creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사 학위논문

파랑 중 선박의 충돌회피 성능에 관한 연구

Study On Collision Avoidance Performance of a Ship in Waves

2022년 8월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

고 광 성

공학석사 학위논문

파랑 중 선박의 충돌회피 성능에 관한 연구

Study On Collision Avoidance Performance of a Ship in Waves

2022년 8월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

고 광 성

파랑 중 선박의 충돌회피 성능에 관한 연구

Study On Collision Avoidance Performance of a Ship in Waves

지도교수 남 보 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 8월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

고 광 성

고광성의 공학석사 학위 논문을 인준함

2022년 8월

위 원 장: _____ (인)

부위원장: _____ (인)

위 원: _____ (인)

Abstract

최근 자율 시스템 관련 기술의 발전 및 센서 정확도 향상에 따라 다양한 분야에 적용성이 증대되었고, 이에 따라 신뢰성 높은 무인화 기술개발의 수요가 증가하고 있다. 조선/항해 분야에서도 선박의 운항 과정에서 인적 요인에 의한 해상사고의 최소화, 장기간 해상 데이터의 수집, 해상 운송의 효율성 증대 등을 목적으로 자율 운항 시스템을 도입한 선박의 개발 및 운용 을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 임무를 수행하기 위해서는 자율적인 장애물 충돌회피 능력을 갖추어야 하며, 이에 따라 선박의 충돌회피 시스템에 관한 연구가 필요하다. 또한 중앙해양안전심판원에서 집계한 최근 5년간의 운항사고 통계는 운항자의 과실에 의해 발생하는 선박사고 중 66%가량이 충돌사고로 이어진다는 것을 보여주어, 무인선 개발뿐만 아니라 운항자의 과실에 의한 충돌사고 예방을 위하여 선박의 충돌회피 시스템에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 기존에 수행되었던 선박의 충돌회피 알고리즘에 관한 연구의 한계점을 극복하고자 두 가지 연구 방향을 설정하였다. 첫째, 정확한 선박의 충돌회피 성능을 평가하기 위하여 정교한 선박 조종 동역학 모델을 기반으로 조종 시뮬레이션 프로그램을 구축하고 검증하고자 하였다. 선박의 동역학을 정교하게 반영하기 위해서는 구속모형실험 및 자유항주 시험을 바탕으로 검증된 동역학 모델을 이용하는 것이 바람직하며, 유체력 미계수 및 자유항주 시험 결과가 제시되어있는 선박을 이용하여 충돌회피 시뮬레이션을 진행하였다. 둘째, 파랑에 의한 충돌회피 성능의 변화 특성을 고찰하기 위하여 조종 시뮬레이션 모델에 파랑표류력을 환경외란으로 추가로 고려하여 선박의 충돌회피 성능을 비교 분석 하였다. 기존 연구에서는 대부분 환경외란을 고려하지 않은 채로 알고리즘 중심의 연구를 진행하거나, 바람 또는 조류만을 반영하여 충돌회피 시뮬레이션을 진행하였다. 하지만 대부분의 운항 조건에서 파랑 표류력이 지배적이며, 이를 고려하기 위해서는 선박의 내항성능 평가가 선행되어야 한다. 파랑의 파고, 파장, 그리고 파향에 따른 선박의 충돌회피 수치 시뮬레이션을 통해 충돌회피 성능을 평가하고자 하였다. 또한 선박의 제어기 성능이

제한된 상황에서의 충돌회피 성능에 관해 살펴보고자 하였다. 파랑 표류력에 의해 선박의 추진기 성능 저하가 일어날 수 있으므로 프로펠러의 회전수를 변화시켜가며 충돌 회피 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 위해, 최소추진출력 사례 연구(case study)를 바탕으로 최소추진출력보다 추력이 작은 경우 충돌회피 성능에 관해 살펴보고자 하였다.

본 연구에서는 최근접점 방법을 이용하여 충돌회피 시점을 결정하였으며, 속도 장애물(Velocity obstacle, VO)에서 확장된 형태인 WVO 방법을 이용하여 충돌회피 경로계획을 진행하였다. 경로 추종 알고리즘으로는 Line-of-Sight(LOS) guidance를 이용하였으며, 프로펠러 회전수와 타각을 이용하여 선속과 선수각을 제어하였다. 국제해상충돌예방규칙(International Regulation for Preventing Collisions at Sea, COLREGs)에서 권고하는 조우상황 별 요구 조건을 준수하도록 충돌회피 알고리즘을 구성하였다. 선박의 충돌회피 성능을 정량적으로 평가하기 위한 지표로 횡방향 이탈 거리(Cross track error, XTE)와 장애물과의 상대 거리(Relative distance)를 이용하였다. 구성된 선박의 조종 시뮬레이션과 충돌회피 알고리즘을 결합하여 선박의 충돌회피 시뮬레이터를 구성하였다. 우선, 정수 중 다양한 충돌회피 상황을 통해 충돌회피 시뮬레이터의 유효성을 확인하였다. 이후 다양한 파랑 조건에서 충돌회피 시뮬레이션을 수행하고 파랑을 구성하는 파고, 파장, 그리고 파향의 영향에 대해 평가하였다. 이를 바탕으로 파랑의 영향에 따른 충돌회피 성능 변화를 선박의 동역학 측면에서 분석하였다.

주요어: 자율운항, 환경하중, 파랑 표류력, KVLCC2, S175, 속도 장애물 (Velocity obstacle), MMG 모델

학 번: 2020-26164

Contents

Abstract i

Contents iii

List of Tables vi

List of Figures vii

1 서론 1

1.1 연구 배경 1

1.2 연구 사례 2

1.2.1 선박의 조종운동방정식 2

1.2.2 선박의 충돌회피 알고리즘 4

1.3 연구 목표 7

2 선박의 조종운동 수학 모델 10

2.1 MMG (Mathematical Modular Group) 모델 12

2.1.1 선체에 의한 유체동역학적 힘 12

2.1.2 프로펠러에 의한 유체동역학적 힘 13

2.1.3 타에 의한 유체동역학적 힘 14

2.1.4 파랑 표류력 계산 15

3 선박의 충돌회피 알고리즘 **18**

3.1 충돌 회피 시점 판단 19

3.1.1 최근접점 (Closest Point of Approach) 19

3.2 국제해상충돌예방규칙 (COLREGs) 및 조우상황 분류 20

3.2.1 국제해상충돌예방규칙 20

3.2.2 조우상황 분류 22

3.3 충돌회피 경로계획 알고리즘 25

3.3.1 속도 장애물 (Velocity obstacle, VO) 25

3.3.2 COLREGs를 고려한 VO 27

3.3.3 Worst-case velocity obstacle (WVO) 28

3.4 가용 속도 및 회피 속도 결정 30

3.4.1 가용 속도 30

3.4.2 회피 속도 결정 32

3.5 경로 추종 알고리즘 32

3.5.1 Line-of-Sight guidance (LOS guidance) 32

3.5.2 PD 제어기 33

4 파랑 중 조종 시뮬레이션 **36**

4.1 정수 중 선박의 조종 시험 36

4.1.1 선회 시험 37

4.1.2 지그재그 시험 40

4.2 파랑 중 선박의 조종 시험 44

4.2.1 파랑 표류력 검증 44

4.2.2 파랑 중 선회 시험 51

5 선박의 충돌회피 시뮬레이션 **56**

5.1 정수 중 선박의 충돌회피 56

5.1.1 단일 장애물 회피 57

5.1.2 다중 장애물 회피 69
5.2 파랑 중 선박의 충돌회피 71
5.2.1 파고의 영향 71
5.2.2 파장의 영향 74
5.2.3 파향의 영향 82
5.2.4 추진기 성능에 대한 충돌회피 83

6 결론 **91**

List of Tables

1.1 Occurences of marine accident in Korea according to kinds of accident in recent 5 years [37] 3

1.2 Previous studies regarding collision avoidance of ships 8

2.1 Principal dimensions of S175 containership and KVLCC2 [46] [30] . 10

4.1 Turning test condition of KVLCC2 and S175 containership 36

4.2 Comparison between experimental results and simulation results . . . 37

4.3 Overshooting angle of KVLCC2 zigzag test 40

4.4 Calcuation matrix for wave drift force 44

4.5 Wave condition of turning tests 51

4.6 Drift distance and angle of simulation results (S175) 54

4.7 Drift distance and angle of simulation results (KVLCC2) 54

List of Figures

1.1 Occurences of marine accident in Korea according to causes of accident in recent 5 years, [38] 2

2.1 Coordinate system of maneuvering motion of equation 11
2.2 Coordinate definition for the seakeeping analysis, figure from [64] . . 16

3.1 Flowchart of ship collision avoidance maneuver 18
3.2 Concept of Closest Point of Approach 19
3.3 COLREGs rule 13, 14, and 15 23
3.4 Graphical representation of a relative bearing and relative course . . . 23
3.5 Ambiguity of bearing-based classification 24
3.6 Concept of velocity obstacle with different obstacle shape 26
3.7 Concept of conventional velocity obstacle 28
3.8 Velocity obstacle with COLREGs, Figure from [8] 29
3.9 Concept of WVO 29
3.10 Graphical representation of RV and RAV 31
3.11 Set of reachable velocities(RV) used in this study 31
3.12 Line-of-Sight guidance with acceptance circle 33
3.13 PD controller for course over ground (COG) 35

4.1 Tunring trajectory of KVLCC2 and S175 containership 38

4.2 Comparison of velocity components and drift angle with experiment (S175) 39
4.3 Comparison of time histories for 10/10 zigzag test in calm water (S175) 41
4.4 Comparison of time histories for 10/10 zigzag test in calm water (KVLCC2) 42
4.5 Comparison of time histories for 20/20 zigzag test in calm water (KVLCC2) 43
4.6 Validation of wave drift force (S175) 45
4.7 Validation of surge wave drift force, $U = 6.0$ kts (KVLCC2) 47
4.8 Validation of sway wave drift force, $U = 6.0$ kts (KVLCC2) 48
4.9 Validation of yaw wave drift moment, $U = 6.0$ kts (KVLCC2) 49
4.10 Polar diagram of wave drift forces (KVLCC2) 50
4.11 Turning trajectories of S175 in waves 52
4.12 Turning trajectories of KVLCC2 in waves 53

5.1 Example of WVO method and cost function (S175) 56
5.2 Collision avoidacne in head on situation (S175) 57
5.3 Collision avoidacne performance in head on situation (S175) 59
5.4 Collision avoidacne in crossing situation (S175) 60
5.5 Collision avoidacne performance in crossing situation (S175) 61
5.6 Collision avoidacne in head on situation (KVLCC2) 63
5.7 Collision avoidacne performance in head on situation (KVLCC2) . . . 64
5.8 Collision avoidacne in crossing situation (KVLCC2) 65
5.9 Collision avoidacne performance in crossing situation (KVLCC2) . . 66
5.10 Collision avoidacne in overtaking situation (KVLCC2) 67
5.11 Collision avoidacne performance in overtaking situation (KVLCC2) . 68
5.12 Multiple stationary obstacle avoidance maneuver of KVLCC2 69
5.13 Multiple dynamic obstacle avoidance maneuver of KVLCC2 70
5.14 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave amplitude wise, $\chi = 90°$) 72

5.15 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave amplitude wise, $\chi = 90°$) 73
5.16 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave amplitude wise, $\chi = 180°$) 75
5.17 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave amplitude wise, $\chi = 180°$) 76
5.18 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave length wise, $\chi = 90°$) 78
5.19 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave length wise, $\chi = 90°$) 79
5.20 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave length wise, $\chi = 180°$) 80
5.21 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave length wise, $\chi = 180°$) 81
5.22 Indices of collision avoidance performance in head on situation (KVLCC2) 82
5.23 Indices of collision avoidance performance in head on situation (S175 containership) 83
5.24 Polar diagram of cross track error for head on situation 84
5.25 Polar diagram of cross track error for head on situation, $\mathrm{A/L} = 0.015$ 85
5.26 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation $(\chi = 180°, \lambda/L = 1.0, \mathrm{A/L} = 0.015)$ 87
5.27 Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation $(\chi = 90°, \lambda/L = 0.7, \mathrm{A/L} = 0.015)$ 88
5.28 Collision avoidance maneuver of S175 containership in waves $(\chi = 90°, \lambda/L = 0.7, \mathrm{A/L} = 0.0225)$ 89
5.29 Comparing assumed RV with ship dynamic based RV, S175 containership 90

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

자율시스템 관련 기술 및 센서의 신뢰도가 향상됨에 따라 많은 분야에서 무인화 작업이 이루어지고 있으며, 조선해양 산업 분야 역시 자율운항 선박의 개발을 활발히 진행하고 있다. 일반적으로, 자율운항 선박은 사고의 인적요인 최소화, 장기간 해상 데이터 수집, 군사 목적, 효율적인 해상 운송 등을 주요 목적으로 한다. Clearpath사는 연구 및 실험 모델을 목적으로 Kingfisher USV([40])를 개발하였으며 L3 ASV 사는 해양 데이터를 측량을 목적으로 한 C-Enduro 소형 무인선을 개발하였다([41]). 선박해양플랜트 연구소(KRISO)와 한국과학기술원(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)의 Han et al. [1]는 8m 길이 ARAGON 호를 이용해 충돌회피 실험을 진행하였으며, 미국 국방 첨단과학기술 연구소 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)는 군사 목적으로 2016년 Anti-Submarine Warfare (ASW) Continuous Trail Unmanned Vessel (ACTUV) 프로그램의 일환으로 40m 길이의 Sea hunter USV를 개발한 바 있다([42]). 또한 해상 운송 목적으로 Det Norske Veritas Germanischer Lloyd(DNV GL)에서 자율 전기추진선인 ReVolt를 개발중에 있다([43]). Samsung Heavy Industry(SHI)는 대형 상선의 자율운항을 목적으로 SAS (Samsung Autonomous ship) 시스템을 개발 중이며 2020년 300-ton 크기의 선박, SAMSUNG T-8에 탑재하여 충돌 회피 실험에 성공하였다([44]). 또한 자율운항 솔루션 개발 전문 회사인 Avikus는 2022년 자율운항 및 자율도킹 솔루션을 적용한 소형 레저선 AiBOAT를 개발하였다([45]). 다양한 임무를 수행하기 위해 자율운항 선박에 대한 연구가 진행되고 있지만 해당 임무를 성공적으로

수행하기 위해서는 장애물을 자율적으로 회피할 수 있는 충돌회피 시스템이 탑재가 필요하다.

선박의 충돌회피 시스템의 필요성은 자율운항 선박뿐만 아니라 선박의 충돌 사고 예방에도 있다. 선박의 충돌사고는 선박의 구조적인 손상과 더불어 인명 및 재산 피해, 기름 유출로 인한 해양환경오염으로 이어질 수 있다. Table 1.1는 국내 해양수산부 산하기관인 중앙해양안전심판원에서 집계한 최근 5년간 사고 종류별 해양 사고 현황을 보여준다. 전체 14,100 건의 해양사고 중 충돌사고는 1,275 건으로 전체의 9% 가량을 차지하였다. 또한 Figure 1.1에서 보여주듯이 운항 과실에 따른 해양사고 중 66%가 충돌사고로 이어졌으며 운항자의 잘못된 판단으로 인한 사고가 충돌사고의 주를 이루는 것을 알 수 있다. 충돌사고의 주된 요인을 제거하기 위해 운항자의 판단을 보조할 수 있는 충돌회피 시스템의 개발이 필요하다.

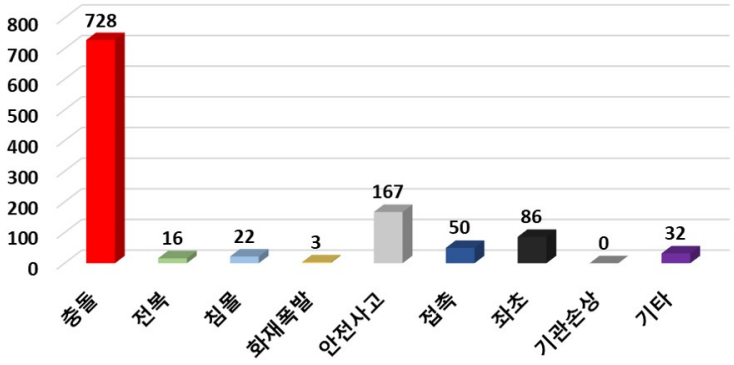


Figure 1.1: Occurences of marine accident in Korea according to causes of accident in recent 5 years, [38]

1.2 연구 사례

1.2.1 선박의 조종운동방정식

선박의 충돌회피 수치 시뮬레이터에 적용하는 선박의 동역학 모델은 실선의 동역학적 특성을 충분히 반영할 수 있는 모델이어야 한다. 연구자들은 각자의 연구

Table 1.1: Occurences of marine accident in Korea according to kinds of accident in recent 5 years [37]

	사고 종류	2017	2018	2019	2020	2021	계
주요사고	충돌	258	250	244	277	246	1,275
	전복	65	46	110	108	96	425
	침몰	29	38	61	69	54	251
	화재 폭발	96	119	132	128	149	624
	안전 사고	160	162	228	203	174	927
단순사고	접촉	25	20	38	39	42	164
	좌초	149	142	140	198	133	762
	기관 손상	838	856	888	878	813	4,273
	부유물 잠김	311	278	346	358	336	1,629
	운항 저해	131	155	151	161	128	726
	해양 오염	65	80	94	70	65	374
	침수	154	210	196	227	195	982
	조타장치손상	103	105	104	132	85	529
	추진축계손상	184	180	185	259	163	971
	기타	14	30	54	49	41	188
계		2,582	2,671	2,971	3,156	2,720	14,100

목적에 따라, 다양한 정확도의 동역학 모델을 이용하여 충돌회피 알고리즘에 대한 연구를 진행하였다. Guoqin [25], Campos et al. [32], Lee et al. [26], Song et al. [33]는 선박의 회전 속도와 전진 속도에 대한 제한조건만을 부여하여 선박의 충돌회피 시뮬레이터를 구성하여 충돌회피 알고리즘에 초점을 둔 연구를 진행하였다. Stenersen [10]과 Kufoalor et al. [9]는 Fossen [13]이 제안한 벡터 형태의 운동방정식을 이용하였고, 우주현 [22]은 WAM-V 무인수상선에 대한 동역학 시스템 식별 (System Identification) 실험을 수행하여 동역학적 특성을 추출하였다. 최근에는 MMG (Mathematical Modular Group) 모델을 기반으로 선박 조종운동방정식을 표현하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 김희수 [31]와 Kim et al. [34]는 이를 이용하여 조종 시뮬레이터를 구축하고 충돌회피 수치 시뮬레이션을 진행하였다.

최근 국제 항해하는 선박에 대하여 에너지 효율 설계 지수 (Energy Efficiency Design Index, EEDI)의 계산이 의무화됨에 따라 파랑, 바람 등의 환경하중 하에서 선박의 조종 성능을 정도 높게 예측하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 문제를 선박의 충돌회피 문제에 적용하고자 선박의 조종운동방정식에 환경하중 항을 추가하여 수치 시뮬레이션을 수행한 사례가 있다. Liu et al. [15]와 Lee et al. [26]는 조류가 해안에서 지배적이라고 판단하고 이접안 문제, 충돌회피 해결을 위해 조류를 고려하였다. 유영준 [27], 우주현 [22]은 어떤 해역이든 존재하는 바람과 조류를 조종운동방정식의 외력으로 반영하여 충돌회피 상황을 수립하였다. Stenersen [10] 은 파랑 표류력을 고려한 충돌 회피 시뮬레이션을 수행하였으나, 파랑 표류력을 가우시안 백색 소음으로 근사하여 파랑의 파고, 파장 그리고 파향의 영향이 반영되지 못하였다.

1.2.2 선박의 충돌회피 알고리즘

충돌회피 알고리즘에 관한 연구는 1970년대 이후, 컴퓨터 공학과 로보틱스 분야에서 활발히 이루어졌으며 수많은 방법론이 제시되어왔다. 연구자들의 연구 목적에 따라 장애물 지도가 주어진 경우의 충돌회피 알고리즘, 센서 기반 탐지된 장애물 정보를 이용한 충돌회피 알고리즘으로 구분할 수 있다. 선박의 충돌회피 및 경로계획

알고리즘은 대부분 기존 충돌회피 알고리즘에 선박의 조종특성을 반영한 방식으로 수정된 형태이다.

선박의 충돌회피 알고리즘에 관한 연구는 크게 다섯 가지로 이루어져 있으며, 충돌회피 시점 추론, 충돌회피 경로 추종을 위한 제어기법, 충돌회피 경로 계획, 실제 운항환경을 고려한 다양한 환경외란 및 위험 인자 반영, 그리고 기존의 충돌회피 알고리즘이 갖는 문제점 해결에 대한 연구이다. 각 주제에 해당하는 대표적인 연구 사례는 다음과 같다.

- 충돌회피 시점 추론

선박의 충돌회피 시점 추론을 위한 다양한 방법론이 존재한다. 먼저, Fuji and Tanaka [2]는 선박안전영역을 제안하였으며 자선의 안전영역 이내에 타선이 감지되면 회피하는 방식으로 활용되었다. 이후 Goodwin [4]은 통계적인 방법을 통해 선박안전영역을 설정하였고, Fujii [2], Coldwell [5]는 선박안전영역에 국제해상충돌예방규칙 (International Regulation for Preventing Collisions at Sea, COLREGs)을 고려하려는 접근을 하였으며, Kijima [6]는 폐색영역(blocking area)과 감시영역(watching area)을 정의하고 충돌회피 알고리즘으로 활용하였다. 하지만 자선과 타선 사이의 거리만으로 단순화하여 타선의 속도가 고려되지 못하는 문제가 있었으며, Hasegawa [3]는 상대속도를 고려하고자 최단접근거리 (Distance at Closest Point of Approach, DCPA)와 최단접근시간 (Time to Closest Point of Approach, TCPA)를 이용한 퍼지 추론을 통해 충돌 위험도를 추론하여 충돌회피 시점을 결정하였다. 퍼지 추론을 이용한 충돌 위험도의 경우 운항자의 주관이 반영된 지표이므로, Kuwata et al. [8], Stenersen [10], Kufoalor et al. [9]는 정량적인 지표인 TCPA와 DCPA를 이용하여 충돌회피 시점을 결정하였다. Woo and Kim [11]은 자선과 타선의 속도비율, 조우상황, 해상운항법 등의 요소를 동시에 고려하기 위해 강화학습을 기반으로 충돌회피 시점을 결정하는 방법을 제시하였다.

- 경로 추종을 위한 제어기법

선박의 충돌회피 경로계획 알고리즘 결과에 따른 경로 추종을 위해 침로 제어를

수행함으로써 선박의 충돌회피 기동이 진행된다. Kijima and Furukawa [7]는 계획된 경로와의 횡방향 이탈거리(lateral distance)와 선수각 차이를 이용하여 퍼지 추론을 통해 타각을 제어함으로써 선박의 침로를 제어하였다. Fossen [12]는 선박의 경로 추종을 위해 두 경유점을 연결한 직선을 추종하는 방식인 Line-of-sight(LOS) guidance 기법을 소개하였다.

- 충돌회피 경로계획 알고리즘

선박의 충돌회피 경로계획 알고리즘은 크게, 주어진 장애물 지도를 기반으로 장애물을 회피하는 경로를 생성하는 전역경로계획(Global path planning) 기법과 실시간 통신, 센서 정보를 통해 국부적으로 장애물 회피 경로를 생성하는 지역경로계획(Local path palnning) 기법으로 나뉜다. 전역경로계획 기법을 대표하는 기법으로는, A* 탐색법, Theta* 탐색법, Artificail potencial 등이 있다. Singh et al. [14]은 포츠머스 항구의 위성 사진을 이용하여 장애물 지도를 생성하고 충돌회피 시뮬레이션을 진행하였으며, Liu et al. [15]은 A* 탐색법을 이용하여 선박의 접안 문제를 해결하고자 하였다. Kim et al. [16]는 선박의 선수각 정보를 반영하기 위해 Theta* 탐색법을 적용하였다.

지역경로계획 기법에는 대표적으로 속도 장애물(Velocity obstacle, VO) 기법, Dynamic Window Approach(DWA) 기법(Fox et al. [70]), Curvature Velocity Method (CVM) (Simmons [71]) 등이 있다. Zhang et al. [17]은 기존의 DWA 기법에 선박의 특성을 반영한 Fuzzy dual-window DWA(FDDWA) 기법을 제안하였다. VO 기법은 많은 연구자에 의해 이용되고 확장되고 있으며 특히, 무인수상선 분야에서 Kuwata et al. [8]은 센서 정보의 불확실성을 반영하기 위해 Worst-case VO(WVO) 기법을 제안한 바 있다. 이외에, Kluge and Erwin [18]은 장애물의 속도에 대한 불확실성을 반영하기 위해 확률의 개념을 도입하여 Probabilistic VO(PVO) 기법을 제안하였고, Van den Berg et al. [19]는 다수의 에이전트(multi-agent) 상황에서 진동하는 운동을 해결하기 위해 Reciprocal VO(RVO)를 도입하였다. 장애물의 속도에 대한 선형 근사 문제를 해결하기 위해 Shiller et al. [20]은 장애물의 이동 궤적을 반영한 Non-linear VO(NLVO)를 개발하였으며 Wilkie et al. [21]는 이러한 문제를 로봇의 제어기

관점으로 변형한 Generalized VO(GVO) 개발 등이 이루어진 바 있다.

- 운항환경을 고려한 충돌회피

Table 1.2는 선박의 충돌회피에 관한 선행연구에서 이용한 충돌회피 알고리즘 및 외력, 실험 여부를 보여준다. 선박을 대상으로 진행된 대부분의 충돌회피 연구는 선박에 작용하는 외력을 무시하거나 바람, 조류만을 고려하였다. Kufoalor et al. [23], Cho et al. [24]는 선박의 특성을 고려한 알고리즘 응용 측면에서 연구를 진행하여 환경외란을 무시하였으며, Steneren [10]은 불규칙파를 white noise 가정한 후 계산하여, 선박에 작용하는 파랑 표류력의 효과를 제대로 반영하지 못했다. 우주현 [22]와 유영준 [27]는 조류 및 풍하중 조건에서 선박의 선회시험을 통해 조류, 바람의 영향을 검토한 이후 충돌회피 시뮬레이션에 적용하였다. 선박의 충돌회피에 관한 연구는 수치 시뮬레이션이 주를 이루므로, 적절한 검증 과정을 통해 환경외란의 효과를 적용해야 한다는 어려움이 있다.

1.3 연구 목표

본 연구에서는 선박의 충돌회피와 관련된 선행연구의 연구 범위 및 결과를 바탕으로 두 가지 측면으로 연구 목표를 수립하였다. 첫째, 선박의 동역학적 특성을 면밀히 반영하기 위해 MMG (Mathematical Modular Group) 모델 기반 조종 시뮬레이션을 개발하고 환경외란을 적용하는 것이다. MMG 모델의 유체력 미계수 및 프로펠러, 러더 모델은 Yasukawa and Yoshimura [30]을 참고하여 실험 기반 미계수를 적용하였다. 3D 랜킨 패널 방법을 기반으로 파랑 표류력을 계산하고, 실험 결과와 비교를 통해 검증하고자 한다. 선박의 조종 시뮬레이션 검증을 위해 정수 중 선회시험 및 지그재그 시험을 진행하고 실험 결과와 비교 검증을 진행하고, 파랑 중 조종 시뮬레이션에 대해 선회시험 결과와 비교 검증을 통하여 본 연구에서 개발한 파랑 중 선박의 조종 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

둘째, WVO 기반 충돌회피 시뮬레이션을 구축하고 MMG 모델 기반 조종 시뮬레이션과 결합하여 선박의 충돌회피 수치 시뮬레이션을 개발하고자 한다. 국제해상충

Table 1.2: Previous studies regarding collision avoidance of ships

Research	Path planning algorithm	Environmental condition			Experiment
		Wind	Current	Wave	
Kuwata [8]	WVO	✓			✓
Stenersen [10]	VO	✓	✓	Noise	
Woo [22]	WVO	✓	✓		✓
Kufoalor [23]	RVO				
Cho, Y [24]	PVO				
Guoqin Xia [25]	NLVO				
You [27]	A* algorithm	✓	✓		
Lee [26]	A* algorithm		✓		
Singh [14]	A* algorithm	✓			
Liu [15]	A* algorithm		✓		
Kim [28]	A* algorithm				✓

돌예방규칙을 준수하는 기동을 목표로 하며 여러 동적 장애물에 대한 시뮬레이션을 진행하고자 한다. 또한, 파랑의 파고, 파장, 그리고 파향에 관한 다양한 시뮬레이션을 통해 파랑 중 선박의 충돌회피 성능을 평가하고자 한다. Seo et al. [29]에 따르면, 파랑 중 선박의 추진기 성능이 정수 중에 비해 15% ∼ 30% 성능 저하가 일어날 수 있다. 이에 따라, MMG 모델의 추진기 성능을 좌우하는 프로펠러 회전수, RPS를 조절하며 선박의 충돌회피 시뮬레이션을 진행하여 제어기 성능이 제한된 경우의 충돌회피 시뮬레이션을 결과를 바탕으로 선박의 제어기 성능 관점에서 충돌회피 성능을 파악하고자 하였다. 선박의 충돌회피 성능 평가를 위한 지표로는 Cross trakc error(XTE)와 장애물과의 상대거리(Relative distance)를 채택하여, 정량적인 충돌회피 성능 평가를 진행하고자 하였다.

제 2 장 선박의 조종운동 수학 모델

본 연구에서는 선박의 충돌회피 연구를 위해 S175 컨테이너선과 KVLCC2, 두 가지 선종을 이용하였으며 유체력 미계수는 각각 Yasukawa [46]와 Yasukawa and Yoshimura [30]의 모형시험 결과를 이용하였다. S175 컨테이너선과 KVLCC2의 주요 제원은 Table 2.1과 같다.

Table 2.1: Principal dimensions of S175 containership and KVLCC2 [46] [30]

	S175 containership		KVLCC2	
	proto	model	proto	model
Scale	-	1/50	-	1/45.7
$L_{pp}[m]$	175	3.5	320	7
$B[m]$	25.40	0.508	58	1.27
$d[m]$	9.50	0.190	20.8	0.46
$\nabla[m^3]$	24,154	193.57	312,600	3.27
$x_G[m]$	-2.545	-0.051	11.2	0.25
C_b	0.572	0.572	0.810	0.810
$D_P[m]$	6.507	0.1301	9.86	0.216
H_R	7.7	0.154	15.80	0.345
$A_R[m^2]$	32.46	0.0130	112.5	0.0539

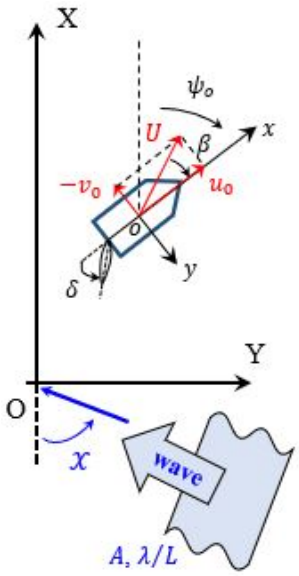


Figure 2.1: Coordinate system of maneuvering motion of equation

선박의 조종 문제를 해결하기 위해, Figure 2.1와 같이 공간고정좌표계($O-XYZ$)와 물체고정좌표계($o-xyz$), 두 직교 좌표계를 이용하는 것이 보편적이다. 두 좌표계 모두 Z축이 아래 방향을 가리킨다. 두 좌표계를 이용함으로써 선박의 속도 및 위치 변화를 반영할 수 있게 된다. 두 좌표계 사이의 변환 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X &= x\cos\psi_0(t) - y\sin\psi_0(t) + X_0(t) \\ Y &= x\sin\psi_0(t) - y\cos\psi_0(t) + Y_0(t) \\ Z &= z \end{aligned} \tag{2.1}$$

여기서, $X_0(t)$, $Y_0(t)$, $\psi_0(t)$는 임의의 시간, t에서 공간고정좌표계에서 선박의 위치 및 선수각을 나타낸다. 선박의 운항 상태에 있어, X 방향 속도는 u_0, Y 방향 속도는 v_0, 선수각 회전속도는 r_0이며 전체 속도(U)와 표류각(drift angle, β)은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{u_o^2 + v_o^2} \\ \beta &= \tan^{-1}(-v_0/u_0) \end{aligned} \tag{2.2}$$

파랑 표류력은 파고(A), 파장 비(λ/L_{pp}), 파향(χ)의 함수로 표현된다. 또한 δ는 타각

(rudder angle)을 의미하며, 파랑의 상대적인 입사각도는 선수각에 의해 변화하므로 $\chi - \psi_0$로 계산된다.

