



# 완화된 제어장벽함수 제약이 적용된 MPC 기반 동적 장애물 회피 알고리즘의 최적화 연구

서진혁<sup>1</sup>·김시원<sup>1</sup>·김정현<sup>1</sup>·임선혁<sup>1</sup>·정성현<sup>1</sup>·강효은<sup>1</sup>·김낙완<sup>3</sup>·박종용<sup>1,2,†</sup>  
국립부경대학교 마린융합디자인공학과 조선해양전공<sup>1</sup>  
국립부경대학교 조선해양시스템공학과<sup>2</sup>  
서울대학교 미래혁신연구원<sup>3</sup>

## Optimization of a Dynamic Obstacle Avoidance Algorithm Based on MPC with Relaxed Control Barrier Function Constraints

Jin-Hyeok Seo<sup>1</sup>·Si-Won Kim<sup>1</sup>·Jeong-Hyeon Kim<sup>1</sup>·Sun-Hyuck Im<sup>1</sup>·Seong-Hyeon Jeong<sup>1</sup>·Hyo-Eun Kang<sup>1</sup>·  
Nak-Wan Kim<sup>3</sup>·Jong-Yong Park<sup>1,2,†</sup>  
Department of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Marine System Engineering, Pukyong National University<sup>2</sup>  
Seoul National University Future Innovation Institute<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper presents an rCBF-MPC (relaxed Control Barrier Function-Model Predictive Control) framework for robust collision avoidance of autonomous surface vessels (ASVs) in congested maritime environments. In coastal waters, multiple ASVs often operate in close proximity, dynamically changing their positions and significantly increasing the risk of collision. While advanced predictive control approaches can ensure safe navigation, complex multi-obstacle interactions and external uncertainties necessitate additional constraints to guarantee reliable safety margins. The proposed method integrates a relaxed Control Barrier Function into a discrete-time MPC structure. By defining and enforcing a mathematically rigorous safe set within the prediction horizon, the system effectively maintains adequate separation from potential hazards, simultaneously mitigating computational overhead typically associated with strict barrier functions. Model tests conducted with a twin-hull ASV demonstrate that the rCBF-MPC framework effectively maintains safe distances and achieves stable maneuvering. Compared to traditional velocity-obstacle-based methods, the proposed integrated approach offers enhanced robustness against sensor noise and rapidly changing traffic conditions, effectively addressing the limitations inherent in single-step avoidance strategies. In summary, this study provides an improved collision avoidance methodology with enhanced reliability, reduced computational complexity, and scalability suitable for real-world operations of autonomous surface vessels.

**Keywords** : Collision avoidance(충돌 회피), Control Barrier Function(CBF, 제어장벽함수), Model Predictive Control(MPC, 모델 예측 제어), Autonomous Surface Vehicle(ASV, 자율운항선박)

## 1. 서론

항만 인근 해역은 정박 중인 선박과 운항 중인 선박이 뒤섞여 있어 충돌사고 위험이 상당히 높다. 실제로 2024년 한 해에만 전 세계적으로 보고된 해상 사고와 인명 피해가 약 10% 증가했으며, 충돌, 좌초 등 주요 사고 유형이 여전히 빈발하는 것으로 알려져 있다 (Allianz Global Corporate & Specialty (Allianz),

2025). 이러한 위험을 완화하고 안전 운항을 강화하기 위해, 자율운항선박(Autonomous Surface Vehicle, ASV) 분야에서 충돌 회피 기술 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다.

복수의 동적 장애물이 존재하는 해역에서 안전 운항을 달성하기 위해서는, 국제해상충돌예방규칙(Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, COLREGs)을 엄격히 준수하면서 충돌 회피를 수행해야 한다

는 점이 강조된다 (Kuwata et al., 2014). 이를 위해 고도화된 예측 기반 제어가 필수적으로 요구되며, Event-Triggered NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) 접근 (Bae et al., 2023)처럼 예측 지평선(prediction horizon) 전반에서 자선 및 타선의 거동을 시뮬레이션하고, 필요 시 즉각적인 회피 기동을 수행하는 방식이 제안되고 있다. 그러나 센서 오차나 복수 장애물의 비선형 움직임을 완전히 예측하기 위해서는, 안전거리를 보장할 수 있는 추가적인 제약이 필요하다.

이러한 한계를 보완하고자, Fiorini and Shiller (1998)는 속도 장애물(Velocity Obstacle, VO) 개념을 제안하였으며, Van Den Berg et al. (2008)은 이를 확장한 상호속도장애물(Reciprocal Velocity Obstacle, RVO) 기법을 통해 상대 속도를 기반으로 단 시간 내 충돌 위험 영역을 회피하는 방안을 제시하였다. 이후 Kuwata et al. (2014)과 Kufoalor et al. (2018)은 RVO 기법에 COLREGs와 상호 협조적 기동 개념을 접목하여, ASV의 충돌 회피 성능을 향상시키고자 하였다. 또한, Cho and Kim (2017)은 선박 간 충돌 확률과 조종 의도를 결합해 복잡한 해역 상황을 정량적으로 평가하는 방안을 제안함으로써, 단순 접근만으로는 이러한 위험도를 충분히 해소하기 어렵다는 점을 시사하였다. 결과적으로, 기존 RVO 계열만으로는 해양 환경 특유의 복합 상호작용을 완벽히 처리하기에 한계가 남는다.

최근에는 제어장벽함수(Control Barrier Function, CBF)가 시스템이 수학적으로 정의한 안전 집합(safe set)을 이탈하지 않도록 불평등 제약을 부과해 충돌 회피를 강건하게 보장할 수 있는 또 다른 대안으로 주목받고 있다 (Wang et al., 2017; Huang and Chen, 2021). 특히, rCBF(relaxed Control Barrier Function)는 외란이나 복잡한 해상 환경에서도 유연한 안전 제약을 적용할 수 있어 다양한 연구가 이루어지는 중이다. Von Ellenrieder and Camurri (2024)는 rCBF를 적용하여 최소 안전거리를 유지하는 충돌 회피 기법을 제시하고, 이를 통해 계산량 절감과 안정성 확보를 동시에 추진하였다. 그러나 해당 연구에서 rCBF가 장애 시점 전 구간을 전면적으로 포괄하는 예측 제어로 설계되지 않았으므로, 복수 장애물의 복합적인 동적 상호작용을 보다 선제적으로 반영하기 위해서는 예측 지평선을 한층 확대하고, 미래 상태변화를 전 구간에서 분석할 수 있는 종합적 방안이 필수적으로 요구된다.

본 연구는 이러한 배경에서, 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)와 rCBF를 2차 계획법(Quadratic Programming, QP)으로 결합한 rCBF-MPC 기법을 제안한다. 이는 예측 지평선 전반에서 자선과 장애물의 미래 거동을 모사하고, rCBF를 통해 수학적으로 안전 집합을 유지하도록 유도함으로써, 기존 rCBF 접근이 전제하는 단일 시점 해석의 한계를 보완한다. 또한 Fu et al. (2023)와 Xue et al. (2021) 등이 제시한 비선형 외란 보상 및 실시간 연산 기법을 결합할 경우, 해상 충돌 회피 성능을 한층 더 높일 수 있을 것으로 기대된다. 국립창원대학교 수조 시설에서 자율운항모형선을 이용해 모형 시험을 수행한 결과, 선형 모델이라는 제한적 조건에도 불구하고 안전거리 확보와 경로 복귀 시간 단축을 동시에 달성함을 확인하였다.

