

A Study on Improve the Navigation Route Management with Collision Avoidance in Naval Combat Management System

Keun-Hee Kim*, Seok-Hyun Kang**

*Engineer, Naval R&D Center, Hanwha Systems, Gumi, Korea

**Senior Engineer, Naval R&D Center, Hanwha Systems, Gumi, Korea

[Abstract]

This paper presents a method of predicting collisionable targets in the combat system navigation route management function and recommending safe routes by avoiding collisions. The recommended course and speed are presented according to the change path input by the operator, but if there is a target with a possibility of collision, the operator must change it by self-judgment. Therefore, a collision avoidance is needed to assist the operator. In this paper, we introduce an algorithm that shortens the response time to avoid collisions by applying the collision avoidance method based on the Closest Point of Approach and the International Maritime Conflict Prevention Rule. As a result of the test, it was found that the time to return after applying the algorithm was 1.7 times higher avoidance success rate and 7 times higher avoidance reaction time, and reduce the distance by 0.89 times. and through this, it was confirmed that the efficient and safe navigation operation of naval ships was possible.

▶ **Key words:** Naval Combat Managemensystem, Navigation Route Management, Collision Avoidance, Closet Point of Approach, COLEG Rule

[요 약]

본 논문에서는 전투체계 자함 항해계획 및 항해경로 관리 기능에 충돌 회피 경로를 권고하는 기능을 추가하는 방법을 제시한다. 기존의 자함 항해계획 및 항해경로 관리 기능에서는 운용자가 설정한 변침 경로에 따라 침로를 권고할 뿐, 충돌 가능성이 있는 표적이 있는 경우에는 운용자가 수동 판단에 의해 변침해야한다. 따라서 운용자를 보조하기 위한 충돌회피 방법이 필요하다. 본 논문에서는 최단접근점과 국제해상충돌예방규칙을 기반으로 한 충돌회피 방법을 적용하여 운용자가 충돌을 회피하는 대응 시간을 단축시키고 효율적으로 경로를 안내하는 알고리즘을 소개한다. 테스트 결과 개선된 알고리즘을 적용했을 때, 1.7배 높은 회피 성공률과 7배 높은 회피 반응시간을 보였으며 최종 항적거리를 0.89배로 단축할 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 해군 함정의 효율적이고 안전한 항해 기동이 가능케 함을 확인하였다.

▶ **주제어:** 함정 전투체계, 자함 항해계획 및 항해경로 관리, 충돌회피, 최단접근점, 국제해상충돌예방규칙

-
- First Author: Keun-Hee Kim, Co-Author: Seok-Hyun Kang, Corresponding Author: Keun-Hee Kim
*Keun-Hee Kim (winterkkh@hanwha.com), Naval R&D Center, Hanwha Systems
 - **Seok-Hyun Kang (sh14.kang@hanwha.com), Naval R&D Center, Hanwha Systems
 - Received: 2024. 10. 31, Revised: 2024. 11. 14, Accepted: 2024. 11. 27.

I. Introduction

항해 중인 함정은 상시 함정 간 충돌과 같은 사고의 위험성에 노출되어 있다. 예를 들어 2023년 해양사고 통계 자료에 따르면 충돌이 3092건 있었으며 그 중 주요사고(672건) 중 충돌이 265건으로 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.[1] 이러한 위험을 회피하며 항해계획 및 경로를 수립하는 것은 대단히 중요하다.

해군 함정전투체계에서 자함 항해계획 및 항해경로 관리 기능(이하 항해경로 관리)은 안전항해 및 전술작전 수행을 위하여 항해경로에 대한 계획을 수립하고, 계획된 항해 경로를 따라 이동할 수 있도록 지원한다. 특히 운용자가 설정한 항로를 가시적으로 파악할 수 있으며, 설정한 시간 및 속력으로 목표지점에 도달할 수 있도록 계산해 주기 때문에 항해 중 필수적인 기능이다. 그러나 항해 중 권고되는 자함의 항적 실행 정보는 운용자가 설정한 항로에 의해 결정되며 자함과 충돌 가능성이 있는 표적에 대해서는 고려하지 않는다. 그래서 해군 함정전투체계의 충돌회피 기능에서 제공하는 표적의 기동정보, CPA(Closest Point of Approach) 정보, 방위끝림 정보를 참고하여 항해한다. 그러나 충돌회피 기능은 항해 중 충돌위험이 있는 표적만 식별할 수 있을 뿐, 회피를 위한 기동 정보는 제공하지 않는다. 그러므로 전투체계를 운용하는 함교 당직사관은 충돌위험이 있는 표적을 식별한 이후에 명확한 기동 지침을 수립하는 대신 자체적인 직관적 판단에 의존하는 경향이 있다.[2] 또한 해양사고의 발생 원인과 관련하여 국제 해사기구에서는 해양종사자의 인적 오류로 인한 과실과 해양산업의 조직 문제로 80% 이상 사고가 발생하는 것으로 발표하였다.[3] 따라서 운용자의 인적 오류를 방지하기 위해 운용자의 판단을 보조할 수 있는 충돌 회피 기능을 적용한 항해경로 관리 알고리즘을 개발하고자 한다.

본 논문에서는 항해경로 관리 실행 중 표적을 조우하는 상황에서 이동 경로 구간별로 표적의 충돌 위험을 예측하고, 충돌 위험도가 높은 표적에 대해 효율적인 경로로 회피할 수 있도록 적용 가능한 알고리즘을 제안한다. 해당 알고리즘은 국제해상충돌예방규칙(COLREG)의 선박 간 항법규정을 고려하며 충돌 회피 및 현재 구간의 경로 유지를 목적으로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 배경 지식으로 충돌위험 예측, 국제해상충돌예방규칙, 함정 전투체계의 항해경로 관리에 대해 설명한다. 3장에서는 충돌회피 기능을 적용한 자함 항해계획 및 항해경로 관리 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 기존 항해경로 관리 대비

제안한 알고리즘을 적용한 소프트웨어의 이점을 평가하고, 마지막 5장에서 결론으로 논문을 마무리한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Risk of collision Prediction

선박의 충돌위험 예측 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 CPA에서의 TCPA(Time of the Closest Point of Approach)와 DCPA(Distance of the Closest Point of Approach)를 이용하여 충돌위험을 판단하고자 한다. CPA는 Closest Point of Approach의 약자로 두 대의 선박이 가장 가까이 접근할 수 있는 지점을 뜻한다. TCPA는 상대 선박이 현재 위치에서 본선과 가장 가까운 지점을 통과하는 시점까지 걸리는 시간이고, DCPA는 상대선박이 본선으로 접근할 때 본선과 가장 가까운 지점까지의 거리를 의미한다.[4] TCPA와 DCPA를 계산하는 방법은 아래와 같다.