2.1 MMG (Mathematical Modular Group) 모델

본 연구에서는, 선박의 조종 운동을 해석하기 위해 3자유도 MMG 모델 기반 조종운동방정식을 적용하였다. 일반적으로 선박 조종 운동 방정식은 수평면상에서 기술되며 heave, roll, pitch 운동에 의한 연성 효과는 무시한다는 가정하에 표현된다. 이에 따라 surge, sway, yaw 운동은 3자유도의 모듈형(module type) 연성 운동 방정식으로 모사될 수 있다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u_0}) - v_0 r_0 &= X_{\mathrm{H}} + X_{\mathrm{R}} + X_{\mathrm{P}} + X_{\mathrm{Wave}} \\ m(\dot{v_0}) + u_0 r_0 &= Y_{\mathrm{H}} + Y_{\mathrm{R}} + Y_{\mathrm{Wave}} \\ I_{zz}\dot{r_0} &= N_{\mathrm{H}} + N_{\mathrm{R}} + N_{\mathrm{Wave}} \end{aligned} \tag{2.3}$$

여기서, m, I_{zz}는 각각 선박의 질량과 Z축 관성모멘트를 의미한다. X와 Y는 전후방향, 좌우방향 힘이며, N은 선수방향 모멘트이다. 아래 첨자, H, R, P는 각각 선체, 타, 프로펠러에 의한 유체동역학적 힘을 의미하고 Wave는 2차 파랑 표류력을 의미한다. 모듈형 운동방정식의 경우 각각의 힘을 독립적으로 모델링 한다는 점에서 요소별로 적용이 편리하다는 장점이 있다.

2.1.1 선체에 의한 유체동역학적 힘

선체에 의한 유체동역학적 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_{\mathrm{H}} =& X_{\dot{u}}\dot{u_0} - Y_{\dot{v}} v_0 r_0 + X_{vv} v^2 - R\left(u_0\right) \\ Y_{\mathrm{H}} =& Y_{\dot{v}}\dot{v_0} + X_{\dot{i}} u_0 r_0 + Y_v v + Y_r r_0 \\ &+ Y_{vvv} v^3 + Y_{vvr} v^2 r_0 + Y_{vrr} v r_0^2 + Y_{rrr} r_0^3 \\ N_{\mathrm{H}} =& N_{\dot{r}}\dot{r_0} + N_v v + N_r r_0 + N_{vvv} v^3 \\ &+ N_{vvr} v^2 r_0 + N_{vr} v r_0^2 + N_{rrr} r_0^3 \end{aligned} \tag{2.4}$$

여기서, $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, 그리고 $N_{\dot{r}}$는 각각 해당 방향의 부가질량 및 모멘트를 의미하며, $X_{vv}, Y_v, Y_r, Y_{vvv}, Y_{vvr}, Y_{vrr}, Y_{rrr}, N_v, N_r, N_{vvv}, N_{vvr}, N_{vrr}, N_{rrr}$은 조종 유체력 미계수를 나타낸다. $R(u)$는 선박의 전진 방향 저항을 의미하고 $R(u) = \frac{1}{2}\rho LDU_0^2 X_{uu}$로 계산된다. 여기서 X_{uu}는 저항 실험을 통해 구한다. 조종 유체력 미계수 및 저항계수는 Yasukawa [46]와 Yasukawa and Yoshimura [30]의 실험 결과를 참고하였다.

2.1.2 프로펠러에 의한 유체동역학적 힘

프로펠러에 의한 유체동역학적 힘은 다음과 같다.

$$X_{\mathrm{P}} = (1 - t_{\mathrm{P}})\, \rho n_{\mathrm{P}}^2 D_{\mathrm{P}}^4 K_T(J_{\mathrm{P}}) \tag{2.5}$$

여기서, t_{P}, n_{P}, D_{P}는 각각 추력감소 계수 (thrust deduction factor), 프로펠러의 회전수와 직경을 의미한다. K_T는 추력계수 (thrust coefficient)를 의미하며 프로펠러의 전진비에 대한 함수로 나타난다.

$$K_T\left(J_{\mathrm{P}}\right) = k_2 J_{\mathrm{P}}^2 + k_1 J_{\mathrm{P}} + k_0 \tag{2.6}$$

$$J_{\mathrm{P}} = \frac{u_0\left(1 - w_{\mathrm{P}}\right)}{n_{\mathrm{P}} D_{\mathrm{P}}} \tag{2.7}$$

w_{P}는 반류 계수 (effective wake fraction)이며 선박이 직진하는 경우의 반류 계수인 w_{P0}와 프로펠러 위치, $x = x_{\mathrm{P}}$에서의 유입각, $\beta_{\mathrm{P}} = \beta - x_{\mathrm{P}} r_0$에 의존하며 여러 형태가 존재한다. S175 컨테이너선과 KVLCC2에 대하여 각각 다음 식을 적용하였다.

$$w_{\mathrm{P}} / w_{\mathrm{P0}} = \exp\left(-4\beta_{\mathrm{P}}^2\right) \tag{2.8}$$

$$\left(1 - w_{\mathrm{P}}\right) / \left(1 - w_{\mathrm{P0}}\right) = 1 + \left\{1 - \exp\left(-C_1 \left|\beta_{\mathrm{P}}\right|\right)\right\}\left(C_2 - 1\right) \tag{2.9}$$

여기서, $\left(1 - w_{\mathrm{P}}\right) / \left(1 - w_{\mathrm{P0}}\right) \to C_2$ at $|\beta_{\mathrm{P}}| \to \infty$임을 확인할 수 있는데, 이는 C_2가 $|\beta_{\mathrm{P}}|$가 큰 경우의 $\left(1 - w_{\mathrm{P}}\right) / \left(1 - w_{\mathrm{P0}}\right)$를 의미한다. 또한 C_1은 $|\beta_{\mathrm{P}}|$에 따른 반류 변화 특성을 의미한다. 실제 반류 특성은 좌/우현 비대칭이므로 β_{P}의 부호에 따라

다른 값을 적용한다. S175 컨테이너선과 KVLCC2에 대해 각각 식 2.8와 2.9를 적용하였으며, 이는 각각의 선박에 대한 MMG 모델을 소개하는 자료인 Yasukawa [46]와 Yasukawa and Yoshimura [30]를 참고하였다.

2.1.3 타에 의한 유체동역학적 힘

타에 의한 유체동역학적 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$X_{\mathrm{R}} = -(1 - t_{\mathrm{R}}) F_N \sin\delta \tag{2.10}$$

$$Y_{\mathrm{R}} = -(1 + a_{\mathrm{H}}) F_N \cos\delta \tag{2.11}$$

$$N_{\mathrm{R}} = -(x_{\mathrm{R}} + a_{\mathrm{H}} x_{\mathrm{H}}) F_N \cos\delta \tag{2.12}$$

여기서, x_{R}은 타의 x축 방향 중심이며 t_{R}, a_{H}, 그리고 x_{H}는 러더와 선체 간의 상호작용을 나타내는 계수이다. t_{R}은 steering resistance deduction factor 이며, 타직압력(F_N)의 길이 방향 성분인 $F_N \sin\delta$에 대한 감쇠 계수를 의미한다. 또한 X_{R}은 타 조종(steering)에 의한 추력 변화를 내포하고 있으며, t_{R}는 타의 저항 감소 성분과 추력 증가 성분을 동시에 고려해주는 계수다. a_{H}는 횡방향 힘에 대한 rudder force increase factor 를 의미한다. 이는 타직압력의 횡방향 성분인 $F_N \cos\delta$으로 인한 선체에 작용하는 힘의 증가 정도를 의미하며, 통상적으로 $0.3 \sim 0.4$의 값을 가진다. 부가적인 횡방향 힘을 $-\Delta Y$로 정의하면, $a_{\mathrm{H}} = -\Delta Y / F_N \cos\delta$ 로 정의할 수 있다. x_{R}은 $-\Delta Y$의 작용점의 위치를 의미하며 가적인 횡방향 힘에 의한 모멘트 계산에 이용된다. δ와 F_N은 각각 타각과 타직압력(rudder normal force)을 의미한다.

$$F_N = (1/2)\rho A_{\mathrm{R}} U_{\mathrm{R}}^2 f_\alpha \sin\alpha_{\mathrm{R}} \tag{2.13}$$

여기서, U_{R}은 타 유입류 속도이고 α_{R}은 그 각도를 의미하며 다음과 같다.

$$U_{\mathrm{R}} = \sqrt{u_{\mathrm{R}}^2 + v_{\mathrm{R}}^2} \tag{2.14}$$

$$\alpha_{\mathrm{R}} = \delta - \tan^{-1}(u_{\mathrm{R}} / v_{\mathrm{R}}) \tag{2.15}$$

$$v_{\mathrm{R}} = U \gamma_{\mathrm{R}} \beta_{\mathrm{R0}} \tag{2.16}$$

선박 직진을 위한 타각과 사항각은 0°로 가정하였다. v_{R}은 식 2.16와 같다. γ_{R}은 선체와 프로펠러의 존재로 인한 후류에 의해 나타나는 정류 효과를 나타내는 계수이며, 보편적으로 1.0보다 작다. 이는 기하학적 유입각인 β_{R0}보다 실제 유입각이 작음을 의미한다. β_{R0}는 선체의 사항각, β와 회전운동을 통한 속도 변화, $-x'_{\mathrm{R}}r'_0$의 합으로 계산되며, x'_{R}은 무차원화된 타의 길이 방향 위치이고 $x'_{\mathrm{R}} = -0.5$가 기대되었으나, 실험을 통해 $x'_{\mathrm{R}} = -1.0$이 적절하다는 결과가 있다(Kose et al. [39]). 실제 타의 위치와의 구분을 위해 x'_{R} 대신 l'_{R}을 이용하여 v_{R}을 나타내면 다음과 같다.

$$v_{\mathrm{R}} = U\gamma_{\mathrm{R}}\beta_{\mathrm{R0}} \tag{2.17}$$

$$\beta_{\mathrm{R0}} = \beta - l'_{\mathrm{R}}r' \tag{2.18}$$

좌/우현 선회시 다른 γ_{R} 값이 적용되어 좌/우현 비대칭성의 원인 중 하나가 된다. 타의 길이방향 속도인 u_{R}은 다음과 같다.

$$u_{\mathrm{R}} = \varepsilon u\left(1 - w_{\mathrm{P}}\right)\sqrt{\eta\left\{1 + \kappa\left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_{\mathrm{P}}^2}} - 1\right)\right\}^2 + (1 - \eta)} \tag{2.19}$$

여기서, ε은 타 위치와 프로펠리 위치에서의 반류비 (wave fraction)의 비율, $\varepsilon = \left(1 - w_{\mathrm{R}}\right)/\left(1 - w_{\mathrm{P}}\right)$로 정의한다. κ는 실험을 통해 구해진 상수이다. η는 프로펠러 직경과 타 폭의 비율을 나타내며, $\eta = D_{\mathrm{P}}/H_{\mathrm{R}}$로 계산된다.

2.1.4 파랑 표류력 계산

실제 선박은 바람, 조류, 그리고 파랑 등 다양한 해양 환경하중 하에 운항한다. 일반적으로 파랑 표류력이 가장 크게 작용하며 본 연구에서는 파랑 표류력을 적용한 선박의 조종운동방정식을 통해 파랑 표류력을 반영하고자 한다. 파랑 표류력은 3D 랜킨 패널 방법을 이용한 WISH 프로그램을 통해 계산하였다. 수치 기법에 대한 자세한 내용은 Kim et al. [72]에서 찾을 수 있다.

본 연구에서는 내항 성능 해석을 위하여 비점성, 비압축성, 비회전성 유동 가정하에 속도 포텐셜(ϕ) 개념을 도입하여 계산한다. 또한 선박의 운항 속도를 고려한 선박의 경계값 문제를 해결하기 위해 Figure 2.2와 같이 세 가지 좌표계를 이용한다.

$O-XYZ$는 공간고정 좌표계, $o-xyz$는 물체고정좌표계, $o-x'y'z'$는 운항 속도를 고려하기 위한 관성좌표계(inertial coordinate system)를 의미한다. 유체장에서 속도 포텐셜은 지배방정식으로 라플라스 방정식 (Laplace equation)을 따르며, 경계조건은 다음과 같다.

$$\nabla^2\phi = 0 \text{ in fluid domain} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
&\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\phi)\cdot\nabla\right](z-\zeta) = 0 \quad \text{on } z = \zeta(x,y,t) \\
&\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\phi)\cdot\nabla\right]\phi = -g\zeta + \frac{1}{2}\nabla\phi\cdot\nabla\phi \text{ on } z = \zeta(x,y,t) \\
&\frac{\partial\phi}{\partial n} = \vec{U}\cdot\vec{n} + \frac{\partial\vec{\xi_S}}{\partial t}\cdot\vec{n} \quad \text{on } S_B
\end{aligned} \tag{2.21}$$

여기서, $\vec{U} = (u_0 - yr_0, v_0 + xr_0, 0)$와 $\vec{n}$는 각각 선박의 운항 속도와 선체 표면의 법선 벡터를 의미하며, ζ는 파랑의 높이(파고)를 의미한다. 경계값 문제의 선형화를 위하여, 속도 포텐셜 ϕ과 파고를 다음과 같이 분해한다.

$$\begin{aligned}
\phi(\vec{x},t) &= \Phi(\vec{x}) + \phi_I(\vec{x},t) + \phi_d(\vec{x},t) \\
\zeta(\vec{x},t) &= \zeta_I(\vec{x},t) + \zeta_d(\vec{x},t)
\end{aligned} \tag{2.22}$$

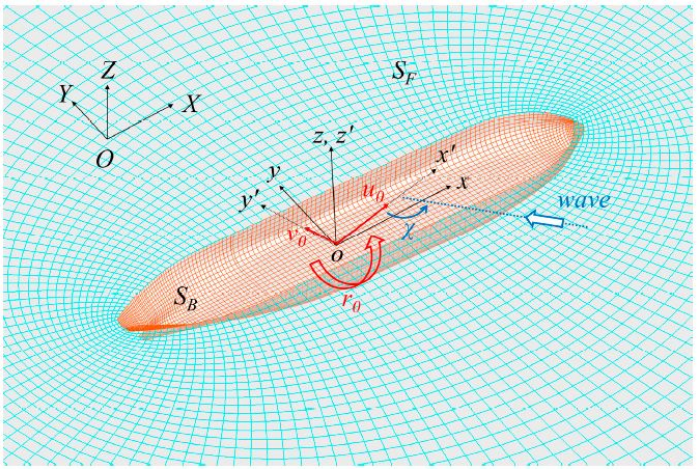


Figure 2.2: Coordinate definition for the seakeeping analysis, figure from [64]

여기서, Φ는 선박의 운항 속도에 의해 발생하는 정상 유동을 고려하기 위한 기본 포텐셜 (basis potential)이며, ϕ_I와 ϕ_d는 각각 입사파(Incident wave)와 교란파(disturbed wave)에 대한 포텐셜을 나타낸다. 또한 ζ_I와 ζ_d는 각각 입사파와 교란파의 파고를 의미한다. 경계값 문제를 통해 속도 포텐셜을 계산해 내기 위해, 그린의 2차 정리 (Green's second identity)에 따라 적분 방정식을 도입하였다.

$$\phi_d + \iint_{\bar{S}_B} \phi_d \frac{\partial G}{\partial n} dS - \iint_{S_F} \frac{\partial \phi_d}{\partial n} G dS = \iint_{\bar{S}_B} \frac{\partial \phi_d}{\partial n} G dS - \iint_{S_F} \phi_d \frac{\partial G}{\partial n} dS \tag{2.23}$$

여기서, $\bar{S}_B$는 평균 위치의 선체 표면을 의미한다. 적분 방정식 풀이를 위한 수치 기법은 Kim et al. [72]에서 찾을 수 있다.

계산된 속도 포텐셜을 통해 동압력 분포를 계산한다. 이후 평균 위치에서의 선체 표면에 대해 동압력을 적분함으로써 선형 Froude-Krylov 힘$(F_{F\cdot K})$과 유체동역학적 힘 $(F_{H\cdot D})$을 구한다. 마지막으로 식 2.24를 통해 선박의 파랑 중 운동 응답을 구해낸다.

$$[M_{ij}] \left\{ \ddot{\xi}_j \right\} + [C_{ij}] \{\xi_j\} = \{F_{F.K.}\}_i + \{F_{\text{H.D.}}\}_i \tag{2.24}$$

여기서, M_{ij}와 C_{ij}는 선박의 관성항과 복원력항을 의미한다. 이차 파랑 표류력 및 모멘트를 추정하기 위해 직접 압력 적분법이 적용되었다. 일반적으로 2차 파랑력은 선형 파랑력보다 크기가 작다. 선형 해석에서 2차 힘은 선형 변수 간의 곱 형태로 나타난다. 따라서 계산된 2차 힘은 2ω 주파수로 진동하며, 시간 평균값이 파랑 표류력 및 모멘트를 의미한다.

제 3 장 선박의 충돌회피 알고리즘

선박의 충돌회피는 장애물 탐지 단계로 시작된다. 선박은 선상의 통신 장비와 센서, 예를 들어, AIS (Auto Identification System), GPS, 레이더, 그리고 카메라 등을 이용하여 장애물을 탐지한다. 일반적으로, 수치 시뮬레이션 기반 충돌회피 연구는

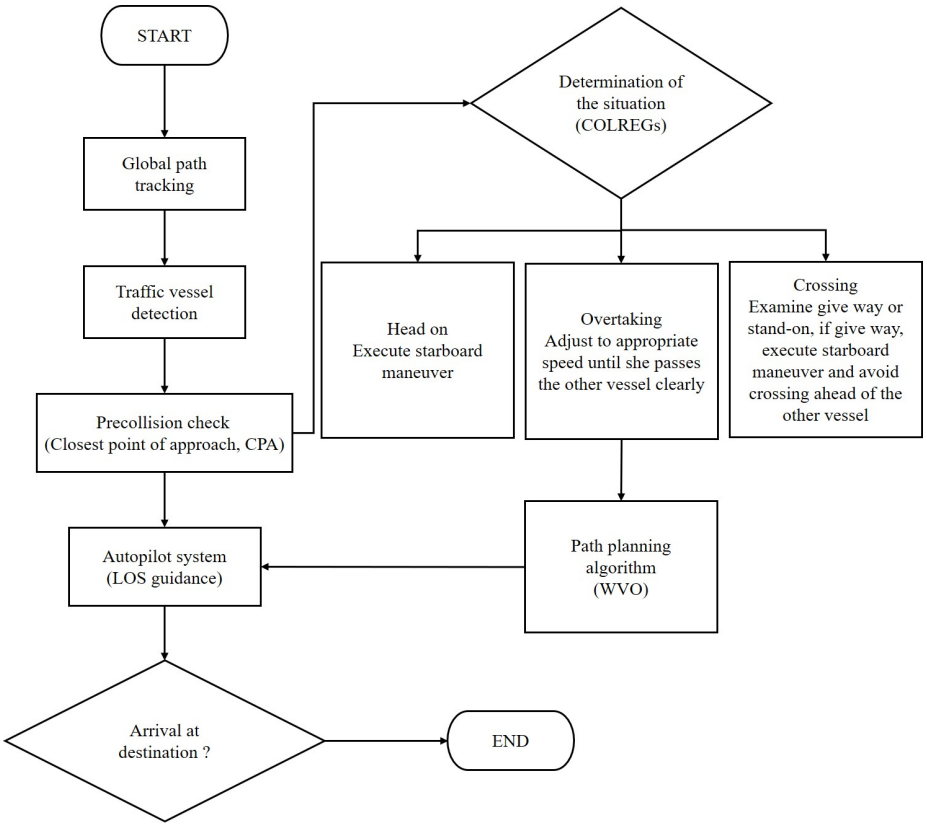


Figure 3.1: Flowchart of ship collision avoidance maneuver

모든 장애물이 탐지 가능하며 신뢰도 높은 속도, 위치 정보를 얻을 수 있다는 가정 하에 진행한다. 탐지된 정보를 바탕으로 충돌회피 의사결정을 진행하게 되며, 장애물의 위험도 판단, 국제해상충돌예방규칙 기반 조우 상황 판단, 충돌회피 경로계획, 그리고 경로 추종을 위한 제어로, 총 네 단계로 이루어져 있다. Figure 3.1는 선박의 충돌회피 과정을 나타낸 흐름도를 보여준다.

이 절에서는 선박의 충돌회피의 네 단계에 대해 본연구를 수행하는 데 사용한 알고리즘에 관해 설명한다. 2.2.1절에서는 탐지된 장애물의 위험도를 판단하고 회피 시점을 결정하는 방법에 대해 소개한다. 2.2.2절은 국제해상충돌예방규칙에서 규정한 충돌회피 규약을 설명한다. 2.2.3절에서는 다양한 충돌회피 경로계획 알고리즘을 간략히 설명하고 본 연구에서 이용한 속도 장애물 (Velocity obstacle, VO) 기법과 그 확장된 버전에 대해 소개한다. 마지막으로 2.2.4절에서 본 연구에서 이용한 경로 추종을 알고리즘을 소개한다.

3.1 충돌 회피 시점 판단

3.1.1 최근접점 (Closest Point of Approach)

Figure 3.2는 최근접점의 개념을 보여준다. 자선 A와 장애물 B가 현재 속도를 유지하는 경우 가장 가까워지는 지점을 최근접점(Closest point of approach, CPA)으로 정의하며, CPA에 도달하는 데 걸리는 시간을 최단접근시간(Time to CPA, TCPA),

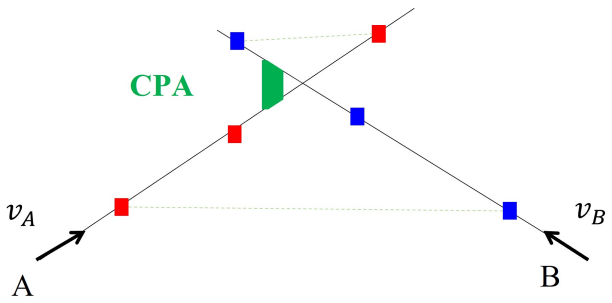


Figure 3.2: Concept of Closest Point of Approach

이 때의 A와 B 사이의 거리를 최단접근거리(Distance at CPA, DCPA)로 정의한다. TCPA와 DCPA는 다음과 같이 계산된다.

$$t_{\mathrm{CPA}} = \frac{(p_B - p_A) \cdot (v_A - v_B)}{\|v_A - v_B\|}$$
$$d_{\mathrm{CPA}} = \|(p_A t_{\mathrm{CPA}}) - (p_B + v_B t_{\mathrm{CPA}})\| \tag{3.1}$$

만약 다음 조건을 만족하면, 충돌회피를 개시한다.

$$0 < t_{\mathrm{CPA}} < t_{\max} \text{ and } d_{\mathrm{CPA}} < d_{\min} \tag{3.2}$$

여기서, $t_{\max}$와 $d_{\min}$은 선박의 조종 성능을 반영하여 산정한다. Kuwata et al. [8]은 실험을 통해 위와 같은 간단한 방식이 유효하다는 것을 보였다.

3.2 국제해상충돌예방규칙 (COLREGs) 및 조우상황 분류

3.2.1 국제해상충돌예방규칙

국제해상충돌예방규칙은 1972년 국제 해사 기구 (IMO)에서 제정한 규칙으로, 운항자에게 안전 회피 속도, 충돌 위험도 등에 대한 지침을 주고 충돌 사고 예방을 위한 회피 기동을 규정하려는 목적으로 제정되었다. 국제해상충돌예방규칙은 선박의 조우 상황을 Head on, Crossing, 그리고 Overtaking 상황으로 분류하고 각 상황에 대하여 피항 의무선(give way vessel)과 진로 유지선(stand on vessel)의 바람직한 운항 방법을 규정하고 있다. 본 연구에서는, COLREGs의 항법규정에 해당하는 Part B의 규정들을 주로 활용하였으며 다음과 같다. [52]

Rule 8. 충돌회피를 위한 동작

(a) 충돌을 회피하기 위한 모든 동작은 충분한 시간을 가지고 적절한 선박 조종술을 따라 행하여야 한다.

(b) 충돌을 회피하기 위한 모든 침로와 속력 변경은 타선이 육안이나 레이더를 통해 관찰하고 있는 타선에게 즉시, 명백하도록 충분히 크게 하여야 한다. 여러 번의 작은 변화는 지양되어야 한다.

(c) 만일 충분한 해면이 있고 적시에 충분하게 행하고 다른 또 하나의 근접 상태가 형성되지 아니한다면, 침로만의 변경도 근접 상황을 피하는 가장 유효한 동작이 될 수 있다.

(d) 타선과의 충돌을 피하고자 취하는 동작은 안전한 거리를 두고 통과하도록 하여야 한다. 수행한 피항행위의 효과는 타선이 완전히 회피할 때까지 주의 깊게 확인하여야 한다.

(e) 충돌 회피, 혹은 추가적인 상황 판단이 필요한 경우, 선박을 멈추거나 타선으로부터 멀어져야 한다.

Rule 13. Overtaking 상황

(a) 추월선은 제2장 제1절 및 제2절에 있는 규정에도 불구하고 추월당하는 선박의 진로를 피하여야 한다.

(b) 다른 선박의 정횡 후 22.5도를 넘는 후방 즉, 추월당하고 있는 선박과의 관계에서 야간에는 그 선박의 선미 등만 볼 수 있고 현등을 볼 수 없는 선박은 추월선으로 보아야 한다.

(d) 두 선박 간의 방위가 그 후에 변경되더라도 추월선이 본 규칙상의 의미에서 횡단선으로 되는 것이 아니며 추월선은 완전히 앞질러 멀어질 때까지 추월당하는 선박의 진로를 피하여야 할 의무를 벗어나지 못한다.

Rule 14. Head on 상황

(a) 충돌의 위험이 내포되도록 2척의 동력선이 반대되는 방향 또는 거의 반대되는 방향으로 마주치는 경우에는 각 선박은 서로 다른 선박의 좌현 측을 통과할 수 있도록 각기 우현 측으로 변침하여야 한다.

Rule 15. Crossing 상황

(a) 두 척의 동력선이 서로 진로를 횡단할 경우에 충돌의 위험이 있을 때에는 다른 선박을 우현 측에 두고 있는 선박이 다른 선박의 진로를 피하여야 하며, 사정이 허락하는 한, 다른 선박의 전방을 횡단하여서는 안 된다

Rule 16. 피항선의 동작 (Action by give-way vessel)

(a) 이 규칙에 따라 다른 선박의 진로를 피하여야 할 선박은 타선을 확실하게 피할 수 있도록 가능한 조기에 충분한 동작을 취하여야 한다.

Rule 16. 유지선의 동작 (Action by stand-on vessel)

(a) (i) 두 선박 중 한 선박이 다른 선박의 진로를 피하여야 할 경우 다른 선박은 그 침로 및 속력을 유지하여야 한다.

(ii) 그러나 유지선은 진로를 피하여야 할 선박이 이 규칙에 따른 적절한 동작을 취하지 않음이 분명해지는 즉시, 자선의 조종만으로 충돌 회피 행위를 취할 수 있다.

(b) 양 선박이 아주 가까이 접근하여 피항선의 동작만으로 충돌을 피할 수 없다고 판단할 때는 유지선도 피항을 위한 협력동작을 취하여야 한다.

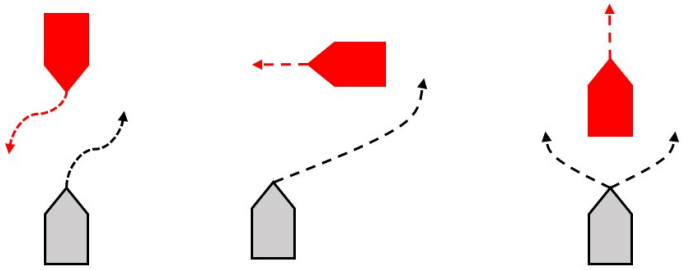
(c) 횡단 상태에서 다른 동력선과 충돌을 피하기 위하여 이 조문 (a)항 (ii)의 규정에 따라 동작을 취하는 선박은 상황이 허락하는 한, 자선의 좌현 측에 있는 선박을 피하기 위하여 좌현 측으로 변침하여서는 아니된다.

본 연구에서는, 국제해상충돌예방규칙 규정을 각 조우 상황별 충돌회피 경로계획 구속조건으로 이용하였다. 국제해상충돌예방규칙은 주관성이 강한 규정이 많으므로 구속조건에는 국제해상충돌예방규칙에 명백히 명시되어있는 규정 위주로 적용하였으며 Figure 3.3와 같다.

3.2.2 조우상황 분류

국제해상충돌예방규칙에서 명확한 조우상황 기준을 제시하지 않기에, 연구자들은 여러 기준을 통해 조우상황을 분류하고 있다. Figure 3.4는 조우상황 분류에 활용되는 지표인 상대 방위(relative bearing)와 상대 진로(relative course)를 보여준다.

Zhang et al. [54]과 Campbell et al. [55], Stenersen [10]는 상대 방위각 $(\beta_{\mathrm{OT}}, \beta_{\mathrm{TO}})$만을 활용하여 조우 상황을 분류하였다. 상대 방위각만을 이용한 조우상황 분류 기



(a) head on (b) crossing (c) overtaking

Figure 3.3: COLREGs rule 13, 14, and 15

법의 경우 자선과 비슷한 선속의 타선에 대해 성공적으로 적용되지만, 자선의 앞쪽에 존재하는 타선에 대한 조우상황 판별에 어려움이 있다 (Figure 3.5). Tam and Bucknall [53]은 이러한 문제를 해결하고자 상대 선수각, $(\psi_{\mathrm{OT}}, \psi_{\mathrm{TO}})$과 상대 방위각, $(\beta_{\mathrm{OT}}, \beta_{\mathrm{TO}})$를 조합하여 조우상황을 분류하였다.

본 연구에서는, 타선의 위치 정보와 선수각 정보를 이용한 Tam and Bucknall [53]의 분류 방법을 이용하였다. 국제해상충돌예방규칙에서는 Overtaking 상황을 제외한 나머지 조우상황에 대한 각도를 제시하고 있지 않으므로, Tam and Bucknall [53]

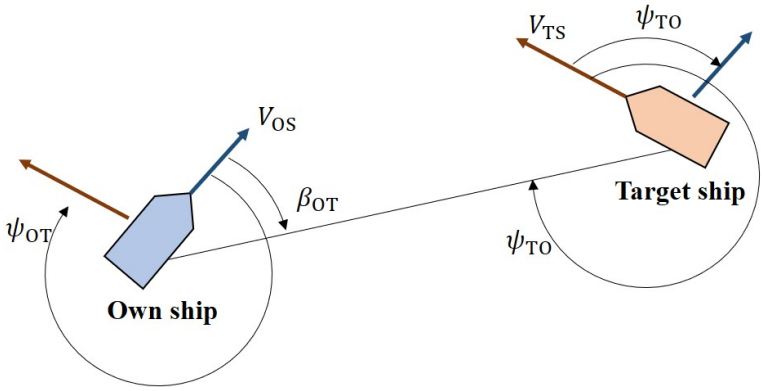


Figure 3.4: Graphical representation of a relative bearing and relative course

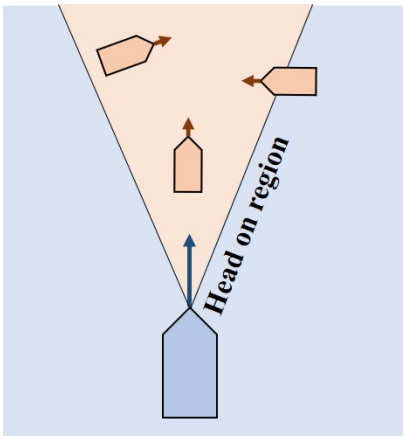


Figure 3.5: Ambiguity of bearing-based classification

과 같이 $\{\frac{1}{8}\pi, \frac{1}{2}\pi, \frac{15}{8}\pi, \frac{5}{8}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{11}{8}\pi\}$로 나누었다. 정적 장애물 (static obstacle)의 경우 조우 상황을 판단하지 않고 자율 회피를 진행하도록 하였으며 $0 < t_{CPA} \leq t_{\max}$인 경우 위험물로 판단하고 회피하도록 하였다.

3.3 충돌회피 경로계획 알고리즘

이 절에서는 본 연구에서 이용한 선박의 충돌회피 알고리즘에 대하여 기술한다. 충돌회피 알고리즘은 장애물 지도를 바탕으로 충돌회피 경로를 계획하는 전역경로계획과, 선박의 센서 및 통신 정보 기반 충돌회피 경로계획 알고리즘인 지역경로계획 알고리즘으로 분류된다. 국부 지역의 정보만을 기반으로 경로를 계획하는 경우 특정 지역에 갇히는 상황이 발생할 수 있지만, 선박의 경우 이러한 복잡한 환경에서 운용하지 않으므로 지역경로계획만을 적용하여 충돌회피 알고리즘을 구성하였다. Kuwata et al. [8]는 이러한 이유로 지역경로계획 알고리즘만을 이용하여 자율운항 선박의 실험을 성공적으로 진행한 바 있다.

