



# 다수 무인선의 대형 유지와 충돌 회피를 위한 군집제어 알고리즘에 관한 연구

박혜리<sup>1</sup>·이효근<sup>2</sup>·전재윤<sup>2</sup>·이동훈<sup>3</sup>·백광준<sup>2</sup>·김상현<sup>2,†</sup>

HD한국조선해양(주) 디지털플랫폼연구실<sup>1</sup>

인하대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>

노르웨이국립과학기술대학교 기계·산업공학과<sup>3</sup>

## The Research on Swarm Control Algorithm of Multiple Unmanned Vessels for Formation Control and Collision Avoidance

Hyeri Park<sup>1</sup>·Hyogeun Lee<sup>2</sup>·Jaeyoon Jeon<sup>2</sup>·Donghun Lee<sup>3</sup>·Kwangjun Paik<sup>2</sup>·Sanghyun Kim<sup>2,†</sup>

Digital Technology Research Institute, HD Korea Shipbuilding and Offshore Engineering<sup>1</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha university<sup>2</sup>

Department of Mechanical and Industrial Engineering, NTNU<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.

In swarm control research, the two most important issues are collision avoidance among moving objects and vehicle-to-vehicle communication (V2V communication). Leader-Follower method, the commonly used in swarm control, has problems about these two function. Data loss in communication or a failure of the leader can cause the entire formation to become uncontrollable. To resolve this problem, this paper suggests the variable Leader-Follower method and collision avoidance process based on the Velocity Obstacle method. Instead of fixing a leader, it selects the leader using an allocation algorithm based on the navigation situation. Also, each ship except the leader, in the swarm choose new ideal point using formation matrix that contains the distance from each ship to ideal points. To avoid static and dynamic obstacles, each ships in the swarm make local path using Velocity Obstacle method(VO) with Quadrangle Ship Domain (QSD). If there is no collision risk, they follow the global path; Otherwise, they plans the local path that can avoid collisions with other vessels and obstacles. To validate the algorithm proposed in this paper, navigation simulations are conducted in the simulation environment based on a MMG type manoeuvring model. It is confirmed that the follower can maintain their formation by formation control and appropriate leader was selected based on the current situation by path following control. The collision avoidance simulation with static, dynamic and complex obstacles ensured that the vessels in the swarm can avoid the collision and they can find the optimum formation.

**Keywords** : Unmanned vessel(무인선박), Swarm control(군집제어), Formation control(대형제어), Collision avoidance(충돌회피), Leader-follower(선도-추종), Path following(경로추종)

## 1. 서론

최근 무인 운용 시스템에 대한 관심이 증가하면서, 해양 분야에서 선박의 자율운항, 무인선 개발 등에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 다수 무인선으로 구성된 군집 제어 시스템은 단일 무인선에 비해 효율적으로 임무를 수행할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다 (Jin et al., 2022; Wu et al., 2022; Baek et al.,

2024). 무인선의 군집 제어는 해양 탐사, 오염 물질 탐지, 해양 구난 작업 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 그 적용 범위는 더욱 확대될 것으로 예상된다.

다수 무인선의 군집 제어에 요구되는 핵심 기능은 대형 제어와 충돌 회피이다. 대형 제어(formation control)는 무인 이동체가 군집을 이루어 임무를 수행할 때 군집 내의 각 이동체가 할당된 위치를 유지하며 행동하는 기술을 말한다. 일반적으로 사용되는

대형 제어 방법은 선도-추종 기법(leader-follower)으로, 리더(leader)와 팔로워(follower)가 일정한 거리와 각도를 유지하며 대형을 형성한다. 이때 대형을 이루는 하나의 무인선이 리더가 되고, 나머지 무인선이 팔로워가 된다.

선도-추종 기법은 리더와 팔로워의 위치 관계를 수학적으로 모델링 할 수 있어 군집의 대형 유지의 안정성을 보장할 수 있으며, 군집의 개체 수 변화에 대응이 간단하여 확장성이 뛰어나다는 장점이 있다. 그러나 리더에 결함이 발생할 경우 군집을 이루는 대형 전체가 통제되지 않으며 (Chen et al., 2021), 팔로워의 위치를 결정하기 위해 리더의 정보가 반드시 필요하기 때문에 이동체 사이의 통신이 필수적으로 요구되고 있다 (Tak et al., 2014). Dai et al. (2019)은 제한된 통신 환경에서의 대형 형성 문제를 해결하기 위해 경계 리아프노프 함수(Barrier Lyapunov function)와 선도-추종 기법을 활용한 대형 제어 연구를 진행하였고, He et al. (2018)은 선도-추종 기법을 적용하여 운항하는 군집의 충돌 회피와 제어를 위해 추적 오차와 수렴 속도를 고려한 제어기 설계에 관한 연구를 수행하였다.

기존의 대형 제어 방식은 군집의 안정성 유지와 복잡도 감소를 위해 리더와 팔로워를 사전에 결정하여 대형 내 위치를 고정하였으며, 운항 중 운항체 간의 정보 교환이 원활하게 이루어진다는 조건에서 적용 되어졌다. 그러나 광활한 해양에서는 언제나 신뢰할 수 있는 통신 환경이 확보되는 것은 아니므로 고정된 리더와 팔로워에 의존하는 대형 제어는 군집 운용에 문제가 발생할 수 있다. (Dai et al., 2019)

군집 대형을 운용하는 과정은 여러 개체가 통합적으로 운용되기 때문에 대형이 흐트러지거나 대형의 형태를 변경해야 하는 경우가 발생한다. 이 경우 군집 내의 이동체 및 타 장애물과의 충돌 회피를 위해 지역 경로 계획(Local path planning)을 수행하며, 실시간으로 대형 내의 운항체는 새로운 경로를 생성한다. 지역 경로 기법의 대표적인 것으로는 이동체와 장애물의 상대 속도 및 크기 정보를 이용하여 충돌을 방지할 수 있는 속도 벡터를 계산하는 속도 장애물 기법(VO, Velocity Obstacle method) (Fiorini et al., 1993, 1998)이 있다. 또한 속도 장애물 기법을 활용한 COLREGs 기반 무인 수상선의 충돌 회피에 관한 연구가 Kim (2019), Cho et al. (2020), Kim (2022)에 의해 진행되었다.

본 연구에서는 고정된 선도-추종 기법의 대형 제어 문제를 개선하기 위해 사전에 리더와 팔로워의 대형 내에서 결정하지 않고, 운항 상황에 따라 리더를 결정하는 군집 제어 시스템을 제안한다. 또한 속도 장애물 기법을 활용하여 리더와 팔로워 사이의 충돌 방지, 이동 선박 및 장애물과의 충돌 회피를 동시에 수행하며 경로를 추종하는 대형 제어를 제안한다.

본 논문의 2장에서는 대형 제어, 할당 알고리즘 및 경로 추종에 대해, 3장에서는 충돌 회피 알고리즘에 대해 다룬다. 4장에서는 운항 제어 시스템과 충돌 회피 시나리오 및 시뮬레이션에 대해 설명하며, 5장에는 결론 및 고찰을 제시한다.

## 2. 선박의 군집 대형 제어 시스템

### 2.1 대형 제어 시스템의 개요

본 논문의 군집 대형 제어 시스템은 리더(leader)와 팔로워(follower), 이상 지점(ideal spot)으로 구성되어 있다. 가변적으로 선택되는 리더를 기준으로 대형이 결정되며, 결정된 대형에 팔로워가 할당되는 방식으로 군집을 유지한다. Fig. 1은 군집 제어 시스템의 간단한 개념도이다. 팔로워의 위치 할당은 할당 알고리즘(allocation algorithm)에 의해 결정된다. 팔로워는 이상 지점을 추종함과 동시에 군집 내의 다른 선박과 장애물을 고려하여 충돌 회피를 수행한다.