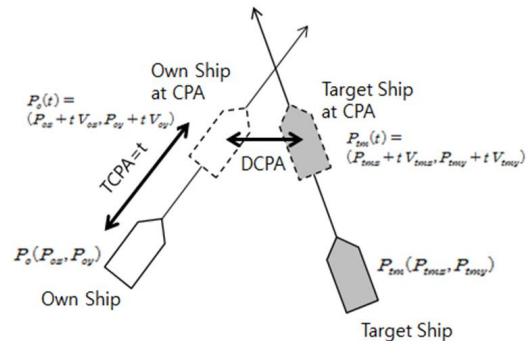


Fig. 1. Definition of CPA

Fig. 3.에서 표적의 현재위치 $P_{tm}(P_{tm_x}, P_{tm_y})$ 에서의 표적 속도를 $V_{tm}(V_{tm_x}, V_{tm_y})$ 라 하고, 자함의 현재 위치 $P_o(P_{ox}, P_{oy})$ 에서의 자함 속도를 $V_o(V_{ox}, V_{oy})$ 라 할 때, t 초 후의 표적과 자함의 위치는 다음과 같다.

$$P_{tm}(t) = (P_{tm_x} + tV_{tm_x}, P_{tm_y} + tV_{tm_y})$$

$$P_o(t) = (P_{ox} + tV_{ox}, P_{oy} + tV_{oy})$$

t 초 후, 자함에 대한 표적의 상대적 위치 속도를 각각 아래로 가정한다.

$$P_x = P_{tm_x} - P_{ox}, V_x = V_{tm_x} - V_{ox}$$

$$P_y = P_{tm_y} - P_{oy}, V_y = V_{tm_y} - V_{oy}$$

t 초 후, 자함에 대한 표적의 상대 거리 $R(t)$ 는 다음과 같다.

$$R(t) = \sqrt{(P_x + tV_x)^2 + (P_y + tV_y)^2}$$

$R^2(t)$ 는 시간에 대한 오목함수이므로 최소점이 하나 존재하고, T_{cpa} 에서 최소가 된다.

$$\frac{d}{dt}R^2(t) = 2T_{cpa}(V_x^2 + V_y^2) + 2(P_x V_x + P_y V_y) = 0$$

해당 수식을 정리하면 T_{cpa} 는 다음과 같다.

$$T_{cpa} = -\frac{P_x V_x + P_y V_y}{V_x^2 + V_y^2}, (\text{단, } V_x^2 + V_y^2 \neq 0)$$

T_{cpa} 는 표적과 자함의 속도 및 상대적인 위치에 따라 양(+) 또는 음(-)의 값을 가지며, 값이 음인 경우에는 CPA를 지나온 경우이므로 T_{cpa} 는 양수인 경우에 한해서 CPA가 존재한다.

T_{cpa} 에서 자함의 위치를 $P_o(t)$, 표적의 위치를 $P_{tm}(t)$ 라 할 때, 계산된 D_{cpa} 는 다음과 같다.

$$D_{cpa} = |P_o(t) - P_{tm}(t)|$$

1.2 COLREG Rule

선박과 표적의 위치, 속력, 침로에 따라 선박과 표적의 관계는 다양하게 존재한다.[5]

국제해상충돌예방규칙은 1972년 국제 해사 기구 (IMO)에서 제정한 규칙으로, 충돌 사고 예방을 위한 회피 기동을 규정하려는 목적으로 제정되었다. 국제해상충돌예방규칙은 선박의 조우 상황을 Head on, Crossing, 그리고 Overtaking 상황으로 분류하고 각 상황에 대하여 선박들이 준수하여야 할 항행규칙을 규정한다.[6]

해당 논문에서는 Rule 13~15을 참고하고자 한다.

Table 1. COLEG Rule for Encounter situation

COLEG Rule	Encounter situation
Rule 13	Overtaking situation
Rule 14	Head on situation
Rule 15	Crossing situation

Rule 13. Overtaking situation

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

(b) 다른 선박의 정형 후 22.5도를 넘는 후방 측, 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 situation

(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 situation

(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.[7]

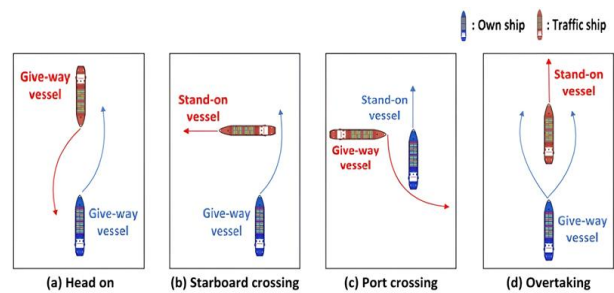


Fig. 2. Classification Collision Situations based on COLREGs rules[8]

1.3 Navigation Route Management

자함 항해계획 및 항해경로 관리 기능의 기본 개념은 다음과 같다. 자함은 함정이 이동하는 항해 경로를 계획하고 다수의 항해 경로를 편집하여 관리할 수 있다. 항해 경로는 이동 경로를 구성하는 변침점과 경로를 기준으로 하는 좌우의 항로 폭으로 구성된다.