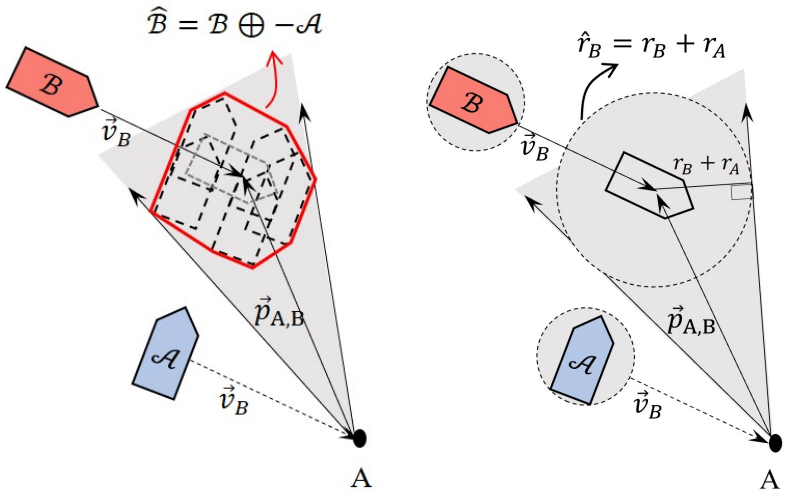
3.3.1 속도 장애물 (Velocity obstacle, VO)

VO는 Fiorini and Shiller [58]이 처음 제안하였으며, 동적 장애물(dynamic obstacle), 복잡한 환경(clustered environment)에 적합한 알고리즘이다. 실시간(real-time) 통신, 센서 정보를 바탕으로 충돌회피를 진행하는 선박에 적용하기 적합하며, 이를 위한 다양한 응용이 이루어졌다. 지역경로계획은 탐지된 영역의 정보를 바탕으로 경로계획을 진행하기에, 어떠한 루프에 빠질 가능성이 있다. 하지만 Kuwata et al. [8]은 해양환경에서는 일어나기 힘든 일이라고 판단하여 전역경로계획과 복합적으로 이용할 필요성이 없다고 언급하였다. VO 기법을 통한 경로계획 과정은 다음과 같다.

- 속도 장애물 기법을 위한 수학적 정의

속도 장애물(VO)는 장애물이 현재 속도를 유지한다고 가정했을 때, 충돌이 일어나는 선박의 모든 속도 벡터의 집합으로 정의된다. VO의 수학적 표현을 위해 몇 가지 수학적 표기법과 정의를 도입한다. 선박의 위치는 $\vec{p} \in \mathbb{R}^2$로 나타내며 $\vec{v} \in \mathbb{R}^2$는 이차원 영역에서 속도 벡터를 의미한다. $\vec{p}$ 위치에서 $\vec{v}$ 방향으로의 연장선은 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda(\vec{p}, \vec{v}) = \{\vec{p} + \vec{v}\Delta \mathrm{t} \mid \Delta \mathrm{t} \geq 0\} \tag{3.3}$$



(a) Velocity obstacle using Minkowski sum (b) Velocity obstacle under the assumption of disc shape

Figure 3.6: Concept of velocity obstacle with different obstacle shape

또한 민코프스키(Minkowski) 합과 반사(reflection) 연산을 도입하며, 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{A} \oplus \mathcal{B} &= \{\vec{a} + \vec{b} \mid \vec{a} \in \mathcal{A}, \vec{b} \in \mathcal{B}\} \\ -\mathcal{A} &= \{-\vec{a} \mid \vec{a} \in \mathcal{A}\} \end{aligned} \tag{3.4}$$

자선을 점으로 취급하고 자선의 크기를 반영하기 위해 식 3.4를 이용하여 자선은 줄이고 자선의 크기를 장애물에 덧붙인다 ($\hat{\mathcal{B}} = \mathcal{B} \oplus -\mathcal{A}$). 만약 자선과 장애물을 원반(disc) 모양으로 가정하면, 장애물의 반지름에 자선의 반지름을 더해주어 간단히 계산할 수 있다. Figure 3.6(a)는 민코프스키 덧셈을 활용한 VO이며 Figure 3.6(b)은 원반 모양으로 가정했을 경우 생성된 VO를 보여준다. 이를 통해 원반으로 가정한 형태에서 더 보수적으로 VO가 생성되는 것을 볼 수 있으며 본 연구에서는 자선과 장애물 모두 원반 형태로 가정하여 충돌회피 시뮬레이션을 구축하였다.

- 충돌 원뿔 (Collision cone, $CC_{A,B}$)

충돌 원뿔($CC_{A,B}$)은 A가 B와 충돌하는 모든 상대속도의 집합을 의미한다. 충돌

원뿔을 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$CC_{A,B} = \left\{ \vec{v}_{A,B} \mid \lambda_{A,B} \cap \widehat{\mathcal{B}} \neq \emptyset \right\} \tag{3.5}$$

- 속도 장애물 (Velocity obstacle, $VO_{A,B}$)

충돌 원뿔은 효율적인 충돌회피 방법이지만, 상대속도 개념을 이용하기에 여러 장애물로의 확장이 어렵다. 이러한 문제는 단순히 충돌 원뿔을 장애물의 속도만큼 이동시켜줌으로써 해결 가능하다. 상대속도를 가리키는 충돌 원뿔의 개념에서 자선의 절대 속도를 기준으로 하는 속도 장애물(VO)로 확장하는 방법이며 수식으로 다음과 같다.

$$VO_{A,B} = CC_{A,B} \oplus \vec{v}_B \tag{3.6}$$

Figure 3.7는 장애물의 확장, 충돌 원뿔 생성, 속도 장애물 생성 과정을 보여준다. 또한, VO는 다음과 같이 계산된다.

$$VO_{A,B}\left(\vec{v}_B\right) = \{\vec{v}_A \mid \lambda\left(p_A, \vec{v}_A - \vec{v}_B\right) \cap \left(\mathcal{B} \oplus -\mathcal{A}\right) \neq \emptyset\} \tag{3.7}$$

만약 여러 장애물이 탐지된다면, 각 장애물에 대한 VO를 생성하고 결합하여 최종적인 VO를 생성하게 된다.

$$VO = \bigcup_{i=1}^{m} VO_{B_i} \tag{3.8}$$

여기서, m은 장애물의 개수를 의미한다. VO 외부의 속도벡터는 충돌회피를 보장한다. 하지만 VO는 장애물의 속도가 일정하게 유지된다는 가정이 있으므로, 적절한 업데이트 시간을 설정하는 것이 중요하다. 또한, 장애물 속도의 비선형성을 보상하기 위해 Non-linear VO(NLVO), Worst-case VO(WVO) 등이 제안된 바 있다.

3.3.2 COLREGs를 고려한 VO

VO는 장애물 회피를 위한 속도장에서의 제한조건의 집합이다. Kuwata et al. [8]은 이러한 점을 응용하여 국제해상충돌예방규칙 기반 각 조우상황에 대응되는

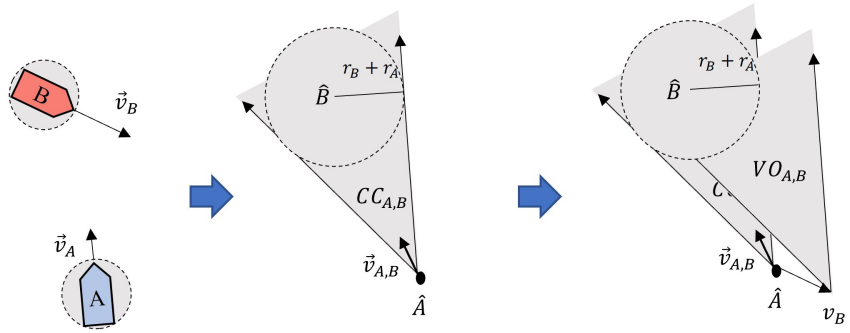


Figure 3.7: Concept of conventional velocity obstacle

제한조건을 속도장에서 부여하는 방법을 제안하였다. Figure 3.8는 국제해상충돌예방규칙을 반영한 VO에 대해 도식적으로 보여주고 있으며 수식적으로 다음과 같이 세 영역으로 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned}
\mathcal{V}_1 &= \{\vec{v}_A \mid \vec{v}_A \notin VO_{A,B} \cup \mathcal{V}_3 \wedge [\vec{p}_{A,B} \times \vec{v}_{A,B}] = z < 0\} \\
\mathcal{V}_2 &= \{\vec{v}_A \mid \vec{v}_A \notin \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_3 \cup VO_{A,B}\} \\
\mathcal{V}_3 &= \{\vec{v}_A \mid \vec{p}_{A,B} \cdot \vec{v}_{A,B} < 0\}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

여기서, $\vec{p}_{A,B}$는 상대위치 벡터를 의미한다. 각각의 속도집합은 특정한 방향으로 회피를 진행하게 된다. $\mathcal{V}_1$에 해당하는 속도벡터는 장애물의 오른편을 바라보며 회피하게되고 국제해상충돌예방규칙에 따라 head on 상황과 crossing 상황에서 제한되게 된다. 규칙 기반 제한조건, $\vec{v}_A \notin \mathcal{V}_1$은 자선의 우현회피를 우선시하게 되고, 필요한 경우 $\mathcal{V}_3$영역의 속도벡터를 선택하여 장애물로부터 멀어지려는 행동을 취한다.

3.3.3 Worst-case velocity obstacle (WVO)

VO 알고리즘은 장애물의 궤적을 선형 근사하여 실제 궤적과 차이가 있을 수 있다. 또한 실제 상황에서 AIS, 레이더, 카메라 센서 등에 의해 얻어지는 장애물의 정보와 dGPS를 통해 얻어지는 자선의 위치 정보는 필연적으로 오차를 갖게 되지만, VO 알고리즘은 이러한 오차를 반영하지 않는다. Kuwata et al. [8]은 이러한 문제를

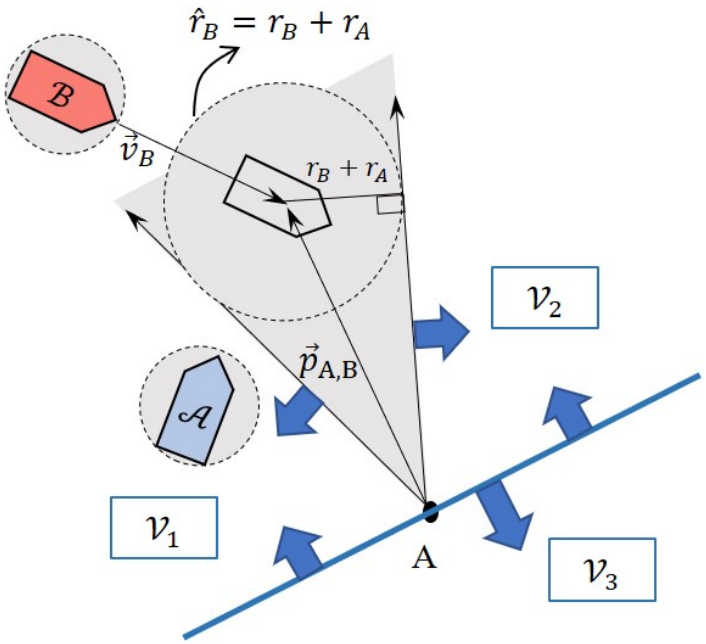


Figure 3.8: Velocity obstacle with COLREGs, Figure from [8]

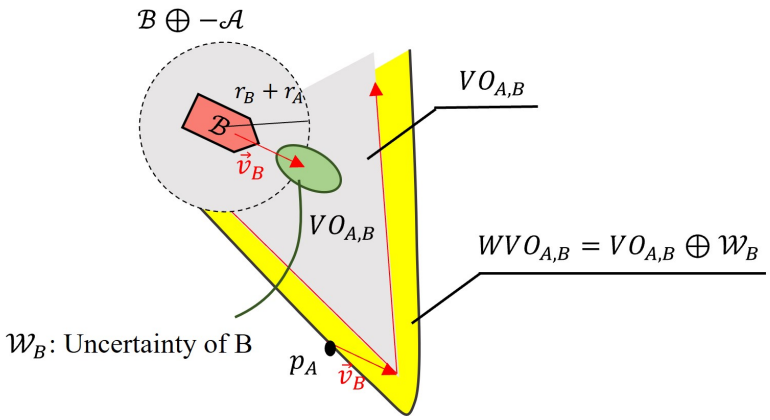


Figure 3.9: Concept of WVO

해결하고자 장애물의 불확실성을 내포하는 영역을 선정하고 VO에 그 영역을 더해 주는 형태의 Worst-case VO(WVO) 기법을 제안하였다.

Figure 3.9는 WVO의 개념을 도식적으로 보여준다. 장애물의 속도, $\vec{v}_B$에 불확실

성을 반영하기 위해 $\vec{v}_B = \overline{\vec{v}}_B + \vec{\delta}_B$와 같이 재정의한다. 여기서, $\vec{\delta}_B$는 B의 불확실성을 의미하며 $\overline{\vec{v}}_B$는 공칭속도 (nominal velocity)를 의미한다. 장애물의 속도에 대한 불확실성 요소, $\vec{\delta}_B$은 $\mathcal{W}_B$ 영역 이내에 존재한다고 가정하고, 이를 타원 형태로 가정한다 ($\vec{\delta}_B \in \mathcal{W}_B$). VO에 민코프스키 덧셈을 이용하여 $\mathcal{W}_B$ 영역만큼 확장하여 $WVO_{A,B}$를 계산하며 수식으로는 다음과 같다.

$$WVO_{A,B}\left(\vec{v}_B\right) = VO_{A,B}\left(\overline{\vec{v}}_B\right) \oplus \mathcal{W}_B \tag{3.10}$$

Figure 3.9의 회색 영역이 $VO_{A,B}(\overline{\vec{v}}_B)$을 의미하며, 초록색 타원이 공칭 속도, $\overline{\vec{v}}_B$를 중심으로 한 불확실성 영역, $\mathcal{W}_B$를 나타낸다. 두 영역의 민코프스키 합으로 확장된 노란색 영역이 $\mathcal{W}_B$ 영역을 의미한다.

3.4 가용 속도 및 회피 속도 결정

3.4.1 가용 속도

- 실현 가능한 가속도 (Feasible accelerations, FA)

현재 상태에서 일정 시간, Δt 동안 도달 가능한 속도를 계산하기 위하여, 제어기와 가속도를 고려한 실현 가능한 가속도 (Feasible accelerations, FA)를 계산한다.

$$\mathrm{FA}(t) = \{\ddot{\mathbf{x}} \mid \ddot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}), \mathbf{u} \in U\} \tag{3.11}$$

여기서, $\mathbf{x}$는 위치벡터, $f(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u})$는 선박 동역학(dynamics)을 의미하며 $\mathbf{u}$는 제어력을, U는 가용 가능한 제어력을 의미한다.

- 가용 속도 (Reachable velocity, RV)

가용 속도는 실현 가능한 가속도를 통해 계산된다.

$$\mathrm{RV}(t + \Delta t) = \{\vec{v} \mid \vec{v} = \vec{v}_A(t) \oplus \Delta t \cdot \mathrm{FA}(t)\} \tag{3.12}$$

여기서 적절한 Δt를 찾는 과정이 필요하다.

- 가용 회피 속도 (Reachable avoidance velocity, RAV)

가용 회피 속도는 장애물 회피를 보장하는 속도벡터 집합으로, 가용 속도 영역에서 WVO 영역을 제외한 영역으로 정의한다.

$$\mathrm{RAV}(t+\Delta t) = \mathrm{RV}(t+\Delta t) \ominus VO(t) \tag{3.13}$$

여기서, 연산자 $\ominus$는 차집합 연산을 의미한다. Figure 3.10은 가용 속도, WVO, 그리고 두 집합의 차집합인 가용 회피 속도를 도식적으로 보여준다.

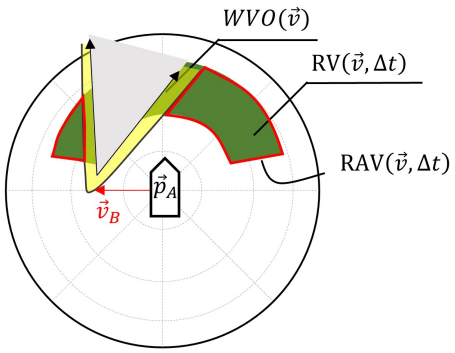


Figure 3.10: Graphical representation of RV and RAV

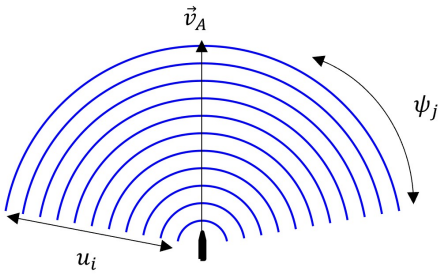


Figure 3.11: Set of reachable velocities(RV) used in this study

3.4.2 회피 속도 결정

가용 속도를 설정함에 있어 선박의 가속도 제한과 동역학적 특성을 면밀히 반영하려는 노력이 필요하다. 하지만 선박에 따라 각기 다른 조종 특성을 가지며 일반화하기 어렵기 때문에, 적절한 Δt 선정과 적절한 업데이트 시간을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다양한 선종에 적용 가능하도록, 선박의 가속도를 0으로 가정하고 여러 속도 후보(velocity candidate)군을 이용하여 가용 속도를 구성하였으며 Figure 3.11와 같다. 여기서, u_i는 속력 후보군을 의미하고, ψ_j는 회전방향 선수각 후보군을 의미한다. ψ_j는 선박의 현재 속도를 기준으로 좌/우현 대칭적으로 선정하였으며, u_i는 선박의 관성을 반영하도록 선택하였다.

가용 회피 속도 내의 속도벡터 후보는 모두 충돌 회피를 보장하게 되므로 적절한 방법을 통해 속도벡터를 선정하여야 한다. Fiorini and Shiller [58]는 간단한 휴리스틱 탐색을 통해 특정 상황에서 효율적인 충돌회피가 가능하다고 제시한다. 본 연구에서는 Stenersen [10]과 같이 비용 함수(cost function)을 도입하며 다음과 같다.

$$J_{ij} = w \left\| \vec{v}_{des} - \begin{bmatrix} u_i \cos\psi_j \\ u_i \sin\psi_j \end{bmatrix} \right\| + \alpha f_{\text{COLREGs}} \tag{3.14}$$

여기서 $\vec{v}_{des}$는 전역경로계획으로부터 지정된 목적지 도달을 위한 속도벡터이며 f_{COLREGs}는 국제해상충돌예방규칙 위반 시 페널티로, 불(boolean) 방식의 함수다. w와 α는 각각 속도와 국제해상충돌예방규칙 위반 시 페널티에 대한 가중치를 의미하며, α를 크게 산정하여 불가피하게 국제해상충돌예방규칙을 불가피하게 위반하여야 하는 경우가 아니라면, 국제해상충돌예방규칙을 따르도록 하였다.

3.5 경로 추종 알고리즘

3.5.1 Line-of-Sight guidance (LOS guidance)

LOS guidance는 가장 많이 쓰이는 경로 추종 방법의 하나로 경유점 추종 알고리즘 중 하나이다. LOS guidance는 이전 경유점(wp_{k-1})과 현재 경유점(wp_k)을 잇는

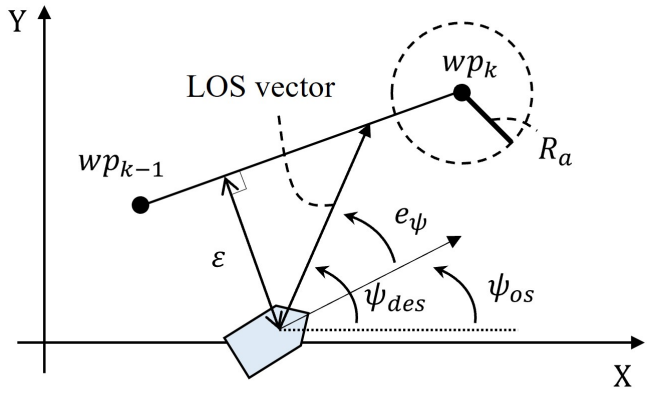


Figure 3.12: Line-of-Sight guidance with acceptance circle

직선을 추종하는 알고리즘으로, LOS 벡터를 정의하여 ψ_{des}를 제어기에 전달한다. 여기서, LOS 벡터는 자선의 위치와 직선 위의 임의의 점, 혹은 현재 경유점, (wp_k)을 잇는 벡터를 의미한다. 현재 경유점을 이용하는 경우와 직선 위 임의의 점을 이용하는 각 경우에 대한 ψ_{des}는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_{des}(t) &= \tan^{-1}\left(y_k - y(t), x_k - x(t)\right) \\ \psi_{des}(t) &= \tan^{-1}\left(y_{\text{los}} - y(t), x_{\text{los}} - x(t)\right) \end{aligned} \tag{3.15}$$

3.5.2 PD 제어기

선박의 목표 선수각에 도달하기 위하여 타각을 이용하였고, 목표 선속에 도달하기 위해 프로펠러의 회전수를 제어하였다. 타각을 제어함에 있어 목표 선수각에 대한 오차뿐만 아니라 경로로부터의 횡방향 이탈 거리(Cross track error, XTE or ε) 역시 보상하도록 PD 제어기를 설계하였으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta &= f_1\left(\varepsilon_t\right) + f_2\left(\Delta\phi_t\right) \\ f_1\left(\varepsilon_t\right) &= K_{P_\varepsilon}\varepsilon_t + K_{D_\varepsilon}\left(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}\right) \\ f_2\left(\Delta\psi_t\right) &= K_{P_\psi}\Delta\psi + K_{D_\psi}(\Delta\dot{\psi}) \end{aligned} \tag{3.16}$$

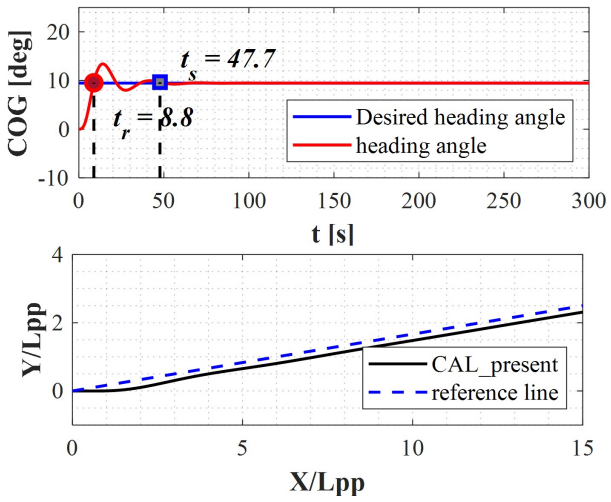
여기서, K_{P_ε}, K_{D_ε}는 XTE에 대한 비례 이득(proportional gain)과 미분 이득(differential gain)을 나타내고, K_{P_ψ}, K_{D_ψ}는 선수각에 대한 비례 이득과 미분 이득을 나타

낸다. Figure 3.13는 제어기가 선수각만을 제어하는 경우와 선수각과 XTE를 동시에 보상하는 상황에 대한 차이점을 보여준다. t_r은 상승 시간(rise time)을 의미하고, t_s는 조정 시간(settling time)을 의미한다. Figure 3.13(a) 와 Figure 3.13(b)의 궤적에서 XTE를 반영하지 않은 제어와 반영한 제어와의 차이를 명백히 볼 수 있다. XTE를 반영하지 않은 경우 계획된 경로와 평행하게 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 만약 e_ψ가 커질 경우 계획된 경로와의 괴리가 크게 발생하기 때문에 본 연구에서는 XTE를 반영하여 제어기를 설계하였다.

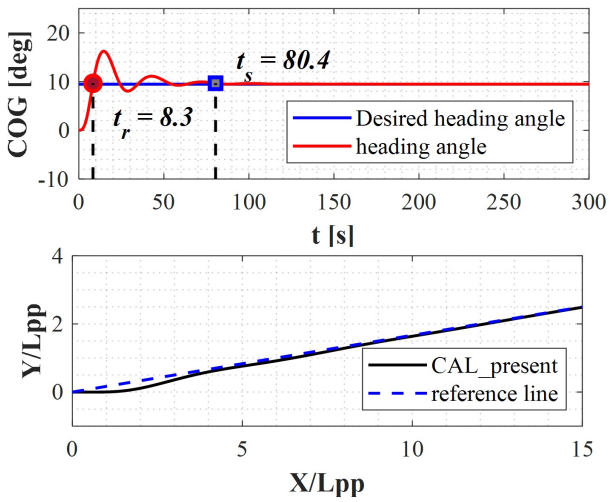
선박의 선속 제어를 위한 프로펠러의 회전수는 다음과 같다.

$$\mathrm{RPS} = \mathrm{RPS} + e_U \cdot K_{P_U} + \dot{e}_U \cdot K_{D_U} \tag{3.17}$$

여기서, RPS는 프로펠러의 회전수를 의미하며 U는 선속을, e_U는 목표 선속과 현재 선속간의 차이, K_{P_U}와 K_{D_U}는 각각 비례 이득과 미분 이득을 나타낸다. 이득 값의 튜닝은 overshoot과 상승 시간이 적절하도록 경험적으로 진행하였다.



(a) COG controller with heading angle



(b) COG controller with heading angle and XTE

Figure 3.13: PD controller for course over ground (COG)

제 4 장 파랑 중 조종 시뮬레이션

선박의 파랑 중 충돌회피 성능 평가를 위하여 이용한 선박 조종 시뮬레이션의 검증에 대해 기술한다. KVLCC2와 S175 컨테이너 선박, 두 선종에 대하여 선회시험과 지그재그 시험을 통해 검증을 진행하였으며, 모형시험 결과와 비교를 통하여 검증을 진행하였다. 시간 영역 3D 랜킨 패널 방법을 기반으로 파랑 표류력을 계산하였으며, 실험 결과 및 타 연구자의 계산 결과와의 비교를 통해 검증을 진행하였다. MMG 모델의 외력항에 파랑 표류력 항을 추가하여 선회시험을 진행하고, 이를 실험 결과 및 타 연구자의 계산 결과와 비교를 통해 검증하였다.

4.1 정수 중 선박의 조종 시험

KVLCC2의 정수 중 조종 시험은 Yasukawa and Yoshimura [30]의 선회시험 실험 결과와, Sakamoto et al. [59]에서 공개한 지그재그 시험의 실험결과와 비교 검증을 진행하였다. S175 컨테이너선의 실험 결과 및 시뮬레이션 결과는 Yasukawa [46][60]를 참고하였다.

Table 4.1: Turning test condition of KVLCC2 and S175 containership

Ship type	ship speed (f_n)	rudder angle	rudder rate	RPS
KVLCC2	0.142	$-35°$	$11.8°$	11.80
S175	0.150	$-35°$	$12.0°$	10.05

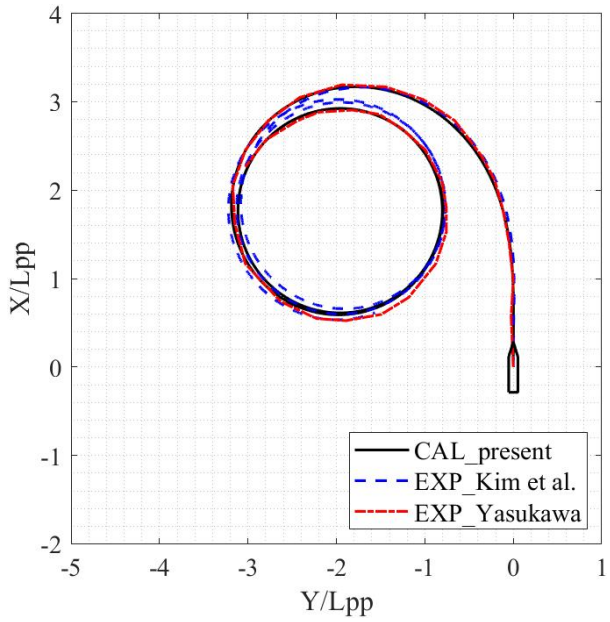
4.1.1 선회 시험

KVLCC2와 S175 컨테이너선의 선회시험을 위해 적용된 실험 조건 Table 4.1와 같다. 선속은 실선 기준으로 KVLCC2는 15 kts, S175 컨테이너선은 12 kts이며 프로펠러 회전수는 각 선속을 유지하기 위한 값이다.

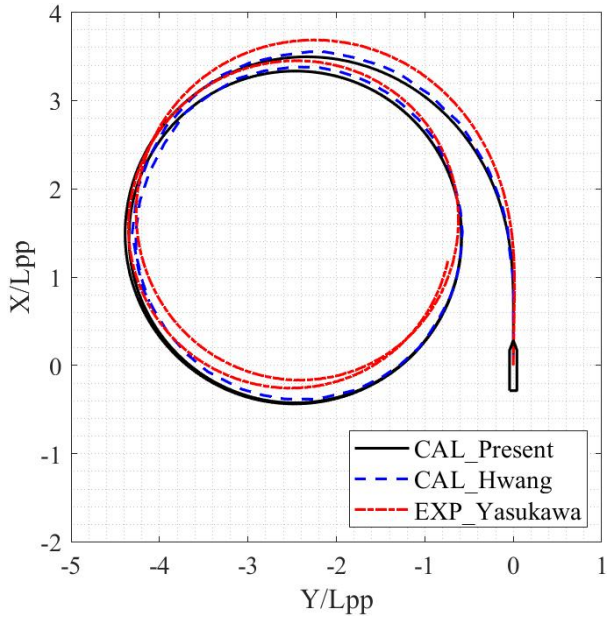
Figure 4.1는 KVLCC2와 S175 컨테이너 선박의 선회 궤적을 보여준다. KVLCC2 선회시험 결과 검증에는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 공개한 실험 결과(Kim et al. [61])와 Yasukawa and Yoshimura [30]의 실험 결과를 이용하였다. S175 컨테이너선의 경우 전진거리(Advance, A_D)는 수치 시뮬레이션 결과 $3.32L_{\mathrm{pp}}$로 실험 결과인 $3.6L_{\mathrm{pp}}$과 비교해 7.8% 상대 오차를 보였으며, 전술직경(Tactical diameter, D_T) 역시 수치 시뮬레이션과 실험 결과 각각 $4.13L_{\mathrm{pp}}$와 $4.23L_{\mathrm{pp}}$으로 2.3%의 작은 상대오차를 보였다. KVLCC2의 수치 시뮬레이션 결과로 $3.1L_{\mathrm{pp}}$의 전진거리와 $3.11L_{\mathrm{pp}}$의 전술직경을 보였는데, 실험 결과는 전진거리와 전술직경 각각 $3.11L_{\mathrm{pp}}$와 $3.08L_{\mathrm{pp}}$으로 0.3%와 0.97%의 상대 오차를 보였다. 또한 타 연구자의 계산 결과(Hwang [62])와 잘 일치하는 모습을 보였다. Figure 4.2는 S175 컨테이너선 선회시험 결과의 속도와 사항각(β) 정보를 비교한 그래프를 보여준다. Figure 4.2(a)를 통해 수치 시뮬레이션이 선속 감소 현상을 잘 반영함을 확인할 수 있다. 이는 선박에 작용하는 부가 저항을 적절히 반영한 것으로 해석된다. 선박은 대략 13°의 사항각을 가지고 선회하는 것을 확인하였다.

Table 4.2: Comparison between experimental results and simulation results

	S175		KVLCC2	
	Present	Exp.	Present	Exp.
Advance	3.32	3.6	3.10	3.11
Tactical diameter	4.13	4.23	3.11	3.08

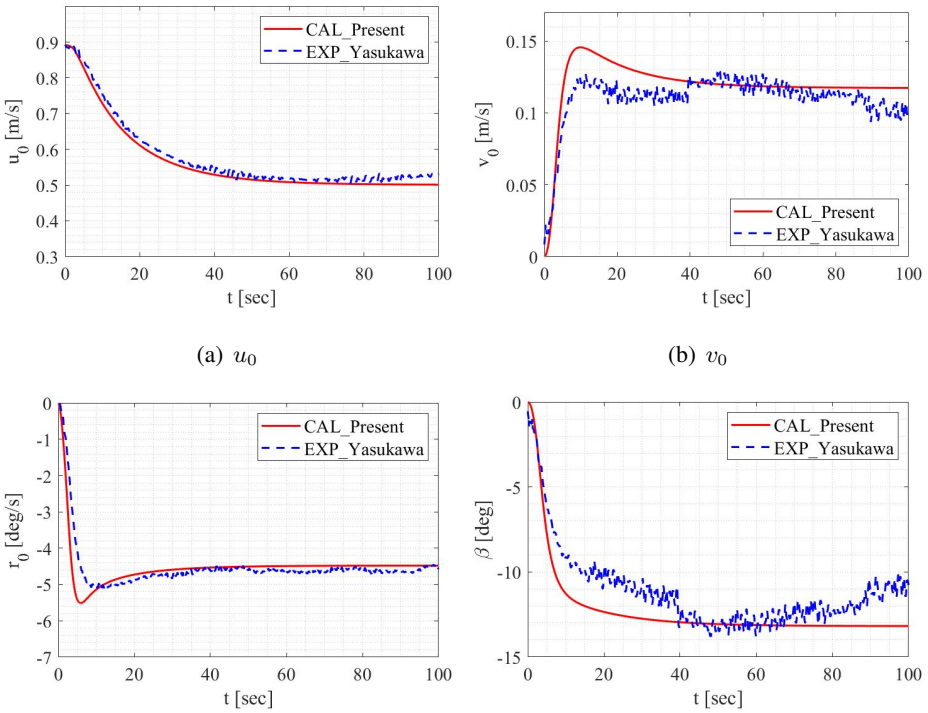


(a) Turning trajectory of KVLCC2



(b) Turning trajectory of S175 containership

Figure 4.1: Tunring trajectory of KVLCC2 and S175 containership



(a) u_0 (b) v_0

(c) r_0 (d) β

Figure 4.2: Comparison of velocity components and drift angle with experiment (S175)

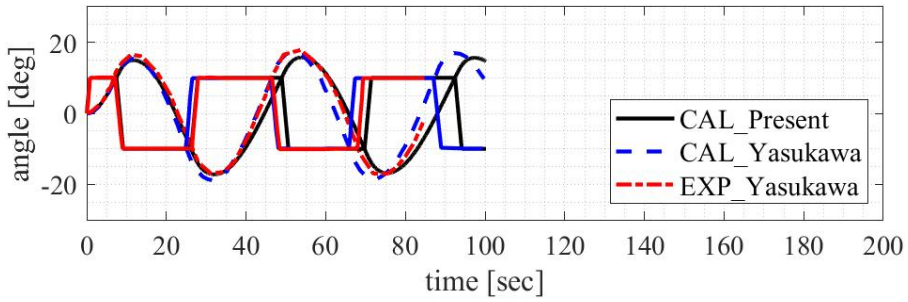
4.1.2 지그재그 시험

Figure 4.3는 S175 컨테이너선의 10/10 지그재그 시험 결과를 보여준다. Figure 4.3(a)에서 $5.75°$의 작은 Overshooting angle (OSA)을 보였으며 7.4초의 상승시간 (rise time)을 확인하였다. 또한 MMG 모델에서 타에 의한 유체력 모델을 확인하기 위하여 타력의 시계열 데이터를 비교하였고, 선회 속도(r_0)의 시계열 데이터를 확인함으로써 MMG 모델이 적절히 구현되었음을 확인하였다. 지그재그 시험을 위한 프로펠러 회전수는 Yasuwawa [60]에서 제시한 RPS $= 7.54$를 이용하였다.