### 2.2 대형 행렬 정의

대형 행렬(Formation matrix)이란 이루고자 하는 대형에 대한 정보를 행렬로 표현한 것이다. 본 논문의 대형 행렬은 식 (1)과 같이 표현한다.

Formation matrix (1)

$$= \begin{bmatrix} spot(0) \\ spot(1) \\ \vdots \\ spot(m-2) \\ spot(m-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d(waypoint) \theta(waypoint) \\ d(1) \theta(1) \\ \vdots \\ d(m-2) \theta(m-2) \\ d(m-1) \theta(m-1) \end{bmatrix}$$

식 (1)에서 첫 번째 행은 리더를 기준으로 경유점까지의 거리와 각도를 나타낸다. 첫 번째 행을 제외한 나머지 행은 각 운항체가 선택할 수 있는 이상 지점 (Ideal point)에 대한 거리와 각도를 의미한다. 여기서  $m$ 은 군집에 포함된 운항체의 개수이다. 대형의 리더는 반드시 첫 번째 행을 선택하며, 나머지 행은 2.3의 할당 알고리즘에 의해 리더를 제외한 나머지 운항체가 선택하게 된다.

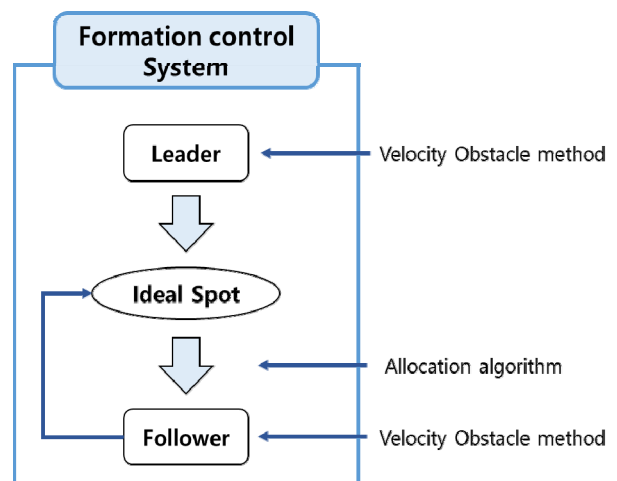


Fig. 1 System of formation control

## 2.3 할당 알고리즘

### 2.3.1 리더의 결정

군집 대형의 기준이 되는 리더는 도착 예정 시간(ETA, Estimated Time of Arrival)에 의해 결정된다. 각 운항체의 속도 정보와 위치 정보를 알고 있다고 가정하며, 현재 목표 경유점에 대해 각 운항체의 ETA를 계산한다. ETA가 가장 작은 운항체가 리더로 결정되며, 리더를 기준으로 군집의 대형을 생성한다.

각 ETA는 식 (2)에 의해서 계산되며, 계산된 ETA는 식 (3)과 같이 도착 예정 시간 행렬에 저장된다. 식 (2)의  $d_{waypoint,m}$ 은  $m$ 번째 운항체로부터 가장 가까운 경유점까지의 거리이며,  $V_m$ 은  $m$ 번째 운항체의 속도이다. 이 중 가장 작은 ETA를 가지는  $m$ 번째의 운항체는 군집의 리더가 된다.

$$ETA_m = d_{waypoint,m} / V_m \quad (2)$$

$$ETA \text{ matrix} = \begin{bmatrix} ETA_1 \\ ETA_2 \\ \vdots \\ ETA_{m-1} \\ ETA_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.3.2 운항체의 대형 할당

리더를 제외한  $n$ 개의 운항체는 거리 비용 행렬에 의해 이상 지점을 선택한다. 거리 비용 행렬은  $n \times n$  크기의 행렬로 운항체로부터 각 이상 지점까지의 거리로 구성되어 있다. Fig 2는 3척의 운항체로 구성된 군집의 거리 비용 행렬 계산의 예시이다.

팔로워 1과 2는 리더의 위치를 기준으로 정의된 이상 지점까지의 거리를 계산한다. 각 이상 지점으로부터 가까운 거리에 위치한 팔로워로부터 지점을 선택하게 되며, Fig. 2에서는  $d_{1,1}$ 이  $d_{2,1}$

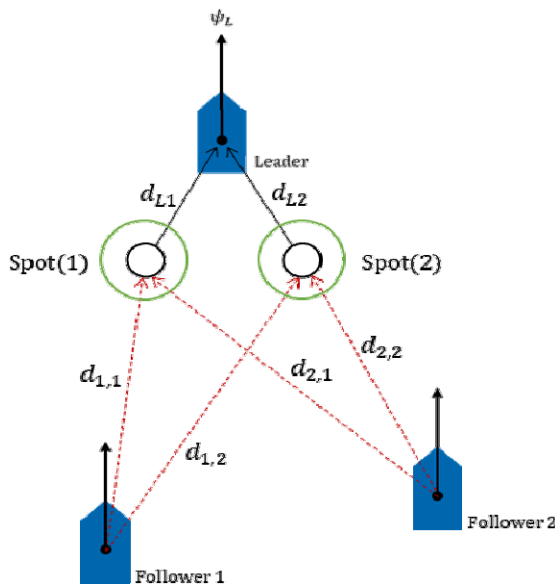


Fig. 2 Calculation of distance cost table

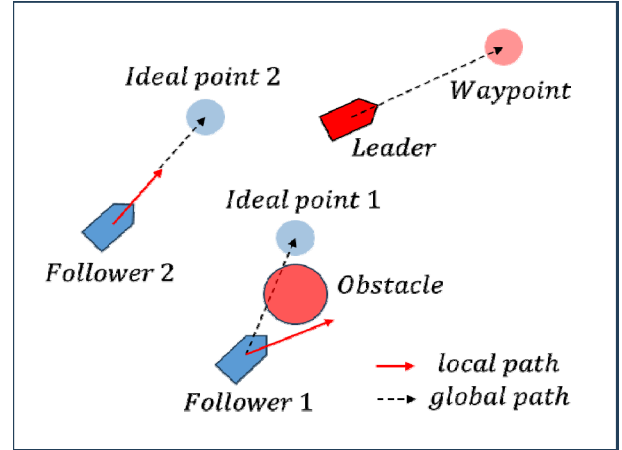


Fig. 3 Global and local path planning process of leader and follower

보다 짧으므로 팔로워 1은 이상 지점 1을 선택 한다. 각 이상 지점은 1대의 팔로워만 선택할 수 있으며, 팔로워에 의해 선택된 이상 지점은 다음 팔로워가 이상 지점을 선택할 때 후보에서 제외된다.  $n$ 대의 팔로워가 존재할 때, 거리 비용 행렬은 식 (4)와 같다.

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,n-1} & d_{1,n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,n-1} & d_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n-1,1} & d_{n-1,2} & \cdots & d_{n-1,n-1} & d_{n-1,n} \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \cdots & d_{n,n-1} & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.4 대형 유지와 경로 추종

선도-추종 기법을 이용하는 군집은 대형을 유지하며 목적지로 향하기 때문에 리더와 팔로워가 추종하는 경유점이 달라진다. 리더로 선정된 선박은 군집 전체가 이동해야 하는 경유점을 향해 전역 경로를 계획한다. 반면 팔로워는 대형 행렬과 할당 알고리즘에 의해 선정된 이상 지점을 향하는 전역 경로를 계획한다. 이와 동시에 리더와 팔로워는 충돌 방지를 위한 지역 경로도 함께 계획한다. Fig. 3의 예시를 통해 리더와 팔로워가 각각 다른 전역 경로를 따르는 것을 확인할 수 있다. 리더와 팔로워 2는 충돌 위험이 없으므로 원래의 전역 경로와 동일한 방향의 지역 경로를 생성하며, 팔로워 1과 같이 충돌 위험이 있을 경우 충돌을 회피할 수 있는 지역 경로를 생성한다. 충돌 회피와 관련된 내용은 3장에서 자세히 서술한다.

