

소형 선박의 충돌 회피 시스템 검증에 관한 연구

편장훈* · 류성곤** · 김인섭***

* 한국해양교통안전공단 주임연구원, ** 한국해양교통안전공단 선임검사원, *** 한국해양교통안전공단 스마트안전연구실장

A Study on the Validation of the Collision Avoidance System for Small-size Vessels

Jang-Hoon Pyun* · Sung-Gon Ryu** · In-Seob Kim***

* Assistant Researcher, Korea Maritime Transportation Safety Authority, ** Senior Surveyor, Korea Maritime Transportation Safety Authority, *** Chief, Smart Safety Research Department, Korea Maritime Transportation Safety Authority

요 약 : 중앙해양안전심판원(2019)에서 발표한 최근 5년의 해양사고통계자료에 따르면 충돌사고의 대부분은 20톤 미만의 어선에서 발생하고 있으며 전방 부주의, 경계 소홀 등의 운항과실로 인한 사고가 주요 원인으로 나타나고 있다. 이러한 사고 방지를 위해 운항자를 대상으로 훈련 및 교육을 강화하고 있지만 충돌사고는 빈번히 발생되고 있으며 충돌 사고를 줄이기 위한 기술적인 방안 또한 지속적으로 개발중에 있다. 본 연구에서는 고속 활주형 소형 선박에 WAVE 통신 기술을 적용하여 선박 간 거리, 속도, 방위에 기반한 조우 상황을 고려하여 충돌 회피 동작이 가능한 제어 알고리즘을 개발하였으며, WAVE 통신-제어를 결합하여 충돌 회피 시스템을 구축하였다. 그리고 충돌 회피 동작의 검증을 위해 두 소형 선박간의 정면, 추월, 교차의 3가지의 조우 시나리오에 대해서 시뮬레이션을 수행하고 실선 시험을 통해서 충돌 회피 알고리즘을 검증하였다.

핵심용어 : 소형 선박, 어선, 충돌, 충돌 회피 알고리즘, WAVE 통신

Abstract : Korea Maritime Safety Tribunal (KMST) statistics released in of 2019 indicated that most collision accidents involving small-size vessels with less than 20 gross-tonnage occur mainly due to operational carelessness, such as forward-looking negligence and unskilled vessel control. As an effective remedy, training and education for vessel operators are being strengthened to prevent accidents. However, collision accidents are increasing, and technical measures are continuously developed to reduce accidents caused by human factors. In this study, an avoidance algorithm and prototype of terminal-controller against collision between two nearby vessels was developed for implementation on relative navigation control by adopting WAVE telecommunication technology. Moreover, several sea trial tests were performed to verify the collision avoidance algorithm and control system using two fishing vessels for different scenarios.

Key Words : Small size vessel, Fishing vessel, Collision, Collision avoidance algorithm, WAVE telecommunication

1. 서 론

중앙해양안전심판원(KMST)에서 2019년에 발표한 최근 5년간 해양사고통계자료에 따르면 전체 해양사고 14,035건 중 어선의 해양사고가 9,501건(68%)으로 상당한 부분을 차지하고 있으며 이 중 충돌사고가 1,599건(17%)으로 어선 해양사고의 가장 중요한 원인으로 나타나고 있다. 충돌사고의 원인으로서는 전방 부주의, 경계 소홀 등이 77%로 운항과실이

주요 요인인 것으로 분석되었다(KMST, 2019).

대형 상선 등은 고성능 장비 등의 정확성과 신뢰성을 통해 운항 안전성을 확보하고 해양사고를 예방할 수 있지만 소형 선박 등의 경우 조타실 공간 부족 및 비용부담 등의 이유로 고성능 장비의 적용에 어려움이 있다.

이를 해결하기 위한 선행연구로서 AIS, 레이더 등의 고가 무선통신 장비의 도입이 어려운 소형 선박에 현실적으로 적용이 가능한 휴대전화용 이동통신망을 활용하여 충돌 예방 시스템을 개발하였고(Lee et al., 2011), 선박 충돌 방지를 위한 우선 순위 지정 알고리즘에 따른 선박의 충돌 회피 모델을 개발한 연구 결과가 있다(Kim, 2013). Lee 등은 WAVE

* First Author : jhpyun@komsa.or.kr, 044-330-2578

† Corresponding Author : cookie@komsa.or.kr, 044-330-2450

통신 기술을 적용하여 소형 선박 충돌 예방 알고리즘을 제안하였고, 알고리즘 구성을 위해서 소형 선박에 대표되는 DCPA와 TCPA의 선정 기준을 제시하였다(Lee et al., 2019). 최근에는 고속 활주형 소형 선박에 WAVE 통신 기술을 적용하여 WAVE 통신기, 제어기, 조타장치를 연계한 충돌 회피 시스템을 개발한 사례도 있다(Kim et al., 2020).