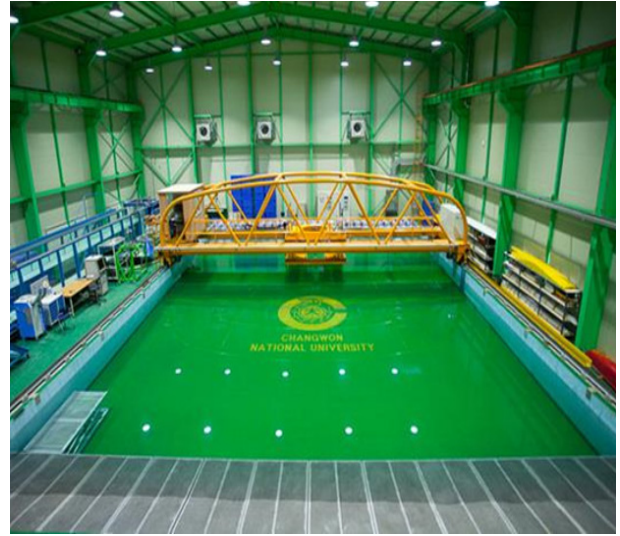


Fig. 1 Changwon National University 3D wave tank

## 2. 시험 구성

### 2.1 시험 환경

본 연구에서는 MPC 기반 충돌 회피 알고리즘의 시험적 검증을 위하여 국립창원대학교 조선해양공학과와 선형 수조(L x B x D = 20m x 14m x 1.5m)를 이용하여 자유 항주 모형선을 활용한 충돌 회피 시험을 수행하였다. 본 수조는 모형선의 저속 기동 및 제어 알고리즘 성능 평가에 적합한 크기와 조건을 갖추고 있다. 실제 수조의 모습은 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 모형선

시험에 사용된 모형선은 두 척 모두 카타마란 형태로 설계·제작되었다. 모형선의 주요 제원을 Table 1에 나타내었으며, 모형선의 모습은 Fig. 2에 제시하였다.

이와 같이 실제 수조 시설과 모형선을 기반으로 한 시험 환경을 구축함으로써, 설계된 MPC 기반 충돌 회피 알고리즘의 성능을 보다 신뢰성 있게 평가하고, 시뮬레이션과 실제 시험 간의 성능 차이를 명확히 분석할 수 있는 기반을 마련하였다.

Table 1 Principle dimensions of the model ship

| Specifications | Dimensions |
|----------------|------------|
| Length [m]     | 1.2        |
| Breadth [m]    | 0.65       |
| Draft [m]      | 0.26       |
| Depth [m]      | 0.50       |
| Weight [kg]    | 50.0       |

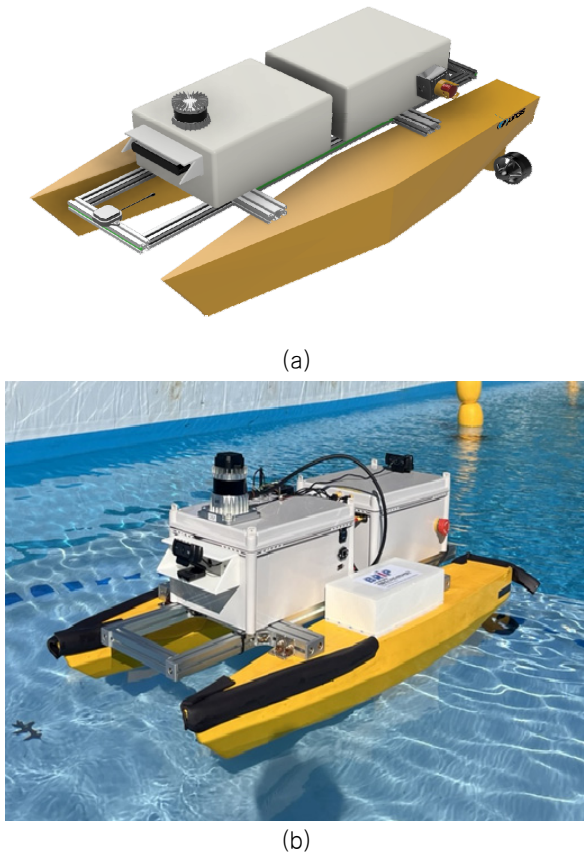


Fig. 2 (a) Rendered image of the Twin-hull model ship equipped with sensors and control systems, (b) Actual Twin-hull model ship with sensors and control systems

### 2.3 항법 시스템

모형선에는 정확한 위치, 속도 및 자세 정보를 획득하여 실시간 제어를 수행하기 위한 센서 및 항법 시스템이 탑재되었다. 자선의 위치 및 속도는 3D-LiDAR(3Dimensional-Light Detection and Ranging) 및 IMU(Inertial Measurement Unit)를 활용한 3D LiDAR SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)알고리즘을 통해 추정한다.

자선과 타선의 위치 정보는 ROS 2(Robot Operating System 2) 기반의 통신 네트워크를 통해 상호 공유되었다. 각 선박은 개별적으로 획득한 위치 및 자세 정보를 ROS 2 topic을 이용하여 실시간으로 전송한다. 모형선에 탑재된 주요 센서 및 장비의 모델과 사양은 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Main particular

| Particulars | Model                    |
|-------------|--------------------------|
| 3D-LiDAR    | Ouster OS1               |
| IMU         | Microstrain 3DM-GX5-AHRS |
| PC          | Jetson Orin AGX          |
| Thruster    | Blue Robotics T200       |

### 2.4 좌표계

본 연구에서 사용된 좌표계는 Fig. 3과 같다. 3D LiDAR SLAM을 통해 생성된 맵 고정 좌표계 ( $o_0 - x_0y_0$ )에서  $x_0 - y_0$  평면은 정수면과 일치한다. 또한, 선박 고정 좌표계 ( $o - xy$ )의 원점  $o$ 는 모형선의 중양(midship)에 위치하며,  $x$  축은 선수,  $y$  축은 횡방향으로 정의한다.

방위각 ( $\psi$ )은 맵 고정 좌표계의  $x_0$  축을 기준으로 선박 고정 좌표계의  $x$  축까지 시계 방향으로 측정한 각으로 정의한다. 선박 고정 좌표계에서의 정의되는 종방향 속도, 횡방향 속도, 각속도는 각각  $u$ ,  $v$ ,  $r$ 로 나타낸다.

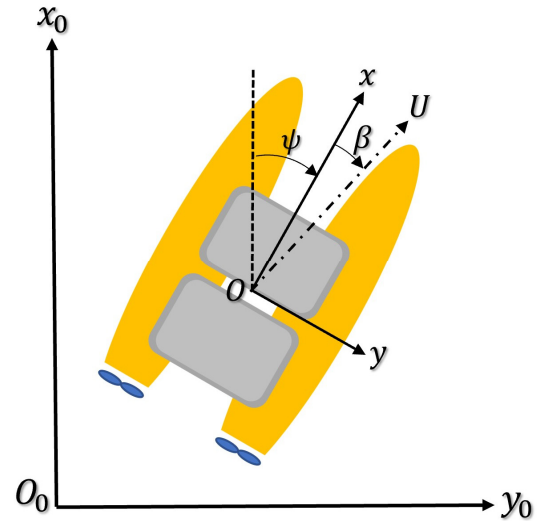


Fig. 3 Coordinate systems

## 3. 회피 알고리즘

### 3.1 동역학 모델

본 연구에서는 모형선의 2차원 평면상 운동을 고려하여, 위치, 자세 그리고 본체 기준 속도를 포함하는 6차 상태벡터  $\eta$ 를 정의하였다. 연속시간에서의 운동방정식은 동일한 모형선을 사용한 Kim et al. (2024)와 유사한 구조를 취하며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= A_n \eta + B_r \tau \\ \eta &= [x, y, \psi, u, v, r]^T \\ \tau &= [\tau_x, \tau_n]\end{aligned}\quad (1)$$

여기서  $A(\psi)$ 는 본체 기준 속도( $u, v$ )를 맵 좌표계로 변환하기 위한 행( $\cos\psi, \sin\psi$ )과, 시험 기반 식별로 구한 선형 계수를 포함한다.  $B$ 는 입력( $\tau_x, \tau_n$ )이 각 축 속도에 미치는 영향을 행

렬 형태로 반영한 것이다. sway-yaw간 상호작용 항이 포함되어 모형선의 비대칭 거동을 모델링한다.