## 3. 선박의 충돌회피 시스템

### 3.1 속도 장애물 기법

운항 중 조우하는 장애물을 회피하기 위해 속도 장애물 기법을 이용한다. 대형 내에 존재하는 다른 선박은 동적 장애물로 간주하여 대형 형성 및 변경 중 발생할 수 있는 충돌을 회피하며 고정

장애물은 속도가 “0”인 동적 장애물과 같이 취급한다. 속도 장애물 기법은 이동하는 다수 장애물에 대한 회피를 위하여 제안된 알고리즘이다. (Fiorini and Shiller, 1998) 현재까지도 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 회피 대상의 속도 벡터와 피항중인 이동체의 속도 벡터를 이용하여 충돌을 회피한다. 3.2장부터 3.4장까지 속도 장애물 기법의 수학적 표현을 기술한다.

### 3.2 자선과 타선의 수학적 표현

2차원 평면에 존재하는 다각형의 장애물은 다수의 원으로 표현 가능하다. (Featherstone, 1990) 속도 장애물을 도식화하기 위해 자선과 타선은 각각을 대표하는 원으로 표현한다. Fig. 4(a)에서  $A$ 는 자선을,  $B$ 는 타선을 의미한다.

또한 Fig. 4(b)에서  $\hat{A}$ 는 자선을 대표하는 원의 반경을 0으로 줄여 점으로 표현한 것이고,  $\hat{B}$ 는 타선을 대표하는 원의 반경에 자선을 대표하는 원의 반경을 더한 큰 원으로 표현한 것이다. 생성된  $\hat{A}, \hat{B}$ 는 3.3절에서 충돌 원뿔을 정의하기 위해 이용된다.

### 3.3 충돌 원뿔과 속도 장애물 정의

충돌 원뿔은 자선과 타선이 충돌할 가능성이 있는 영역을 의미하며 Fig. 5(a)와 같이  $\hat{A}$ 으로부터  $\hat{B}$ 로의 접선을 각각  $\lambda_r, \lambda_f$ 라 할 때,  $\lambda_r, \lambda_f$  사이의 공간을 충돌 원뿔로 정의하고  $CC_{A,B}$ 로 표시한다. 타선에 대한 자선의 상대 속도가 충돌 원뿔 안에 존재할 경우 충돌이 발생한다고 판단한다. 또한  $v_{A,B}$ 는 자선이 선택 가능한 타선에 대한 자선의 상대속도 후보군이고,  $\lambda_{A,B}$ 는  $v_{A,B}$  방향으로 그른 직선이라 하면, 충돌 원뿔  $CC_{A,B}$ 는 식 (5)와 같이  $\lambda_{A,B}$ 와  $\hat{B}$ 의 교집합이 존재하는 영역이라고도 정의할 수 있다.

$$CC_{A,B} = \{v_{A,B} \mid \lambda_{A,B} \cap \hat{B} \neq \emptyset\} \quad (5)$$

단일 선박과 조우하는 경우 상대 속도를 이용해 회피 할 수 있으나, 다수의 선박을 회피하는 경우에는 자선의 절대 속도를 이용하여 일반화된 상황에 대한 고려가 필요하다. 이를 위해 정의

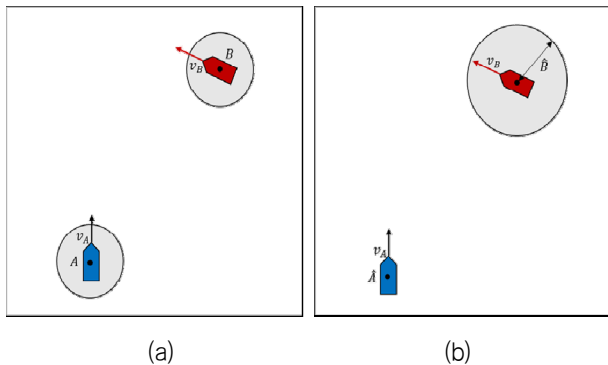


Fig. 4 Mathematic Expression of Own ship and Target ship

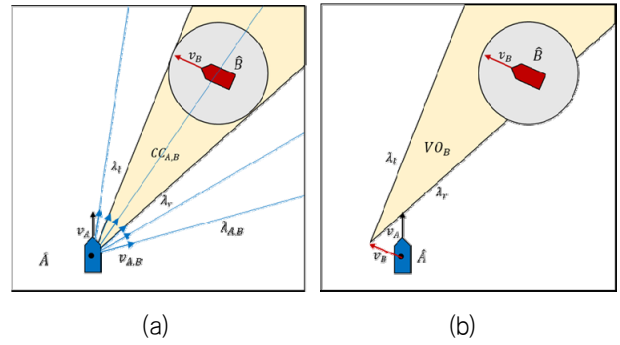


Fig. 5 Definition of Collision Cone and Velocity Obstacle

하는 것이 Fig. 5(b)와 같이 나타낸 속도 장애물  $VO$ 이며,  $VO$ 는 식 (6)과 같이 충돌 원뿔을 타선의 속도  $v_B$ 만큼 이동시킨 것이다. 따라서 식 (7)과 같이 자선의 절대 속도  $v_A$ 가  $VO$ 에 포함되지 않으면 자선과 타선의 충돌이 발생하지 않는 것으로 정의할 수 있다.

$$VO = CC_{A,B} \oplus v_B \quad (6)$$

$$A(t) \cap B(t) = \emptyset \text{ if } v_A(t) \notin VO(t) \quad (7)$$

식 (6)에서  $\oplus$ 는 Minkowski의 벡터합 연산자이다. 속도 장애물은 수학적 연산에서 상대 속도를 계산하기 위한  $v_B$ 를 이항한 것과 같으므로 충돌 원뿔을 이용하였을 때와 속도 장애물을 이용하였을 때의 물리적 의미는 같다. 다수의 속도 장애물에 대한 회피는 식 (8)과 같이 속도 장애물을 모두 합친 것과 같으며  $m$ 은 장애물의 수이다.  $VO_{B_i}$ 는  $i$ 번째 장애물에 의해 생성된 속도 장애물을 의미한다.

$$VO_{total} = \bigcup_{i=1}^m VO_{B_i} \quad (8)$$

### 3.4 가용 속도 벡터

속도 장애물 기법을 사용하기 위해 선박이 미소 시간 간격  $\Delta t$  후에 도달 가능한 속도 벡터를 계산하며 이를 가용 속도 벡터로 정의한다. 속도 장애물 기법은 속도 장애물 내에 위치한 가용 속도 벡터를 목표 속도 선택지에서 제외함으로써 이동체와의 충돌을 방지한다. 본 논문에서 가용 속도 벡터는 최대, 최소 선수각과 최대, 최소 속도를 이용하여 생성된다. 식 (9), (10)은 가용 속도 벡터를 정의하기 위한 수식이다.

식 (9)의  $SC$ 와  $HC$ 는 속도 후보군(Speed Candidate, SC)과 선수각 후보군(Heading Candidate, HC)를 의미하며,  $RS$ 와  $RH$ 는 가용 속도(Reachable Speed, RS), 가용 선수각(Reachable Heading, RH)이다.  $n_{speed}$ 와  $n_{heading}$ 은 각각  $SC$ 와  $HC$ 의 길이이다. 가용 속도 벡터(Reachable Velocity, RV)는 식 (10)의 행렬과 같이 나타낼 수 있으며 첫 번째 열은 선박 고정 좌표계에서  $x$  방향 속도 성분을, 두 번째 열은  $y$  방향 속도 성분을 나타낸다. Fig. 6은 생성된  $RV$ 를 나타내며,  $RV_{K_i}$ 는  $RV$ 의 행 중 하나이다.