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 WAVE 통신 단말기와 조타를 관장하는 제어기를 활용한 충돌 회피 시스템의 기본 개념도를 보여준다. 이는 WAVE 통신과 충돌회피 알고리즘을 이용하여 충돌 위험을 감지하고 제어기를 통해 타를 물리적으로 작동시키는 제어 시스템을 나타낸다.

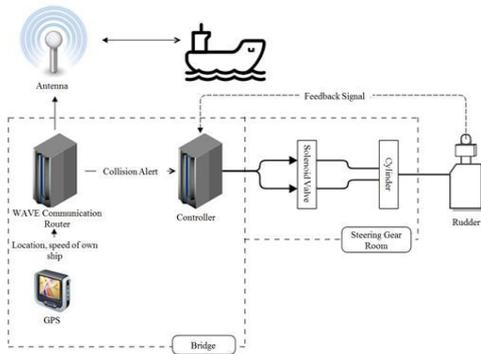


Fig. 1. Basic concept of rudder control system for the collision avoidance.

본 연구에서는 소형 선박(어선포함)의 운항 중 변침가능최소 거리가 0.5마일 미만인 점을 고려하여 거리에 따른 4단계의 경고 발생 기준을 설정하였고, 경고 발생 구간에서는 제어 알고리즘에 의해서 선박이 자동으로 우현 15°로 변침하여 충돌을 회피하도록 하는 조타 보조 시스템을 고안하였다.

이러한 회피 동작은 다양한 조우 시나리오를 따른 두 선박의 조우 상황을 고려하여 충돌에 대응하는 상대 거리와 시간에 따라 회피 동작을 고려해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 WAVE 통신 단말기에서 생성되는 선박의 위·경도의 좌표와 선수방위 등의 정보를 이용하여 선박 간의 조우 상태를 식별하고 이에 따른 회피 동작이 작동할 수 있는 소형 선박용 제어 알고리즘과 제어기를 구성하였고 실제 해상에서 조우하는 두 소형 선박에 대해서 실선 시험을 수행하였다.

2. 충돌 회피 알고리즘과 제어

2.1 이론적 배경

Hasegawa는 퍼지(Fuzzy) 이론을 바탕으로 두 선박의 DCPA (Distance to Closest Point of Approach)와 TCPA(Time to Closest Point of Approach)의 함수를 도입하여 충돌위험도를 추론하

였다(Hasegawa, 1987). Hasegawa의 DCPA/TCPA 함수를 기반으로 하는 충돌위험도의 추론방법은 많은 연구자에 의해 활용 또는 확장되었다. Lee는 퍼지 이론을 바탕으로 현시점과 그 다음 시점의 충돌위험도를 추정하고 두 시점 중 가장 위험한 충돌위험도를 사용하고자 하였다(Lee, 1993). Kearon은 실험적 데이터를 기반으로 획득 가능한 통계적 가중치를 고려하여 DCPA/TCPA의 산출방법을 제시하였다(Kearon, 1997). Kim은 DCPA/TCPA를 이용한 기존 기법에 VCD(Variation of Compass Degree)를 입력 함수로 추가 하여, 기존 퍼지 이론을 발전시켜 일정한 범위 내에 존재하는 선박에 대한 세부적인 충돌위험도를 산출하였다(Kim, 2002).

Lee 등은 최근접점에서 두 선박의 상대방위에 따른 위험 값을 계산하고 VTS(Vessel Traffic Service) 관점에서 선박 조우상황에 따른 충돌위험도를 제안하였다(Lee et al., 2015). Jung 등은 DCPA/TCPA함수를 사용하여 무인잠수정이 3차원 환경에서 장애물을 회피할 수 있는 충돌위험도를 산출하는 시스템을 개발하였고, 3차원 환경에서의 DCPA/TCPA를 획득하는 방법을 제안하였다(Jung et al., 2011). Song 등은 베이지안 추정 이론을 이용하여 DCPA/TCPA를 확률변수로 하여 현재 위치에서의 속도, 방위를 유지한다는 가정 하에 충돌 위험도를 추정하는 알고리즘을 제안하였고, AIS 데이터를 활용하여 기존의 DCPA/TCPA를 이용한 퍼지 추론보다 효율적인 충돌위험도를 추정하였다(Song et al., 2011). 선행 연구와 같이 향후 실시간으로 데이터의 수집이 용이한 레이더, AIS, WAVE 등의 통신기반 시스템을 활용하여 DCPA와 TCPA의 활용이 점차 증가할 것으로 기대된다.

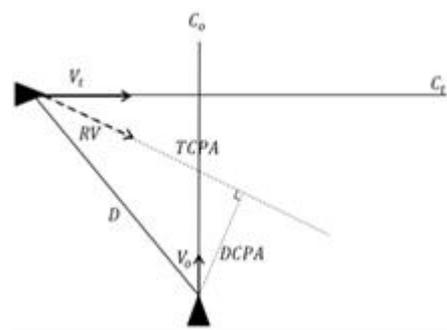


Fig. 2. The concept of DCPA/TCPA for the encountering 2(two) ships.