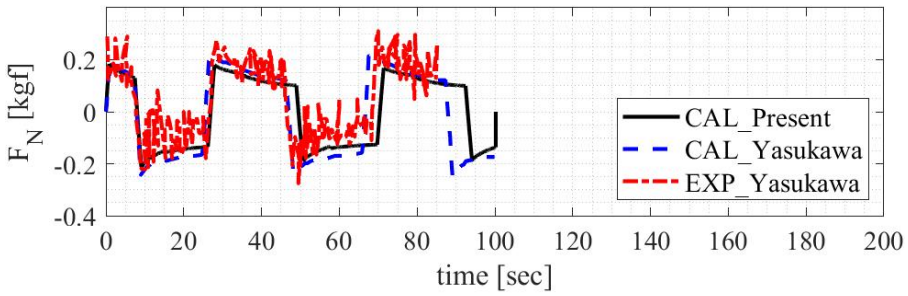
KVLCC2의 지그재그 시험에 이용된 프로펠러 회전수, 조타 속도, 그리고 선속 조건은 선회 시험과 동일하다. Figure 4.4와 Figure 4.5는 각각 10/10 지그재그 시험, 20/20 지그재그 시험 결과를 보여주며 Table 4.3에서 OSA 및 상대오차를 보여준다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과 사이에 최대 $3°$ 가량의 1st OSA과 $6°$ 가량의 2nd OSA을 확인하였으며, 이는 Yasukawa and Yoshimura [30]가 언급했듯 허용 가능한 수준의 오차라고 판단하였다. 지그재그 실험의 속도 정보는 Nobuaki et al. [59]를 참고하였다. 10/10 지그재그 시험에 비해 20/20 지그재그 시험에서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치한다. 10/10 지그재그 시험에서 더 큰 OSA 상대오차가 나타났다고 볼 수 있다.

Table 4.3: Overshooting angle of KVLCC2 zigzag test

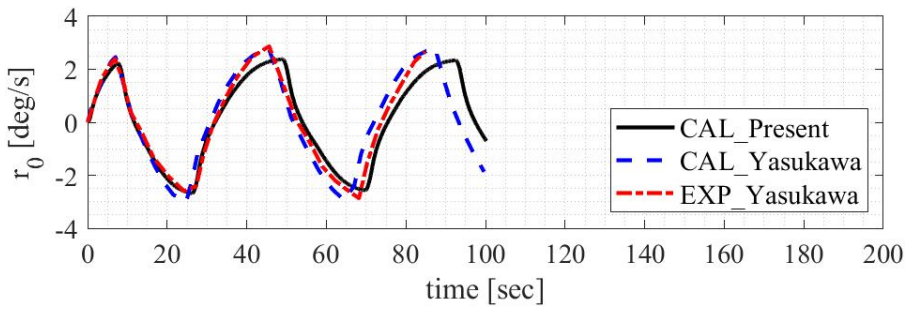
	Present(°)	CAL_Yasukawa(°)	EXP_Yasukawa(°)
1st OSA(10/10)	5.3	5.2(1.9%)	8.2(35.4%)
2nd OSA(10/10)	14.7	15.8(7.0%)	21.2(30.7%)
1st OSA(20/20)	12.6	10.9(15.6%)	13.7(8.0%)
2nd OSA(20/20)	17.4	17(2.4%)	14(24.3%)



(a) Heading angle of 10/10 zigzag maneuver



(b) Rudder normal force of 10/10 zigzag maneuver



(c) Turning rate of 10/10 zigzag maneuver

Figure 4.3: Comparison of time histories for 10/10 zigzag test in calm water (S175)

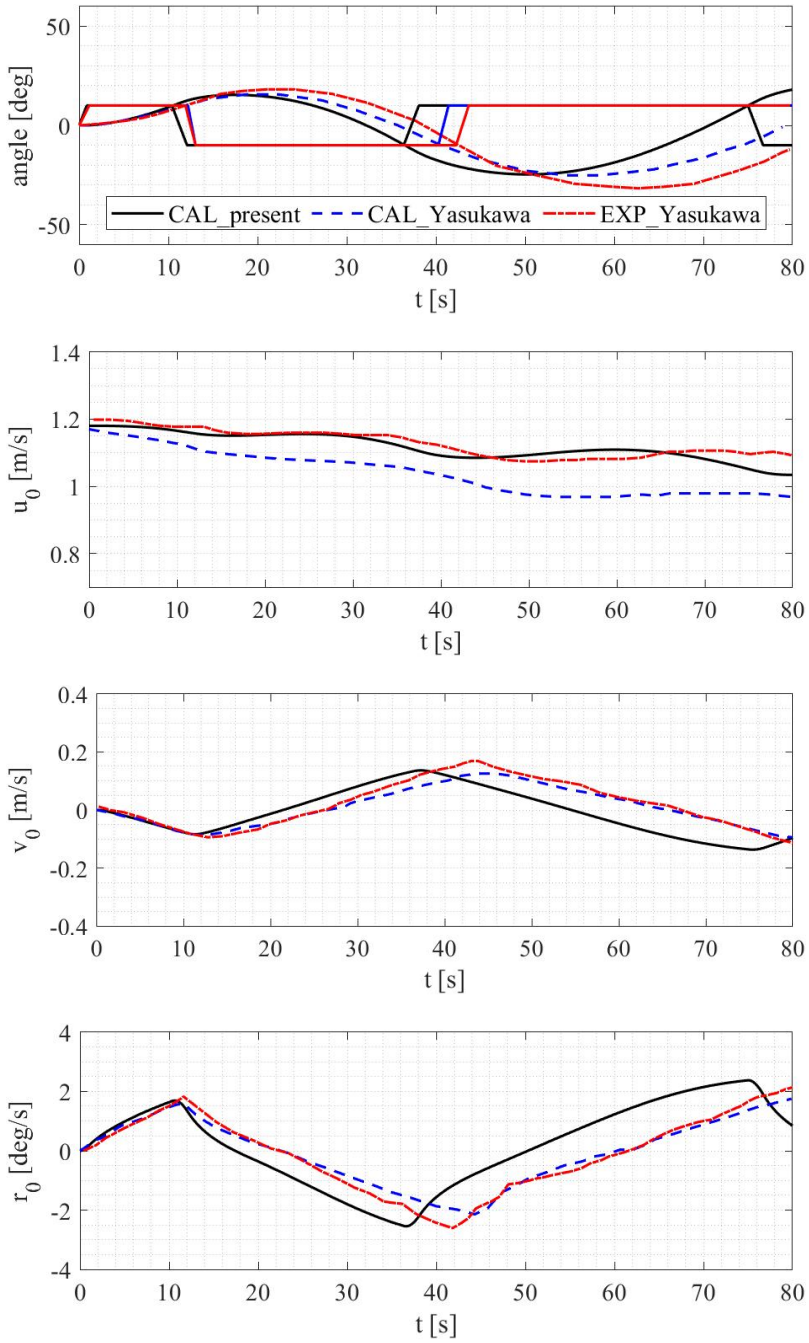


Figure 4.4: Comparison of time histories for 10/10 zigzag test in calm water (KVLCC2)

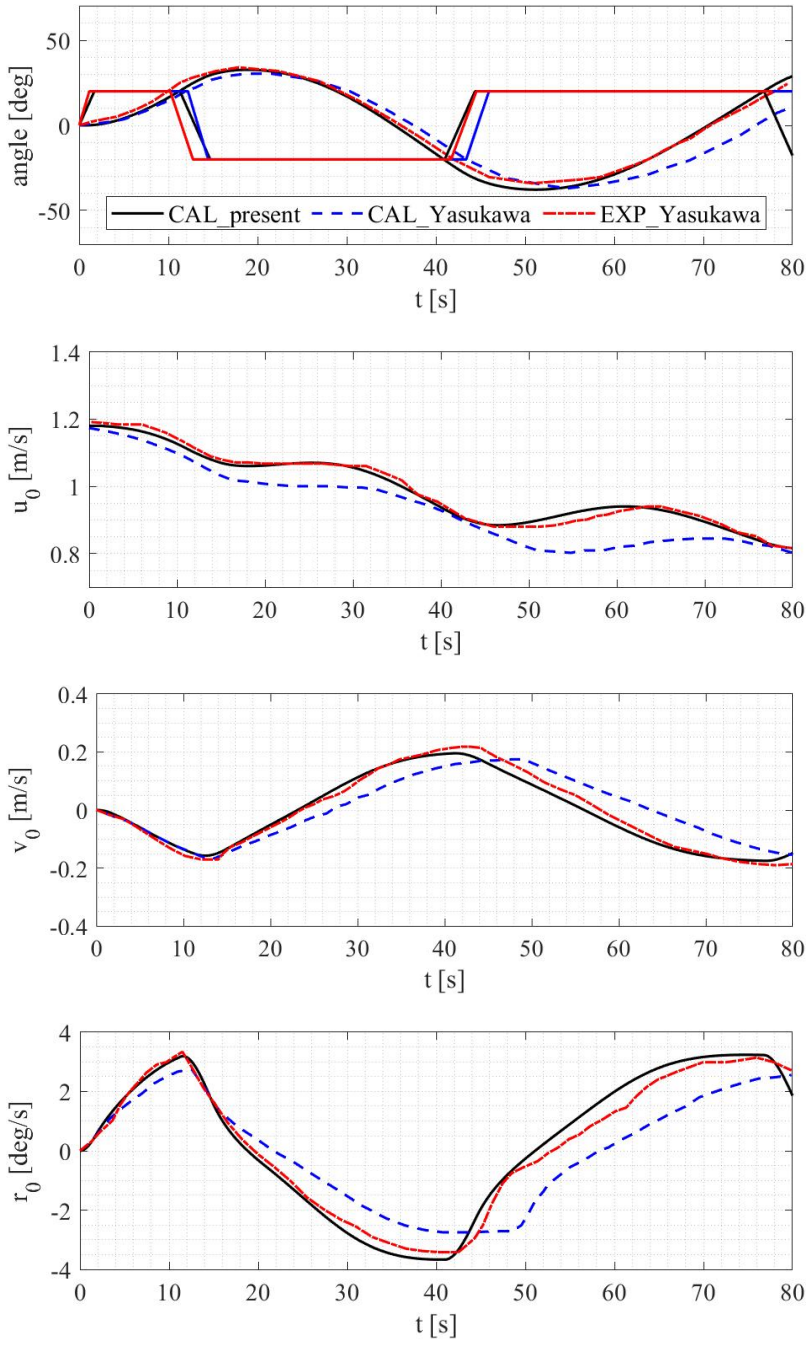


Figure 4.5: Comparison of time histories for 20/20 zigzag test in calm water (KVLCC2)

4.2 파랑 중 선박의 조종 시험

4.2.1 파랑 표류력 검증

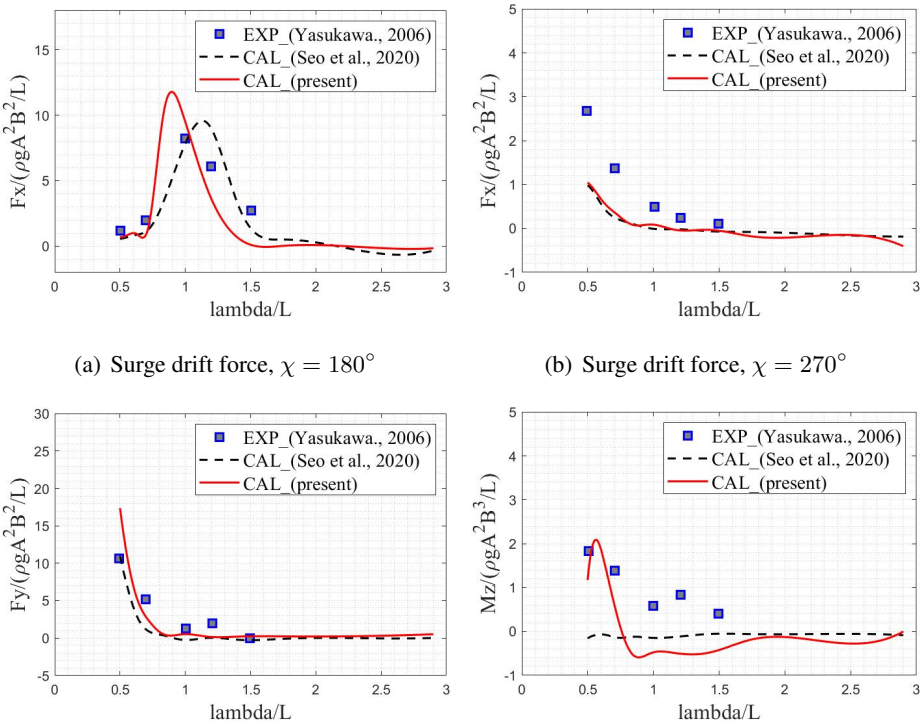
S175 컨테이너선과 KVLCC2의 파랑 표류력 계산 케이스는 Table 4.4와 같다. 선박의 조종운동방정식에 파랑표류력 항을 추가하기 위하여 파향, 선속에 대하여 데이터베이스(Data base, DB)화 시킨 후, 선형 보간하여 이용하였다. 여기서, λ, ω, χ는 각각 파랑의 파장, 주파수, 그리고 파향을 의미하고, U는 선속을 의미한다.

Table 4.4: Calcuation matrix for wave drift force

Item	KVLCC2	S175
wave heading	$0° \sim 180°$, $d\chi = 30°$	$0° \sim 180°$, $d\chi = 30°$
wave length	$0.3 \sim 2.0$, $d(\lambda/L) = 0.2$	$0.35 \sim 0.85$, $d\omega = 0.05$
ship speed (kts)	3.2, 6, 11, 15	$0 \sim 12$, $dU = 2$

S175 컨테이너선에 대한 파랑 표류력은 Seo et al. [65]의 계산 결과와 Yasukawa [46]의 실험 결과와의 비교를 통해 검증을 진행하였으며 Figure 4.6에서 확인할 수 있다. 전체적으로, 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였으나, 단파장 영역에서 수치 계산 결과와 실험 결과 간에 차이가 있었다. 이는 포텐셜 이론의 한계로 이해할 수 있다. Figure 4.6(a)는 선수파 ($\chi = 180°$)에서의 파랑 표류력을 보여주며, 파장비 $\lambda/L = 1.0$ 근처에서 최댓값을 보인다. 선속에 의해 선박이 느끼는 주파수가 조우 주파수로 조정되면서 $\lambda/L = 1.0$이 아닌 그 근처에서 최댓값이 나타난 것으로 해석된다. Figure 4.6(c)와 4.6(d)를 통해 횡파를 받을 때, 단파 영역에서 큰 반사파에 기인하여 큰 Y 방향 파랑 표류력과 Yaw 방향 파랑 표류 모멘트가 커지는 것을 확인하여, 적절히 계산되었다고 판단하였다.

KVLCC2에 대한 파랑 표류력은 Seo et al. [63]에서 공개한 실험 결과와 비교를 통해 검증을 수행하였다. 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 1/100 스케일 모델선을 이용하여 파랑 표류력 계측 실험을 수행하였으며 해양공학 수조(ocean engineer-



(a) Surge drift force, $\chi = 180^{\circ}$

(b) Surge drift force, $\chi = 270^{\circ}$

(c) Sway drift force, $\chi = 270^{\circ}$

(d) Yaw drift force, $\chi = 270^{\circ}$

Figure 4.6: Validation of wave drift force (S175)

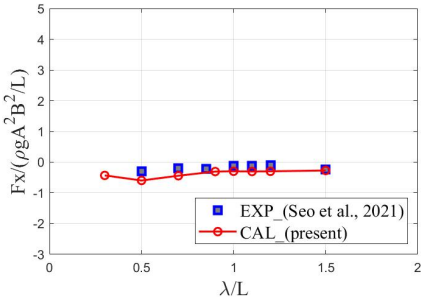
ing basin)에서 진행되었다. 7가지 파향 조건, $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ $(d\chi = 30^{\circ})$, 7가지 파장 비 조건, $\lambda/L = 0.5, 0.7, 0.85, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5$, 그리고 두 선속, $U = 15.5, 6.0kts$, 총 98 케이스의 실험을 수행하였으며 선속 $6kts$에 대하여 모든 선수각 및 파장 비에서의 파랑 표류력 실험 결과를 공개하여, 선속 $6kts$에 대해 비교 검증을 수행하였다.

Figure 4.7, Figure 4.8, Figure 4.9는 각각 X-방향 파랑 표류력, Y-방향 파랑 표류력, 그리고 Yaw 방향 파랑 표류 모멘트의 비교 결과를 보여준다. 파향은 $\chi = 180^{\circ}$에서 선수파를 나타낸다. Figure 4.7(a)와 Figure 4.7(g)에서 각각 선미파와 선수파에 대한 X-방향 파랑 표류력을 보여주며, 선수파에서 파랑의 영향이 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 선미 사파, Figure 4.7(b), 4.7(c) 상황보다 선수 사파, Figure 4.7(e), 4.7(f)에서 더 큰 파랑 표류력이 작용함을 확인하였다. 파장 비, $\lambda/L = 1.0$ 부근에서 최댓

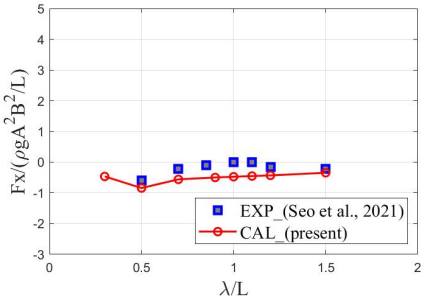
값을 보여, 선속의 영향에 의해 약간 단파장 영역으로 이동하였지만, 물리적 현상을 잘 반영하고 있는 모습을 보였다.

Y-방향 파랑 표류력의 경우 모든 파향에 대하여 파랑의 파장이 짧을수록 큰 파랑 표류력이 나타났다. 이는, 단파장 영역에서 반사파의 영향이 커지는 것을 반영한 결과로 해석된다. 파향에 대해 선수 사파와 선미 사파 모두 비슷한 수준의 파랑 표류력을 보였다. Yaw 방향 파랑 표류 모멘트의 경우 선미 사파에 비해 선수 사파에서 더 크게 작용하는 것을 볼 수 있다. 또한 파장 비, $\lambda/L = 1.0$ 부근에서 크게 작용하여 S175 컨테이너선과 차이를 보였다. 이는 파장이 짧아짐에 따라 커지는 Y-방향 파랑 표류력의 영향과 선수파 영향 사이 간의 차이로 보인다.

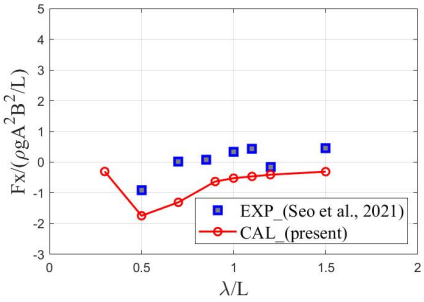
Figure 4.10는 선속 6.0 kts와 15.0 kts에서의 파랑 표류력 및 모멘트를 극선도 (polar diagram)으로 보여준다. 반지름 방향은 파랑의 파장 비를 의미한다. Figure 4.10(b)와 4.10(a)의 선수파, 선수 사파 영역을 보면, 선박의 속도에 따라 조우 주파수가 변하면서 최댓값을 가지는 파장 비가 변하는 것을 확인할 수 있다. Yaw 방향 모멘트 역시 유사한 경향을 보여주었으며 최댓값을 가지는 파장 비가 sugre 방향 파랑 표류력의 파장 비 영역과 일치하는 유사한 것을 확인하여 조우 주파수의 영향이 반영됨을 확인하였다.



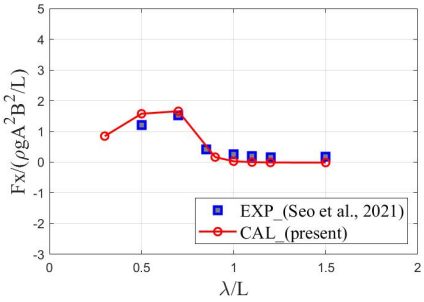
(a) Surge drift force, $\chi = 0^\circ$



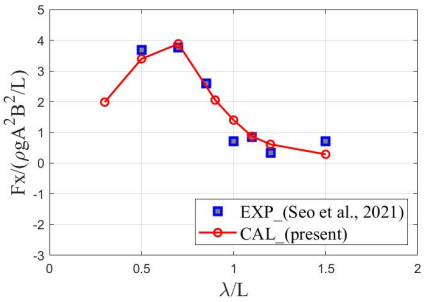
(b) Surge drift force, $\chi = 30^\circ$



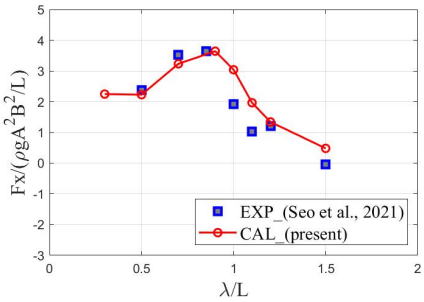
(c) Surge drift force, $\chi = 60^\circ$



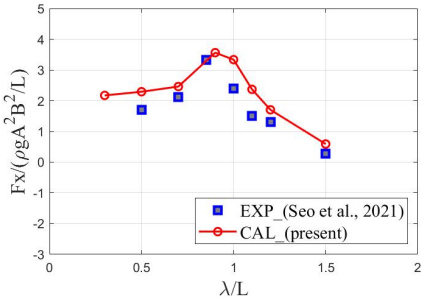
(d) Surge drift force, $\chi = 90^\circ$



(e) Surge drift force, $\chi = 120^\circ$

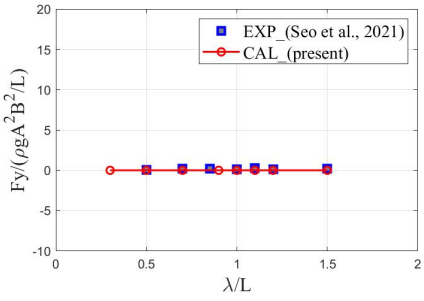


(f) Surge drift force, $\chi = 150^\circ$

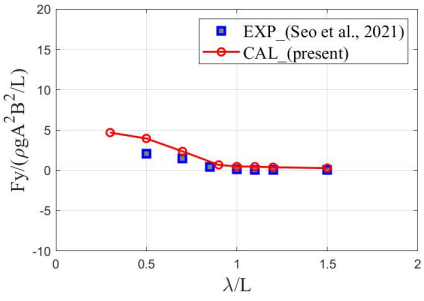


(g) Surge drift force, $\chi = 180^\circ$

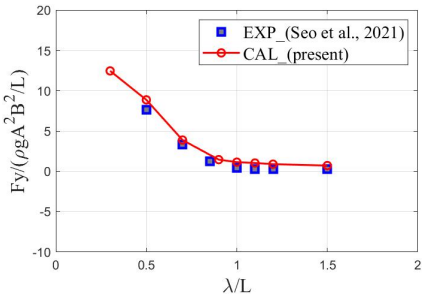
Figure 4.7: Validation of surge wave drift force, $U = 6.0$ kts (KVLCC2)



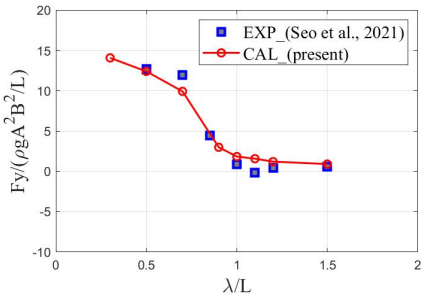
(a) Sway drift force, $\chi = 0°$



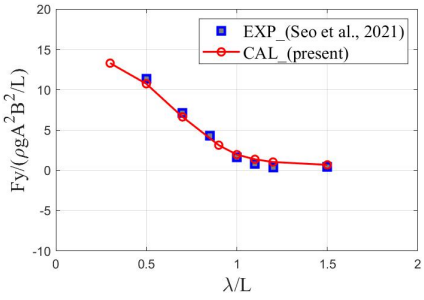
(b) Sway drift force, $\chi = 30°$



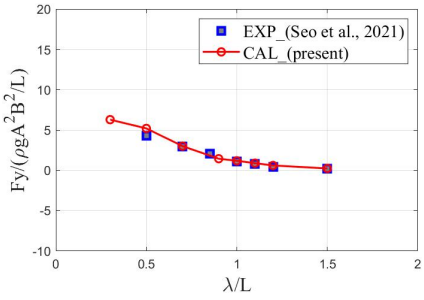
(c) Sway drift force, $\chi = 60°$



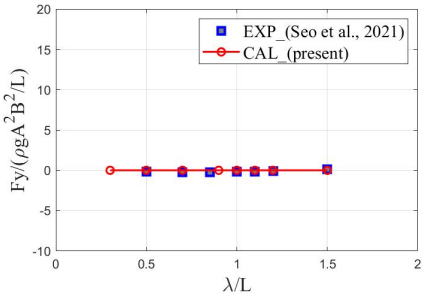
(d) Sway drift force, $\chi = 90°$



(e) Sway drift force, $\chi = 120°$

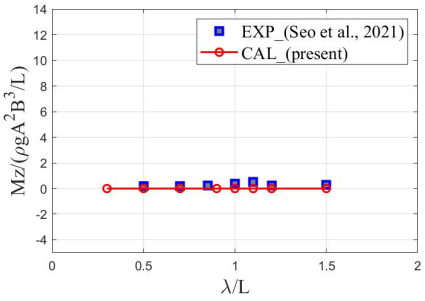


(f) Sway drift force, $\chi = 150°$

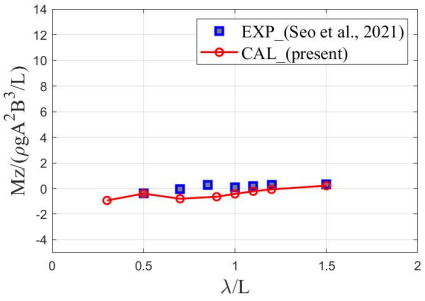


(g) Sway drift force, $\chi = 180°$

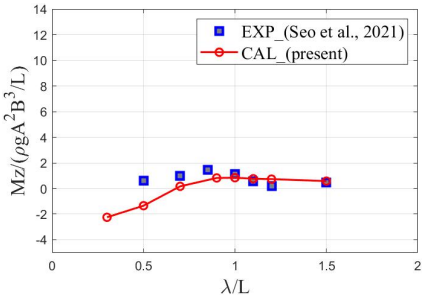
Figure 4.8: Validation of sway wave drift force, $U = 6.0$ kts (KVLCC2)



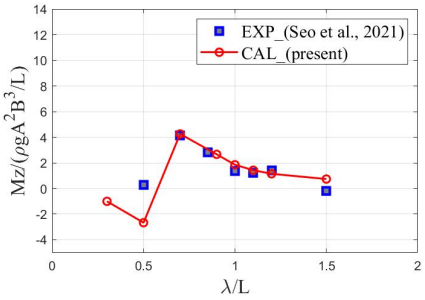
(a) Yaw drift moment, $\chi = 0°$



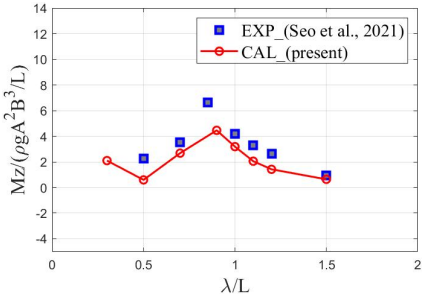
(b) Yaw drift moment, $\chi = 30°$



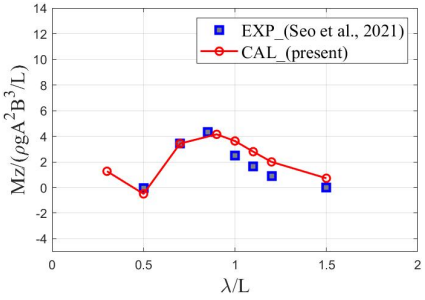
(c) Yaw drift moment, $\chi = 60°$



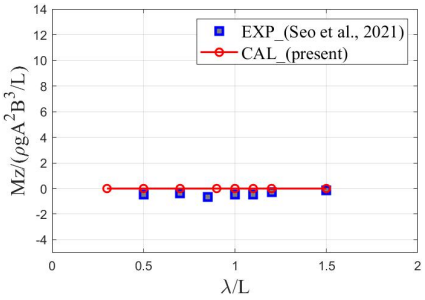
(d) Yaw drift moment, $\chi = 90°$



(e) Yaw drift moment, $\chi = 120°$

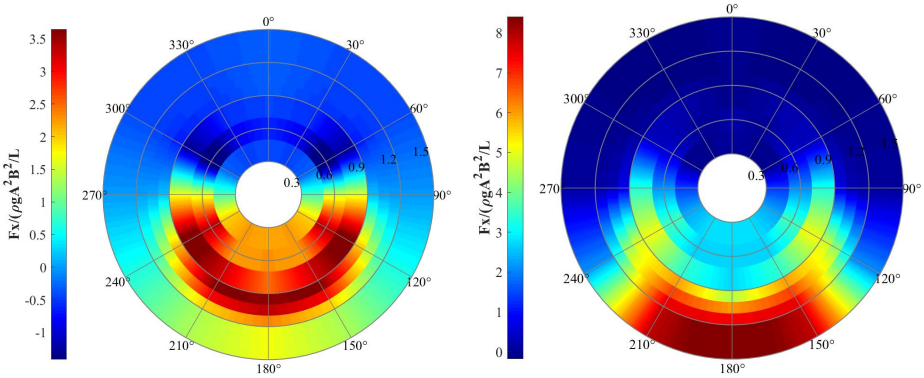


(f) Yaw drift moment, $\chi = 150°$



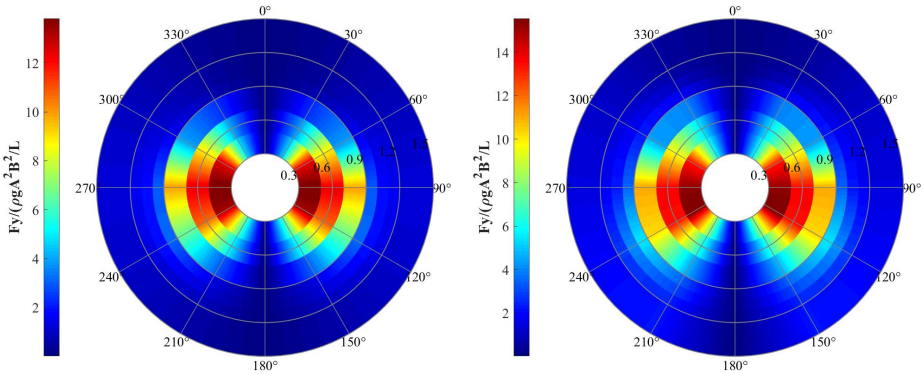
(g) Yaw drift moment, $\chi = 180°$

Figure 4.9: Validation of yaw wave drift moment, $U = 6.0$ kts (KVLCC2)



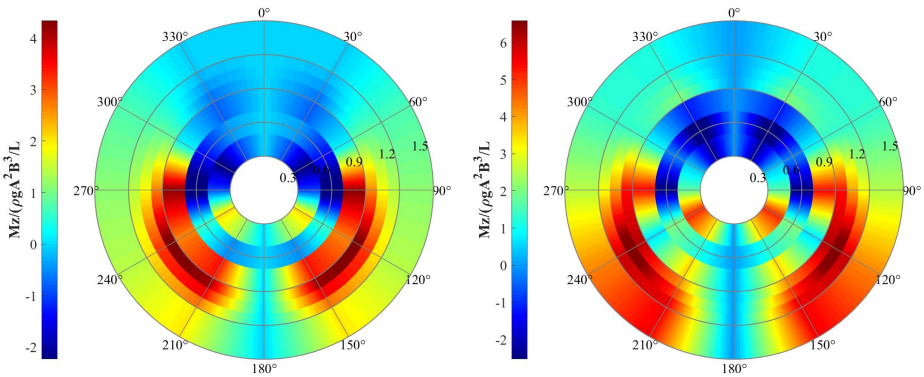
(a) Surge drift force, $U = 6.0$ kts

(b) Surge drift force, $U = 15.0$ kts



(c) Sway drift force, $U = 6.0$ kts

(d) Sway drift force, $U = 15.0$ kts



(e) Yaw drift moment, $U = 6.0$ kts

(f) Yaw drift moment, $U = 15.0$ kts

Figure 4.10: Polar diagram of wave drift forces (KVLCC2)

4.2.2 파랑 중 선회 시험

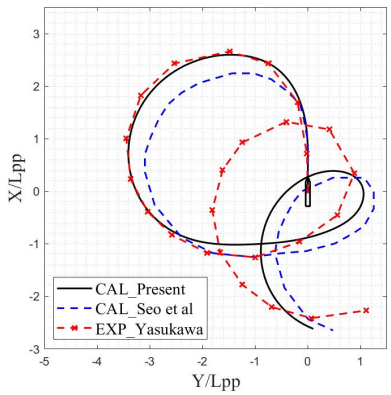
MMG 모델 기반의 조종운동방정식에 파랑 표류력을 추가하여 파랑 중 조종 시뮬레이션을 수행하였다. 3.1장에서 정수 중 조종 시뮬레이션에 대하여 검증을 완료하였으며 3.2장에서 계산된 파랑 표류력의 검증을 진행하였다. 이 장에서는 파랑 중 선박의 선회 시험을 통해 파랑 표류력이 조종운동방정식에 적절히 적용되었는가를 검증하고자 한다. KVLCC2와 S175 컨테이너선의 선회 시험 케이스는 Table 4.5와 같다.