Fig. 3. Navigation Route Management User Interface

운영자는 설정한 항해계획을 선택하고 목표지점까지 위치하기 위한 설정 정보를 입력하여 실행한다. 실행 시, 경로가 전술 화면에 표시되며 권고 침로 및 속력 정보 등 항해 경로를 유지하기 위한 계산정보가 제공된다.

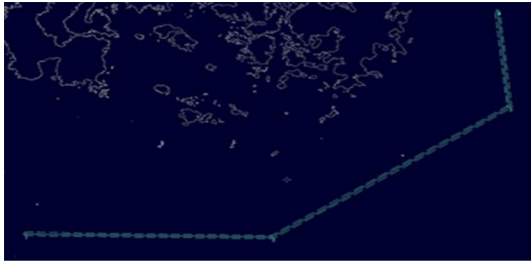


Fig. 4. Navigation Route in CMS Main Display

항해계획 실행정보			
항해정보			
항해계획명	Plan1	1함대	
변침점	1	경로전입전	
현재시간	19:28:08	자함 최대 속력 초과	
정로선	yds		
권고침로	342.9 °	권고속력	83.85 kts
변침점방위	337.7 °	변침점거리	163.90 NM
다음침로	310.5 °	변침점 도착시간	19:28:08
실침로	000.0 °	실속력	0.00 kts
유향	180.0 °	유속	20.00 kts
항로정보			
도착목표시간	02일 19시 59분	잔여시간	∞
도착예정시간	∞	잔여거리	197.38 NM

Fig. 5. Navigation Route Management Execution

운용자는 항해계획 실행정보 창의 정보를 참고하여 항해할 수 있지만 해당 정보는 충돌 방지를 고려하지 않는다. 따라서 운용자는 충돌의 위험이 있는 표적을 대비하기 위하여 주기적으로 전술화면에서 표적을 관찰해야한다. 전술화면에서는 표적에 대한 정보와 CPA 정보를 확인할 수 있으나 회피는 운용자의 판단에 의해서만 이루어진다.

III. The Proposed Scheme

본 연구에서는 항해 경로에 따라 항해 중인 함정의 충돌 회피 위험을 탐지하고 안전거리를 확보하며 운용자에게 효율적인 경로를 권고하는 알고리즘을 제시한다. 운용자가 항해경로 관리 실행 중 항해경로 구간 내 진입한 시점에 위협표적을 선정한다. 구간 내 항해 시 선정된 위협표적에 대해 충돌 회피하는 알고리즘을 적용하며, 충돌회피를 위한 권고 속력 및 침로는 운용자에 의한 응답시간과 알고리즘 수행 주기에 따른 응답시간의 차이를 고려하여 2초마다 계산하여 갱신하도록 한다.

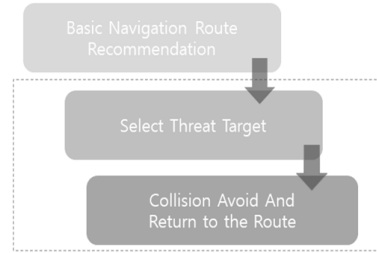


Fig. 6. Improvement Process of Navigation Route Management

1. Select Threat Target

항해경로 관리 실행 시, 경로 변침 구간마다 달라지는 자함 침로의 고려가 필요하다. 따라서 항해경로의 변침 구간에 진입할 때마다 자함에서 가까운 표적 100개의 표적에 대해 TCPA와 DCPA를 계산한다.

일반적으로 충돌의 위험(Risk of Collision)이 있는 경우는 “실질적인 충돌의 위험이 있어 충돌항법이 적용되는 시점으로, 거리상 통상 6해리를 보며 이는 선박의 크기나 속력에 따라 달라지는 경우”이다. 또한 충돌회피 동작은 박근상태(Close-Quarters situation - 선박이 회피동작을 취한다 하더라도 충돌위험을 벗어나기 힘든 상황 충돌 약 6분 전 거리로 약 3해리(2~4해리))를 초래하지 않도록, 충분한 시간 내에 상대선이 인지할 수 있도록 크고 명확하게 하여야 한다.[9] 때문에 TCPA와 DCPA를 계산한 표적 중, TCPA가 6분 이내이고 DCPA가 6해리 이하인 표적을 선별하고 해당 표적이 현재 경로 구간 안에서 충돌 위험이 있는지 식별한다. 현재 경로에서 벗어나자마자 충돌 위험이 있는 표적이 있을 수 있으므로 통상적으로 충돌항법이 적용되는 지점인 6해리를 기존 구간에 더하여 지정하여 CPA 지점이 해당 구간 안에 있는지 판단한다.

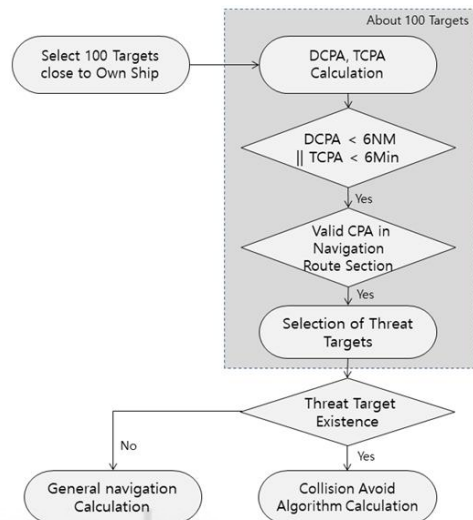


Fig. 7. Select Threat Targets

Fig.8.은 위협표적으로 선정되는 표적의 예시이다. TCPA가 6해리 미만이거나 DCPA가 6분 이내이며 항해경로 구간에서 6해리를 더한 구간 내 CPA 지점이 존재한다.