### 3.2 모델 예측 제어

MPC는 모형선의 동역학을 기반으로 미래 상태와 제어 입력을 예측하고, 이들에 대한 비용 함수를 최소화하도록 최적의 입력을 산출하는 기법이다. 본 연구에서는 연속시간에서 정의된 ASV의 운동 방정식을 Forward Euler 방식으로 이산화하였으며, 그 결과 이산시간 스텝  $k$ 에서의 시스템 모델은 식 (2)로 표현된다.

$$\eta[k+1] = \eta[k] + \Delta t \cdot (A_n \eta[k] + B_r \tau[k]) \quad (2)$$

여기서  $\Delta t$ 는 이산화 시간 간격이며, 예측 지평선(prediction horizon,  $N$ ) 동안 미래 상태와 입력을 순차적으로 예측·결정하게 된다. Fig. 4는 예측 지평선 전 구간에서 시간 스텝  $k$ 마다 상태  $\eta[k]$ 와 제어 입력  $\tau[k]$ 가 어떻게 결정되는지를 개략적으로 나타낸다. 각 시점의 예측 상태  $\eta[k]$ 는 초기 상태  $\tau[0]$ 와 입력  $\tau[k]$ 의 시뮬레이션 결과로서, 식 (2)을 통해 계산되며, 식 (3)에 제시된 비용 함수를 최소화하는 최적 제어 입력이 도출된다.

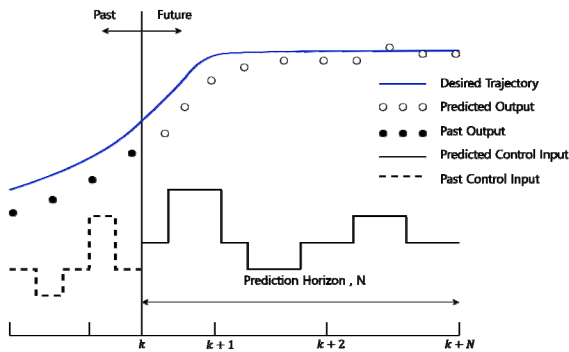


Fig. 4 Conceptual structure of MPC algorithm

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [(z[k] - z_d[k])^\top Q (z[k] - z_d[k]) + \tau[k]^\top R \tau[k] + (z[N] - z_d[N])^\top Q_f (z[N] - z_d[N])] \quad (3)$$

본 연구에서는  $z[k]$ 를  $k$ 번째 시점에서의 예측 상태로 정의하고  $z_d[k]$ 는  $k$ 번째 시점에서의 목표 상태이며,  $Q$ 와  $Q_f$ 는 각각 단계별 및 종단 상태 오차에 대한 가중치 행렬로, 자신이 목표 상태에 얼마나 정밀하게 도달하는지를 결정한다. 제어 입력의 사용량을 억제하기 위한 가중치 행렬로, 입력 크기가 커질수록 비용이 커지도록 설계하여 과도한 추진력이나 조향 각속도가 발생하지 않도록 유도한다. 식 (3)를 QP 형태로 변환하여 최적의 해를 구한다.

### 3.3 제어장벽함수

본 연구에서는 충돌 회피를 위한 안전 제약 조건으로 rCBF를 적용하였다. 장애물이 시간에 따라 움직이는 환경에서도 최소 안전거리를 유지하기 위해, 자신과 장애물 간 상대 위치를 바탕으로 동적으로 변화하는 안전 집합을 정의하고, 이를 제어 입력의 불평등 제약으로 환원한다. 이를 통해 자신이 목표를 추적하는 동안에도 안전 집합 내에서 운항하도록 보장할 수 있다.

rCBF는 식 (4)와 같은 비선형 시스템에서, 장벽함수  $B$ 의 도함수를 제어하여 시스템이 안전 집합 내에서 유지되도록 보장한다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u_c \quad (4)$$

장벽함수  $B > 0$ 을 만족하도록 설계되며, 이때의 시간 도함수가 식 (5)의 부등식을 만족할 때 안정적인 안전 집합 유지가 수학적으로 보장된다.

$$\inf_{u_c} \{ \nabla B(\tilde{x})^\top (f(\tilde{x}) + g(\tilde{x})u_c) \} < \alpha B(\tilde{x}, \tilde{x}_0) + \beta \quad (5)$$

$\alpha, \beta$ 는 양의 스칼라 이득(gain)이고,  $\tilde{x}$ 는 장애물과 자신의 상대 상태를 포함한 상태벡터이다. 또한 장애물 중심으로부터 최소 안전거리 이상 떨어지도록 식 (6)을 설정하면 물리적 충돌을 회피할 수 있다.

$$\|\tilde{x}_0\| = \|x - x_0\| \geq \|\tilde{x}_0\|_{\min} \quad (6)$$

본 논문에서는 거리 기반의 상대 위치를 활용해 식 (7)와 같은 rCBF를 정의하였다.

$$B(\tilde{x}, \tilde{x}_0) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\|\tilde{x}_0\|^{1/c} - \|\tilde{x}_0\|_{\min}^{1/c}} \right)^2 + \|\tilde{x}\|^2 \quad (7)$$

$\tilde{x}$ 는 목표 추적 오차,  $\tilde{x}_0$ 는 장애물과의 상대 위치,  $c$ 는 제어기의 민감도 조절을 위한 스칼라 상수다. 식 (7)에 의해 장벽함수의 기울기  $\nabla B$ 가 결정되며, 시간 도함수  $\dot{B}$ 를 식 (5) 형태의 부등식으로 관리함으로써 안전 반경을 보장한다.

### 3.4 rCBF 기반 제약

기존 rCBF 접근은 현재 시점에서만 식 (8)을 만족하는 최적 입력  $u_c$ 를 해석적으로 구할 수 있으며, 자세한 유도 과정은 Von Ellenrieder and Camurri (2024)에 제시되어 있다. 장애물이 매우 빠르게 이동하거나 선박의 운동 관성이 큰 경우, 단일 시점의 제약만으로는 회피 기동이 지연될 위험이 있다. 이를 보완하기 위

해, 본 연구에서는 식 (2)에 제시된 선형 이산 시스템과 rCBF 조건을 결합하였다.

$$\dot{B} \leq \alpha B + \beta \quad (8)$$

예측 지평선 내  $k$ 번째 시점의 상태벡터를  $z[k]$ 로 정의하며, 해당 벡터는 자선과 장애물 간 상대 위치 및 목표 오차 정보를 포함한다. 이때 각 스텝에서  $z[k]$ 가 시간에 따라 갱신됨에 따라, CBF 함수  $B$  또한 시간에 따라 변화하게 된다. 식 (9)에서는 1번째 시점의 상태 도함수  $\dot{z}[1]$ 을 사용하여 CBF의 시간 도함수  $\dot{B}$ 를 계산한다.

$$\dot{B} = \left( \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}_0} \right)^T \dot{z}[1] - \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}^T} \dot{x}_d - \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}_0^T} \dot{x}_0 \quad (9)$$

식 (10)에서는 rCBF 조건을 만족하는 제어 입력 제약식을 선형 형태로 정리하기 위해, 다음과 같은 항들을 정의하였다. 먼저  $A_{CBF}$ 는 상태 오차  $\tilde{x}$  및 장애물과의 상대 위치  $\tilde{x}_0$ 에 대한 CBF 함수의 편미분을 기반으로 구성되며, 제어 입력이  $\dot{B}$ 에 미치는 영향을 나타낸다.  $B_{CBF}$ 는 안정 계수  $\alpha, \beta$ 와 함께, 목표 궤적  $\dot{x}_d$  및 장애물과의 상대 속도  $\dot{x}_0$ 의 영향을 포함하는 항으로 구성된다.  $L$ 은 시스템 입력에 대한 Lie 도함수로 정의되며, 제어 입력이 CBF 제약 조건을 얼마나 만족시키는지 나타낸다.