Table 4.5: Wave condition of turning tests

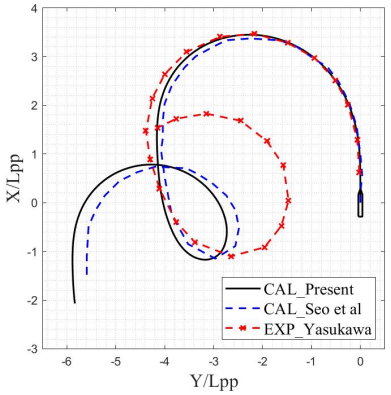
	wave direction (χ)	wave length (λ/L)	wave height (H/L)
S175	180°, 90°	0.7, 1.0, 1.2	0.02
KVLCC2	180°, 90°	0.7, 1.0, 1.2	0.02

Figure 4.11와 4.12는 각각 S175 컨테이너선과 KVLCC2의 파랑 중 선회 시험 궤적을 보여준다. S175 컨테이너선의 경우, Yasukawa [46]의 실험 결과와 Seo et al. [66]의 수치 시뮬레이션 결과와 비교하였다. KVLCC2는 KRISO에서 수행한 자유항주 모형실험 결과(Kim et al. [67])와 비교 검증을 진행하였다. 또한 타 연구자의 선회 시험 시뮬레이션 결과를 참고하기 위해 Lee et al. [64]의 파장 비, $\lambda/L = 0.7$에 대한 선회 시험 결과와 비교하였다.

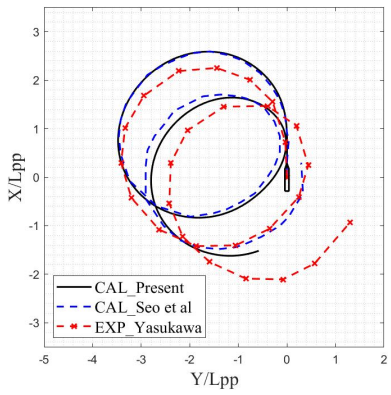
S175 컨테이너선의 파랑 표류력은 단파장 영역에서 실험 결과와 계산 결과 사이에 차이가 있었다. Figure 4.11(a)와 4.11(b)에서 실험 결과와 계산 결과가 상대적으로 큰 차이를 가지는 모습을 확인할 수 있었지만, 계산 결과 간의 차이는 근소하였으며, 표류되는 방향이 실험과 유사하여 파랑 표류력의 효과를 적절히 반영한다고 판단하였다. 파장이 길어질수록 표류 거리(Drift distance)와 표류 방향이 실험과 잘 일치하였으며, 파향에 관계없이 파가 입사하는 방향과 선박이 표류하는 방향이 이루는 각도가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. KVLCC2의 경우에는 선수파 상황에서 파장 비 $\lambda/L = 1.0$ 부근에서 더 짧은 전진거리(Advance)가 관찰되었는데,



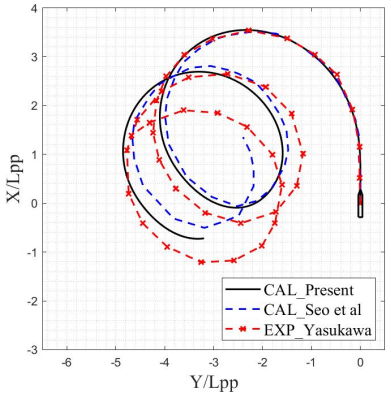
(a) $\chi = 180°, \lambda/L = 0.7$



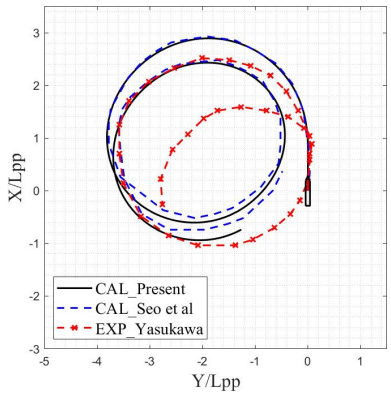
(b) $\chi = 90°, \lambda/L = 0.7$



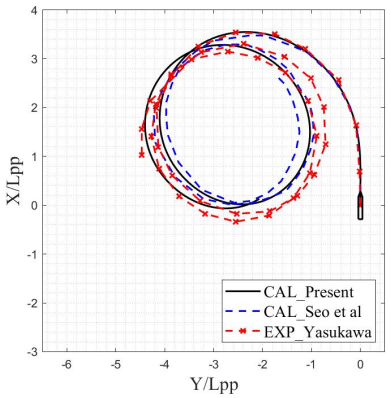
(c) $\chi = 180°, \lambda/L = 1.0$



(d) $\chi = 90°, \lambda/L = 1.0$

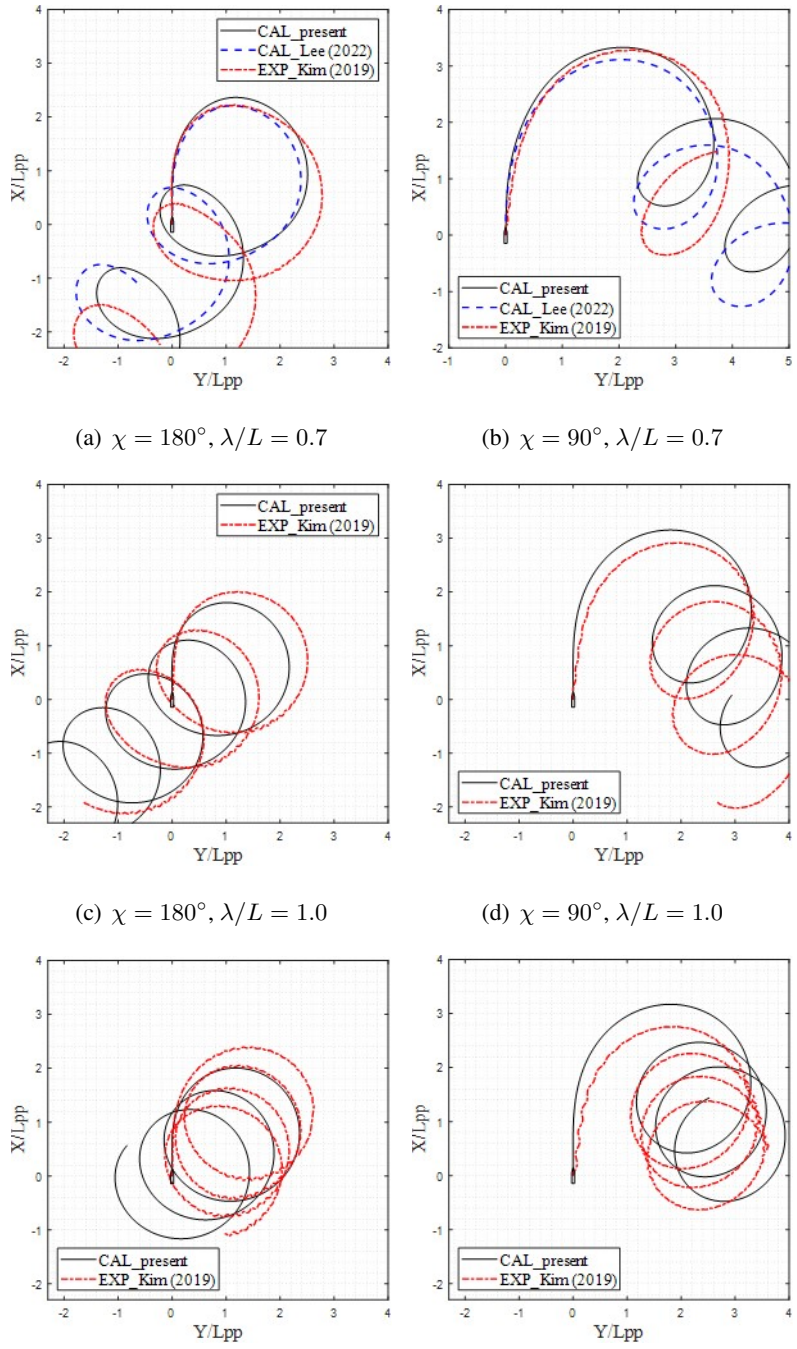


(e) $\chi = 180°, \lambda/L = 1.2$



(f) $\chi = 90°, \lambda/L = 1.2$

Figure 4.11: Turning trajectories of S175 in waves



(a) $\chi = 180°, \lambda/L = 0.7$

(b) $\chi = 90°, \lambda/L = 0.7$

(c) $\chi = 180°, \lambda/L = 1.0$

(d) $\chi = 90°, \lambda/L = 1.0$

(e) $\chi = 180°, \lambda/L = 1.2$

(f) $\chi = 90°, \lambda/L = 1.2$

Figure 4.12: Turning trajectories of KVLCC2 in waves

Table 4.6: Drift distance and angle of simulation results (S175)

		λ/L		
		0.7	1.0	1.2
$\chi = 180°$	Drift distance [·]	2.98	1.02	0.35
	Drift angle [°]	126.5	141.4	165.5
$\chi = 90°$	Drift distance [·]	2.98	1.03	0.35
	Drift angle [°]	126.4	140.8	165.1

Table 4.7: Drift distance and angle of simulation results (KVLCC2)

		λ/L		
		0.7	1.0	1.2
$\chi = 180°$	Drift distance [·]	1.93	1.00	0.57
	Drift angle [°]	142.6	128.5	127.2
$\chi = 90°$	Drift distance [·]	1.93	1.00	0.58
	Drift angle [°]	142.7	128.5	127.6

$\lambda/L = 1.0$ 부근에서 더 큰 X-방향 파랑 표류력이 발생하여 선속 감소가 더 심하게 발생하였기 때문이다.

수치 시뮬레이션 결과, S175 컨테이너선과 KVLCC2에 대응되는 표류 거리 및 표류각은 Table 4.6와 4.7에서 보여준다. 두 선종 모두 파장 비가 작아질수록 표류 거리가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 단파장 영역에서 더 커지는 Y-방향 파랑 표류력의 영향으로 해석된다. 특히 S175 컨테이너선는 파장 비 $\lambda/L = 0.7$, $\lambda/L = 1.0$, $\lambda/L = 1.2$ 각각에 대해 2.98, 1.02, 0.35의 표류 거리를 보여 파장 비가 짧아질수록 큰 폭으로 표류 거리가 증가함을 보였다. 이는 Figure 4.6(c)에서 보여준 Y-방향 파랑 표류력 경향에서 기인한다고 볼 수 있다. KVLCC2와 S175 컨테이너선 모두 선수파와 횡파 조건에서 유사한 표류거리를 보여, 파향에 관계없이 파장 비에 의존적임을 알

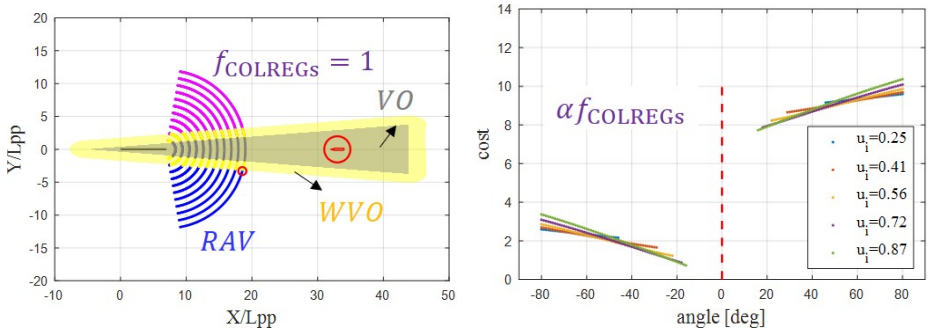
수 있다. 표류각(Drift angle)은 공간고정좌표계를 기준으로 파랑의 방향과 선박이 표류하는 방향이 이루는 각도를 의미한다. 표류 거리와 마찬가지로 파향에 관계없이 동일한 파장 비 조건에서 동일한 표류각을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 선박이 선회함에 따라 수렴 시 같은 표류각을 가진다고 볼 수 있다. 표류 거리와 표류각을 확인함으로써 규칙파 중 선회 시험 결과 검증을 완료하였다.

제 5 장 선박의 충돌회피 시뮬레이션

이 장에서는 2장에서 설명한 WVO 기법 기반 충돌회피 알고리즘과 3장에서 검증한 선박의 조종 시뮬레이션을 결합하여 선박의 충돌회피 시뮬레이션을 수행하고 그 성능에 대해 논한다.

5.1 정수 중 선박의 충돌회피

Figure 5.1는 본 연구에서 개발한 선박의 충돌회피 시뮬레이션의 예시를 보여준다. 우선, 부채꼴 모양의 가용 속도를 가정하였다. S175 컨테이너선의 경우 속력 후보군, $u_i = 0.25 \sim 0.87$, 선수각 후보군, $\psi_j = \pm 80°$로 설정하였다. 회색 영역과 노란색 영역은 각각 VO, WVO를 의미하며 충돌회피를 위한 비용 함수 계산에서



(a) Example of WVO algorithm activated while head on situation

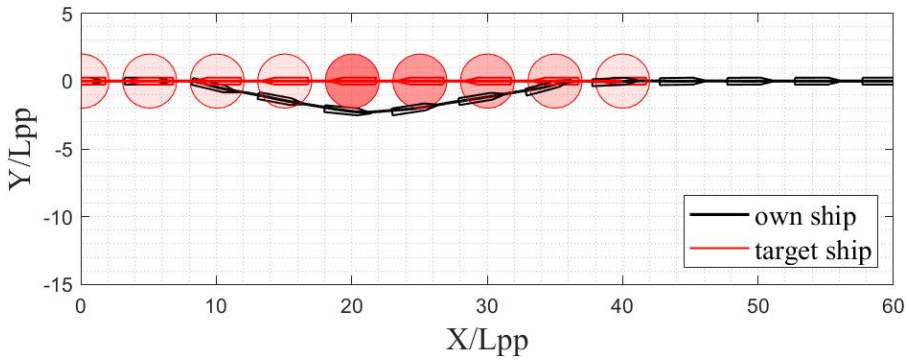
(b) Example of cost function

Figure 5.1: Example of WVO method and cost function (S175)

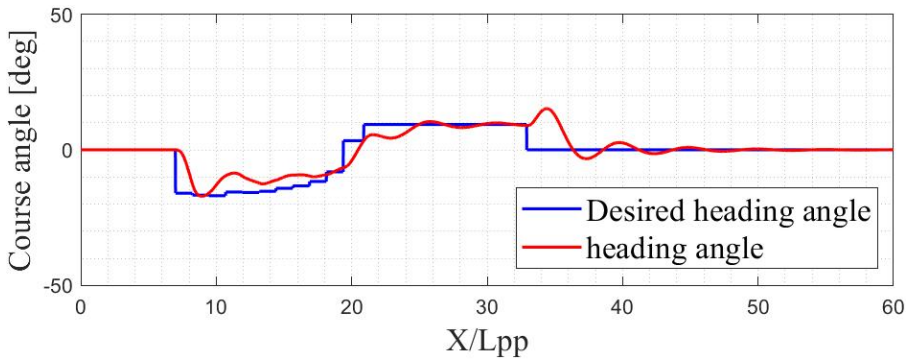
제외된다. 보라색 점들은 국제해상충돌예방규칙을 위반하는 영역으로 비용 함수 계산에 있어 $\alpha f_{\mathrm{COLREGs}}$의 페널티를 받게 되며, Figure 5.1(b)에서 선박의 진행방향 기준으로 좌/우현의 값이 $\alpha f_{\mathrm{COLREGs}}$만큼 차이 나는 것을 확인할 수 있다.

5.1.1 단일 장애물 회피

Figure 5.2는 head on 상황에 대한 충돌회피 시뮬레이션 결과를 보여준다. 자선은 선박 심벌, 타선은 $r_{\mathrm{obs}} = r_{\mathrm{TS}} + r_{\mathrm{safety}}$반지름을 가지는 원반모양으로 표현하였으며, $r_{\mathrm{safety}} = L$, $r_{\mathrm{TS}} = L$을 적용하였다. 또한 20 초(second)마다 심벌을 나타내었고, 자선과 타선 사이의 거리가 가까울수록 짙은 색 원반으로 나타내었다. Figure 5.2(b)



(a) Trajectory of collision avoidance in head on situation

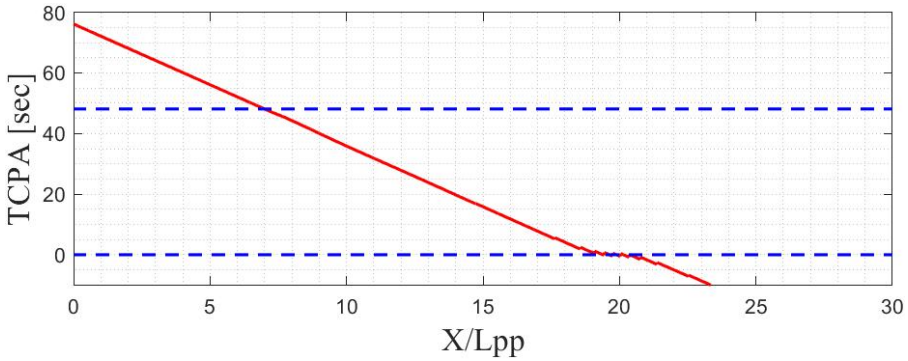


(b) Autopilot system used in collision avoidance algorithm

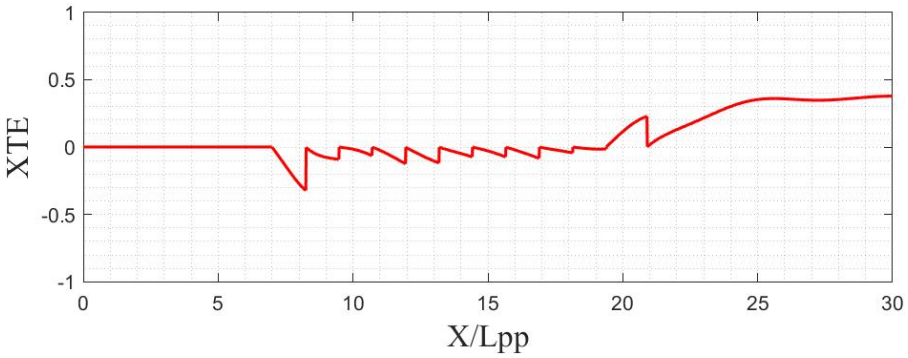
Figure 5.2: Collision avoidacne in head on situation (S175)

에서 회피 기동을 위한 오토파일럿 시스템을 확인할 수 있다. 충돌회피 알고리즘은 회피 완료 시점 이전에는 5초의 업데이트 시간을 설정하였다. Figure 5.3(a)는 선박의 충돌회피 시점을 결정하는 기준인 TCPA를 보여준다. S175의 경우 $t_{\max} = 12 \cdot L/U_0$로 설정하였다. 또한 TCPA < 0인 경우 장애물과 가장 가까워지는 시점이 지났으므로 회피 완료 시점으로 이용하였다.

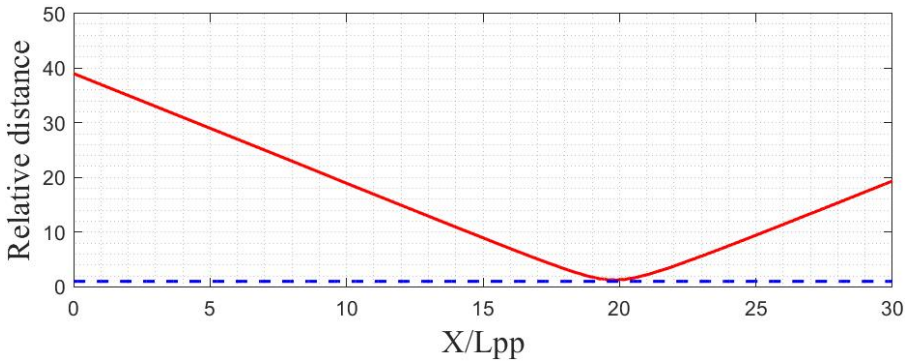
Figure 5.3(b)와 5.5(b)는 각각 head on 상황과 crossing 상황에 대한 XTE를 보여주며, 무차원수를 기준으로 0.5 이하의 작은 값을 가지는 것을 확인하였다. 가용 속도를 구성함에 있어, 선형화 된 속력 성분을 이용하였기 때문에, 계획한 경로와 실제 선박의 동역학을 반영한 경로와의 차이가 발생하는 것은 불가피하며, XTE가 커지면 충돌 위험도가 커지게 된다. 또한 Figure 5.3(c)와 5.5(c)를 통해 자선과 타선 사이의 상대 거리를 확인하였으며, VO 기법의 특성상 타선을 스치듯이 회피하는 모습을 보였으나 r_{safety} 밖으로 지나가는 것을 확인할 수 있었다. 이는 타선과 자선 사이의 거리가 최소 $2 \cdot L$ 이상을 유지하고 있음을 뜻한다. 더 안전한 회피를 위하여 r_{safety}를 키우거나, 회피 시점인 $t_{\max}$를 키우는 방법이 있다.



(a) Time to CPA and decision-making of collision avoidance

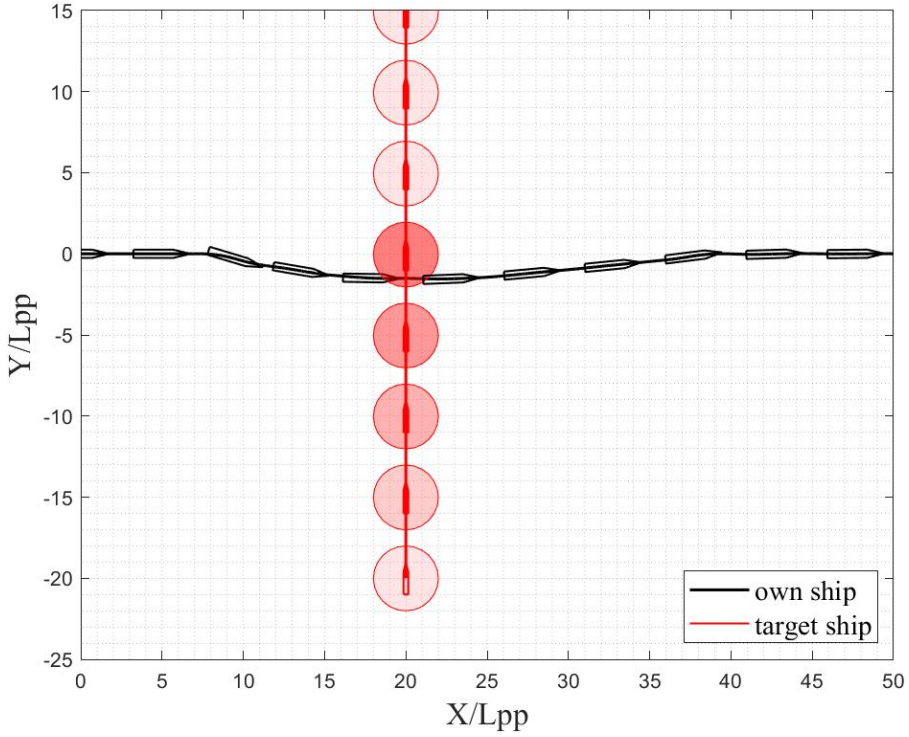


(b) Cross track error in calm sea

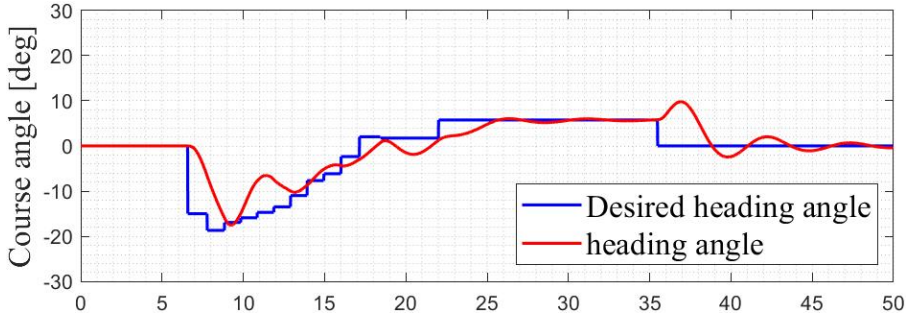


(c) Relative distance between own ship and target ship

Figure 5.3: Collision avoidacne performance in head on situation (S175)

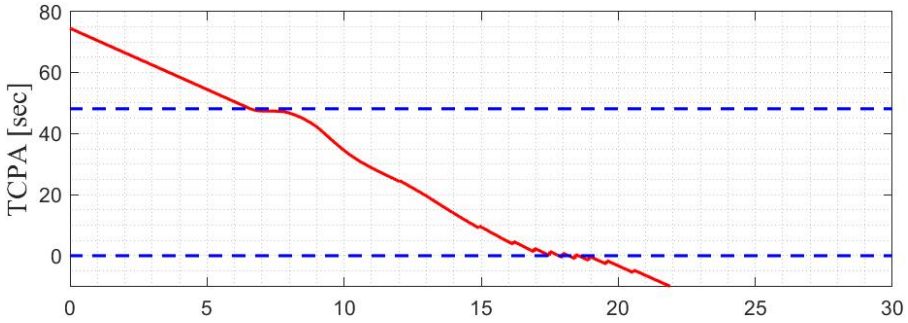


(a) Trajectory of collision avoidance in crossing situation

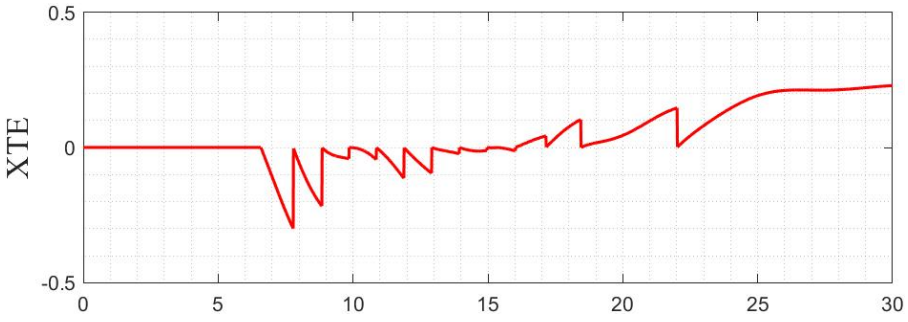


(b) Autopilot system used in collision avoidance algorithm

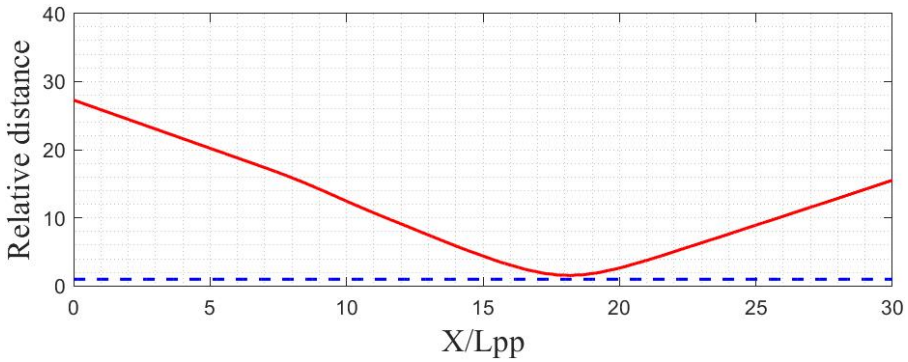
Figure 5.4: Collision avoidacne in crossing situation (S175)



(a) Time to CPA and decision-making of collision avoidance



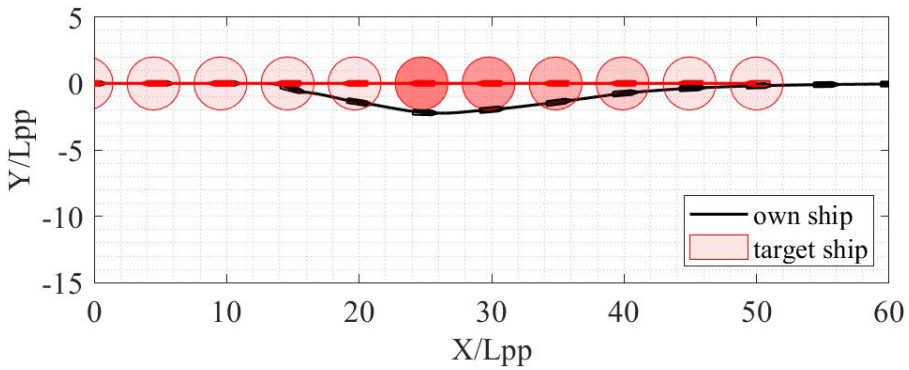
(b) Cross track error in calm sea



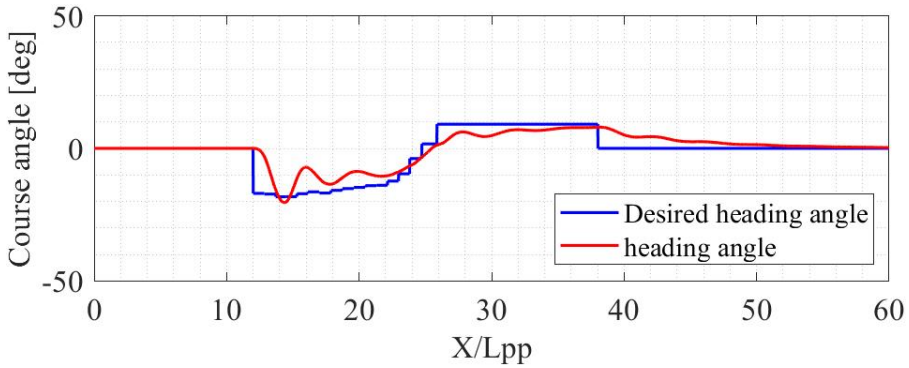
(c) Relative distance between own ship and target ship

Figure 5.5: Collision avoidacne performance in crossing situation (S175)

Figure 5.6 ∼ 5.11는 KVLCC2에 대하여 head on 상황, crossing 상황, 그리고 overtaking 상황에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Figure 5.6(a)와 5.8(a)의 심벌은 30초 마다 그려져 있다. KVLCC2의 조종 성능을 고려하여 head on 상황과 crossing 상황에 대하여 $t_{\max} = 12 \cdot L/U_0$와 $t_{\max} = 18 \cdot L/U_0$를 각각 적용하였다. 회피기동을 수행하는, Figure 5.7(b)의 $X/L_{pp} = 12 \sim 26$ 구간과 Figure 5.9(b)의 $X/L_{pp} = 6 \sim 18$ 구간에서 XTE를 보면 작은 각도의 변침 시에는 0.3 수준을 보였고, 큰 각도로 변침 시 상대적으로 큰, 1.0 수준을 보였다. 또한 crossing 상황에 대해 국제해상충돌예방규칙에서 권고하는 것과 같이, 타선을 앞지르지 않기 위해 Figure 5.8(a)의 선박 심벌 간격처럼, 선속을 감소시키고 우현 변침을 수행한다.