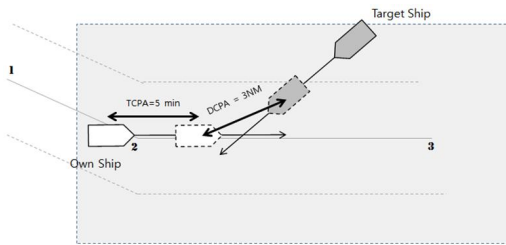


Fig. 8. In case of Threat Target

Fig.9~10은 위협표적으로 선정되지 않는 경우이다. Fig.7.에서 표적은 CPA 거리와 시간이 충분하여 안전한 환경 안에서 충돌 없이 항해할 수 있다. Fig.8.에서 표적은 현재 항해 구간 내 CPA 지점이 없다. 따라서 자함이 다음 항해 경로 구간으로 변침할 경우 CPA가 달라지므로 현재구간이 아닌 다음 구간 변침시 위협표적 선정에 고려되는 표적이다. 따라서 해당 표적들에 대해서는 현재 경로에서 회피 절차를 수행하지 않는다.

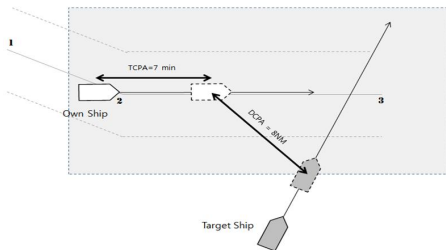


Fig. 9. In case of excluded Threat Target

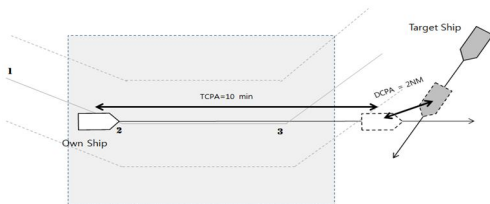


Fig. 10. In case of excluded Threat Target(2)

2. Collision avoid and Return to the route

일반적으로 충돌회피 문제에 있어서 가장 문제시 되고 있는 것은 상대선박의 의도를 미리 파악할 수 없고 단지 선박의 진행사항으로만 그 의도를 예측해야 하는 것이다. 따라서 선박충돌 회피지원 모델 개발을 위한 알고리즘은 상대선박의 침로와 속도를 유지한다는 가정에서 계획이 수립된다.[10]

본 연구에서는 CPA 개념을 적용한 충돌 교차 회피 방법과 국제해상충돌예방규칙을 기반으로 한 COLREG 회피 방법을 제안한다. 충돌 교차 회피 방법은 충돌회피를 위한 최소 안전거리를 6해리로 정의하고 자함과 표적이 범위 내에 위치하지 않는 경우 최소 6해리를 두고 교차하여 회피할 수 있도록 하는 방법이다. 만약 자함과 표적이 이미 6해리 이내에 위치한다면 COLREGs 규칙에 기반한 COLREG 회피 방법을 사용한다. 회피 지점 선정 후 해당 지점으로 가기 위한 권고 속력과 침로를 계산하며 회피 후 현재 항해 경로로 복귀하도록 속력과 침로를 변경한다.

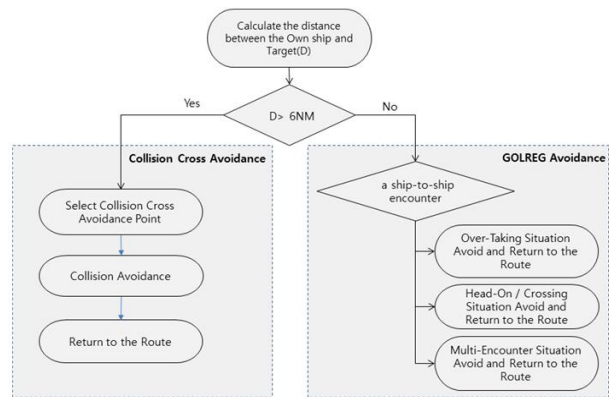


Fig. 11. Collision Avoid Process

1.1 Collision Cross Avoidance

표적이 충돌 위험 거리인 6해리 안에 있지 않을 때, 이후 CPA 지점에서의 안전한 회피를 위해 충돌 회피 위험구역을 벗어나는 방법이다. 충돌회피 지점에서 급격한 변침을 막기 위해 설계하였다. 먼저 위협 표적 중 가장 빠른 TCPA를 가진 표적을 선정하고, TCPA 시점에 위협표적들의 위험 구역이 겹치는지 유무에 따라 회피 지점을 선정한다. 교차 회피 지점 선정 후 권고 속력과 침로를 변경하고 위험 구역을 벗어났을 때, 현재 항해 경로와 지정 속력으로 복귀하도록 권고한다.

회피해야 하는 표적의 안전 구역이 다른 표적의 안전 구역과 겹치지 않을 때, 하나의 안전 구역에 대해서 교차하여 지나갈 수 있도록 한다. TCPA를 t초라고 가정할 때, t 초 뒤 CPA 지점에서 6해리 떨어진 곳을 교차하여 지나가기 위해 P(t)인 지점에서 반지름 6해리인 원을 그린다. 해당 원을 위험구역이라 한다.

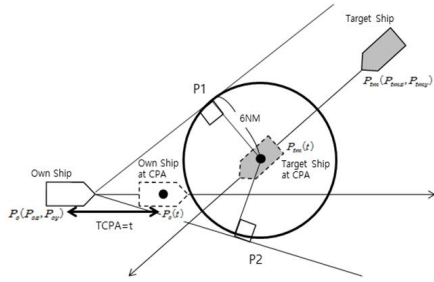


Fig. 12. In case of One Section Cross Avoid

Fig.12.에서 CPA가 되는 시점(t초 후)의 표적의 위치에서 반지름 6해리인 원을 교차하여 지나가는 지점(P1, P2)이 현재 자함의 위치에서 가장 최단 거리로 충돌위험지역을 벗어나는 구간이다.

교차 회피방법 중 회피해야 하는 표적의 위험 구역이 다른 표적의 위험 구역과 중복되는 경우, 해당 표적을 회피하려다 다른 표적의 충돌위험 구간에 들어갈 수 있다. 따라서 모든 위험구역을 회피하는 지점을 선정해야 한다.