이러한 항의 구성은 Von Ellenrieder and Camurri (2024)에서 제안한 rCBF 기반 안전 제어 구조를 참고하여 적용하였다.

$$\begin{aligned} A_{CBF} &\leq B_{CBF} \\ A_{CBF} &:= \left( \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}_0} \right)^T B, \\ B_{CBF} &:= \alpha B + \beta - LfB + \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}} \dot{x}_d - \frac{\partial B}{\partial \tilde{x}_0} \dot{x}_0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (11)은 QP 기반 MPC 정식화에 삽입된다. 예측 지평선 동안 미래 상태  $z[k]$ 에서 충돌 위험이 발생할 가능성이 파악되면, rCBF 제약이 활성화하여 제어 입력  $\tau$ 를 조정하게 된다.

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2} u^T H u + f^T u \\ & A_{CBF} \leq B_{CBF} \\ & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

$H$ 는 제어 입력에 대한 이차 비용 행렬,  $J$ 는 선형 항이며,  $A_{CBF}, B_{CBF}$ 는 안전거리 기반의 제약 조건으로 구성된다. rCBF 제약은 자신이 사전에 정의된 임계 거리 이내로 접근할 때에만 조건부로 활성화되며, 이를 통해 불필요한 계산을 줄이고 실시간 운용 가능성을 확보할 수 있다.

rCBF 조건을 MPC 프레임워크와 통합함으로써, 단순히 현재

시점의 회피만 고려하는 것이 아니라 미래 시점에서 발생할 수 있는 충돌 가능성을 선제적으로 반영하여 안정적인 회피 기동을 유도할 수 있다. 이는 계산 효율이 높고 해석적 특성이 명확한 CBF 방식의 장점을 유지하면서도, MPC의 미래 예측 능력을 통해 복잡한 해상 환경에서의 실시간 운용이 가능하도록 한다.

### 3.5 상호속도 장애물

본 연구에서는 RVO 기법을 활용하여 모형선의 충돌 회피를 위한 제약 조건을 정식화하였다. RVO는 VO 개념을 발전시킨 것으로, Reciprocal 개념을 추가하여 다수의 동적 장애물이 있는 상황에서도 양측 속도를 조정해 충돌 회피할 수 있도록 확장하였다.

RVO 기법은 자선과 장애물의 상대 속도를 분석하여, 충돌 위험이 존재하는 속도 영역을 반평면 제약 형태로 표현한다. 예측 지평선 상의 벡터  $z[k]$ 에서, 자선 속도와 장애물 추정 속도  $v_{obs}$ 를 사용해 식 (12)와 같이 상대 속도  $v_r$ 를 계산한다.

$$v_r = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} - v_{obs} \quad (12)$$

상대 위치  $\Delta p$ 를 통해 식 (13)와 같이 단위 법선 벡터  $n$ 을 정의한다.

$$n = \frac{\Delta p}{\|\Delta p\|} \quad (13)$$

상대 속도가 RVO 경계면을 벗어난 영역에 위치하도록 제어 입력을 제한하면 회피가 가능하다. 식 (14)는 이러한 반평면 제약을 내적 형태로 나타낸 것이다.

$$(\Delta v - v_{avo})^T n \geq 0 \quad (14)$$

$v_{obs}$ 는 장애물 움직임을 고려해 보정된 안전 속도이다. 만약  $v_r$ 가 위험 구역으로 진입할 우려가 있으면, 이 반평면 조건을 통해 자선 속도를 조정하여 안전거리를 확보한다.

### 3.6 RVO 기반 제약

자선의 운동을 선형 이산 시스템으로 근사하고, 이를 통해 예측된 속도에 RVO 제약 조건을 부과한다. 식 (2)에 제시된 선형 이산 시스템과 RVO를 결합하여, 다음 시점에서 계산되는 예측 속도가 식 (14)에서 정의된 충돌 회피 영역을 벗어나도록 설정한다. 이를 위하여, 식 (15)와 같은 선형 불평등 형태의 RVO 제약을 만족하게 하도록  $\tau$ 를 제한한다.

$$A_{RVO} \tau[0] \leq b_{RVO} \quad (15)$$

$A_{RVO}$ 는 입력 행렬  $B$ 에서 속도 항을 추출해 구성하고,

$b_{RVO}$ 는 제어 입력이 0일 때의 예측 속도를 기준으로 설정한다. 이러한 RVO 제약을 식 (16)의 QP 기반 MPC 정식화에 삽입함으로써, 예측 지평선 전 구간에서 충돌 위험이 감지되면 RVO 제약이 활성화되어 자선의 속도를 제한한다.

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2}u^THu + f^Tu \\ & A_{RVO} \leq b_{RVO} \\ & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (16)$$

RVO 기법을 MPC 최적화에 결합하여, 예측 지평선 동안 장애물과의 상대 속도를 시뮬레이션하고, 필요시 반평면 제약을 통해 회피 기동을 유도하도록 설계하였다.

## 4. 시뮬레이션 및 성능 분석

본 장에서는 앞서 설계한 MPC에 rCBF와 RVO 기반의 제약 조건을 각각 적용한 후, 다양한 충돌 회피 시나리오에서의 성능을 비교·분석한다.

### 4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션의 주요 파라미터를 Table 3에 나타내었다. 상태 가중치  $Q$  행렬은 선속도( $u$ ), 회전속도( $r$ ), 방위각 오차( $\psi$ ) 항목에 높은 가중치를 부여하여 항로 추종 성능과 자세 안정성을 강조하였다. 제어 입력 가중치 행렬  $R$ 은 과도한 제어 입력을 제한하는 수준으로 설정하였으며, 종단 상태 오차 가중치  $Q_f$ 는 상태 가중치  $Q$ 와 동일하게 구성하였다.

Table 3 General simulation parameters

| Sampling time [s] | Prediction horizon | Ownship radius [m] | Obstacle radius [m] |
|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 0.1               | 30                 | 1.2                | 1.2                 |

### 4.2 회피 시나리오 결과

COLREGs를 참고하여, 실제 해상에서 선박이 빈번히 마주칠 수 있는 4가지 시나리오를 선정하였다. 각 시나리오 별 초기 위치, 속도, 장애물 특성은 Table 4에 제시하였다.

Table 4 Scenario-specific parameters

| Scenario | Ownship initial position [m] | Obstacle initial position [m] | Obstacle speed [m/s] | Safe radius | Encounter type  | Avoidance responsibility |
|----------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
| 1        | (0,0)                        | (20, 0)                       | 1.2                  | 1.5         | Head-on         | Ownship                  |
| 2        | (0,0)                        | (6,-10)                       | 1.2                  | 1.5         | Crossing        | Ownship                  |
| 3        | (0,0)                        | (2, 0)                        | 0.5                  | 1.5         | Overtaking      | Ownship                  |
| 4        | (0,0)                        | (10, 0)                       | 0.0                  | 1.5         | Static Obstacle | Ownship                  |

각 시나리오에 대해 rCBF와 RVO기반 제약을 각각 적용한 MPC를 구동하고, 경로 추종 및 충돌 회피 성능을 비교하였다. Figs. 5 ~ 12에는 시나리오 별 자선의 궤적, 상태변화 및 제어 입력 추이를 나타내었다.

각 회피 시나리오가 COLREGs의 주요 규칙에 부합하는지를 검토하기 위해, Rule 13(overtaking), Rule 14(head-on), Rule 15(crossing)을 기준으로 자선의 회피 기동이 해당 규칙을 준수하는지를 분석하여 Table 5에 정리하였다.

본 연구는 자선만이 회피 기동을 수행하고, 타선은 항로를 유지하는 단방향 회피 구조를 기반으로 하기 때문에, 일부 시나리오에서는 COLREGs 상의 엄밀한 규칙 준수가 어려울 수 있다는 한계가 존재한다.

Table 6은 시나리오 별 최소 회피 거리, 최대 경로 이탈, 경로 복귀 시간 등을 요약한 결과로써, rCBF와 RVO의 특징을 정량적으로 비교한다.