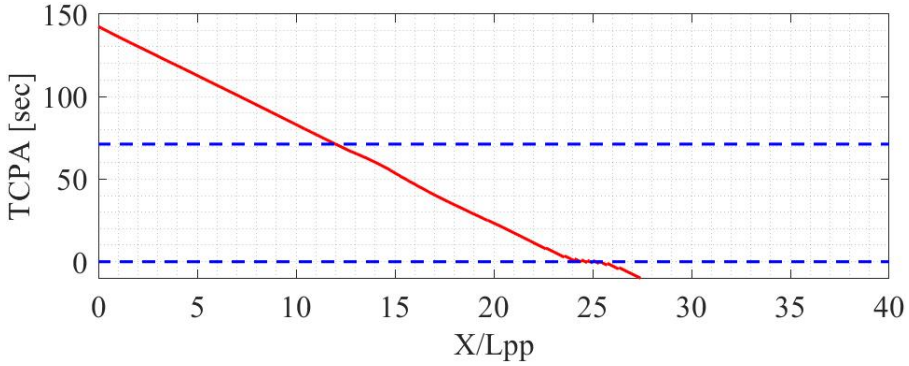


(a) Trajectory of collision avoidance in head on situation

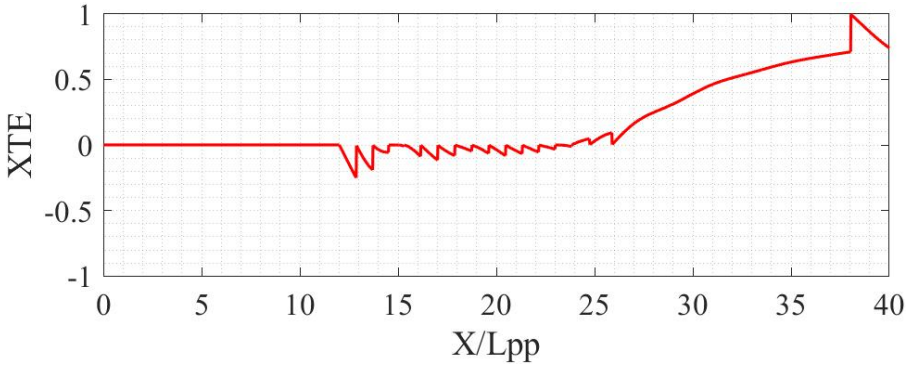


(b) Autopilot system used in collision avoidance algorithm

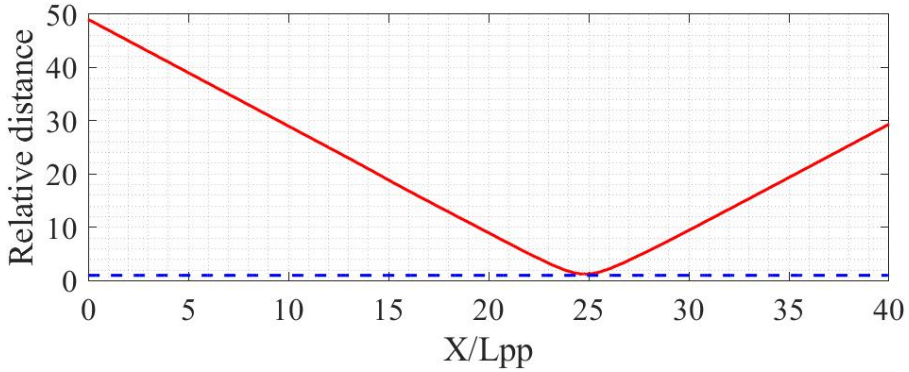
Figure 5.6: Collision avoidacne in head on situation (KVLCC2)



(a) Time to CPA and decision-making of collision avoidance

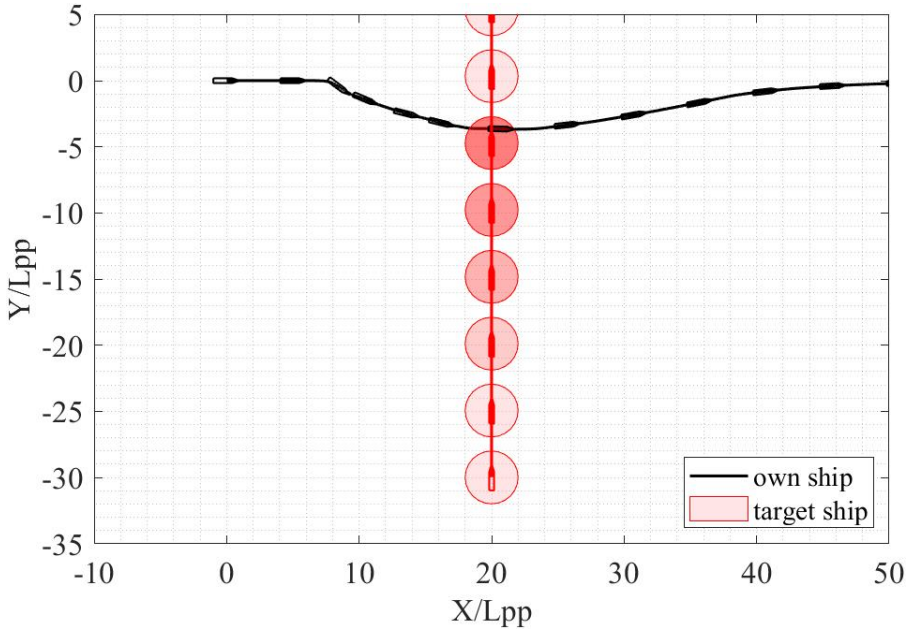


(b) Cross track error in calm sea

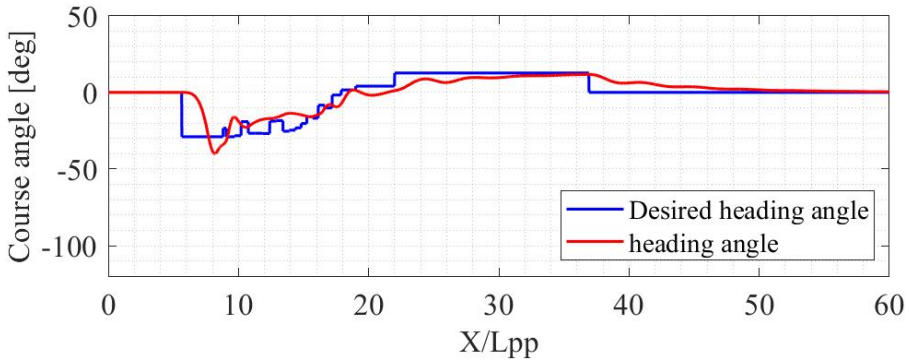


(c) Relative distance between own ship and target ship

Figure 5.7: Collision avoidacne performance in head on situation (KVLCC2)

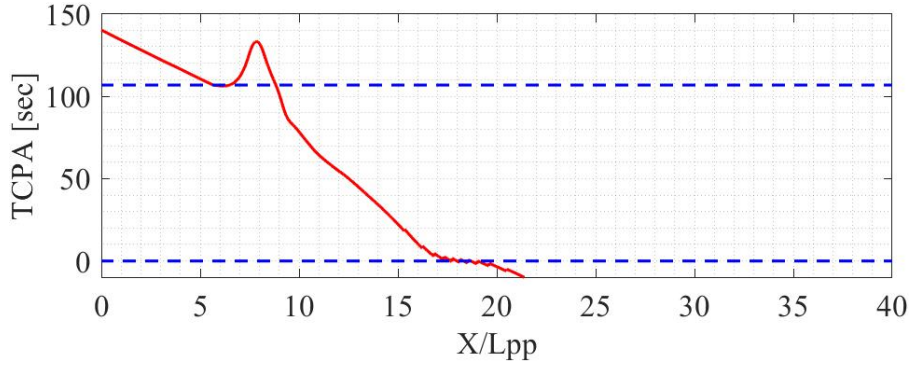


(a) Trajectory of collision avoidance in crossing situation

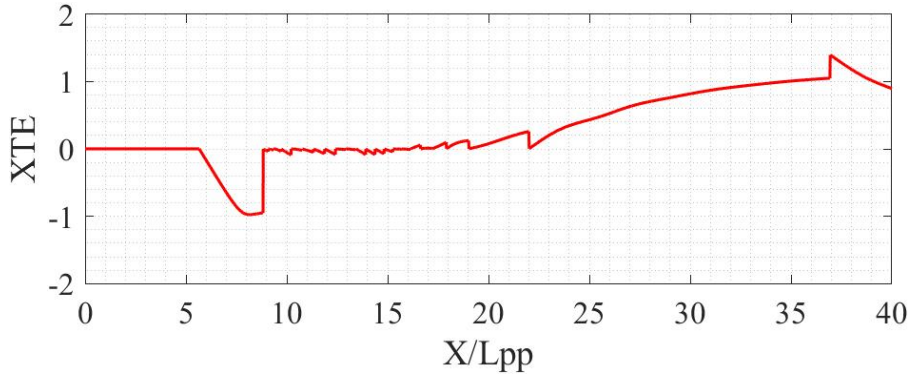


(b) Autopilot system used in collision avoidance algorithm

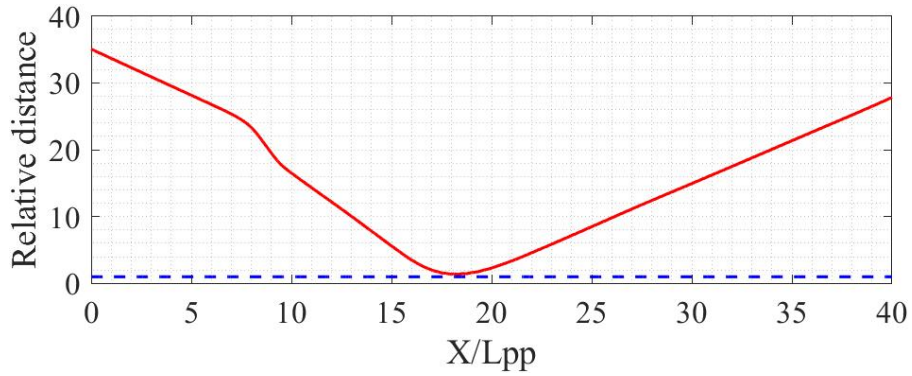
Figure 5.8: Collision avoidacne in crossing situation (KVLCC2)



(a) Time to CPA and decision-making of collision avoidance

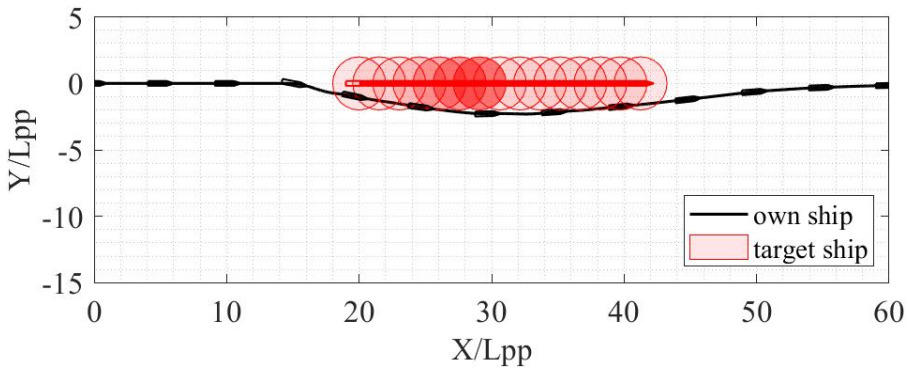


(b) Cross track error in calm sea

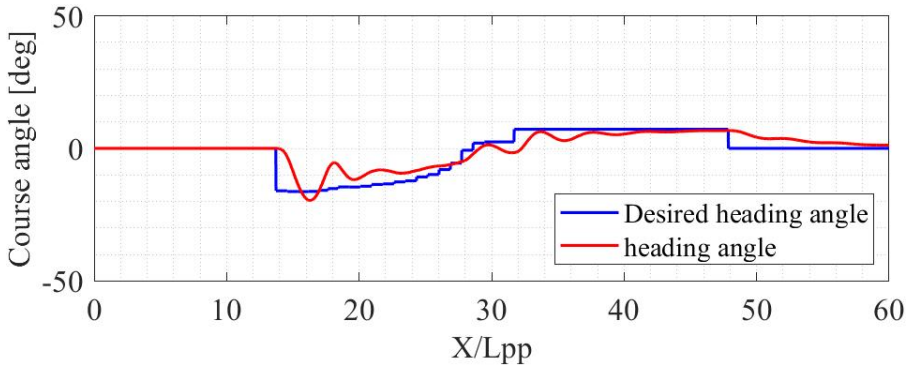


(c) Relative distance between own ship and target ship

Figure 5.9: Collision avoidacne performance in crossing situation (KVLCC2)

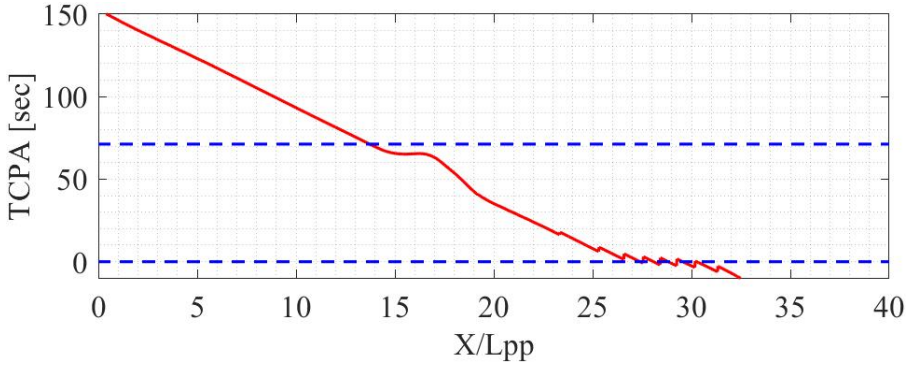


(a) Trajectory of collision avoidance in overtaking situation

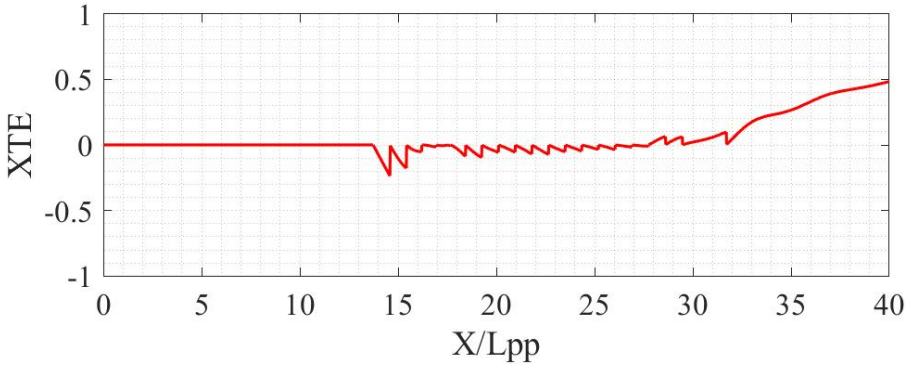


(b) Autopilot system used in collision avoidance algorithm

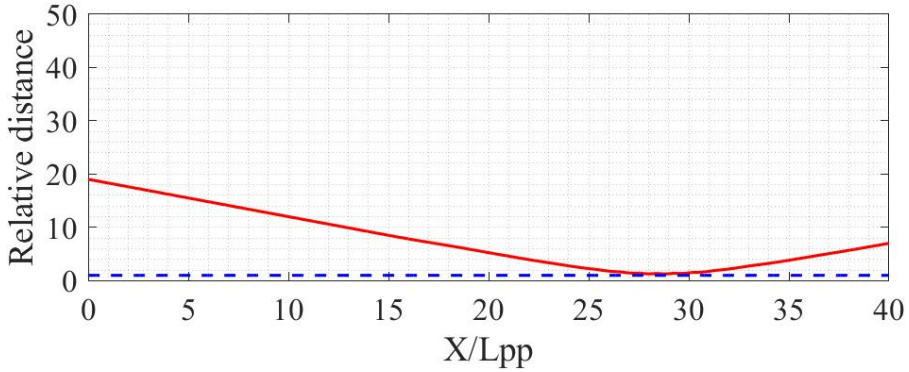
Figure 5.10: Collision avoidacne in overtaking situation (KVLCC2)



(a) Time to CPA and decision-making of collision avoidance



(b) Cross track error in calm sea

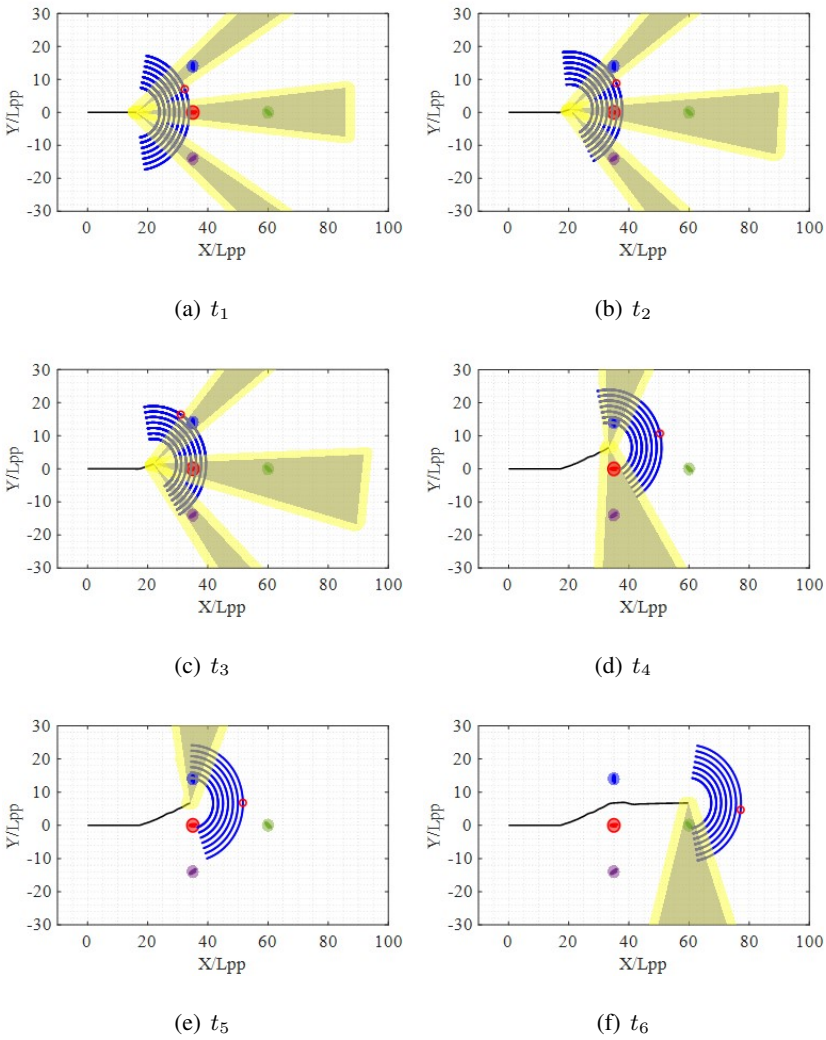


(c) Relative distance between own ship and target ship

Figure 5.11: Collision avoidacne performance in overtaking situation (KVLCC2)

5.1.2 다중 장애물 회피

VO 기법은 다중 장애물 환경(clustered environment)에 적용하기 용이하며 장애물 각각의 속도를 반영할 수 있다는 장점이 있다. 선박의 정수 중 충돌회피 시뮬레이션 검증을 위하여 정지된 상태의 다중 장애물 및 속도를 가지는 장애물 충돌 회피에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다.



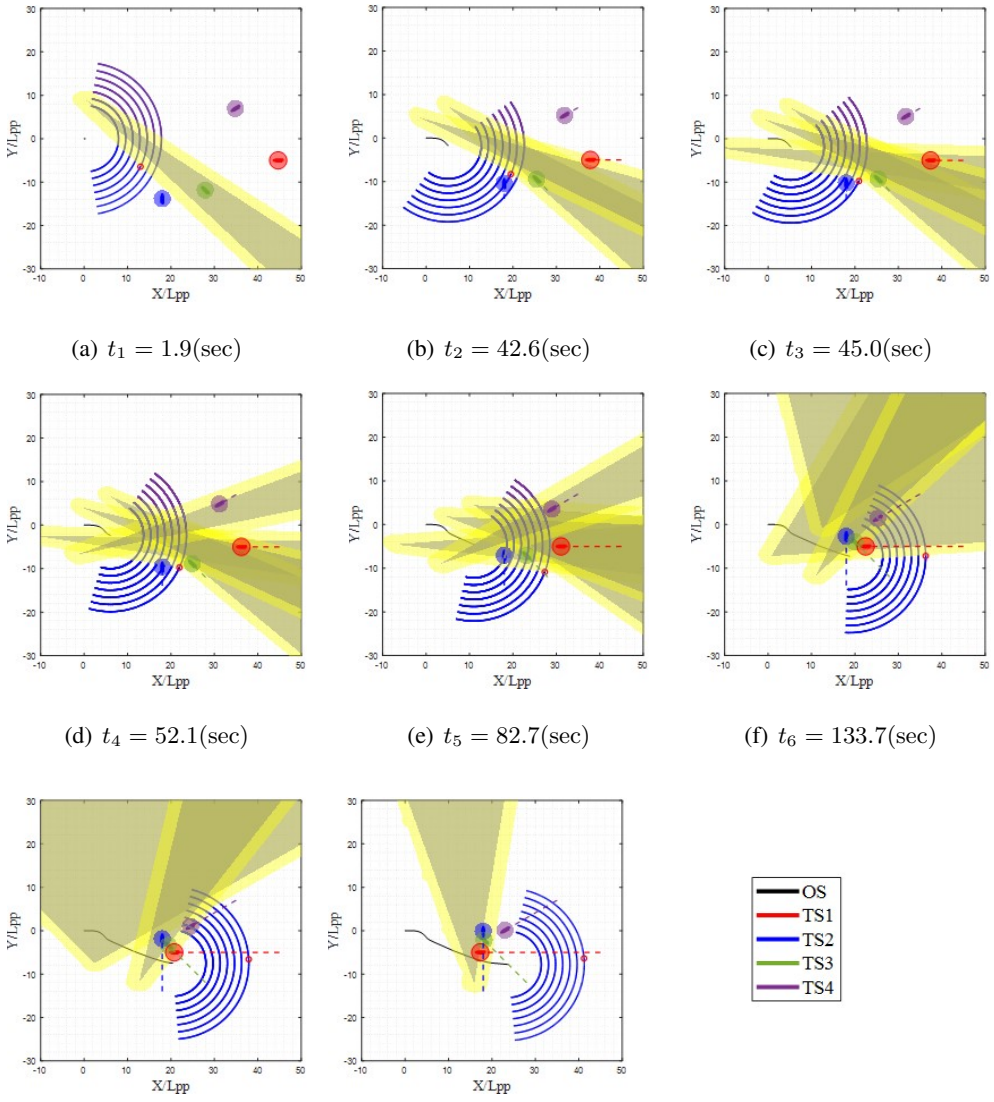
(a) t_1 (b) t_2

(c) t_3 (d) t_4

(e) t_5 (f) t_6

Figure 5.12: Multiple stationary obstacle avoidance maneuver of KVLCC2

Figure 5.12는 정지된 상태의 다중 장애물에 대한 충돌회피를 보여준다. 각 장애물에 대하여 VO를 생성하고 가용 속도영역에서 모든 VO를 제외한 후 최적 경로를 선정하는 모습을 확인할 수 있다. Figure 5.13(a)에서 타선과 자선의 초기 위치 및



(a) $t_1 = 1.9(\text{sec})$ (b) $t_2 = 42.6(\text{sec})$ (c) $t_3 = 45.0(\text{sec})$

(d) $t_4 = 52.1(\text{sec})$ (e) $t_5 = 82.7(\text{sec})$ (f) $t_6 = 133.7(\text{sec})$

(g) $t_7 = 143.9(\text{sec})$ (h) $t_8 = 164.3(\text{sec})$

Figure 5.13: Multiple dynamic obstacle avoidance maneuver of KVLCC2

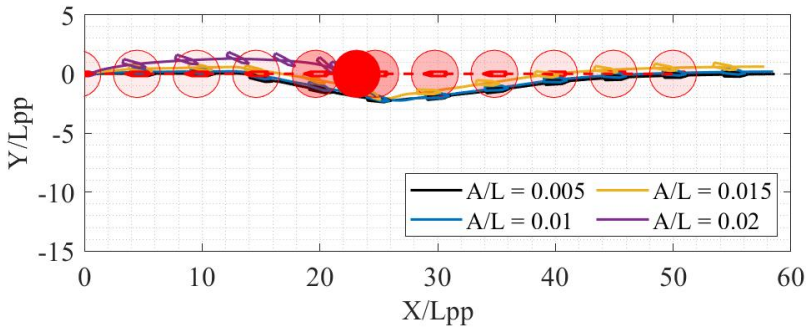
속도는 다음과 같이 설정하였다. 위치: $P_{\mathrm{OS}} = (0, 0)$, $P_{\mathrm{TS1}} = (45, -5)$, $P_{\mathrm{TS2}} = (18, -14)$, $P_{\mathrm{TS3}} = (28, -12)$, $P_{\mathrm{TS4}} = (35, 7)$, 속도: $\vec{V}_{\mathrm{OS}} = (1.18, 0)$, $\vec{V}_{\mathrm{TS1}} = (-1.18, 0)$, $\vec{V}_{\mathrm{TS2}} = (0, 0.59)$, $\vec{V}_{\mathrm{TS3}} = (-0.417, 0.417)$, $\vec{V}_{\mathrm{TS4}} = (-0.511, -0.295)$. 다중 장애물 상황에서 경로 추종 중 추가적인 장애물이 탐지되었을 경우 VO 알고리즘을 업데이트하는 모습과 각각의 속도를 고려하는 모습을 Figure 5.13에서 확인할 수 있다.

5.2 파랑 중 선박의 충돌회피

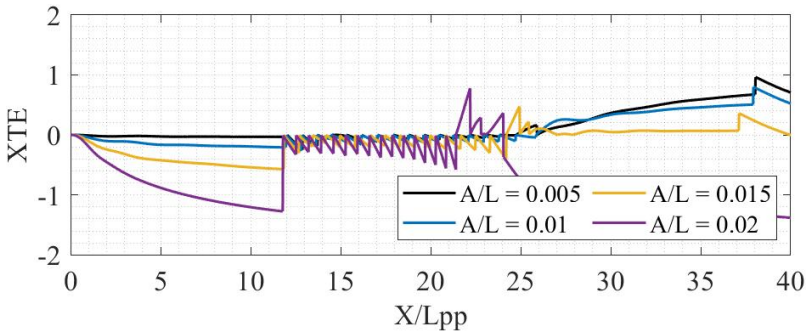
이 장에서는 파랑 표류력을 적용한 선박 조종운동방정식을 이용하여 선박의 충돌회피 수치 시뮬레이션을 진행한다. 파랑 표류력의 영향을 확인하기 위해 head on 상황과 crossing 상황에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 파랑 중 선박의 충돌회피 성능 평가를 위한 지표로 XTE와 상대 거리(Relative distance)를 이용하였다. 파랑의 파고, 파장, 그리고 파향의 영향을 확인하고자 여러 파랑 조건에서 충돌회피 시뮬레이션을 수행하고, 추가적으로 제어기의 성능이 제한된 상황에서 파랑 중 충돌회피 성능에 대하여 확인해보고자 하였다.

5.2.1 파고의 영향

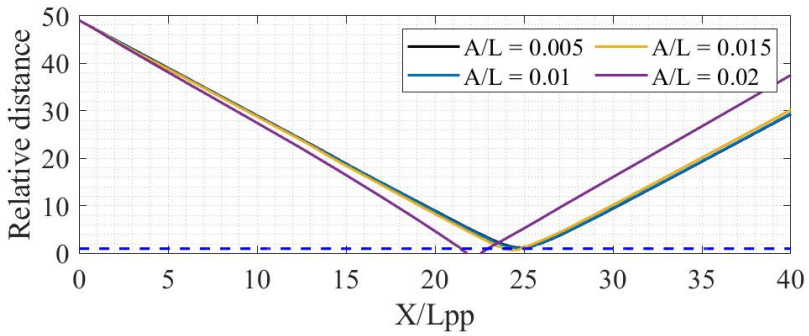
파랑의 파고는 선박의 길이 대비, $\mathrm{A/L} = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02$이며 최대 6.4 m의 파고를 선정하였다. Figure 5.14는 횡파가 작용하는 해상상태에서의 head on 충돌회피 시뮬레이션 결과이다. 선박의 충돌회피 성능에 미치는 파고의 영향을 조사하기 위해 다양한 파고 조건에서의 선박의 충돌회피 궤적 및 동작 상태를 검토하였다. Figure 5.14(a)에서 선박 심벌의 기울기는 선박의 표류각을 의미한다. 파랑 표류력 및 모멘트는 파고의 제곱(A^2)에 비례하므로 파고가 커짐에 따라 더 큰 환경외란이 작용한다. 충돌회피 시점 이전인 $\mathrm{X/Lpp} < 12$ 영역에서 횡파의 영향으로 직진 시 표류각과 표류 거리가 나타나며, 파고가 클수록 큰 표류각 및 표류 거리가 관찰되었다. 또한 파랑 중 선박이 직진을 유지하기 위한 타각(δ_0)은 파고가 커짐에 따라 $\delta_0 = 3.75°, 11.18°, 14.64°, 15.40°$로 증가하였는데, 이는 선박이 회피를 위해



(a) Trajectories of collision avoidance

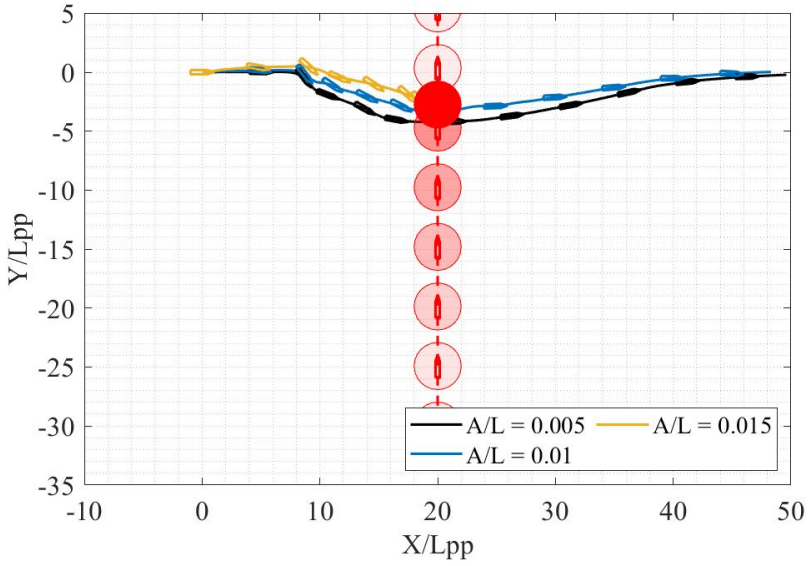


(b) Cross track error of collision avoidance

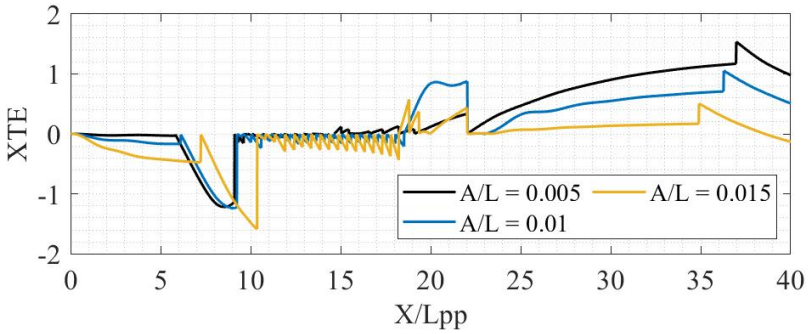


(c) Relative distance of collision avoidance

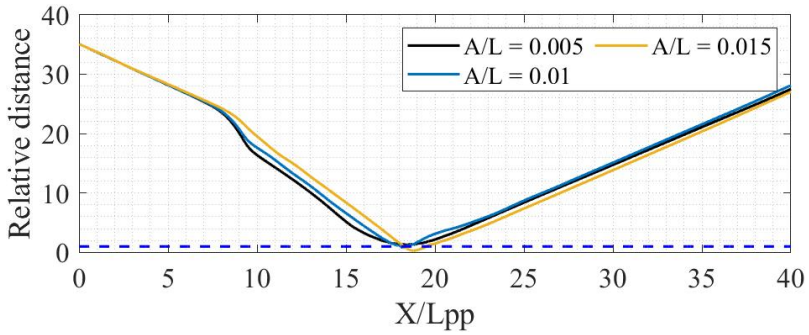
Figure 5.14: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave amplitude wise, $\chi = 90°$)



(a) Trajectories of collision avoidance



(b) Cross track error of collision avoidance



(c) Relative distance of collision avoidance

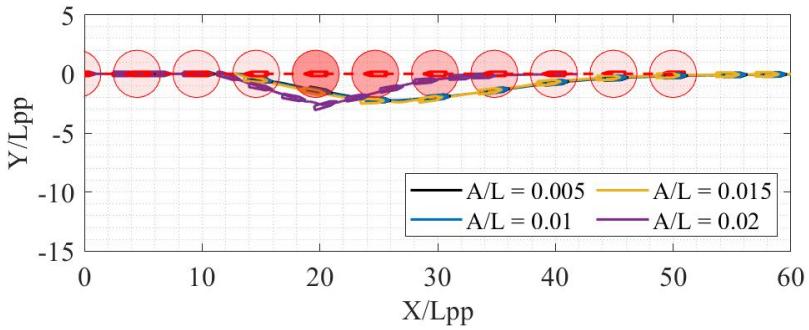
Figure 5.15: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave amplitude wise, $\chi = 90°$)

가용 가능한 타각의 여유가 줄어듦을 의미한다. 회피 시점 이전에 직진 시 수렴 상태에서 큰 표류 거리를 가지며 타각의 여유가 없는 상태에서 더 큰 파랑 표류력을 받기에 파고가 클수록 충돌 위험도가 높다고 판단된다. 따라서, 파고가 증가함에 따라 XTE가 증가하였고, 상대 거리는 감소하여 더 큰 환경외란 중에 충돌회피 성능이 저하되었음을 확인하였다. 특히 $\mathrm{A/L} = 0.02$ 상황에는 큰 XTE로 인해 충돌 회피에 실패한 모습을 관찰할 수 있으며 Figure 5.14(c)에서 r_{safety} 를 나타내는 파선 아래로 내려가는 것을 통해 확인할 수 있다. Figure 5.15는 같은 파랑 조건에서 crossing 상황에 대한 충돌회피 시뮬레이션 결과를 보여준다. 상대적으로 큰 각도로 변침함에 따라 $\mathrm{A/L} = 0.015$ 상황에서 충돌이 발생하였으며 Figure 5.15(c) 기준선 미만으로 내려가는 것을 통해 알 수 있다.