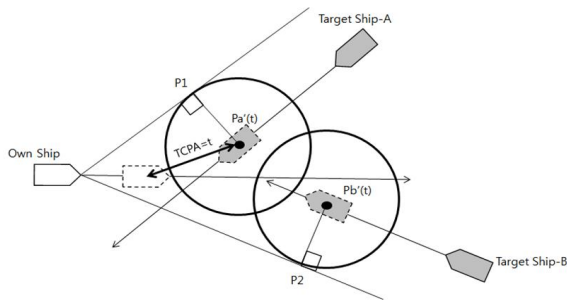


Fig. 13. In case of Multi Section Cross Avoid

Fig.13.에서 가장 가까운 TCPA가 t초일때, 다른 위협 표적 B의 t초 후 위치를 계산하여 해당 안전 구역이 표적 A의 위험 구역과 중복되는지 계산한다. 중복되는 경우에는 가장 외곽의 접점 P1, P2이 교차 회피할 수 있는 지점이다. t초 후 안전구역이 겹치는 표적이 다수일 경우에는 (표적 개수 * 2)개의 원의 접선이 있으나 자함의 현재 침로 기준에서 가장 벗어난 두 지점(P1,P2)이 다중 표적에 대해 충돌위험구역을 벗어날 수 있는 지점이다.

충돌 교차 회피를 위한 원의 접점 (P1, P2)를 선정했다면 해당 접점에서 어느 방향으로 회피를 할 것인지 선택하여야 한다.

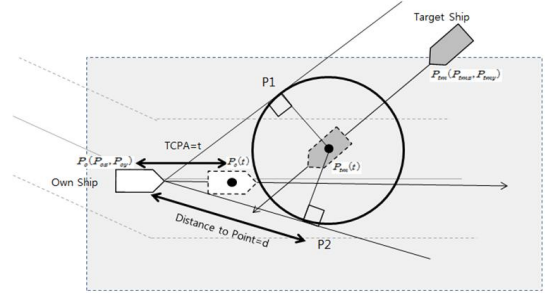


Fig. 14. Select Collision Cross Avoid Point

Fig.14.에서 교차하는 지점은 원의 접점 P1, P2가 있다. 만약 두 접점 중 하나의 지점만 향해 경로 내 존재한다면, 현재 경로 유지를 위해 구간 내 있는 접점을 권고 회피 지점으로 선택한다. 두 지점이 모두 구간 내 존재하거나 존재하지 않는다면, 경로 복귀를 위해 항로 폭 중간 지점에서 더 가까운 지점을 선택한다. Fig.11.에서는 항로 중간 지점에 더 가까운 P2를 선택하여 해당 침로로 권고한다. 자함에서 P2까지의 거리 d를 t초 내에 갈 수 있도록 하기 위해 속력은 $V_o = d/t$ 로 권고한다.

회피 후 복귀를 하는 시점은 TCPA 6분, DCPA 6해리 이상이 될 때이다. 해당 시점에는 안전한 거리 밖에서 표적을 지나칠 수 있다고 판단하여 다시 경로로 복귀하여 다음 변침점으로 항해하도록 침로를 권고한다.

1.2 COLREG-Base Avoidance

선박 간 조우 상황인 Over-Taking, Head-On, Crossing 상황 이외에 다중 표적을 맞닥뜨리는 상황을 Multi-Encounter으로 정의하고 각 조우상황에 따른 회피 방법에 대해 설명한다.

Over-Taking 상황에서 회피 방향을 지정하기 위해서는 다른 표적과의 조우 상황을 고려해야 한다. 만약 자함의 오른쪽에 위협표적들이 있다면 자함의 왼쪽 방향으로 추월하기 위해 (자함의 침로-45도) 방향으로 권고하고 자함의 왼쪽에 표적들이 있다면 자함의 오른쪽방향으로 추월하기 위해 (자함의 침로+45도) 방향으로 권고한다. 완전히 앞질러 멀어질 때까지 추월당하는 선박의 진로를 방해하지 않기 위해 TCPA가 음수가 되는 시점에서 항해 경로로 복귀하지 않고 표적과 같은 방향으로 경로를 유지한다. 충돌위험이 적다고 판단하는 6해리를 벗어나는 지점이 될 때 항해경로 지점으로 복귀하도록 침로를 권고한다.

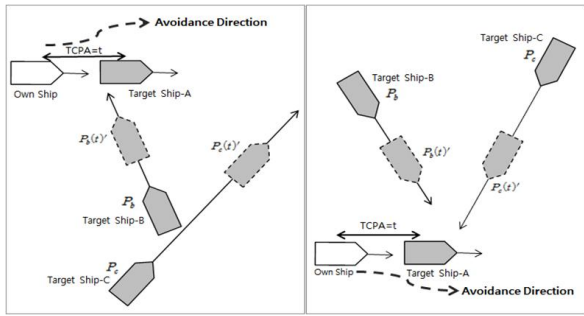


Fig. 15. Avoidance Direction in Over-Taking Situation

충돌을 방지하기 위해 박근상태인 3해리가 되는 지점까지는 표적의 속력보다 낮은 속력으로 권고하고 자함과 표적의 거리가 3해리가 넘어가는 시점에서 본래 자함의 속력으로 권고한다.

선박 간 조우상황이 Head-On 이거나 Crossing 상황일 때 자함은 오른쪽으로 회피해야한다. 최소 안전거리를 확보하기 위한 빠른 변침이 필요한 상황이며 (자함의 침로 +90도) 방향으로 권고한다. 충돌을 방지하기 위해 최소 안전거리인 6해리를 벗어나는 것을 지점을 찾아 회피한다.

Fig.16~17 에서 현재 자함의 위치에서 권고 지점인 P까지의 거리를 d라고 할 때, 권고속력은 $V_o = d/t$ 이다.

자함과 표적의 상대 위치가 변경됨에 따라 TCPA를 갱신하고, TCPA 값이 음수인 경우에 충돌위험이 없다고 판단하여 항해경로로 복귀하도록 권고한다.