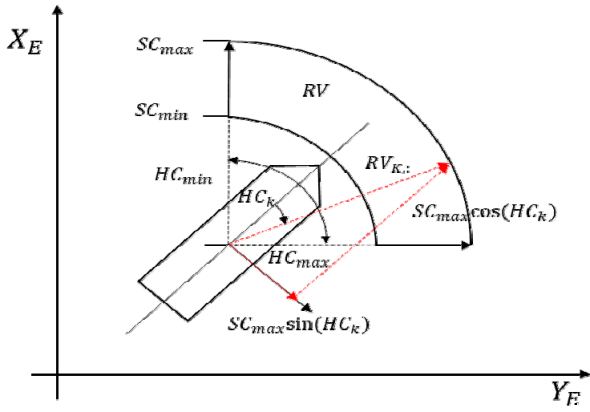


Fig. 6 Example of Reachable Velocities

$RV_{K,i}$ 의 길이는  $SC_{max}$ 이고  $HC_k$ 만큼 기울어져 있다.

$$SC = [RS_1, RS_2, \dots, RS_{n_{speed}-1}, RS_{n_{speed}}] \quad (9)$$

$$HC = [RH_1, RH_2, \dots, RH_{n_{heading}-1}, RH_{n_{heading}}]$$

$$RV = \begin{bmatrix} SC_1 \cos(HC_1) & SC_1 \sin(HC_1) \\ \vdots & \vdots \\ SC_1 \cos(HC_{n_{heading}}) & SC_1 \sin(HC_{n_{heading}}) \\ \vdots & \vdots \\ SC_{n_{speed}} \cos(HC_1) & SC_{n_{speed}} \sin(HC_1) \\ \vdots & \vdots \\ SC_{n_{speed}} \cos(HC_{n_{heading}}) & SC_{n_{speed}} \sin(HC_{n_{heading}}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3.5 COLREGs를 반영한 속도 벡터 선택 전략

가용 속도 벡터 중 최종적으로 추종할 목표 속도는 기준 벡터로부터  $RV$ 의 각 요소까지 유클리드 거리를 계산하여 벡터의 유사도 비교를 통해 결정한다. 이는 식 (11)과 Fig. 7에서 확인할 수 있다. Fig. 7의  $V_{target}$ 은 기준 벡터이며, 경유점 혹은 이상 지점을 향하는 방향을 가지고 그 크기가 목표 선속과 같은 벡터이다.  $d_{Euclid}$ 는 기준 벡터로부터  $RV$ 까지의 유클리드 거리를 요소로 하는 행렬이며  $V_{selected}$ 는 최종적으로 선박의 제어를 위해

$$V_{selected} = RV_{I,:} \quad (11)$$

$$I = \operatorname{argmin}(d_{Euclid})$$

$$d_{Euclid} = RV - (A \cdot \vec{V}_{target})$$

$$\vec{V}_{target} = (v_{target} \cdot \cos\theta, v_{target} \cdot \sin\theta)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 1 \end{bmatrix}_{(n_{speed} \cdot n_{heading}) \times 2}$$

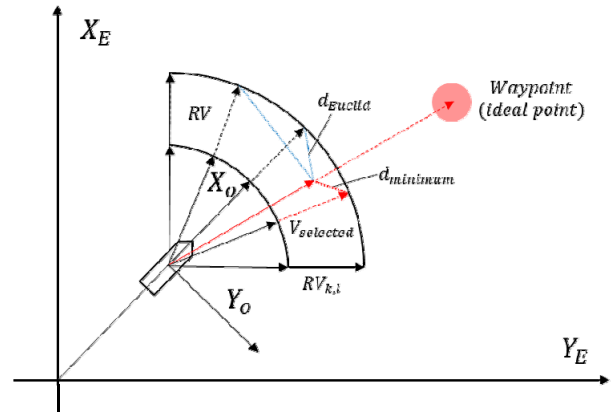


Fig. 7 Vector selection strategy based on the Euclidean distance

사용되는 목표 속도 벡터이다.  $I$ 는  $d_{Euclid}$  중 최솟값을 가지는 요소의 인덱스이다. 유클리드 거리가 작을수록 두 벡터는 유사도는 증가하므로, 속도 장애물 영역 내에 존재하는 벡터를 제외한 나머지 벡터 중 유클리드 거리가 가장 짧은 대상을 선택하여 충돌을 방지함과 동시에 목표 속도 벡터와 가장 유사한 벡터를 선정한다.

선박은 국제해상충돌예방협약(COLREGs)을 준수하여 회피하여야 한다. COLREGs에서 Starboard-Crossing 상황에서는 자선이 피항 의무선, 타선이 침로 유지선이 되며, Port-Crossing 상황에서는 자선이 침로 유지선이 되고, 타선이 피항 의무선이 된다. 또한 Port-Crossing 상황에서 타선이 충돌 회피 의사를 보이지 않을 경우 충돌 방지를 위해 방향에 상관 없이 최대한 피항하는 것을 목표로 한다. 이를 반영하기 위해 속도 벡터를 선정할 때, 자선 기준 우현부터 가용 속도 벡터를 탐색함으로써, 우현으로 회피가 가능할 경우 우현의 속도벡터를, 우현의 회피 경로가 없을 경우 좌현으로 회피를 수행하도록 하였다.

### 3.6 선박안전영역을 반영한 충돌 회피

선박안전영역은 안전한 항해를 위해 정의된 타선 및 장애물이 진입할 수 없는 선박 주변의 2차원 영역을 말한다(Fujii & Tanaka, 1971). 이는 Zhao et al.(1993), Wang et al.(2010) 등에 의해서 발전되었으며, 다양한 형태의 선박 안전 영역이 제시되었다. 본 논문에서 선박안전영역은 속도 장애물에서 선박을 2차원에 표현하는 과정에서 이용된다. 일반적인 속도 장애물 기법은 회피 대상과 피항체를 일정한 반경의 원으로 표현하지만, 이는 사용자에 의해 장애물의 크기가 정의된다는 단점이 존재하며, 선박의 방향에 따른 위험 영역이 반영되지 않는다. 이를 해결하기 위하여 원을 대신한 Quadrangle Ship Domain (QSD)을 적용한다. 이는 선박 중심으로 선수, 선미, 좌현, 우현 방향의 각기 다른 길이를 가지는 사각형의 영역으로 정의되며 각 방향의 길이는 식 (12)와 같이 계산한다. Fig. 8은 QSD의 예시이다.

$$R_{fore} = (1 + 1.34\sqrt{k_{AD}^2 + (k_{DT}/2)^2})L \quad (12)$$

$$R_{aft} = (1 + 0.67\sqrt{k_{AD}^2 + (k_{DT}/2)^2})L$$

$$R_{starb} = (0.2 + k_{DT})L$$

$$R_{port} = (0.2 + 0.75k_{DT})L$$

식 (12)의  $L$ 은 선박의 길이이며,  $k_{AD}$ 는 선박의 전진거리와 관련된 계수,  $k_{DT}$ 는 선박의 전술 직경과 관련된 계수이다. 이는 선박에 따라 달라지므로 식 (13)과 같이 경험식에 의해 결정한다.  $V_{own}$ 은 *knot*로 표현된 선박의 속도이다.

$$k_{AD} = A_D/L = 10^{0.3591 \log V_{own} + 0.0952} \quad (13)$$

$$k_{DT} = D_T/L = 10^{0.05441 \log V_{own} - 0.0795}$$

Fig. 9는 선박 안전 영역을 포함한 다수 선박 회피 상황의 예시이다. 위험도가 높은 타선의 선수 방향으로서는 안전 영역이 넓게 생성되므로 속도 장애물도 크게 생성된다. 비교적 위험도가 적은 타선의 선미 방향으로서는 안전 영역이 좁으며, 속도 장애물도 작게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 검정색 화살표는 전역 경로를 추종하기 위한 벡터이며, 초록색 화살표는 장애물을 회피하기 위한 속도 벡터이다. 초록색 화살표는 속도 장애물에 포함되지 않으며, 3.5의 속도 벡터 전략에 의해 선택된다.