시뮬레이션 결과, rCBF 제약은 장애물과의 안전거리를 유지하며 안정적인 회피를 수행할 뿐 아니라, 경로 복귀 시간도 상대적으로 짧아 신속한 항로 복귀를 달성했다. 반면, RVO 제약은 적극적인 회피를 통해 빠르게 장애물을 회피하는 장점이 있으나, 회피 과정에서 경로 이탈 폭이 커지고, 해상 환경에 따라 추가 안정화가 필요할 수 있었다.

## 5. 시험 결과 및 분석

앞서 설계한 MPC 기반 제어기(rCBF 및 RVO 제약 조건 적용)의 실험적 유효성을 검증하기 위하여, 국립해양대학교 조선해양 공학과의 수조 시험 시설을 이용한 모형 시험을 수행하였다.

### 5.1 시험 시나리오 구성

시뮬레이션에서 다루었던 충돌 회피 시나리오 중 대표적으로 2가지 상황을 선택하여 실제 시험을 진행하였다. 각 시나리오 별 초기 조건은 Table 7에 나타내었다.

### 5.2 시험 시나리오 결과

각 시나리오에 대해 rCBF 및 RVO 제어 알고리즘을 각각 적용하였으며, 신뢰성을 확보하기 위해 동일 조건에서 3회 이상 반복 수행한 뒤 평균값을 비교·분석하였다. Figs. 13 ~ 16에는 시나리

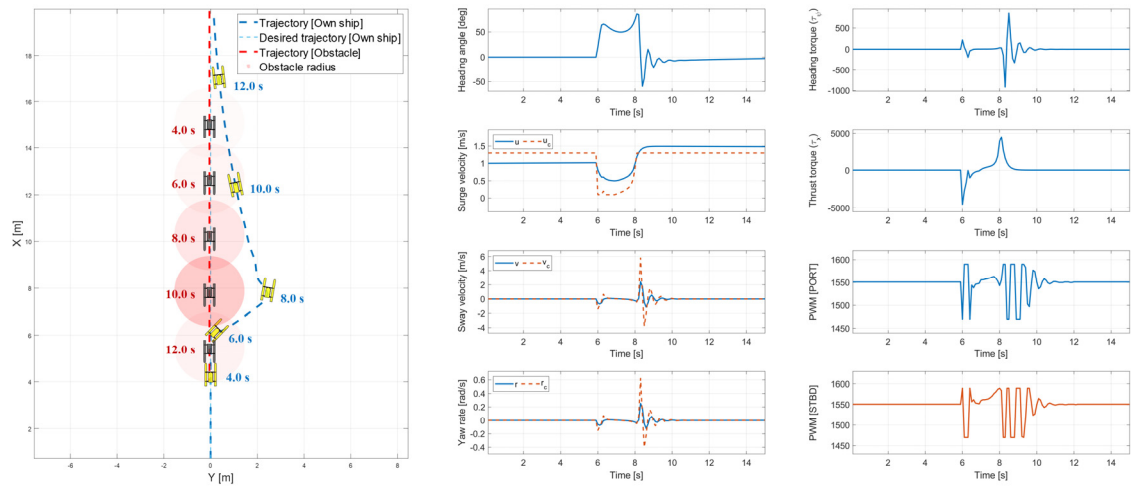


Fig. 5 rCBF-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 1)

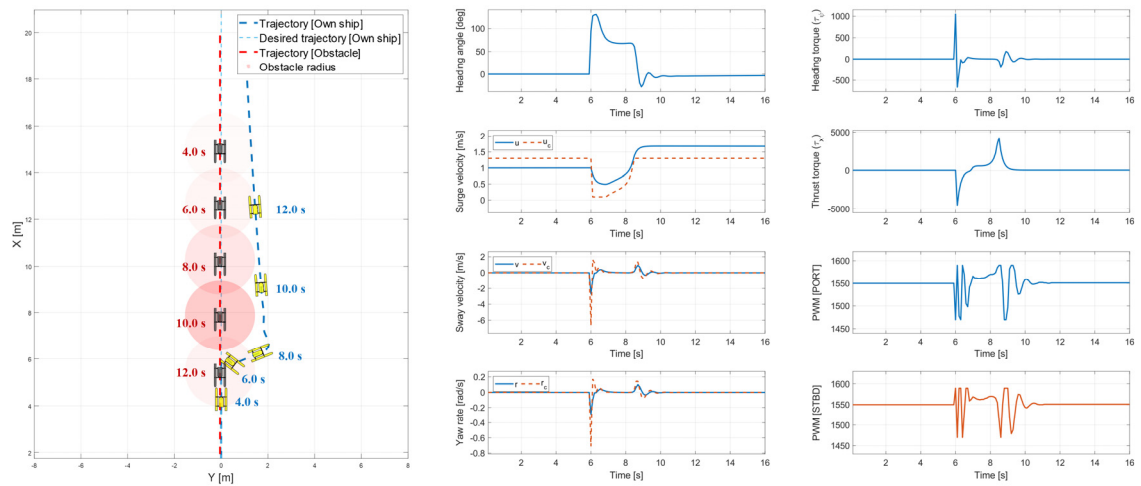


Fig. 6 RVO-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 1)

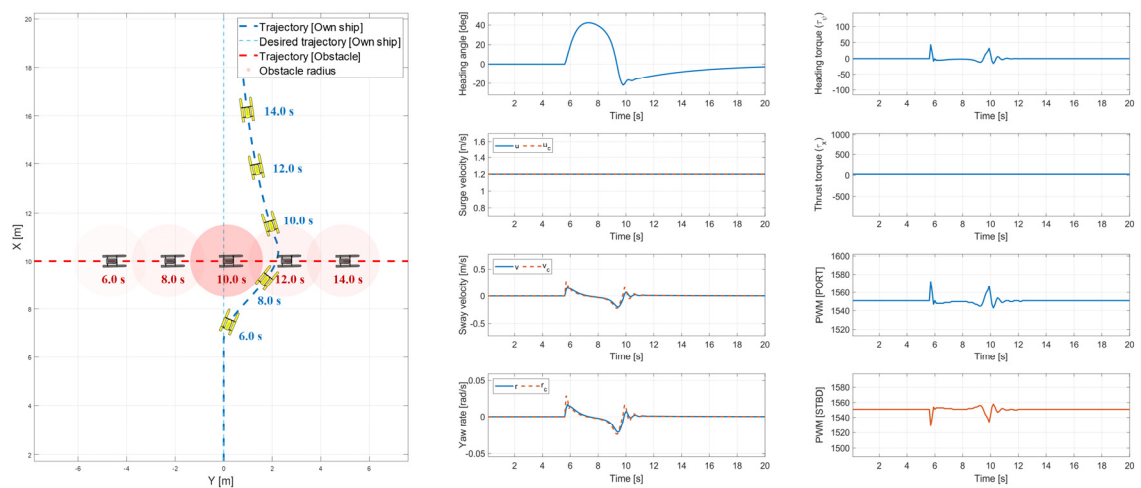


Fig. 7 rCBF-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 2)

오 별 자선의 궤적, 상태변화 및 제어 입력 추이를 나타내었다.

Table 8은 시나리오 별 최소 회피 거리, 최대 경로 이탈, 경로 복귀 시간 등을 요약한 결과로써, rCBF와 RVO의 특징을 정량적

으로 비교한다.