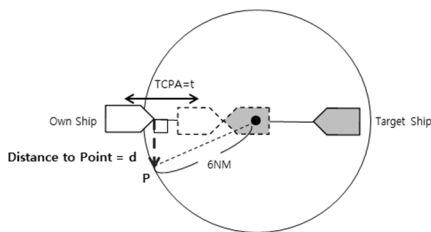


Fig. 16. Avoidance Direction in Head-On situation

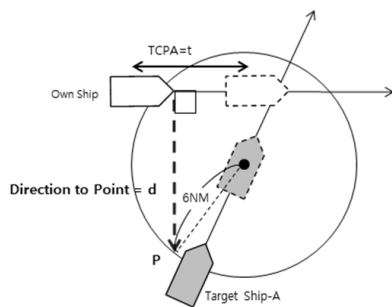


Fig. 17. Avoidance Direction in Crossing situation

Muti-Encouter 상황에서는 자함 기준 가장 오른쪽 표적을 기준으로 회피하도록 권고한다. 자함의 왼쪽에서 다

가오는 Crossing 상황에서는 자함이 유지선이고 표적이 피항선이므로 피항선에서 회피를 고려해야 한다. 또한 오른쪽으로 변침하게 되면 왼쪽 표적들에 대해 TCPA 와 DCPA 값이 커지게 된다. Over-Taking 상황에서도 자함이 좌현을 선택하게 되면 좌측에 있던 표적들 중에서도 회피해야 할 회피 표적이 생길 수 있다. 따라서 전체 위협 표적에 대해 우측으로 회피하도록 권고한다.

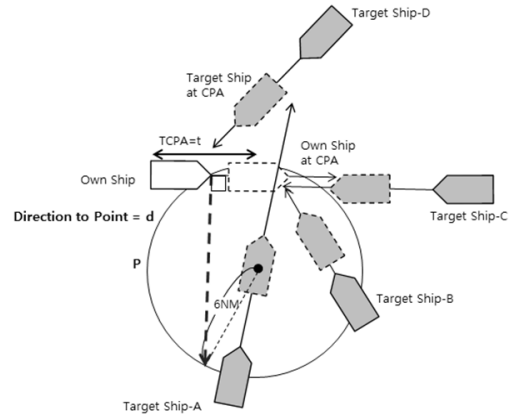


Fig. 18. Avoidance Direction in Multi-Encounter situation

Fig.18.에서 TCPA가 가장 가까운 표적은 Target Ship-D이지만 회피 침로는 자함 침로 기준 가장 오른쪽 표적인 Target Ship-A를 기준으로 오른쪽으로 회피하도록 권고한다. 가장 빠른 TCPA를 t초라고 가정할 때, t초 후 표적의 위치 중 가장 오른쪽에 있는 Target Ship-A기준으로 6해리의 위험 구역을 그린다. 현재 자함의 침로+90도 방향으로 만나는 지점인 P지점을 선택한다. P까지의 거리를 d라고 할 때, 권고속력은 $V_o = d/t$ 이다. 변침 후 TCPA 값이 음수가 되는 지점에서 충돌위험이 없다고 판단하여 항해경로로 복귀하도록 권고한다.

IV. Test and Evaluation

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 알고리즘을 적용한 소프트웨어를 전투체계 시뮬레이션 환경에서 시험하였다.[11] 해당 시험 환경은 전투체계 시험 운용평가에서도 사용이 되는 시뮬레이션 환경이며 현재 전투체계에서 사용되고 있는 DSS(Data Sharing Service) 방식을 이용해 통신한다. 시험환경은 개체생성기 PC 1대, 시뮬레이터 PC 2대로 구성된다. 개체생성기 PC에서는 표적 시뮬레이터와 자함 시뮬레이터를 실행하여 모의 표적정보와 자함 정보를 시뮬레이터 PC 1, 2에 전송한다. 표적 시뮬레이터는 임의의 침로와 속력, 위치정보를

가진 수동 표적을 생성하고 모의 동작하게 하며, 자함 시뮬레이터는 운용자가 입력한 침로와 속력, 위치정보를 이용하여 자함이 이동하는 것처럼 모의 동작하게 한다.

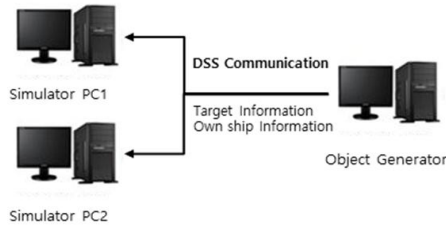


Fig. 19. Test Environment

시뮬레이터 PC 1에서는 현재 전투체계의 항해계획 관리 기능과 충돌회피 기능을 탑재하고 시뮬레이터 PC 2에서는 충돌회피 알고리즘을 적용한 항해계획 관리 기능을 탑재했다. 시험을 위해 개체생성기 PC에서 자함 주변 100개의 표적을 생성하였으며 각 시뮬레이터 PC에 동일한 항해계획 50개를 생성하였다. 자함의 침로와 속력은 개체생성기에서 설정하며 자함과 표적과의 거리가 0.1NM 이내 일 경우에는 회피에 실패했다고 판단한다.

시뮬레이션 PC1에서 시험은 다음과 같이 진행하였다. 운용자를 모의하기 위한 시험 대상자는 국내 전투체계 개발 경험이 5년 이상이고 항해경로 관리 시험이 가능한 10명을 선정하였다. 운용자는 항해경로를 실행하여 모의 항해하며 기존 전투체계에서 확인 가능한 TCPA, DCPA, 방위끝림 정보를 이용하여 수동 판단하여 충돌을 회피한다.

시뮬레이터 PC2에서는 개선된 항해경로 관리를 실행하여 시험한다. 운용자는 충돌회피 알고리즘이 적용되어 계산된 회피 지점으로 권고하는 침로 및 속력을 개체생성기 PC에서 설정하여 목표지점까지 모의 항해한다.