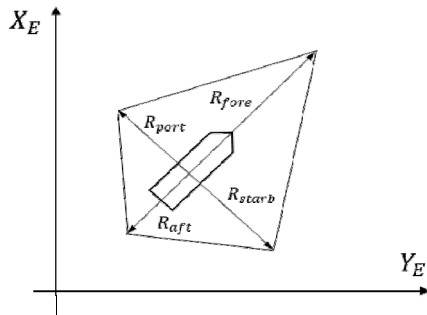


Fig. 8 Quadrangle Ship Domain

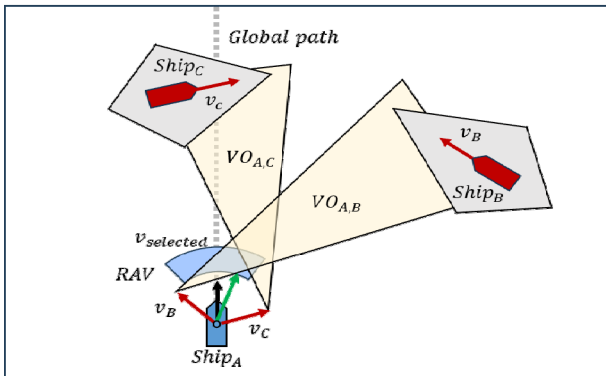


Fig. 9 Collision avoidance and selection of optimum vector

## 4. 운항 제어 시뮬레이션

### 4.1 대상선

선박의 동역학적 특성을 반영하여 대형제어, 충돌회피 시뮬레이션을 수행하기 위해 자율운항선박(Korea Autonomous Surface Ship, KASS) 1차 설계 선형을 대상선으로 선정하여 활용하였다. 대상선은 2축 2타선으로, Table 1은 선박의 주요 제원이며, Fig. 10는 KASS 모형선이다.

### 4.2 조종운동 수학모델

시뮬레이션 환경 구성을 위해 사용된 대상선의 조종운동 수학 모델은 3자유도 운동모델이다. 지배방정식은 식 (14)와 같이 나타내며, 선체력, 추력, 타력을 수식화 한 것은 각각 식 (15), (16), (17)과 같다. 추력과 타력 표현에서 뒤틀림자  $P$ 는 2축 2타의 좌현(Port)을 의미한다. Fig. 11은 선박 운동 모델의 좌표계이다.

$$m(\ddot{u} - vr - x_G \dot{r}^2) = X_H + X_P + X_R \quad (14)$$

$$m(\ddot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y_H + Y_P + Y_R$$

$$I_{zz} \ddot{r} + m x_G (\ddot{v} + ur) = N_H + N_P + N_R$$

$$X_H = X_u \dot{u} + X_{vv} v^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 + X_{vvv} v^4 - R \quad (15)$$

$$Y_H = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{vv} v^3 + Y_{rr} r^3 + Y_{vr} v^2 r + Y_{rv} r v^2$$

$$N_H = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{vv} v^3 + N_{rr} r^3 + N_{vr} v^2 r + N_{rv} r v^2$$

$$X_P = (1-t)\rho D^4 (n^{P^2} \cdot K_T^P(J_P^P) + n^{S^2} \cdot K_T^S(J_P^S)) \quad (16)$$

$$Y_P = 0$$

$$N_P = y_P (1-t)\rho D^4 (n^{P^2} \cdot K_T^P(J_P^P) - n^{S^2} \cdot K_T^S(J_P^S))$$

Table 1 Principal particulars of the subject ship

| Dimension                                    | Full-scale | Model  |
|----------------------------------------------|------------|--------|
| Scale                                        | 1          | 3.8    |
| LBP, $L$ [m]                                 | 22.000     | 5.789  |
| Breadth, $B$ [m]                             | 6.000      | 1.579  |
| Draft, $T$ [m]                               | 1.250      | 0.329  |
| Displacement, $\nabla$ [m <sup>3</sup> ]     | 85.681     | 1.561  |
| Rudder lateral area, $A_R$ [m <sup>2</sup> ] | 0.5175     | 0.0358 |
| Propeller diameter, $D_P$ [m]                | 0.95       | 0.25   |

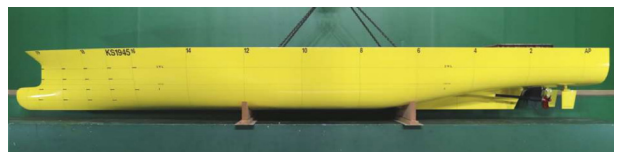


Fig. 10 KASS model ship (3.8 scale)

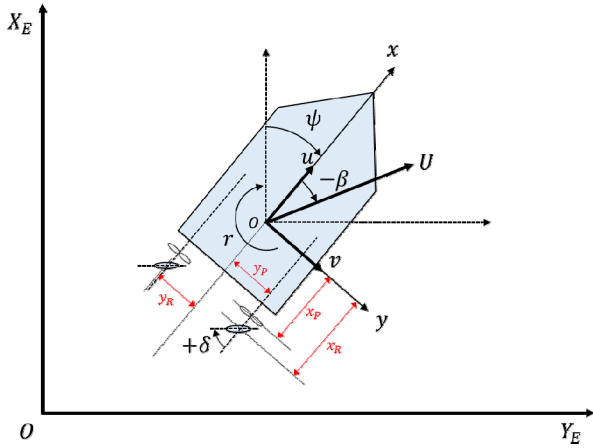


Fig. 11 Coordinate systems

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)(F_N^P + F_N^S)\sin\delta \\ Y_R &= (1+a_H)(F_N^P + F_N^S)\cos\delta \\ N_R &= (x_R + a_H x_H)(F_N^P + F_N^S)\cos\delta \\ &\quad - y_R(1-t_R)(F_N^P - F_N^S)\sin\delta \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16)의 프로펠러 전진비  $J_P$ 는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 식 (17)의 타 직압력  $F_N$ 은 식 (19)와 같이 나타낼 수 있으며 본 논문에서는 좌현의 타 직압력만을 나타내었으며 우현의 타 직압력은 생략하였다.

$$J_P^P = \frac{(1-w_P^P)u}{n^P D}, \quad J_P^S = \frac{(1-w_P^S)u}{n^S D} \quad (18)$$

$$F_N^P = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^P f_a \sin \alpha_R^P \quad (19)$$

$$U_R^P = \sqrt{u_R^{P^2} + v_R^{P^2}}, \quad \alpha_R^P = \delta - \tan^{-1} \left( \frac{v_R^P}{u_R^P} \right)$$

$$u_R^P = \epsilon u_P^P \sqrt{\eta \left[ 1 + \chi \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T^P}{\pi f_P^2}} - 1 \right) \right]^2 + (1-\eta)}$$

$$\begin{aligned} v_R^P &= \gamma_R^P (v + l_R^P), \\ (\gamma_R^P &= \gamma_R^- \text{ when } \beta_R \geq 0, \gamma_R^P = \gamma_R^+ \text{ when } \beta_R < 0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_P^P &= (1-w_P^P)u, \quad \omega_P^P = \omega_{P_0} \exp(-C_P^P \cdot v_P^2) \\ (C_P^P &= C_P^- \text{ when } \beta_P \geq 0, C_P^P = C_P^+ \text{ when } \beta_P < 0) \end{aligned}$$

$$v_P = v + x_P^P$$

대상선의 조종운동 수학적모델을 반영한 시뮬레이션 환경을 검증하기 위하여 Kim et al. (2021)에 의해 수행된 대상선의 선회 시뮬레이션과 지그재그 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, Fig. 12, Fig. 13을 통해 시뮬레이션 환경에서 대상선의 동특성이 유효하게 반영되고 있음을 확인하였다.