시험 결과, rCBF 기반 MPC는 장애물과의 최소 회피 거리를 상대적으로 크게 유지하면서도 경로 복귀 시간이 짧아, 시뮬레이

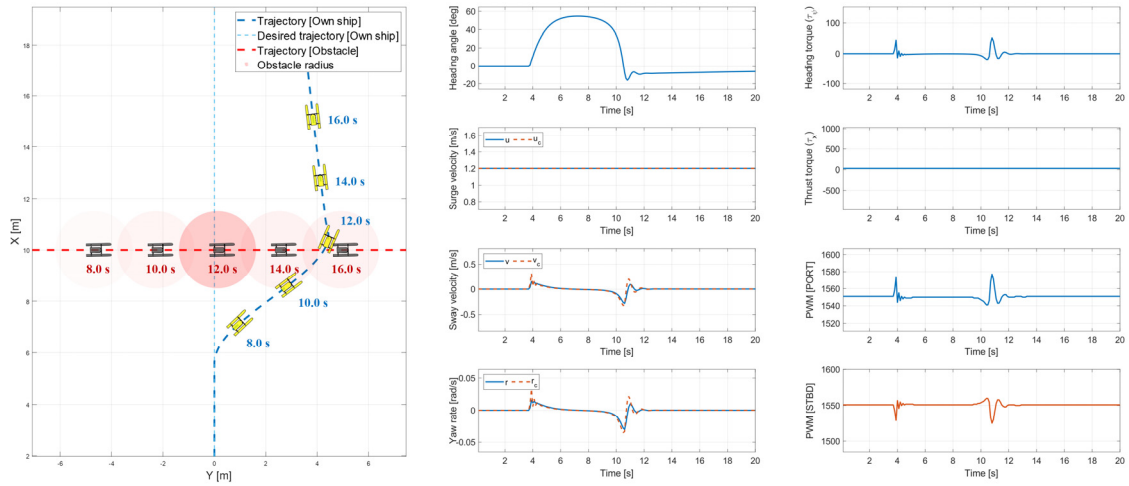


Fig. 8 RVO-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 2)

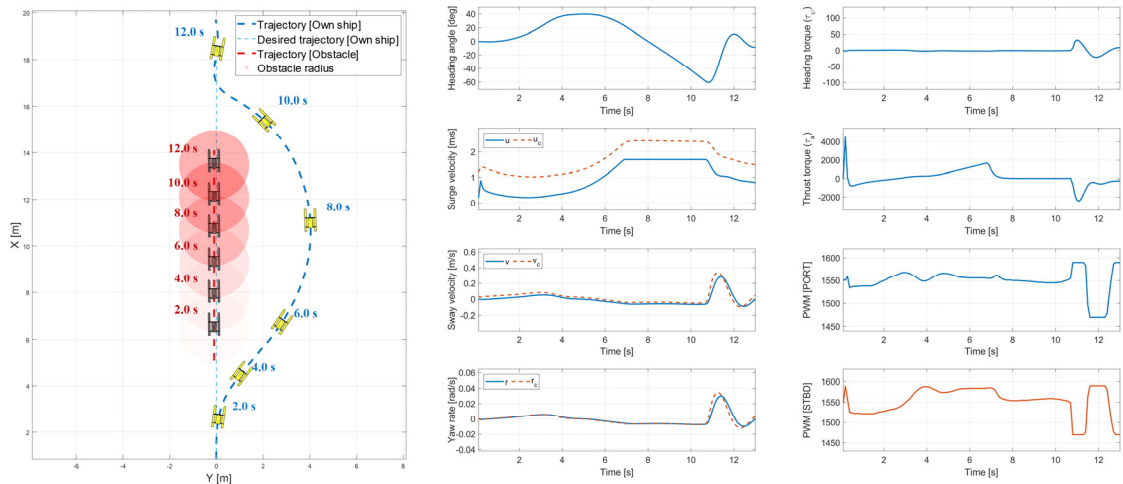


Fig. 9 rCBF-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 3)

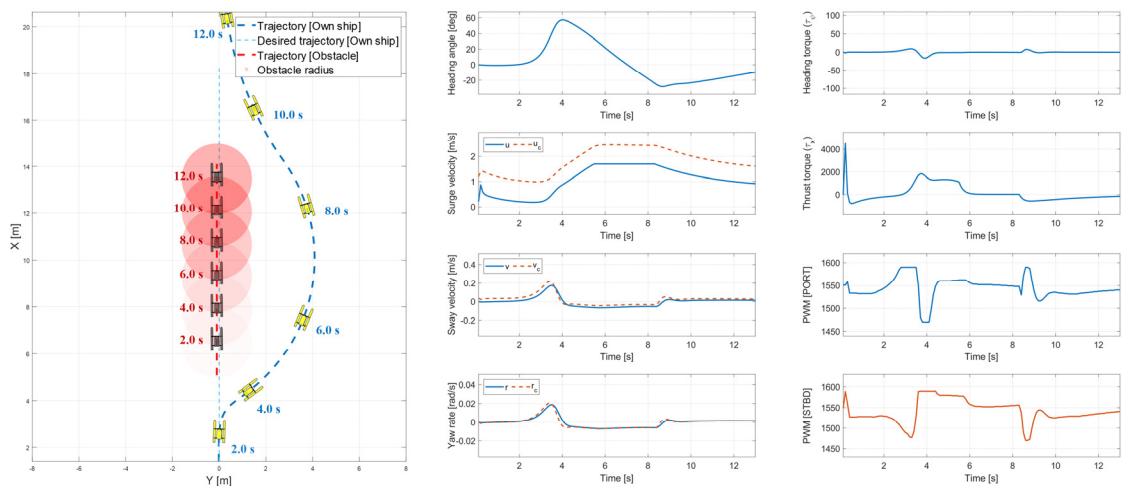


Fig. 10 RVO-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 3)

선과 유사하게 안정적인 회피와 신속한 복귀를 동시에 달성하였다. RVO 기반 MPC는 회피 기동 자체가 적극적이어서 단시간 내 충돌 위험 구역을 이탈할 수 있지만, 경로 이탈 폭이 커져 그만큼

추가적인 복귀 조치가 필요함이 관찰되었다.

결과적으로, 시나리오 별 표에서도 rCBF가 종합적인 측면에서 RVO 대비 우수한 성능을 보였으며, 이는 시뮬레이션 결과와도

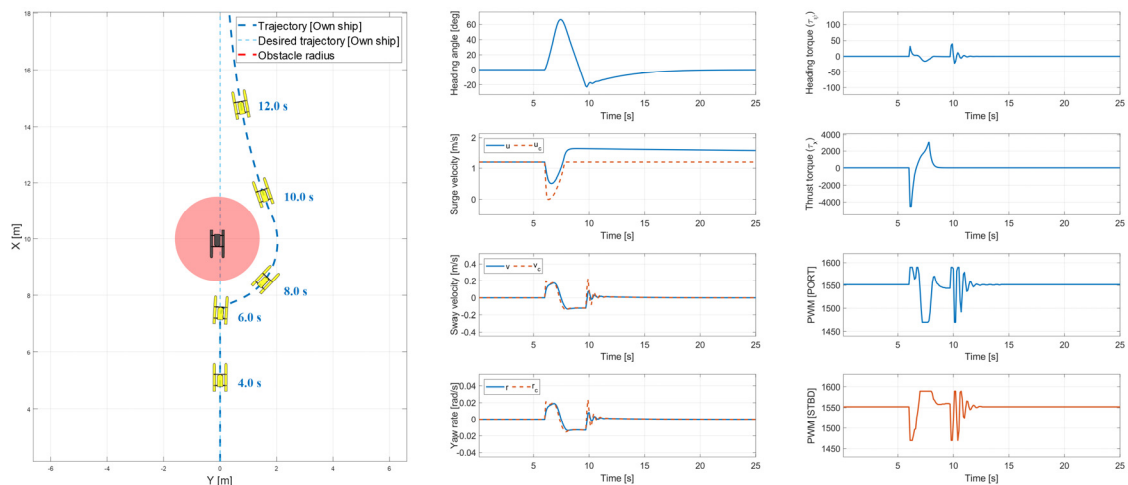


Fig. 11 rCBF-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 4)