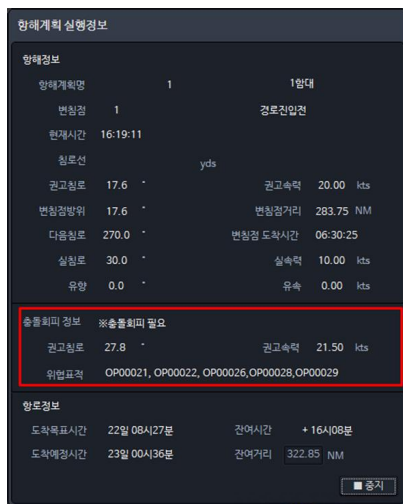


Fig. 20. Improved Navigation Route Management

Fig.20.은 충돌회피 기능을 탑재한 개선된 항해경로 관리 실행창이다. 기존 항해계획 실행정보 창에서 충돌회피 정보 구역을 추가하여 충돌회피 발생 시, 운용자가 충돌 위험성에 대해 인지하고 해당 침로와 속력으로 항해할 수 있도록 권고한다. 또한 충돌위험성이 가장 높은 5개의 표적들을 위협표적에 표시하여 운용자가 확인할 수 있게 한다. 충돌회피가 필요하지 않은 경우 충돌회피 정보 아래 권고침로, 권고속력, 위협표적은 공란으로 표시되며 운용자는 기존 항해정보의 권고침로 및 권고속력 정보를 이용하여 항해한다.

충돌회피 알고리즘을 검증하기 위해 모의 데이터를 이용하여 150번의 시험을 진행하였으며 각 시뮬레이터 PC에서 시험한 충돌회피의 성공률과 회피응답시간, 최종 항적거리를 평균값을 비교 분석하였다.

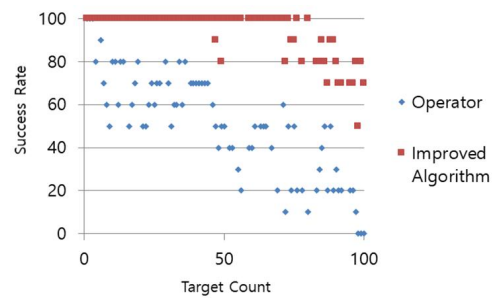


Fig. 21. Success rate of Collision Avoidance According to Target Number

Fig.21.에서는 위협표적 개수에 따른 충돌회피 성공률을 나타낸다. 충돌회피 시험결과, 운용자가 직관적으로 판단한 경우 충돌회피 성공률이 평균 53.125%로 그쳤으며 항해경로 내 표적이 50개 이상인 경우부터는 성공률의 평균이 30%이하로 내려갔다. 하지만 개선된 항해경로 관리를 실행해서 모의 항해한 경우에는 94%의 충돌회피 성공률을 보였으며 표적이 50개 이상이 넘어가더라도 88%의 성공률을 보였다. 개선된 소프트웨어로 자동 계산한 경우 기존 운용자의 판단에 의존한 충돌회피 성공률보다 평균 1.7배 이상 더 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Result of Collision Avoid Success Rate

Subject	Success Rate	Standard Deviation
Operator	53.125%	33.156%
Improved Algorithm	94.125%	4.872%

Table 3. Result of Collision Avoid Reaction Time.

Subject	Reaction Time	Standard Deviation
Operator	14.754 s	11.22%
Improved Algorithm	0.05756 s	0.021%

운영자가 직접 충돌회피 표적을 확인하여 충돌회피를 하는 경우에는 회피에 평균 14초 이상 시간이 걸렸으며 표적이 많을수록 시간이 많이 걸렸다. 개선된 항해경로 관리는 0.05초 내에 회피지점을 계산하지만 2초마다 갱신하여 정보를 전달하므로 실제로는 기존 대비 평균 7배 정도 응답시간이 빠르다고 할 수 있다. 또한 충돌회피 성공률과 의사결정 시간은 운영자별로 그 편차가 매우 큰 것이 확인되었다.

최종 항적거리를 측정하여 항해 경로를 얼마나 효율적으로 운행하였는지 시험하였다. 최종 항적거리는 충돌회피를 하면서 항해 경로 유지 및 복귀를 하여 최종 목적지까지 도착했을 때, 자함이 운행한 실제거리이다. 아래는 총 50개의 항해계획에 대한 최종 항적거리 비교 결과이다.

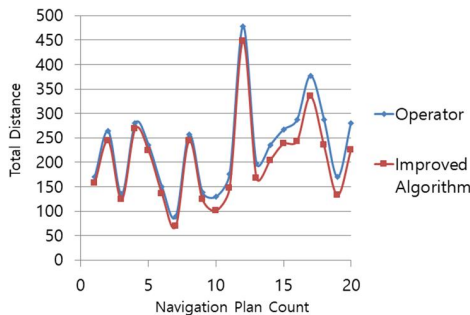


Fig. 22. Total Distance to the Destination

Table 4. Result of Total Route Distance.

Subject	Average of Total Route Distance	Standard Deviation
Operator	234 Nautical Mile	155.432
Improved Algorithm	262 Nautical Mile	40.6894

제안된 충돌회피 알고리즘을 사용하는 경우 기존 소프트웨어에 비해 최종 항적 거리가 평균 0.89배로 줄어 들었다. 이는 충돌회피 후 경로로 복귀하여 항해하기 위해 더 짧은 거리가 소요되었다는 것을 의미한다.

제안한 방법을 통하여 충돌회피 성공률을 높이고 충돌회피 의사결정 시간을 단축하면서도 총 항적거리를 줄일 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 제안된 충돌회피 알고리즘으로 다중 표적 상황에서 실시간으로 얼마나 많은 시간이 걸리는지 성능을 평가해 보았다.