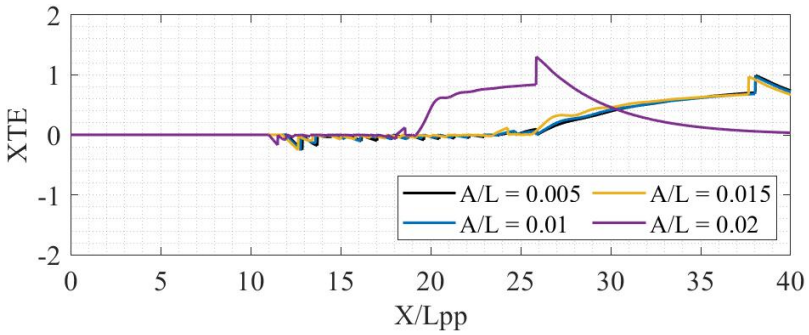
선수파 조건에서 파랑 표류력의 영향을 확인하기 위해 $\lambda/L = 1.0$ 상황에서 시뮬레이션을 진행하였다. Head on 상황에서 XTE와 상대 거리는 파고가 커짐에도 비슷한 수준을 유지하였다. 하지만 Figure 5.15(a)를 통해 파고가 커짐에 따라 X-방향 파랑 표류력이 크게 나타나고 $\mathrm{A/L} = 0.02$ 경우에 속도 감소가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 모델 선 기준 설계 속도인 $1.18m/s$에 대해 각 파고 조건에서 설계 속도를 유지하였으나, $\mathrm{A/L} = 0.02$ 조건에서만 $0.70m/s$로 선속이 감소하였다. 낮은 속도에 따라 타력이 작음에도 횡방향 표류력이 상대적으로 작아 적절한 회피기동에 성공한 것으로 보인다. Figure 5.16와 5.17는 선수파 조건에서 head on 상황과 crossing 상황에 대한 충돌회피 시뮬레이션 결과를 보여주며 선속 감소 현상이 일어남을 확인하였다.

5.2.2 파장의 영향

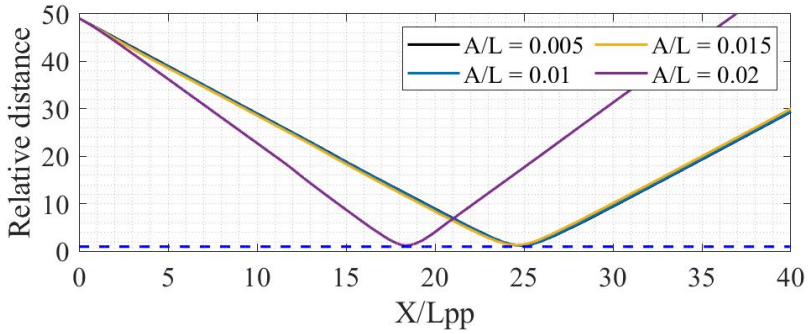
파장의 영향을 뚜렷이 보기 위해 파고, $\mathrm{A/L} = 0.015$ 조건에서 진행하였다. Figure 5.18(b)에서 파장 비가 짧을수록 직진 시 더 큰 표류 거리를 갖는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상이 큰 각도로 변침하는 crossing 상황에서 충돌로 이어지는 것을 Figure 5.19(a)에서 확인할 수 있다. 이는 단파장 영역에서 반사파의 영향에 의해 큰 Y-방향 파랑 표류력이 보였던 경향과 같다. Figure 5.18(a)의 직진 영역, $\mathrm{X/Lpp} < 13$



(a) Trajectories of collision avoidance

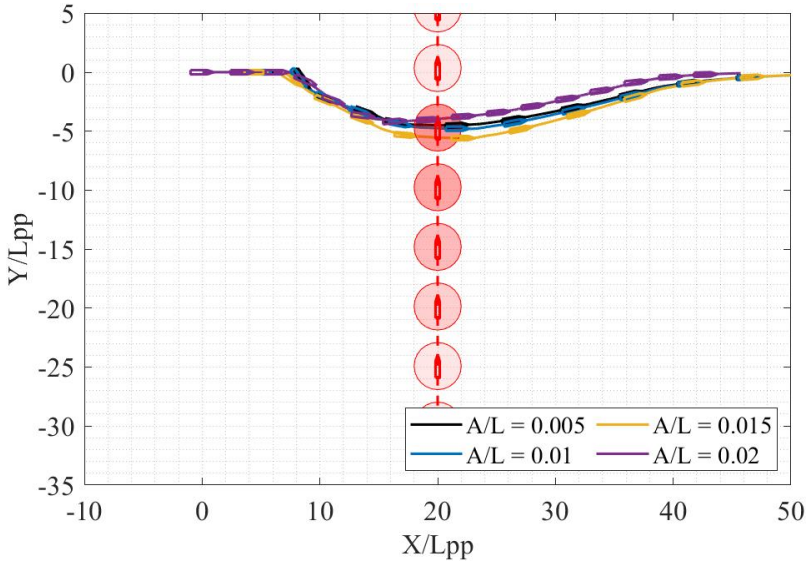


(b) Cross track error of collision avoidance

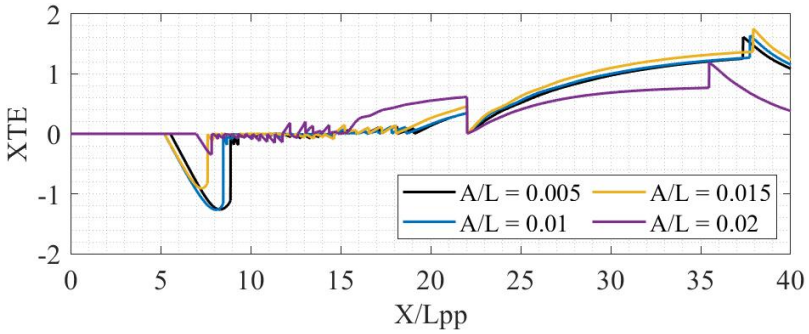


(c) Relative distance of collision avoidance

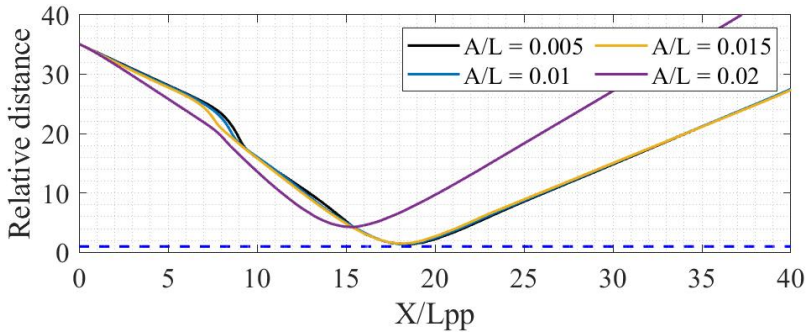
Figure 5.16: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave amplitude wise, $\chi = 180°$)



(a) Trajectories of collision avoidance



(b) Cross track error of collision avoidance



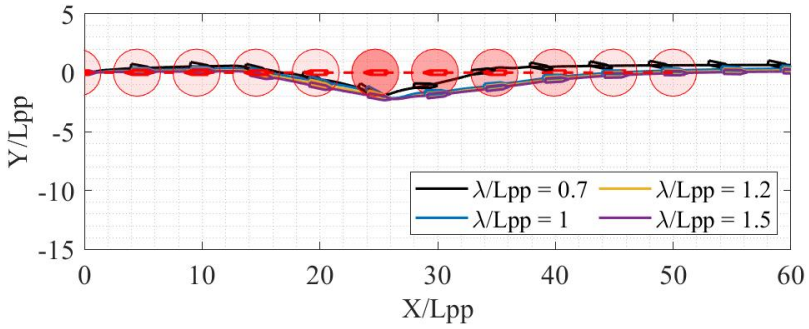
(c) Relative distance of collision avoidance

Figure 5.17: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave amplitude wise, $\chi = 180°$)

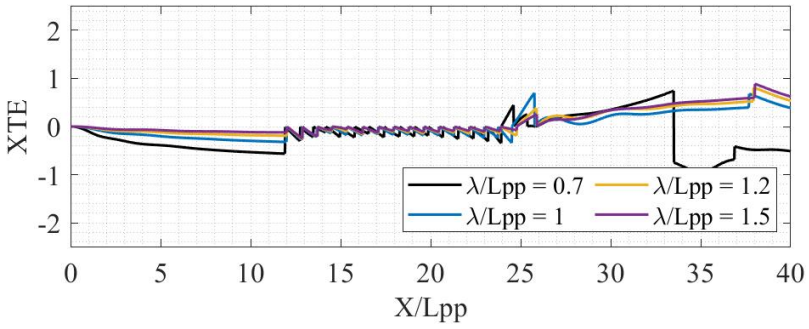
에서 선박 심벌의 기울기를 통해 파장 비가 작을수록 큰 표류각을 관찰할 수 있다. 파장 비 $\lambda/L = 0.7, 1.0, 1.2, 1.5$에 대응되는 (표류각, 직진 시 중립 타각)은 각각 $(11.92°, 14.64°), (4.50°, 1.20°), (2.65°, 0.85°), (1.74°, 1.56°)$ 이다. 이를 통해 파장 비가 짧을수록 큰 직진 시 중립 타각을 가지며 Y-방향 파랑 표류력이 작용하여, 회피를 위해 가용할 타각 범위가 작아지는 것을 의미한다. 회피를 위해 가용 가능한 타각 범위가 작아지는 것을 의미하며 Figure 5.18(a)를 통해 충돌회피 중 타선과의 거리가 더 가까이 위치하는 것을 확인할 수 있다. Figure 5.19는 Crossing 상황에서 파장 비에 따른 충돌회피 시뮬레이션 결과를 보여준다. 직진 시 수렴 상태에서 표류각 및 직진 시 중립 타각이 파장 비 $\lambda/L = 0.7$ 조건에서 급격히 커지는 모습을 확인하였다. 큰 각도로 변침하여 회피를 진행하는 경우 XTE가 커져 타선과 충돌하는 모습을 확인하였는데, 이를 통해 단파장 영역에서 보수적인 충돌회피 거동이 계획되어야 함을 알 수 있다.

선수파 조건에서 head on 상황을 살펴보면, X-방향 파랑 표류력이 가장 크게 나타난 $\lambda/L = 1.2$ 조건에서 선속 감소가 크게 관찰되었다. 모형선 기준으로 설계속도 $1.18m/s$ 에 대해 파장 비 $\lambda/L = 1.2$ 조건에서 $1.03m/s$로 감소하였으며, Figure 5.20(a)의 30초 간격으로 나타난 선박 심벌을 통해 알 수 있다. 또한 crossing 상황, $\lambda/L = 1.2, 1.5$ 조건에서 Yaw 파랑 표류 모멘트가 크게 발생하여 XTE가 크게 나타난 것을 Figure 5.21(a)와 5.21(b)에서 확인할 수 있다.

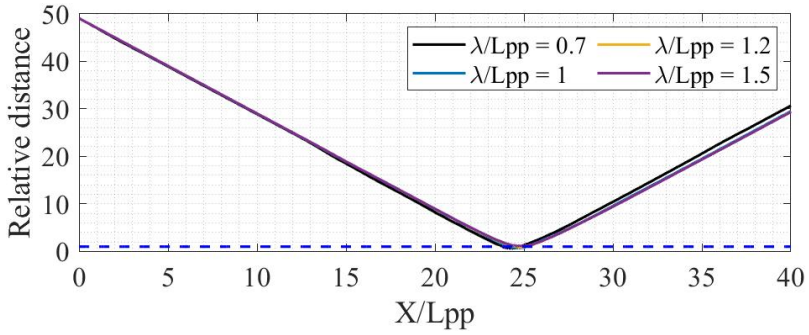
Figure 5.22와 5.23은 KVLCC2와 S175 컨테이너선의 파랑 중 충돌회피 시뮬레이션으로부터 계산된 XTE와 상대거리에 대한 등고선도를 나타낸다. 여기서, 가로축은 파고, 세로축은 파장 비에 해당한다. 파향의 경우 변침 방향과 반대되는 방향으로 파랑이 입사하는 경우 가장 위험하므로, 횡파 조건에서의 충돌회피 성능을 평가하였다. 파고가 커짐에 따라 파랑 표류력이 증가하는 경향을 보이므로 파고의 증가에 따라 XTE가 증가하고 상대 거리는 감소하는 경향을 보였다. 또한 KVLCC2와 S175 컨테이너선 모두 단파장 영역에서 큰 XTE와 작은 상대거리를 보여, 보수적인 판단이 필요함을 알 수 있다. 변침을 통해 충돌회피를 진행하기 때문에 Y-방향 파랑 표류력의 영향이 지배적이며, XTE와 상대거리의 크고 작은 경향이 Y-방향 파



(a) Trajectories of collision avoidance

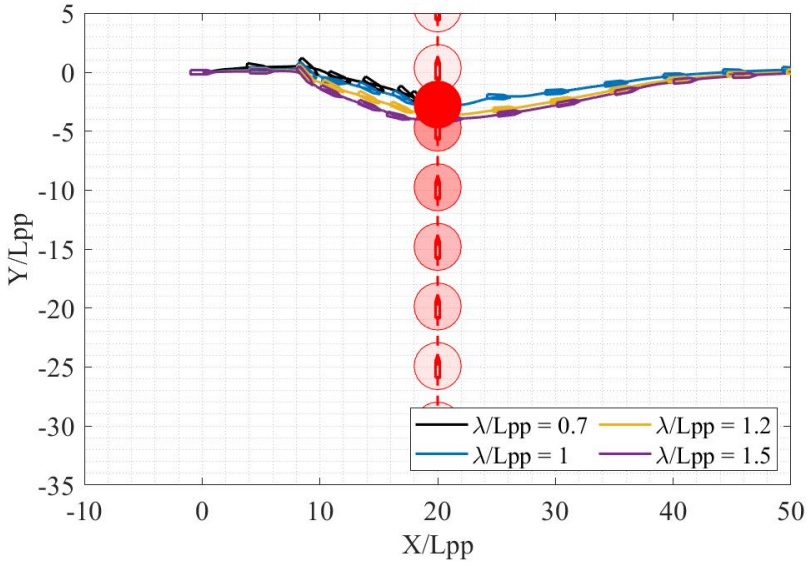


(b) Cross track error of collision avoidance

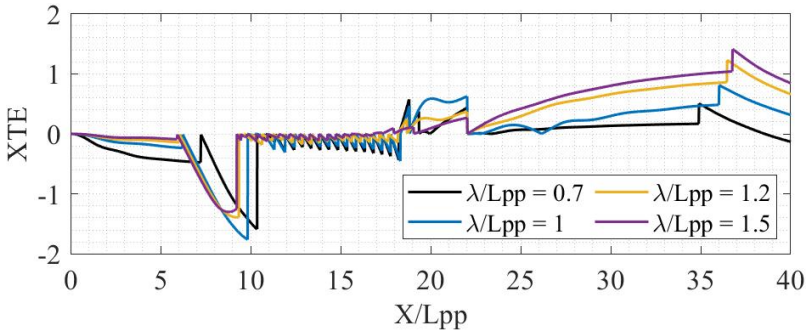


(c) Relative distance of collision avoidance

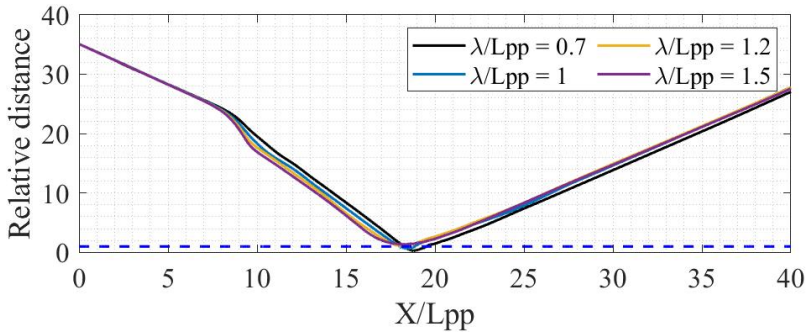
Figure 5.18: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave length wise, $\chi = 90°$)



(a) Trajectories of collision avoidance

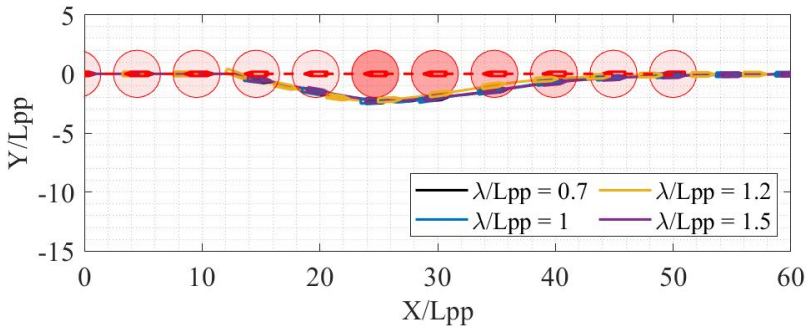


(b) Cross track error of collision avoidance

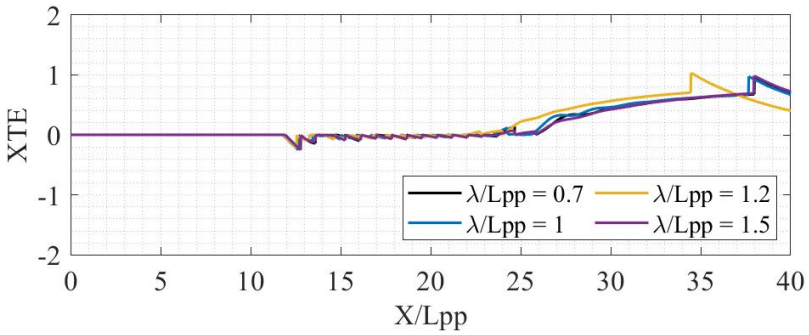


(c) Relative distance of collision avoidance

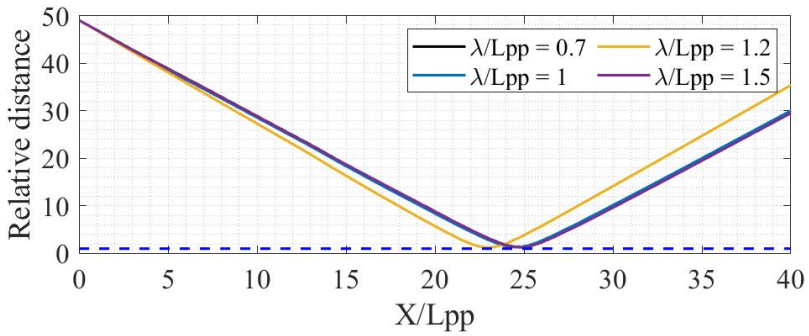
Figure 5.19: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave length wise, $\chi = 90°$)



(a) Trajectories of collision avoidance

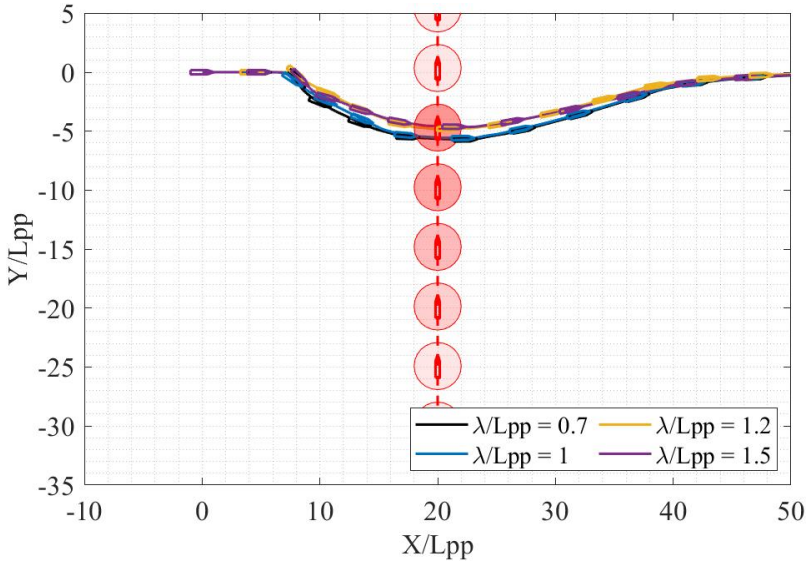


(b) Cross track error of collision avoidance

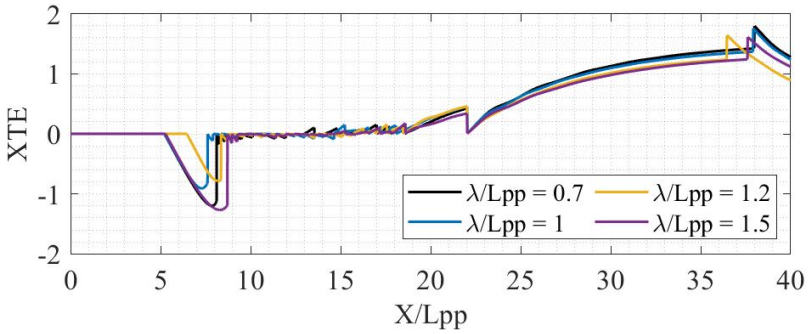


(c) Relative distance of collision avoidance

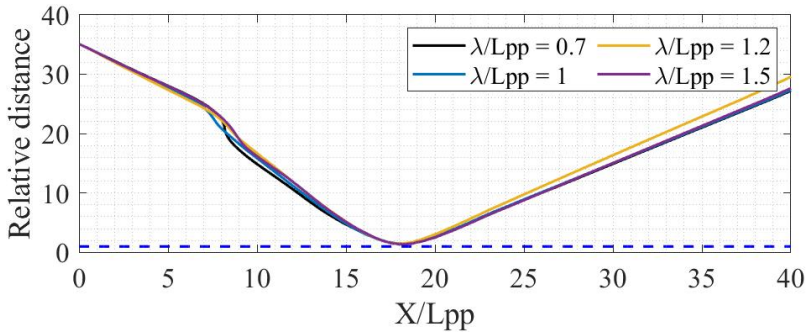
Figure 5.20: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation (wave length wise, $\chi = 180°$)



(a) Trajectories of collision avoidance



(b) Cross track error of collision avoidance



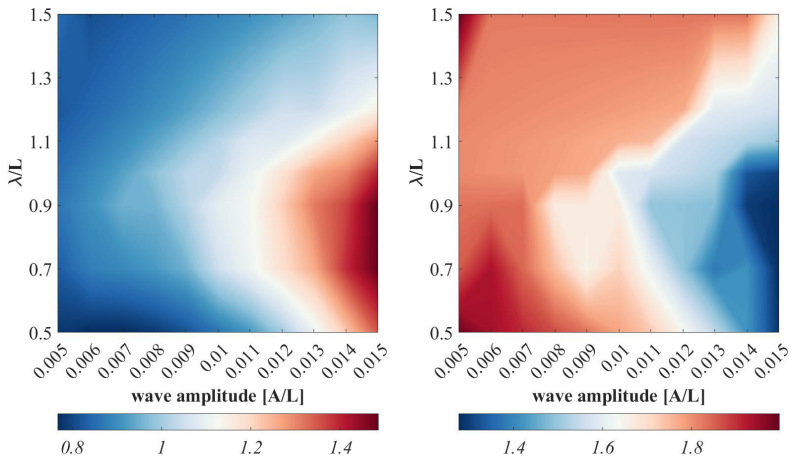
(c) Relative distance of collision avoidance

Figure 5.21: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in crossing situation (wave length wise, $\chi = 180°$)

랑 표류력의 증가 경향과 유사하다. 만약, 변침 방향과 파랑 방향이 같은 경우에는 Y-방향 파랑 표류력이 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. KVLCC2의 경우 Yaw 방향 파랑 표류 모멘트가 $\lambda/L = 0.9 \sim 1.1$ 영역에서 크게 작용하여 단파장 영역으로 갈수록 XTE가 꾸준히 증가하지는 않는 모습이다.

5.2.3 파향의 영향

파향, $\chi = 0° \sim 180°, d\chi = 30°$에 대하여 $\lambda/L = 0.7, 1.0$, $\mathrm{A/L} = 0.015$ 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. Figure 5.24는 반지름 방향이 파고(A/L)인 XTE에 대한 극선도(polar diagram)을 보여준다. 횡파와 선수 사파 조건에서 XTE가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 파장 비 $\lambda/L = 0.7$ 조건에서 $\lambda/L = 1.0$ 조건에 비해 0.2 가량 큰 XTE가 관찰되었고, 이는 단파장 영역에서의 큰 Y-방향 파랑 표류력의 영향으로 보인다. Figure 5.25는 반지름 방향이 파장 비(λ/L)이며, 파고, $\mathrm{A/L} = 0.015$ 조건에서 시뮬레이션 결과를 극선도로 도시한다. 횡파, 단파장 조건과 선수 사파, 파장 비 $\lambda/L = 1.0$ 부근에서 큰 값을 볼 수 있는데, 이는 Y-방향 파랑



(a) Cross track error (b) Relative distance

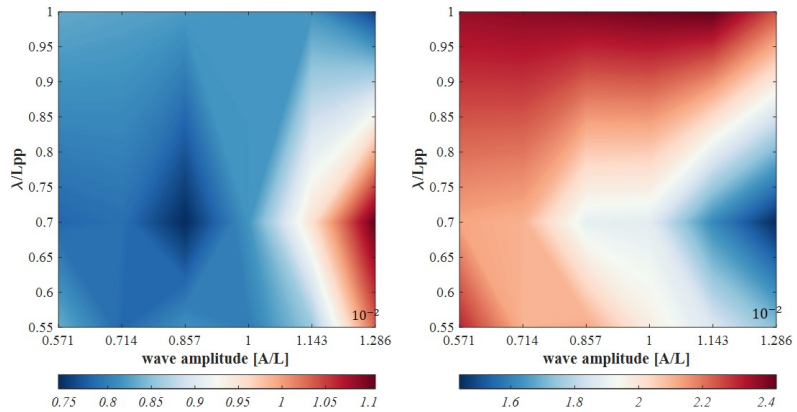
Figure 5.22: Indices of collision avoidance performance in head on situation (KVLCC2)

표류력과 Yaw 표류 모멘트의 경향성을 반영한 결과로 볼 수 있다.

5.2.4 추진기 성능에 대한 충돌회피

KVLCC2의 추진기 성능이 제한된 상황에서의 파랑 중 충돌회피 시뮬레이션을 수행하였다. MMG 모델의 프로펠러 모듈에서 추진력은 프로펠러 회전수의 제곱(RPS^2)에 비례하므로, 프로펠러 회전수를 $\mathrm{RPS}_{\max}$로 제한함으로써 추진기 성능이 제한된 상황을 가정하였다. 최근 EEDI의 영향으로 최소추진출력의 연구가 활발히 진행되었고, 2020년 SSPA에서 KVLCC2의 최소추진추력에 대한 사례 연구(case study)가 이루어졌다(Gerhardt et al. [68]). 위 사례 연구를 통해 추정된 최소추진출력은 실선 기준 12 MW 이며, MMG 모델의 프로펠러 회전수로 변환하면 $\mathrm{RPS}_{\max} = 23$에 해당한다. 하지만 KVLCC2에 대하여 Seo et al. [29]은 파랑 중에 통상적으로 30% 가량의 추력 감소가 일어난다고 언급하였다. 본 연구에서 이용한 프로펠러 모델에는 파랑에 의한 추력 감소가 반영되지 않으므로 $\mathrm{RPS}_{\max} = 23$를 기준으로 $\mathrm{RPS}_{\max} = 23, 21, 19$ 조건에서 충돌회피를 진행하였다.

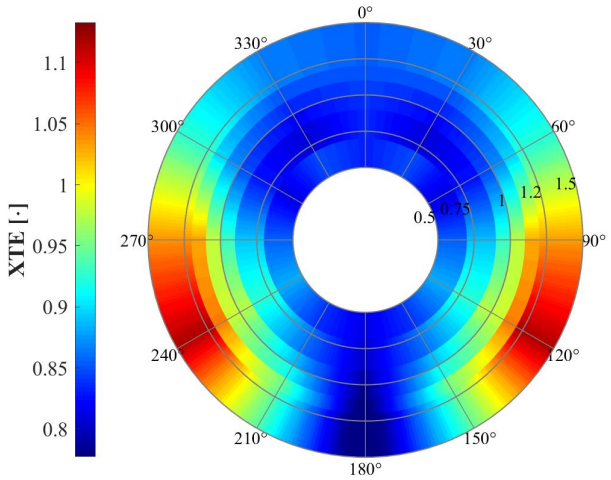
Figure 5.26와 5.27는 각각 선수파, 횡파 조건에서의 충돌회피 결과를 도시한다.