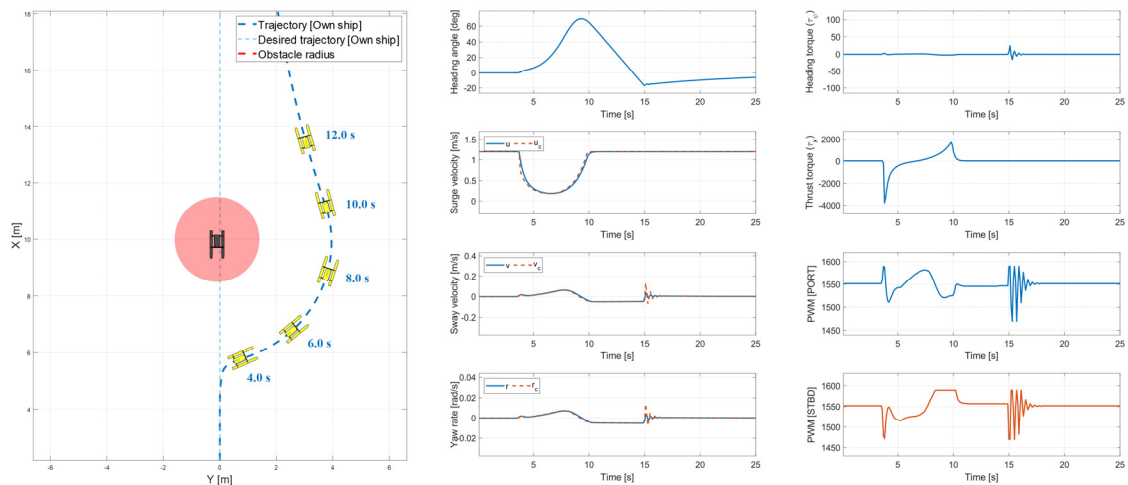


Fig. 12 RVO-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 4)

Table 5 COLREGs rule application and evasive action summary per scenario

| Scenario | Encounter type  | Applicable rule | Rule compliance     | COLREGs-required maneuver   | Actual avoidance maneuver    |
|----------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1        | Head-on         | Rule 14         | Compliant           | Turned to starboard         | Starboard avoidance          |
| 2        | Crossing        | Rule 15         | Partially Compliant | Gave way (starboard target) | Moved ahead without yielding |
| 3        | Overtaking      | Rule 13         | Compliant           | Passed on starboard side    | Passed on starboard side     |
| 4        | Static obstacle | N/A             | N/A                 | N/A                         | Starboard avoidance          |

Table 6 Performance comparison for all scenarios

| Scenario        | Constraint | Minimum avoidance distance [m] | Maximum path deviation [m] | Path recovery time [s] |
|-----------------|------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Head-on         | rCBF       | 4.2                            | 3.0                        | 2.6                    |
| Head-on         | RVO        | 3.9                            | 1.5                        | 4.3                    |
| Crossing        | rCBF       | 6.1                            | 3.0                        | 4.2                    |
| Crossing        | RVO        | 5.8                            | 3.4                        | 5.2                    |
| Overtaking      | rCBF       | 2.6                            | 3.2                        | 3.9                    |
| Overtaking      | RVO        | 2.3                            | 3.6                        | 5.0                    |
| Static obstacle | rCBF       | 4.4                            | 3.0                        | 4.4                    |
| Static obstacle | RVO        | 4.2                            | 3.6                        | 5.6                    |

Table 7 Experimental initial conditions

| Scenario | Ownship Initial position [m] | Obstacle initial position [m] | Obstacle speed [m/s] | Safe radius | Encounter type | Avoidance responsibility |
|----------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------|----------------|--------------------------|
| 1        | (0,0)                        | (20, 0)                       | 1.2                  | 1.5         | Head-on        | Ownship                  |
| 2        | (0,0)                        | (6, -6)                       | 1.2                  | 1.5         | Crossing       | Ownship                  |

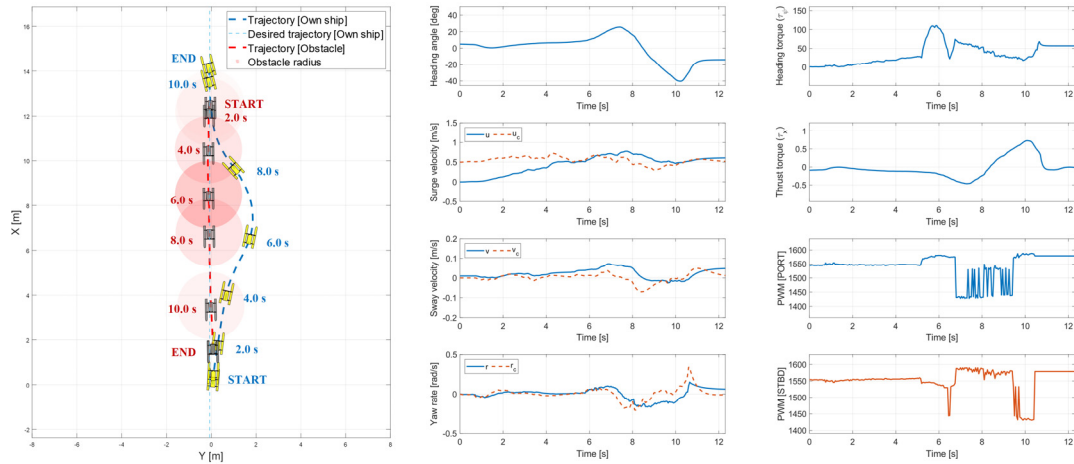


Fig. 13 rCBF-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 1)

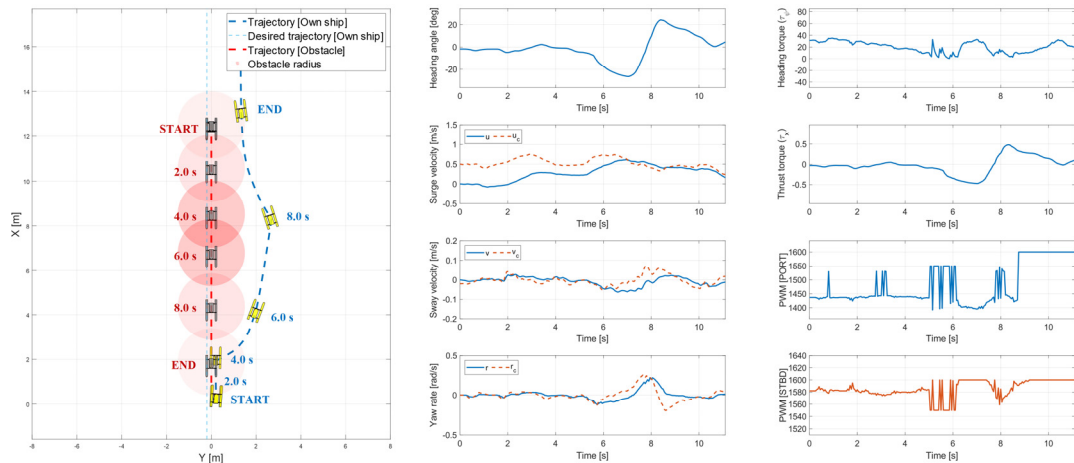


Fig. 14 RVO-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 1)

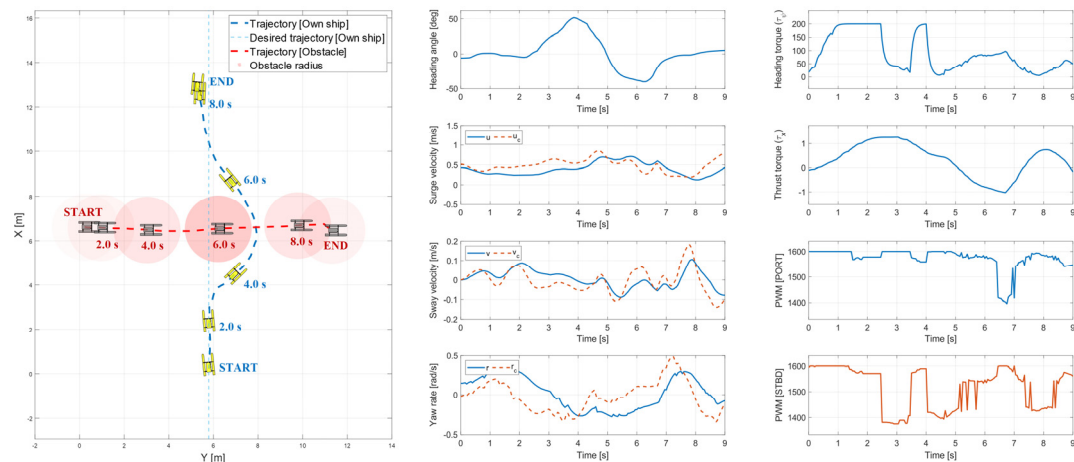


Fig. 15 rCBF-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 2)