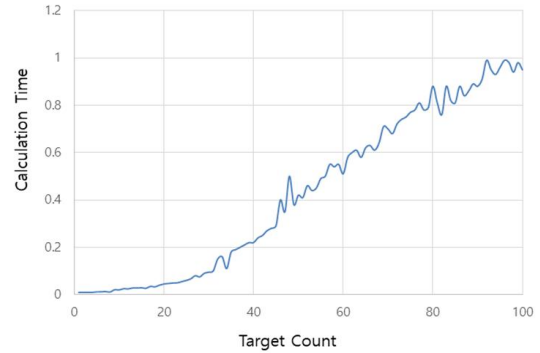


Fig. 23. Calculation Time by Target Count

위험표적이 증가할수록 계산시간이 증가하는 추세를 보이나 1초 내에 최대 100개의 표적에 대해 충돌회피 계산을 수행하므로 갱신주기 2초 내에 계산을 수행할 수 있음을 확인하였다.

V. Conclusions

항정 전투체계의 충돌회피는 항해 중 중요한 요소이다. 하지만 항해경로 관리 실행 중 충돌회피를 할 때에는 오직 운영자의 직관적 판단에 의해서 이뤄지며 이는 운영자의 숙련도에 의존하는 방법이므로 안전한 항해를 저하시키는 요인이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 항해경로 관리 실행 중 자함의 충돌 위험 표적을 식별하고 해당 표적들에 대해 충돌을 회피하며 효율적으로 경로를 유지할 수 있는 자동화 방법에 대해서 제안하였다. 또한 국제해상충돌예방규칙을 사용하여 보다 신뢰성 있는 충돌회피 결정이 가능하도록 했다. 시뮬레이션 결과 분석을 통해 시험한 결과 기존의 직관적 판단에 의하여 회피를 결정하는 기법보다 더 높은 충돌회피 성공률을 보이며 빠른 충돌회피 결정이 가능함을 보였다. 또한 충돌회피시 표적과의 회피만을 고려한 기존 기법에 비해 항해경로 유지 및 복귀를 고려함으로써 기존 항적 실행보다 짧은 거리를 항해할 수 있음을 확인하였다. 그러나 시뮬레이션을 통해 시험한 결과는 기상 조건이나 조류와 같은 외부 환경요인이 반영되지 않은 한계가 있다. 따라서 외부 환경요인에 따른 변침요소들을 반영한 충돌회피 알고리즘 개발 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

본 연구를 통해 제안한 항해경로 관리가 함정 전투체계에 적용된다면 신속한 충돌회피로 인해 전투체계는 안정적인 함정의 운용이 가능해지고, 운용자의 의사결정 시간을 감소시키므로 작전효율성이 향상되며 항해거리를 단축하여 함정의 작전 운용시간을 줄이는 효과를 낼 수 있을 것이다. 향후 연구로 충돌회피 및 항적거리 단축이 전투체계 작전 운용에 어떤 영향을 주는지 평가하고자 한다.

REFERENCES

- [1] KMST, <https://www.kmst.go.kr/web/board.do?menuldx=108&bbsl dx=100512>.
- [2] Jeong-soo Ha, Yeon-hwan Jeong, "A Study on the Critical for Collision Avoidance of Naval Ships for Obstacles in Constant Bearing, Decreasing Range(CBDR)," Journal of Navigation and port Research, Vol. 43, No. 6, pp. 377-383, Nov. 2019. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2019.43.6.377>
- [3] Jun-Hyuk Lee, "A Study on Data Mining Analysis of Human Factors in Marine Accidents : Focused on Human Error," Cultural Interaction Studies of Sea Port Cities, Vol. 28, No. 1, pp355-373, April, 2024. <https://doi.org/10.35158/cisspc.2023.04.28.355>
- [4] Myoung-ki Lee, Young-Soo Park, Won-Sik Kang, "A Study on Construction of Collision Prevention Algorithm for Small Vessel Using WAVE Communication System," Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol 25, No. 1, pp.1-8, February, 2019. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.1.001>
- [5] Chang Sook Yang, Kyubaeak Kim, "A Study on the Calculation of Course Recommendation for Collision Avoidance Using Safety Kistance with Target," Korea Institute of Military Science and Technology, pp.331-334, June 2012.
- [6] IMO. Convention on the international regulations for preventing collisions at sea, 1972 (colregs), year = 1972, <http://www.imo.org/en/about/conventions/listofconventions/pages/colreg.aspx>.
- [7] Gwang sung Go, "Study On Collision Avoidance Performance of a Ship in Waves," Seoul Graduate School, August 2022.
- [8] Yeongu Bae, Jaeha Choi, Jeonghong Park, Miniu Kang, Hyejin Kim, Wonkeun Yoon, "Event-Triggered NMPC-Based Ship Collision Avoidance Algorithm Considering COLREGs," Journal of the Society of Naval Architects of Kore, Vol. 60, No. 3, pp. 155-164, June 2023. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2023.60.3.155>
- [9] Sun-Jin Yoon, Joo-Yong Kim, Donghan Jung, "A Study and development on Collision Avoidance of Naval Combat Management System," Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 1625-1626, June 2016.
- [10] Hyong-Seon yang, Byeong-Deok Yea, "Ship Collision Avoidance Support Model in Close Quarters Situation(II)," Journal of Navigation and Port Research, pp. 199~124, April 2005. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2005.29.10.827>
- [11] Jin-Hyang Ahn, Chi-Sun Baek, "A Study of the Submarine Periscope Detection Algorithm using Characteristic of Target HRRP Information," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 29, No. 1, pp. 131-138, January 2024. <https://doi.org/10.9708/jksci.2024.29.01.131>

Authors



Keun-Hee Kim received the B.S degrees in Computer Science and Engineering from Yeungnam University, Korea, in 2015. She is currently working in Hanwha Systems Co. She is interested in Naval Combat

Management Systems and Standard Programming Model with Software Design Pattern.



Seok-Hyun Kang received the B.S degrees in Information and Communication Engineering from Yeongnam University, Korea, in 2014. He is currently working in Hanwha Systems Co. He is interested in Naval Combat

Management Systems and Database Management System.