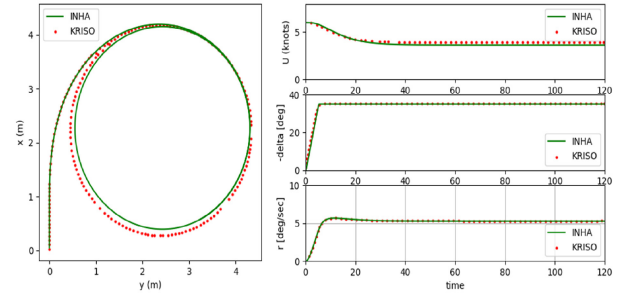


Fig. 12 Validation of turning test (35°, Starboard)

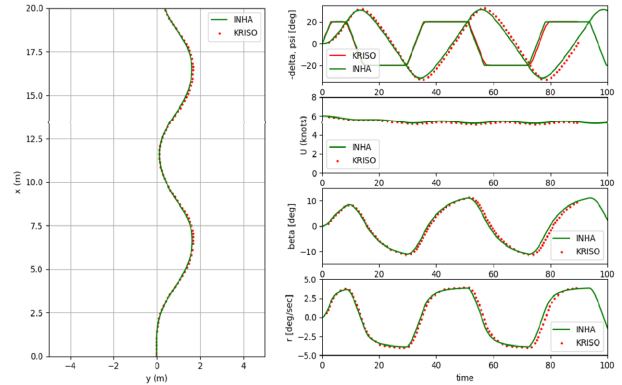


Fig. 13 Validation of Zig-Zag test (20°/20°, Starboard)

### 4.3 속도, 선수각 제어기

리더와 팔로워가 군집을 이루어 운항하기 위해서는 속도와 선수각 제어를 필요로 한다. 군집 내의 선박들은 속도 벡터 선택 전략에 의해 선정된 속도 벡터와 각 선박의 속도, 선수각을 이용하여 제어된다. 리더와 팔로워는 동일한 제어를 이용하지만 목표 선수각과 목표 선속에 차이가 있다. 팔로워의 경우는 이상 지점과 자선과의 거리 오차를 이용하여 목표 선수각과 목표 선속을 결정하고 있으며, 리더의 경우는 이상 지점과 자선과의 거리 오차를 "0"으로 설정하여 목표 선수각과 목표 선속을 결정하고 있다. 목표 선수각 및 목표 선속에 도달하기 위하여 속도와 선수각 모두 P 제어를 이용하여 제어하였으며, 각 제어기는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{\text{heading}} = \psi_{\text{target}} - \psi$$

$$\delta = K_{P, \text{heading}} \cdot e_{\text{heading}}$$

$$e_{\text{speed, leader}} = V_{\text{target}} - V_{\text{leader}}$$

$$RPS_{\text{leader}} = K_{P, \text{speed}} \cdot e_{\text{speed, leader}} \quad (20)$$

$$e_{\text{speed, follower}} = V_{\text{target}} - V_{\text{follower}}$$

$$e_{\text{dist, follower}} = \sqrt{(x_{\text{ideal}} - x_{\text{follower}})^2 + (y_{\text{ideal}} - y_{\text{follower}})^2}$$

$$\begin{aligned} RPS_{\text{follower}} &= K_{P, \text{speed}} \cdot e_{\text{speed, follower}} \\ &\quad + K_{P, \text{dist}} \cdot e_{\text{dist, follower}} \end{aligned}$$

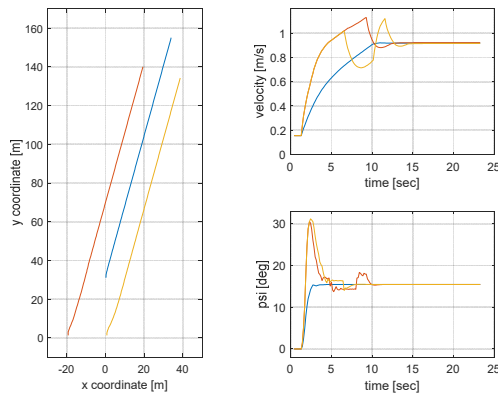


Fig. 14 Formation control simulation to validate the speed controller

식 (20)의  $\psi_{target}$ 은 대상선의 목표 선수각을 의미하며  $\psi$ 는 선수각을 의미한다.  $\delta$ 는 대상선의 타각이며, 속도는 각각의 RPS를 제어함으로써 목표에 도달한다.

Fig 14은 대형 내의 선박의 대형 형성 및 위치 제어를 시뮬레이션 한 결과이다. 최초 시작점으로부터 대형이 형성되기 위해 팔로워의 속도가 증가하였다가 특정 지점이 지난 후 일정한 속도에 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, 형성된 대형 또한 유지됨을 볼 수 있다. 선수각 제어기의 성능 검증은 4.4절의 대형 제어 시뮬레이션과 함께 서술한다.

#### 4.4 대형 제어 시뮬레이션

구현한 대형 제어 알고리즘과 선수각 제어 알고리즘을 검증하기 위해 5대의 선박을 이용한 대형 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 사각형 경유점을 설정하고, 선박이 Wedge 형태의 대형을 유지하며 운항하는 시나리오로 진행되었다. 경유점은 (0, 200), (200, 200), (200, 0), (0, 0) 순으로 시계 방향으로 이동하며, 총 3번의 경유점 변경이 이루어진다. Fig 14에서 그

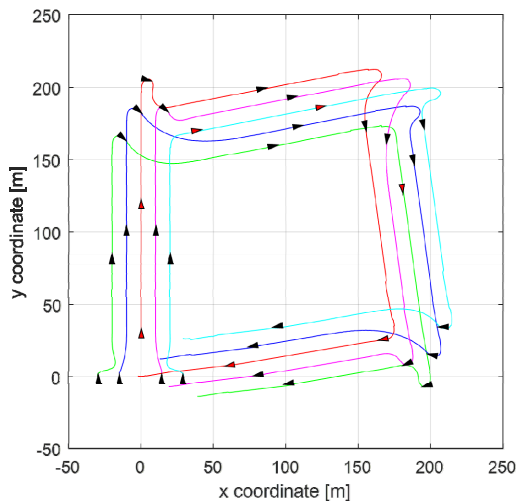


Fig. 15 Formation control simulation with 5 ships result

Table 2 Information of Static obstacle

| Obstacle | Type   | Radius [m] | speed [knot] |
|----------|--------|------------|--------------|
| NO.1     | Static | 7          | 0            |
| NO.2     | Static | 4          | 0            |
| NO.3     | Static | 4          | 0            |

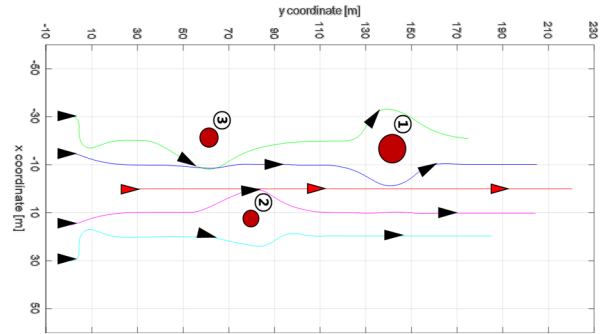


Fig. 16 Static obstacle avoidance simulation result

결과를 확인할 수 있다. Fig 15에서 붉은색 선박은 현재 설정된 리더를 나타낸다. 첫 번째 경유점을 지난 후, 두 번째 경유점으로 향하는 과정에서 거리 비용이 가장 작은 선박이 새롭게 리더로 선정되었다. 세 번째와 네 번째 경유점을 지날 때에도 동일한 방식으로 적합한 리더가 선정되었다. 또한, 정해진 경유점을 추종하는 과정에서 선수각 제어를 통해 타를 제어하여 원하는 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.5 정적 장애물 회피 시뮬레이션

정적 장애물에 대한 회피 및 대형 유지를 검증하기 위해 Fig. 16와 같이 시나리오를 구성하였다. 장애물은 반지름 7m의 장애물 1개, 반지름 4m의 장애물 2개로 구성되며 군집이 이동하는 방향에 이동을 방해하도록 위치를 선정하였다. 장애물의 제원은 Table 2와 같다.

