion and Manoeuvrability of Marine Vehicles*. Dasom Press. pp.1-169.
- [36] Sutulo, S. and Guedes Soares, C., 2009. Simulation of close-proximity manoeuvres using an online 3D potential flow method. *Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '09)*, Panama City, Panama.
- [37] Sutulo, S. and Guedes Soares, C., 2016. Parametric study of a modified panel method in application to the ship-to-ship interaction. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Hamburg, Germany, pp.177-185.
- [38] Sutulo, S., Guedes Soares, C. and Otzen, J., 2012. Validation of potential-flow estimation of interaction forces acting upon ship hulls in parallel motion. *Journal of*

Ship Research, 56(3), pp.129-145.

- [39] The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC), 2014, Harbour Approach Channels Design Guidelines, Brussels: PIANC.
- [40] Vantorre, M., Verzhbitskaya, E. and Laforce, E. 2002. Model test based formulations of ship-ship interaction forces. *Ship Technology Research*, 49, pp. 124-141.
- [41] Varyani, K.S., Krishnankutty, P., 2006. Modification of ship hydrodynamic interaction forces and moment by underwater ship geometry. *Ocean Engineering* 33, pp.1090-1104.
- [42] Varyani, K.S., McGregor, R. and Wold, P., 1998. Interactive forces and moments between several ships meeting in confined waters. *Control Engineering Practice*, 6, pp.635-642.
- [43] Varyani, K.S., McGregor, R., Krishnankutty P. and Thavalingam, A., 2002. New empirical and generic models to predict interaction forces for several ships in encounter and overtaking manoeuvres in a channel. *International Shipbuilding Progress*, 49(4). pp.237-262.
- [44] Varyani, K.S., Thavalingam, A. & Krishnankutty P., 2004. New generic mathematical model to predict hydrodynamic interaction effects for overtaking maneuvers in simulators. *Journal of Marine Science of Technology*, 9(1), pp.24-31.
- [45] Varyani, K.S. and Vantorre, M., 2006. New generic equation for interaction effects on a moored container ship due to a passing tanker. *Journal of Ship Research*, 50(3), pp.278-287.
- [46] Wang, H.Z. and Zou Z.J., 2014. Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock. *Ocean Engineering*, 88, pp.409-425.
- [47] Xiang, X. and Faltinsen, O.M., 2011. Maneuvering of two interacting ships in calm water. *Marine systems & Ocean Technology*, 6(2), pp.65-73.
- [48] Yasukawa H., 2003. Maneuvering motions of two ships in close proximity. *Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, 105, pp.43-54.

- [49] Zou, L. and Larsson, L., 2013a. Computational fluid dynamics (CFD) prediction of bank effects including verification and validation. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(3), pp.310-323.
- [50] Zou, L. and Larsson, L., 2013b. Numerical predictions of ship-to-ship interaction in shallow water. *Ocean Engineering*, 72, pp.386-402.