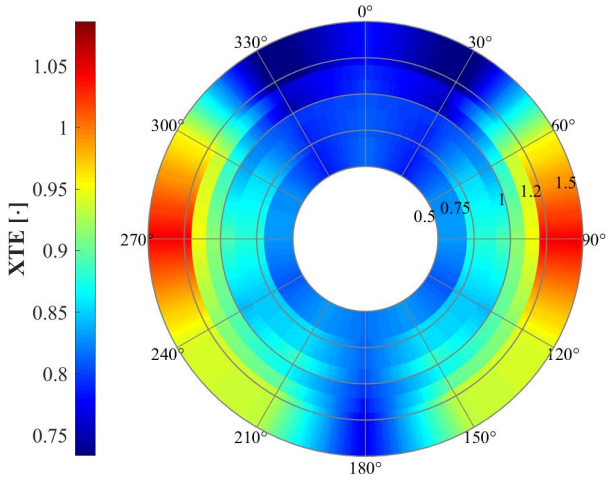
(a) Cross track error (b) Relative distance

Figure 5.23: Indices of collision avoidance performance in head on situation (S175 containership)

Figure 5.26(b)와 5.27(b)의 실선은 선속을 나타내고 점선은 목표 선속을 의미한다. Figure 5.26(c)와 5.27(c)는 선박의 프로펠러 회전수를 보여주는데, $\mathrm{RPS}_{\max} = 21, 19$ 인 경우 최대 RPS를 유지함에도 목표 속도에 도달하지 못하는 모습을 확인할 수 있다. Figure 5.26(a)의 $\mathrm{RPS}_{\max} = 19$ 조건에서 추진기 성능 제한에 의해 파랑 표류력을 상쇄시키지 못하고 선속 감소가 일어나는 모습을 확인할 수 있다. 또한 횡파



(a) Polar diagram of cross track, $\lambda/L = 1.0$



(b) Polar diagram of cross track, $\lambda/L = 0.7$

Figure 5.24: Polar diagram of cross track error for head on situation

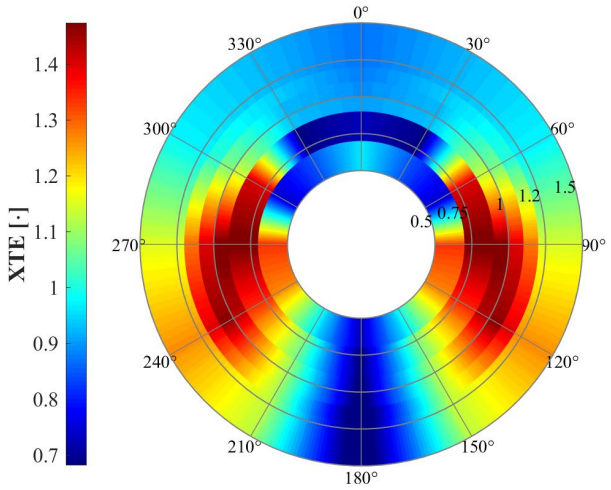
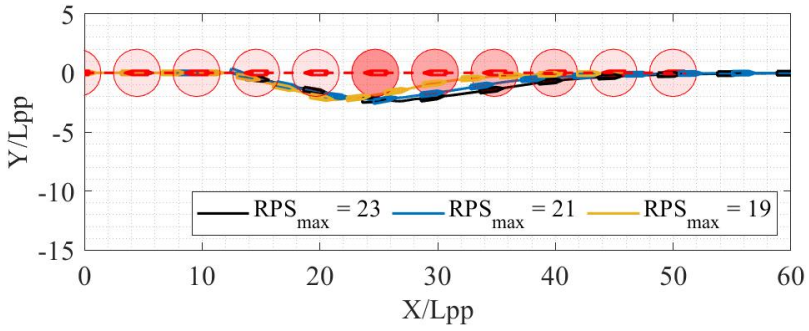


Figure 5.25: Polar diagram of cross track error for head on situation, $\mathrm{A/L} = 0.015$

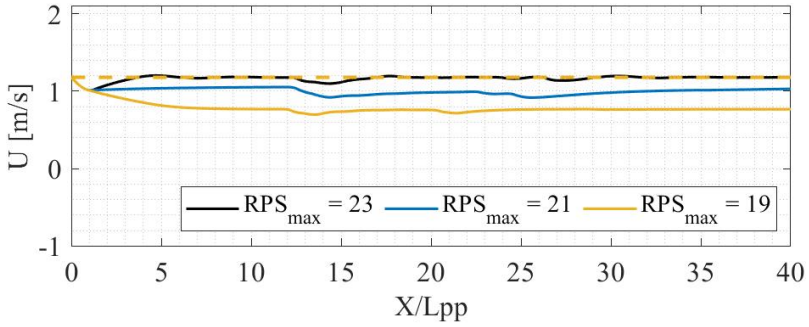
조건에서 Figure 5.27(a)의 $\mathrm{RPS_{max}} = 19, 21$ 조건에서 파랑 표류력을 이기지 못하고 타선과 충돌하는 모습을 볼 수 있다. MMG 모델의 타(rudder) 모델 역시 프로펠러 회전수와 연관되어 있기 때문에, 프로펠러 회전수의 제한에 의해 타력이 파랑 표류력을 보상하지 못하는 현상으로 해석된다. 따라서, EEDI에서 제안한 최소추진출력을 만족하는 엔진이라도, 환경외란의 영향이 최소 추진추력을 크게 저하하지 않거나, 보수적인 추진출력을 설계하는 것이 환경외란 중 선박의 충돌회피 안정성을 보장한다.

Figure 5.28는 S175 컨테이너선의 $\mathrm{RPS_{max}}$에 따른 충돌회피 결과이며 KVLCC2와 같은 경향을 보였다. 이에 대한 원인으로, WVO 알고리즘에 사용된 가용 속도와 실제 선박 동역학을 반영한 가용 속도 사이의 차이의 영향으로 보인다. 본 연구에서 이용한 가용 속도는 선속의 선형성을 가정하였으나, 실제 선박은 그렇지 못하다. Figure 5.29는 가정한 가용 속도와 선박 동역학을 반영한 가용 속도의 비교를 보여준다. Figure 5.29의 점선은 선속의 선형성을 가정하여 구성한 가용 속도이고, 실선은 MMG 모델을 기반으로 경로 추종 시뮬레이션을 수행한 결과이다. $\mathrm{RPS_{max}}$가 충분히 설정된 경우에는 가용 속도 사이에 차이가 상대적으로 작지만 $\mathrm{RPS_{max}} = 12$ 조건과 같이 작게 설정된 경우, 파랑이 흘러오는 방향으로 경로 추종을 수행하지

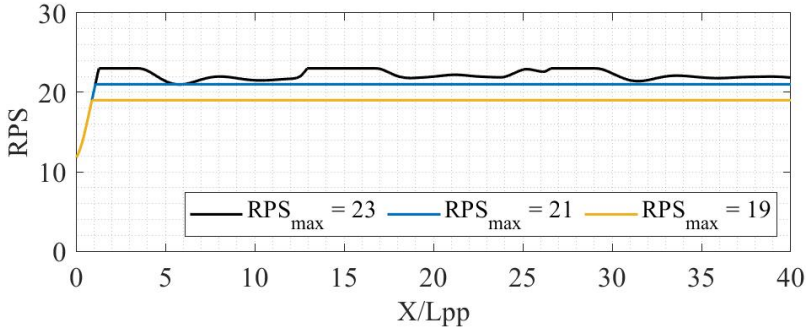
못하는 모습을 Figure 5.29(a)와 5.29(b)에서 확인할 수 있다. 환경외란이 작용하는 경우 선박의 추진기 성능에 따라 가용 속도가 크게 변함을 확인하였다. 따라서 환경외란 중 선박의 충돌회피 시 가용 속도 설정에 유의해야 한다.



(a) Trajectories of collision avoidance

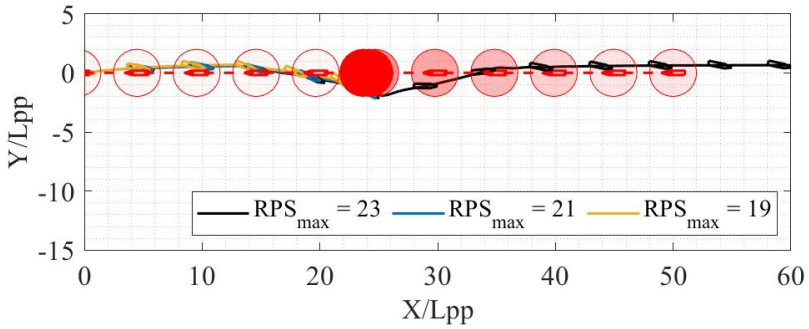


(b) Cross track of of collision avoidance

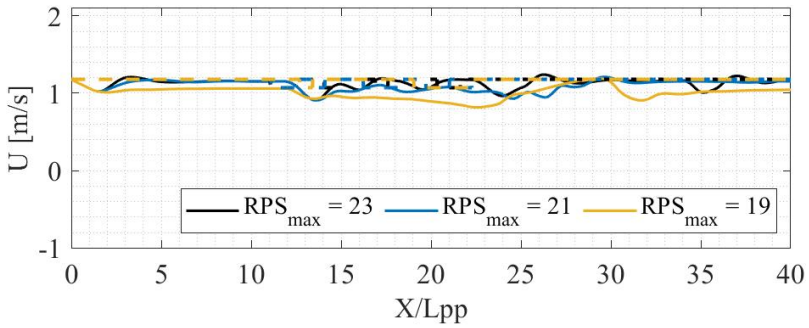


(c) Relative distance of collision avoidance

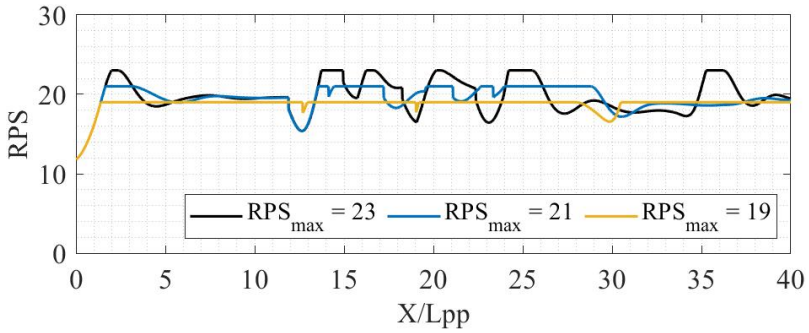
Figure 5.26: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation ($\chi = 180°, \lambda/L = 1.0, \mathrm{A/L} = 0.015$)



(a) Trajectories of collision avoidance



(b) Cross track of of collision avoidance



(c) Relative distance of collision avoidance

Figure 5.27: Collision avoidance maneuver of KVLCC2 in head on situation ($\chi = 90°, \lambda/L = 0.7, \mathrm{A/L} = 0.015$)

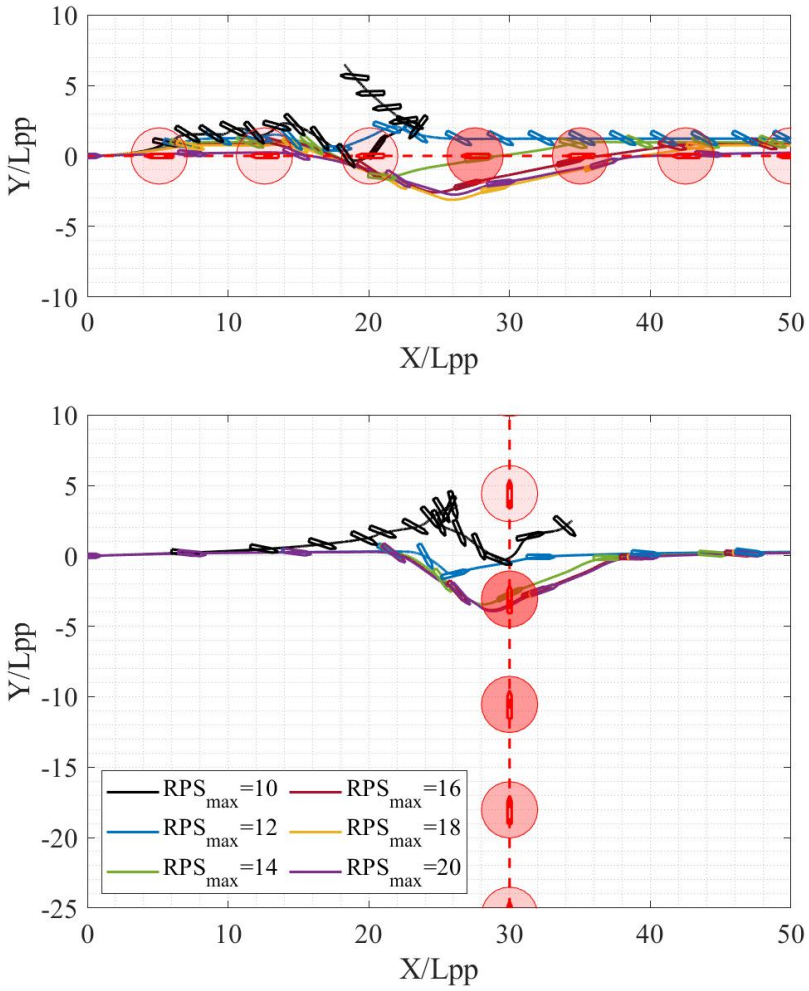
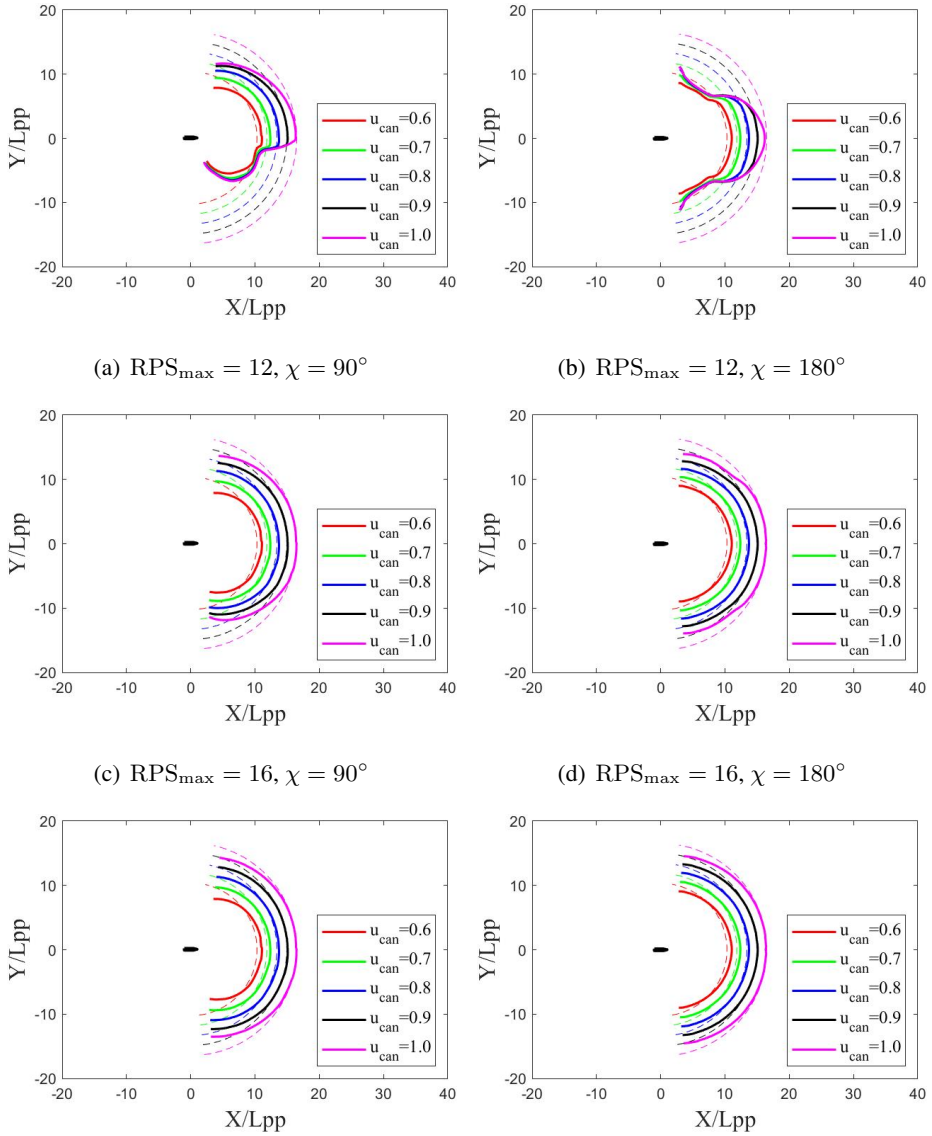


Figure 5.28: Collision avoidance maneuver of S175 containership in waves ($\chi = 90°, \lambda/L = 0.7, \mathrm{A/L} = 0.0225$)



(a) $\mathrm{RPS}_{\max} = 12, \chi = 90°$ (b) $\mathrm{RPS}_{\max} = 12, \chi = 180°$

(c) $\mathrm{RPS}_{\max} = 16, \chi = 90°$ (d) $\mathrm{RPS}_{\max} = 16, \chi = 180°$

(e) $\mathrm{RPS}_{\max} = 20, \chi = 90°$ (f) $\mathrm{RPS}_{\max} = 20, \chi = 180°$

Figure 5.29: Comparing assumed RV with ship dynamic based RV, S175 containership

제 6 장 결론

본 논문에서는 선박의 파랑 중 충돌회피 시뮬레이터를 개발하고, 수치 시뮬레이션을 통해 파랑 효과에 의한 충돌회피 성능을 평가하였다. 선박의 조종 운동을 모사하기 위해, MMG 모델을 기반으로 선박의 조종 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이터의 검증을 위해 정수 중 선회시험 및 지그재그 시험을 수행하고 실험 결과와 비교 검증을 진행하였다. 파랑 표류력은 시간영역 3D 랜킨 패널 방법을 이용한 프로그램인 WISH를 통해 계산하였고, 선행 연구의 모형시험 결과와 비교를 통해 검증하였다. 또한 파랑 중 선회시험에 대한 모형시험과의 비교를 통해 선박의 조종 시뮬레이션 결과의 타당성을 확인하였다.

선박의 충돌회피 기법으로 WVO 기법을 채택하였다. VO 기법은 다수의 동적 장애물 회피에 특화되어 있으며, 센서 정보를 바탕으로 충돌회피를 수행하는 지역 경로계획을 대표한다. 또한 선박의 충돌회피 경로계획에 있어 국제해상충돌예방 규칙을 따르도록 설계하였다. 국제해상충돌예방규칙에서 정의하는 선박 간 조우 상황인 head on, crossing, overtaking 상황에 대해 정수 중 충돌회피 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 또한 다수의 선박과 동시에 조우하는 상황을 설정하여 복잡한 환경에서도 성공적으로 충돌회피를 수행하는 모습을 확인하였다.

파랑 중 조종 시뮬레이션과 WVO 기반 충돌회피 경로계획 알고리즘과의 결합을 통해 파랑 중 충돌회피 시뮬레이터를 개발하였다. 규칙파의 파향, 파고, 그리고 파장의 영향을 평가하기 위한 지표로 XTE와 상대 거리를 이용하였다. 파고가 높을수록, 파장이 짧을수록 혹은 선수파 상황에서 파장 비 1.0 부근인 경우, 선수 사파 조건에서 각각 높은 XTE를 관찰할 수 있었으며, 이는 파랑 표류력 계산 결과와 같은 경향성을 가진다. 따라서 높은 환경외란 하에서 운항하는 경우 더욱 보수적인 경로

계획이 권장된다.

선박의 프로펠러 회전수를 제한함으로써 선박의 추진기 성능이 제한된 상황을 연출하였다. SSPA에서 수행한 최소추진출력 관련 사례 연구를 바탕으로 기준 RPS_{max} 조건을 결정하였으며, 파랑 중 선박의 추진기 추력 감소에 관한 연구를 참고하였다. 추진기 성능이 제한된 경우, 충돌회피 시뮬레이션 결과 큰 XTE와 작은 상대거리를 보였으며, 이는 충돌회피 성능 저하를 의미한다. 이는 추진기 성능이 제한됨에 따라 기존 가용 속도의 선속의 선형성에 대한 가정이 유효하지 않게 되었기 때문이다. RPS_{max}가 충분히 크게 설정된 경우, 선형성이 가정된 가용 속도와 선박 동역학을 반영한 가용 속도 사이의 차이가 작았지만, RPS_{max} 조건이 환경외란을 극복하지 못하는 수준으로 설정된 경우 두 가용 속도 사이에 큰 차이를 보였다. 이를 통해 환경외란 중 충돌회피 시 적절한 가용 속도 선정 방법이 고안되어야 하며, 보수적인 속도 벡터 선정이 필요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 선박의 충돌회피 모듈은 자선만 탑재하고 있는 경우에 대한 결과이다. 향후 연구로, 항만과 같이 복잡한 해상 교통 상황에서의 활용을 위하여 다수의 에이전트를 다룰 수 있도록 충돌회피 알고리즘의 확장이 필요하다. 이를 위해 VO 알고리즘에의 고도화가 필요하다. 다수의 에이전트 상황으로의 확장을 위한 대표적인 예로 RVO가 존재한다. 또한 선박 동역학을 반영할 수 있는 가용 속도 선정 방법에 대한 고찰을 통해 환경외란 중 충돌회피 알고리즘의 성능을 개선할 수 있다. 자선의 가속도를 일정하게 가정하거나 가속도의 제한을 설정하여 가용 속도를 설정하는 방식이 있을 수 있으며 DWA 방법이나 CVM 방법을 응용할 수 있다. 선박에 작용하는 외력 관점에서는, 계산된 규칙파 중 파랑 표류력 결과를 바탕으로 불규칙파 중 충돌회피 성능 평가를 진행할 수 있다. 또한 바람, 조류와 같이 주 방향이 있는 환경외란을 추가하여 실제 해상상태를 정도 높게 구현 가능하다. 이를 통해 실제 해상상태와 유사한 상황에서 충돌회피 시뮬레이션을 진행할 수 있으며 충돌회피 알고리즘이 유효한 상황을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

Bibliography

[1] Han, J., Cho, Y., Kim, J., Kim, J., Son, N. S., & Kim, S. Y. (2020). Autonomous collision detection and avoidance for ARAGON USV: Development and field tests. Journal of Field Robotics, 37(6), 987-1002.

[2] Fujii, Yahei, and Kenichi Tanaka. "Traffic capacity." The Journal of navigation 24.4 (1971): 543-552.

[3] Kouzuki, A., and K. Hasegawa. "Automatic collision avoidance system for ships using fuzzy control." J Kansai Soc Nav Archit Jpn 205 (1987): 1-10.

[4] Goodwin, Elisabeth M. "A statistical study of ship domains." The Journal of navigation 28.3 (1975): 328-344.

[5] Coldwell, T. G. "Marine traffic behaviour in restricted waters." The Journal of Navigation 36.3 (1983): 430-444.

[6] Kijima, Katsuro, and Yoshitaka Furukawa. "Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area." IFAC Proceedings Volumes 36.21 (2003): 223-228.

[7] Kijima, Katsuro, and Yoshitaka Furukawa. "Design of automatic collision avoidance system using fuzzy inference." IFAC Proceedings Volumes 34.7 (2001): 65-70.

[8] Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zarzhitsky, D., & Huntsberger, T. L. (2013). Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 39(1), 110-119.

[9] Kufoalor, D. Kwame Minde, Edmund Førland Brekke, and Tor Arne Johansen. "Proactive collision avoidance for ASVs using a dynamic reciprocal velocity obstacles method." 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018.

[10] Stenersen, Thomas. Guidance system for autonomous surface vehicles. MS thesis. NTNU, 2015.

[11] Woo, Joohyun, and Nakwan Kim. "Collision avoidance for an unmanned surface vehicle using deep reinforcement learning." Ocean Engineering 199 (2020): 107001.

[12] Fossen, Thor I. "Marine control systems–guidance. navigation, and control of ships, rigs and underwater vehicles." Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, Org. Number NO 985 195 005 MVA, www. marinecybernetics. com, ISBN: 82 92356 00 2 (2002).

[13] Fossen, Thor I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, 2011.

[14] Singh, Y., Sharma, S., Sutton, R., Hatton, D., & Khan, A. (2018). A constrained A* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents. Ocean Engineering, 169, 187-201.

[15] Liu, C., Mao, Q., Chu, X., & Xie, S. (2019). An improved A-star algorithm considering water current, traffic separation and berthing for vessel path planning. Applied Sciences, 9(6), 1057.

[16] Kim, H., Lee, T., Chung, H., Son, N., & Myung, H. (2012, May). Any-angle path planning with limit-cycle circle set for marine surface vehicle. In 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 2275-2280). IEEE.

[17] ZHANG, J., ZHAO, H., WANG, N., & GUO, C. (2021). Fuzzy dual-window DWA algorithm for USV in dense obstacle conditions. CHINESE JOURNAL OF SHIP RESEARCH, 16(6).

[18] Kluge, Boris, and Erwin Prassler. ”Recursive probabilistic velocity obstacles for reflective navigation.” Field and Service Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003.

[19] Van den Berg, Jur, Ming Lin, and Dinesh Manocha. ”Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation.” 2008 IEEE international conference on robotics and automation. Ieee, 2008.

[20] Large, F., Sckhavat, S., Shiller, Z., & Laugier, C. (2002, December). Using non-linear velocity obstacles to plan motions in a dynamic environment. In 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002. (Vol. 2, pp. 734-739). IEEE.

[21] Wilkie, David, Jur Van Den Berg, and Dinesh Manocha. ”Generalized velocity obstacles.” 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009.

[22] 우주현. 심층강화학습을 이용한 무인수상선의 충돌회피. Diss. 서울대학교 대학원, 2018.

[23] Kufoalor, D. Kwame Minde, Edmund Førland Brekke, and Tor Arne Johansen. ”Proactive collision avoidance for ASVs using a dynamic reciprocal velocity obstacles method.” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018.

[24] Cho, Y., Han, J., Kim, J., Lee, P., & Park, S. B. (2019). Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles. IFAC-PapersOnLine, 52(21), 329-334.

[25] Xia, G., Han, Z., Zhao, B., & Wang, X. (2020). Unmanned Surface Vehicle Collision Avoidance Trajectory Planning in an Uncertain Environment. IEEE Access, 8, 207844-207857.

[26] Lee, T., Kim, H., Chung, H., Bang, Y., & Myung, H. (2015). Energy efficient path planning for a marine surface vehicle considering heading angle. Ocean Engineering, 107, 118-131.

[27] 유영준. 충돌비율을 이용한 선박충돌회피 알고리즘의 개발. Diss. 서울대학교 대학원, 2013.

[28] Kim, H., Kim, D., Shin, J. U., Kim, H., & Myung, H. (2014). Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles. Ocean Engineering, 84, 37-44.

[29] Seo, J. H., Lee, C. M., Yu, J. W., Choi, J. E., & Lee, I. (2020). Power increase and propulsive characteristics in regular head waves of KVLCC2 using model tests. Ocean Engineering, 216, 108058.

[30] Yasukawa, Hironori, and Y. Yoshimura. ”Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions.” Journal of Marine Science and Technology 20.1 (2015): 37-52.

[31] 김희수. ”선박안전영역이 고려된 최적속도벡터 선정을 통한 운항 선박의 지역 경로계획에 관한 연구.” 국내석사학위논문 인하대학교 대학원, 2019. 인천

[32] Campos, Daniel Filipe, Aníbal Matos, and Andry Maykol Pinto. ”An adaptive velocity obstacle avoidance algorithm for autonomous surface vehicles.” 2019

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019.

[33] Song, A. L., Su, B. Y., Dong, C. Z., Shen, D. W., Xiang, E. Z., & Mao, F. P. (2018). A two-level dynamic obstacle avoidance algorithm for unmanned surface vehicles. Ocean Engineering, 170, 351-360.

[34] Kim, J. S., Lee, D. H., Kim, D. W., Park, H., Paik, K. J., & Kim, S. (2022). A numerical and experimental study on the obstacle collision avoidance system using a 2D LiDAR sensor for an autonomous surface vehicle. Ocean Engineering, 257, 111508.

[35] Nakos, Dimitris E. Ship wave patterns and motions by a three dimensional Rankine panel method. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 1990.

[36] Kring, David Charles. Time domain ship motions by a three-dimensional Rankine panel method. Diss. Massachusetts institute of technology, 1994.

[37] 중앙해양안전심판원. (2021). 2021년 해양사고 통계. 18pg [Online] Available at: https://www.kmst.go.kr/web/board.do?menuIdx=135 [Accessed 6 July 2022]

[38] 중앙해양안전심판원. (2021). 2021년 해양사고 통계. 180 183pg [Online] Available at: https://www.kmst.go.kr/web/board.do?menuIdx=135 [Accessed 6 July 2022]

[39] Kose K, Yumuro A, Yoshimura Y (1981) III. Concrete of mathematical model for ship manoeuvring. In: Proceedings of the 3rd symposium on ship maneuverability, Society of Naval Architects of Japan, pp 27–80 (in Japanese)

[40] Evan Ackerman. ”Clearpath Robotics Introduces Kingfisher M200” IEEE.org https://spectrum.ieee.org/iros-2012-clearpath-robotics-introduces-kingfisher-m200 (accessed JUL. 24, 2022)

[41] Raghavi Joshi. ”C-Enduro Autonomous Surface Vehicle” naval-technology.com https://www.naval-technology.com/projects/c-enduro-autonomous-surface-vehicle/ (accessed JUL. 24, 2022)

[42] Julian Turner. ”Sea Hunter: inside the US Navy’s autonomous submarine tracking vessel” naval-technology.com https://www.naval-technology.com/analysis/sea-hunter-inside-us-navys-autonomous-submarine-tracking-vessel/ (accessed JUL. 24, 2022)

[43] Hans Anton Tvete. ”The ReVolt A new inspirational ship concept” dnv.com https://www.dnv.com/technology-innovation/revolt/ (accessed JUL. 24, 2022)

[44] Nam Kwang-sik. ”Samsung Heavy succeeds in operating remote autonomous ship” yna.co.kr https://en.yna.co.kr/view/AEN20201019004400320 (accessed JUL. 24, 2022)

[45] Rachel Rowney. ”Insight into Avikus’ autonomous vessels” superyachtnews.com https://www.superyachtnews.com/technology/insight-into-avikus-autonomous-vessels (accessed JUL. 24, 2022)

[46] Yasukawa, Hironori. ”Simulations of Ship Maneuvering in Waves (1 st report: turning motion).” Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 4 (2006): 127-136.

[47] FUJII, Hitoshi, and Tatuo TUDA. ”Experimental researches on rudder performance.(2).” Journal of Zosen Kiokai 1961.110 (1961): 31-42.

[48] Arimura, Nobuo, and K. Yamada. ”DEVELOPMENT OF COLLISION PREVENTING SUPPORT SYSTEM-MODEL OF EVALUATION INDICES FOR NAVIGATION.” (1994).

[49] Kadono, A., and R. Yamasaki. ”On turning qualities of ships.” Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects 56 (1978): 23-31.

[50] Colley, B. A., R. G. Curtis, and C. T. Stockel. "Manoeuvring times, domains and arenas." The Journal of Navigation 36.2 (1983): 324-328.

[51] Lee, Han-Jin, and Key Pyo Rhee. "Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm." International shipbuilding progress 48.3 (2001): 197-212.

[52] IMO. Convention on the international regulations for preventing collisions at sea, 1972 (colregs), year = 1972, url = http://www.imo.org/en/about/conventions/listofconventions/pages/colreg.aspx.

[53] Tam, CheeKuang, and Richard Bucknall. "Collision risk assessment for ships." Journal of marine science and technology 15.3 (2010): 257-270.

[54] Zhang, J., Zhang, D., Yan, X., Haugen, S., & Soares, C. G. (2015). A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs. Ocean Engineering, 105, 336-348.

[55] Campbell, Sable, and Wasif Naeem. "A rule-based heuristic method for colregs-compliant collision avoidance for an unmanned surface vehicle." IFAC proceedings volumes 45.27 (2012): 386-391.

[56] Cho, Yonghoon, Jungwook Han, and Jinwhan Kim. "Efficient COLREG-compliant collision avoidance in multi-ship encounter situations." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (2020).

[57] Russell, Stuart J. Artificial intelligence a modern approach. Pearson Education, Inc., 2010.

[58] Fiorini, Paolo, and Zvi Shiller. "Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles." The international journal of robotics research 17.7 (1998): 760-772.

[59] Sakamoto, N., Ohashi, K., Araki, M., Kume, K. I., & Kobayashi, H. (2019). Identification of KVLCC2 manoeuvring parameters for a modular-type mathematical model by RaNS method with an overset approach. Ocean Engineering, 188, 106257.

[60] Yasukawa, Hironori. "Simulations of ship maneuvering in waves (2nd report: Zig-zag and stopping maneuvers)." Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 7.0 (2008): 163-170.

[61] Kim, D. J., Choi, H., Yun, K., Yeo, D. J., & Kim, Y. G. (2022). Experimental study on turning characteristics of KVLCC2 tanker in long-crested irregular waves. Ocean Engineering, 244, 110362.

[62] 황승현. "조종 내항 통합 모델을 이용한 파랑 중 선박의 조종운동 해석." 국내석사학위논문 서울대학교 대학원, 2010.

[63] Seo, M. G., Ha, Y. J., Nam, B. W., & Kim, Y. (2021). Experimental and numerical analysis of wave drift force on KVLCC2 moving in oblique waves. Journal of Marine Science and Engineering, 9(2), 136.

[64] Lee, J., Nam, B. W., Lee, J. H., & Kim, Y. (2021). Development of Enhanced Two-Time-Scale Model for Simulation of Ship Maneuvering in Ocean Waves. Journal of Marine Science and Engineering, 9(7), 700.

[65] Seo, Min-Guk, Bo Woo Nam, and Yeon-Gyu Kim. "Numerical evaluation of ship turning performance in regular and irregular waves." Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 142.2 (2020): 021202.

[66] Seo, Min-Guk, Bo Woo Nam, and Yeon-gyu Kim. "Numerical Evaluation of Ship Maneuvering Performance in Waves." International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vol. 51265. American Society of Mechanical Engineers, 2018.

[67] Kim, D. J., Yun, K., Park, J. Y., Yeo, D. J., & Kim, Y. G. (2019). Experimental investigation on turning characteristics of KVLCC2 tanker in regular waves. Ocean Engineering, 175, 197-206.

[68] Gerhardt, F. C., Kjellberg, M., Korkmaz, B., Ljungqvist, K., & Shiri, A. (2020). Determining the EEDI "Minimum Propulsion Power". Influence of EEDI on Ship Design & Operation; Royal Institution of Naval Architects: London, UK, 1-15.

[69] Loe, Øivind Aleksander G. Collision avoidance for unmanned surface vehicles. MS thesis. Institutt for teknisk kybernetikk, 2008.

[70] Fox, Dieter, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun. "The dynamic window approach to collision avoidance." IEEE Robotics & Automation Magazine 4.1 (1997): 23-33.

[71] Simmons, Reid. "The curvature-velocity method for local obstacle avoidance." Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation. Vol. 4. IEEE, 1996.

[72] Kim, Y., Kim, K. H., Kim, J. H., Kim, T., Seo, M. G., & Kim, Y. (2011). Time-domain analysis of nonlinear motion responses and structural loads on ships and offshore structures: development of WISH programs. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 3(1), 37-52.