시작 지점에서 y축을 기준으로 가장 위에 위치한 선박을 ship1, 가장 왼쪽에 위치한 선박을 ship2, 그 오른쪽에 위치한 선박을 ship3, 가장 오른쪽에 위치한 선박을 ship5, 마지막 선박을 ship 4라고 정의하였을 때, 3번 장애물을 회피하기 위해 ship 2가 우현으로 회피한다. 2번 장애물을 조우한 ship 4와 ship 5가 각각 좌현과 우현으로 회피하는 것을 확인할 수 있고, 1번 장애물을 회피하기 위해 ship 2와 ship 3가 각각 좌현 우현으로 회피하는 것을 볼 수 있다. 모든 장애물을 회피 한 후 다시 대형을 유지하기 위한 경로를 추종하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.6 동적 장애물 회피 시뮬레이션

동적 장애물 회피 및 대형 유지를 검증하기 위해 Fig. 17와 같이 동적 장애물 1과 2가 대형을 가로지르며 직선 이동하는 시나리오를 구성하였다. 장애물의 제원은 Table 3과 같다.

Table 3 Information of Dynamic obstacle

| Obstacle | Type    | Radius [m] | speed [knot] |
|----------|---------|------------|--------------|
| NO.1     | Dynamic | 5          | 1            |
| NO.2     | Dynamic | 4          | 1            |

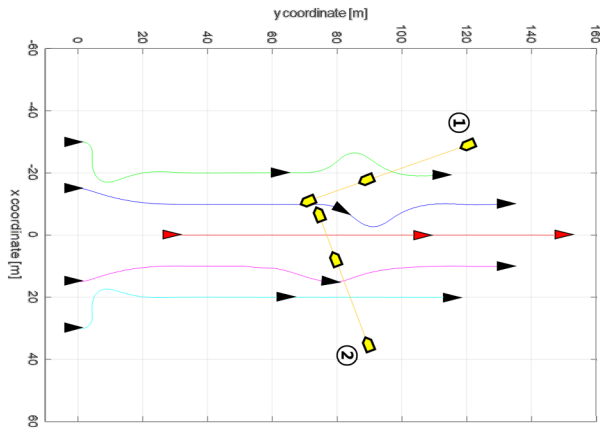


Fig. 17 Dynamic obstacle avoidance simulation scenario

#### 4.7 복합 장애물 회피 시뮬레이션

동적 장애물과 정적 장애물이 모두 존재하는 상황에서 Fig. 18 와 같은 시뮬레이션을 진행하였다. (시나리오에 대한 설명 추가) 2개의 동적 운항체가 직진 운항하며 대형의 경로를 상에 3개의 정적 장애물이 존재한다. 장애물의 제원은 Table 4와 같다.

Table 4 Information of Dynamic and static obstacle

| Obstacle | Type    | Radius [m] | speed [knot] |
|----------|---------|------------|--------------|
| NO.1     | Dynamic | 5          | 1            |
| NO.2     | Dynamic | 4          | 0.75         |
| NO.3     | Static  | 7          | 0            |
| NO.4     | Static  | 4          | 0            |
| NO.5     | Static  | 10         | 0            |

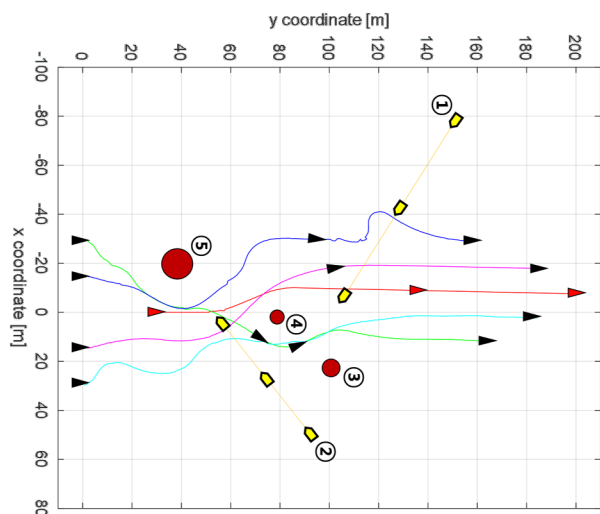
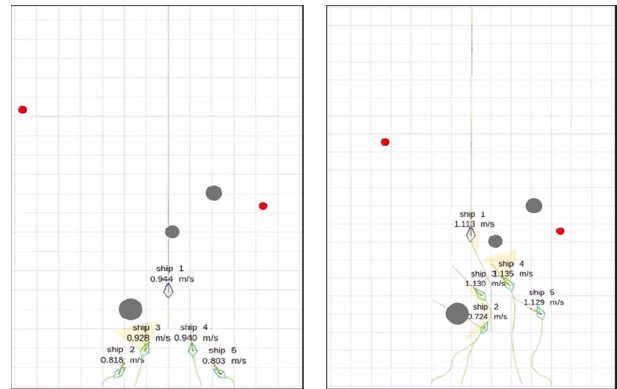
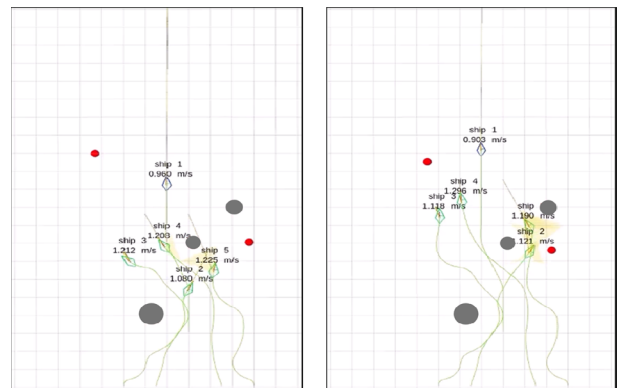