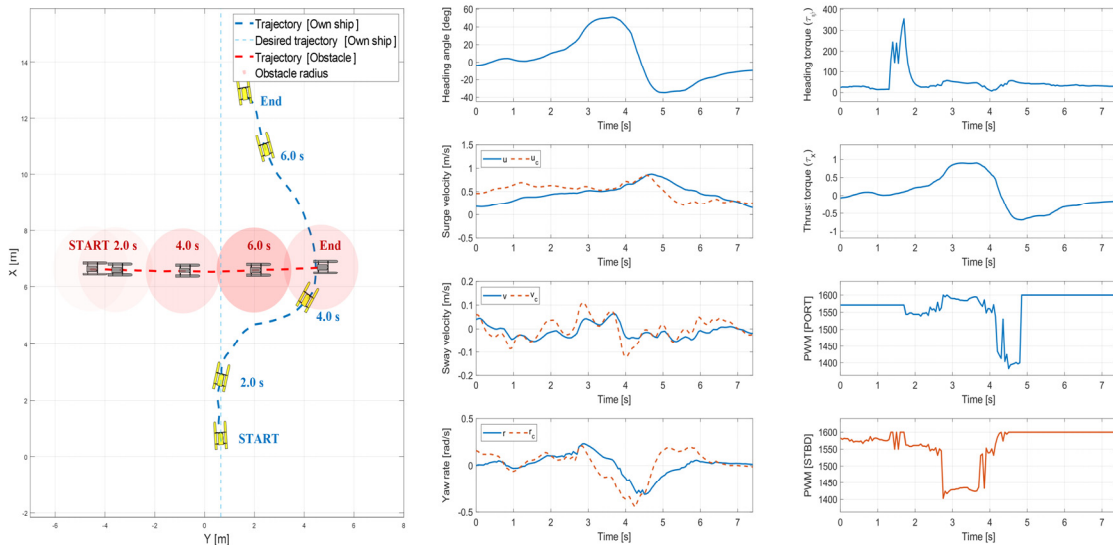


Fig. 16 RVO-MPC ASV trajectory and time responses (Scenario 2)

Table 8 Performance comparison for all scenarios

| Scenario | Constraint | Minimum avoidance distance [m] | Maximum path deviation [m] | Path recovery time [s] |
|----------|------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Head-on  | rCBF       | 2.2                            | 2.7                        | 4.2                    |
| Head-on  | RVO        | 1.9                            | 3.8                        | 5.5                    |
| Crossing | rCBF       | 2.3                            | 3.2                        | 3.2                    |
| Crossing | RVO        | 2.1                            | 4.3                        | 4.1                    |

높은 일치성을 나타냈다. 따라서 rCBF 기반 MPC가 실환경에서도 안전성과 유연성을 동시에 확보한다는 점을 시험적으로 검증하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 ASV의 충돌 회피를 위해 MPC와 rCBF를 결합한 제어 기법을 제안한다. 본 기법은 예측 지평선 동안 자선의 미래 상태를 효과적으로 모사하고, 수학적으로 정의된 안전 집합 기반의 제어 제약을 부과하여 강건한 충돌 회피 성능을 확보하였다. 시뮬레이션을 통해 이를 이론적으로 입증하였으며 모형 시험을 통해 실제 구현 가능성과 안정성을 검증하였다. 다만, 본 연구는 실제 해상에서 발생할 수 있는 파랑, 해류, 풍하중 등 복합 외란이 배제된 환경에서 수행되었으며, 실험 대상 장애물 수도 제한적이어서 고밀도 교통상황이나 복잡한 선박 간 상호작용을 충분히 반영하지 못했다는 한계를 가진다. 또한, MPC와 rCBF의 결합 구조는 연산량 증가로 인해 실시간 운용 시 계산 지연이 발생할 수 있으며, 특히 임베디드 시스템과 같은 자원이 제한된 환경에서는 추가적인 검토가 필요하다.

향후 연구에서는 복합 외란 조건을 포함한 현실적인 시험 환경을 구축하고, 다중 장애물 및 군집 운용 상황을 고려한 회피 성능 분석을 수행할 계획이다. 이때, 조건부 제약 활성화 구조를 기반으로 컴파일 언어를 통한 경량화된 구현과 멀티스레딩 기법을 적

용하여, 전체 연산 효율을 더욱 향상시키고 실시간 운용에 적합한 구조로 최적화할 계획이다.

또한, 강화학습이나 신경망 기반 최신 회피 기법과의 성능 비교를 통해 다양한 환경에서의 상대적 우수성과 실효성을 종합적으로 평가할 것이다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 rCBF-MPC 기법은 ASV의 충돌 회피 문제에서 강건하고 신뢰할 수 있는 성능을 입증하였다. 향후 실해역 기반의 고도화 연구가 이루어진다면, 본 기법은 실제 해상 교통 환경에서도 적용 가능한 실용적인 충돌 회피 솔루션으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문(또는 저서)은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의하여 연구되었음.

## References

- Bae, Y., Choi, J., Park, J., Kang, M., Kim, H. and Yoon, W., 2023. Event-triggered NMPC-based ship collision avoidance algorithm considering COLREGs. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(3), pp.155-164.
- Cho, Y. and Kim, J., 2017. Collision probability assessment b

- etween surface ships considering maneuver intentions. *In: OCEANS 2017 – Aberdeen*, Aberdeen, United Kingdom, 19–22 June 2017. IEEE: Piscataway, pp.1–5.
- Fu, H., Yao, W., Cajo, R. and Zhao, S., 2023. Trajectory tracking predictive control for unmanned surface vehicles with improved nonlinear disturbance observer. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), pp.1874.
- Huang, Y. and Chen, Y., 2021. A safety guaranteed control framework to integrate actuator dynamics via control-dependent barrier functions. *IFAC-PapersOnLine*, 54(20), pp.172–178.
- Kim, J.-H., Choi, S.-W., Son, H.-H., Kim, D.-K., Kim, D.-H. and Park, J.-Y., 2024. A swarming system for multiple autonomous surface vehicles using virtual matrix and leader in ocean engineering basin. *In: OMAE2024*, Volume 5A: Ocean Engineering.
- Kufoalor, D.K.M., Brekke, E.F. and Johansen, T.A., 2018. Proactive collision avoidance for ASVs using a dynamic reciprocal velocity obstacles method. *In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, 1–5 October 2018. IEEE: Piscataway, pp.2402–2409.
- Kuwata, Y., Wolf, M.T., Zarzhitsky, D. and Huntsberger, T.L., 2014. Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), pp.110–119.
- Van Den Berg, J., Lin, M. and Manocha, D., 2008. Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation. *In: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pasadena, CA, USA, 19–23 May 2008. IEEE: Piscataway, pp.1928–1935.
- Von Ellenrieder, K.D. and Camurri, M., 2024. Relaxed control barrier function based control for closest approach by underactuated USVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 49(4), pp.1301–1321.
- Wang, L., Ames, A.D. and Egerstedt, M., 2017. Safety barrier certificates for collisions-free multirobot systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(3), pp.661–674.
- Xue, Y., Wang, X., Liu, Y. and Xue, G., 2021. Real-time nonlinear model predictive control of unmanned surface vehicles for trajectory tracking and collision avoidance. *In: 2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Budapest, Hungary, 3–5 February 2021. IEEE: Piscataway, pp.150–155.