Fig. 18 Complex obstacle avoidance simulation scenario



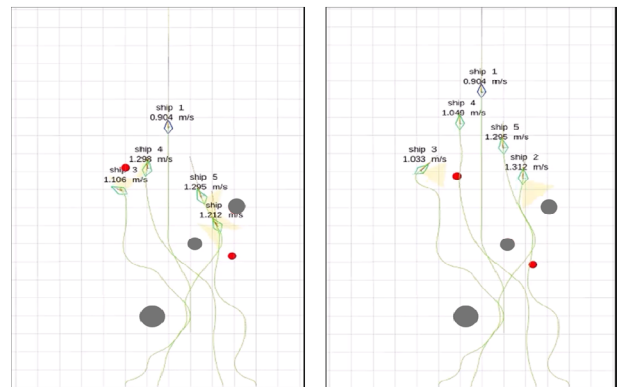
(a)  $t = 4.7s$

(b)  $t = 11.9s$



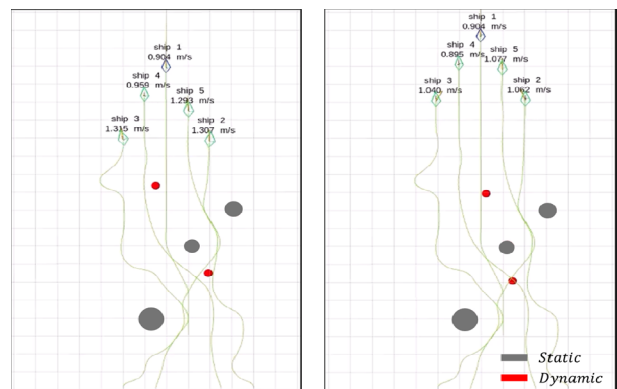
(c)  $t = 17.2s$

(d)  $t = 21.4s$



(e)  $t = 24.2$

(f)  $t = 28.5$



(g)  $t = 31.9s$

(h)  $t = 35.9s$

Fig. 19 Complex obstacle avoidance simulation result

Fig. 19는 Fig. 18 시뮬레이션의 시간에 따른 군집의 이동 경로를 나타낸다. Fig. 19(b)  $t = 11.9s$ 에서 리더가 회피를 수행함에 따라 대형 내 다른 선박도 대형 유지를 위해 이동함을 확인할 수 있다. Fig. 18의 ship 2, ship 5와 같이 일반적인 상황에서는 우현으로 회피를 수행한다. Fig. 19(e)는 1번 동적 장애물을 ship3가 Port-Crossing으로 조우한 상황으로 COLREGs를 고려하면 자선은 침로 유지선이지만, 본 시뮬레이션의 동적 장애물은 회피 행동을 하지 않으므로, 침로를 유지할 경우 충돌이 발생한다. 따라서 Fig. 19(f)와 같이 1번 장애물의 선미부로 회피하여 충돌을 방지하는 것을 확인할 수 있다. 본 시나리오를 통해 정적 장애물과 동적 장애물을 동시에 회피하며 대형을 유지함을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 18에 나타난 군집의 경로를 확인하면, 최초 군집 내의 각 운항체가 목표로 하던 이상 지점과 최종 각 운항체의 이상 지점이 달라진 것을 확인할 수 있으며, 충돌 회피와 대형 유지를 동시에 수행하면서 할당 알고리즘에 의해 새로운 대형을 형성한다는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 기존 리더에 의존적이던 선도 - 추종 방식의 군집 대형 제어 시스템을 개선하기 위해 가변적 리더 선택 전략을 이용하여 상황에 따라 리더가 변화할 수 있는 대형 제어 알고리즘 제안한다. 또한 선박 안전 영역을 반영한 속도장애물 기법을 이용하여 군집 내 선박 사이의 충돌 방지, 선박과 동적 장애물 및 고정 장애물 사이의 충돌 방지를 구현하는 충돌 회피 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 MMG 수확모델을 이용한 다수 무인선의 군집 대형 운항 시뮬레이션 환경을 구축하였다.

본 연구의 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 먼저, 군집의 대형을 이루는 다수 무인선의 경유점 추종 시뮬레이션 결과, 군집이 향하는 경유점에 가장 빠르게 도달 할 수 있는 운항체가 리더로 선정되고, 군집이 신속하게 대형을 재구성하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 제안하는 군집 대형 제어 알고리즘이 가변적 리더 선택 전략을 통하여 효율적으로 대형을 형성함을 확인하였다. 또한 정적, 동적 및 복합 장애물 회피 시뮬레이션을 통해 군집 내의 각 운항체가 장애물에 대한 속도 장애물을 생성하고 장애물을 회피하는 것을 확인 함으로써 제안하는 충돌 회피 알고리즘이 군집의 안전 운항을 보장할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 복합 장애물 회피 시뮬레이션에도 군집 내의 운항체가 안전하게 장애물을 회피함과 동시에 군집 내의 팔로워가 실시간으로 새로운 이상 지점을 탐색하고 대형을 형성하는 것을 확인하여, 제안한 군집의 대형제어 알고리즘과 충돌회피 알고리즘이 효율적 대형 유지와 선박의 안전 운항을 동시에 실현할 수 있음을 검증하였다.

본 연구에서 제안한 군집 제어 시스템은 팔로워의 이상 지점이 고정되어 있다. 향후 연구에서는 다양한 운항 조건에 대응하여 대형 내의 이상 지점이 가변적일 수 있도록 구현하여 협수로, 복

잡한 해상 상태에 대해서도 대응하는 것이 필요하다. 또한 운항체의 운동 특성을 고려한 속도 벡터 생성을 통하여 실시간으로 운항체의 회피 성능을 개선할 수 있는 연구가 함께 수반된다면 더욱 실용적인 알고리즘이 될 수 있을 것이라 기대한다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행되었으며, (2024년 미래 해양플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업, 과제번호 : P0012646) 2024년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 ‘자율운항선박 기술개발사업(20200615)’과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업(No. 2020R1F1A1071610)의 연구결과이다.

## References

- Baek, S., Kim, M. and Woo, J. 2024. A formation control of swarm unmanned surface vehicles using potential field considering relative velocity, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(3), pp. 170-184.
- Chen, K., You, Y., Luo, G. and Guo, X. 2021. Improved multi-UUV formation control for artificial potential fields and virtual navigators, in *2021 IEEE 7th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSE)*, IEEE, pp.108-113.
- Cho, Y., Han, J. and Kim, J. 2020. Efficient COLREG-compliant collision avoidance in multi-ship encounter situations, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Dai, S.L., He, S., Chen, X. and Jin, X. 2019. Adaptive leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with prescribed transient and steady-state performance, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(6), pp. 3662-3671.
- Fiorini, P. and Shiller, Z. 1993. Motion planning in dynamic environments using the relative velocity paradigm, in *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, pp. 560-565.
- Fiorini, P. and Shiller, Z. 1998. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles, *The International Journal of Robotics Research*, 17(7), pp. 760-772.
- Fujii, Y. and Tanaka, K. 1971. Traffic capacity, *The Journal of Navigation*, 24(4), pp.543-552.
- He, S., Wang, M., Dai, S.L. and Luo, F. 2018. Leader-follower formation control of USVs with prescribed

- performance and collision avoidance, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(1), pp. 572–581.
- Jin, K., Wang, J., Wang, H., Liang, X., Guo, Y., Wang, M. and Yi, H. 2022. Soft formation control for unmanned surface vehicles under environmental disturbance using multi-task reinforcement learning, *Ocean Engineering*, 260, pp.112035.
- Kim, D., Choi, H., Kim, Y. and Yeo, D. 2021. Mathematical model for harbour manoeuvres of Korea Autonomous Surface Ship (KASS) based on captive model tests, in *Conference of Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Incheon.
- Kim, J. 2022. *A real-time COLREGS-compliant collision avoidance path planning method for Maritime Autonomous Surface Ships*, MS thesis, Inha University.
- Tak, M.H. and Joo, Y.H. 2014. Formation control algorithm for swarm robots using virtual force, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 63(10), pp. 1428–1433.
- Wang, N. 2010. An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain, *The Journal of Navigation*, 63(4), pp.733–749.
- Wu, T., Xue, K. and Wang, P. 2022. Leader-follower formation control of USVs using APF-based adaptive fuzzy logic nonsingular terminal sliding mode control method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(4), pp. 2007–2018.

- Zhao, J.S., Wu, Z.L., Wang, F.C. and Goodwin, E.M. 1993. Comments on ship domains, *Journal of Navigation*.



박혜리



이효근



전재윤



이동훈



백광준



김상현