DCPA와 TCPA는 WAVE 통신 단말기가 탑재된 두 선박간의 좌표와 선수방위를 실시간으로 계측하여 계산 가능하며 이를 기반으로 충돌회피 알고리즘의 구현이 가능하다. 여기서 DCPA는 상대 선박이 현재위치에서 본선과 가장 근거리로 접근하는 거리이고 TCPA는 상대 선박이 현재 위치에서 본선과 가장 가까운 지점을 통과하는 시점이다. Fig. 2는 공

간상의 조우하는 두 선박의 DCPA와 TCPA의 개념을 간단히 나타낸다.

일반적으로 DCPA와 TCPA는 레이더, WAVE 등의 통신 신호에 의하여 계산이 가능하며, WAVE 통신 신호로부터 계산된 두 선박의 좌표와 침로를 바탕으로 DCPA와 TCPA를 계산한다. DCPA와 TCPA의 계산식은 식(1)~(5)와 같다.

$$RV_x = V_T \times \sin C_T - V_0 \times \sin C_0 \quad (1)$$

$$RV_y = V_T \times \cos C_T - V_0 \times \cos C_0 \quad (2)$$

$$\overrightarrow{RV} = \sqrt{(RV_x)^2 + (RV_y)^2} \quad (3)$$

$$TCPA = \frac{(x' - x) \times RV_x + (y' - y) \times RV_y}{\overrightarrow{RV}^2} \quad (4)$$

$$DCPA = \sqrt{D^2 - (\overrightarrow{RV} \times TCPA)^2} \quad (5)$$

여기서, (x, y) : 본선의 절대좌표, (x', y') : 타선의 절대좌표
 V_0 : 본선의 속도(knots), V_T : 타선의 속도(knots)
 C_0 : 본선의 침로(°), C_T : 타선의 침로(°)
 \overrightarrow{RV} : 두 선박의 상대벡터, D : 두 선박의 거리(mile)
 (RV_x, RV_y) : 상대좌표

2.2 충돌 회피 알고리즘

2000년대에 접어들면서 해상에서도 충돌 회피를 포함하는 자율운항에 대한 관심이 점차 증가하고 있으며 Kang 등은 최대 수신이 8~9km까지 가능한 WAVE 통신이 해상에서 적용 가능함을 확인하였다(Kang et al., 2018). Kim 등은 본 연구의 선행연구로 DCPA와 TCPA를 이용하여 3마일 범위 내에 4단계의 충돌 경고 알람에 따른 제어기 작동 알고리즘을 제안하였고, 제어기와 조타장치의 작동 상태를 실증으로 확인하였다(Kim et al., 2020). 본 연구에서는 선행연구에서 검증된 알고리즘을 활용하여 실선에 제어기를 설치하여 실제 해상에서 회피 동작이 가능한지 추가로 검증하고자 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 활용한 충돌회피 알고리즘을 나타내었다. 이 충돌 회피 알고리즘은 WAVE 통신중인 두 선박이 3마일 범위 내에서 신호 수신시 크게 거리에 따라서 원거리(3마일)과 근거리(1마일)로 분류하고 다시 각각 2마일과 0.5마일로 세분화하여 충돌 회피 동작을 수행하도록 구성되었다.

TCPA 기준은 2.5분 이하로 설정하였고, 그 근거는 앞에서 언급한 Lee et al.(2019)의 연구를 참고하였다. 여기서 TCPA 기준을 종거(advance)에 대한 최소 이동 시간을 TCPA로 보았고, 종거 거리에 대한 이동 시간은 대략 2.1분~2.3분으로 도출하였다. 최종 안전율을 고려하여 TCPA의 기준을 2.5분으로 설정하였다.

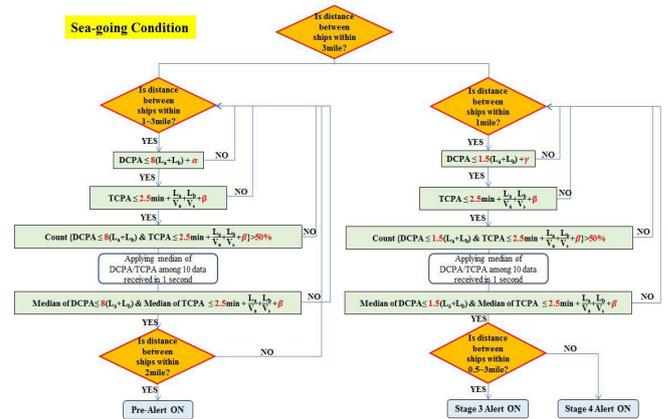


Fig. 3. The collision avoidance algorithm for each stage.

본 연구에서는 상대적으로 선회 반경이 작고 속도가 빠른 소형 선박을 대상으로 근접 거리인 약 0.5마일 이내에서 신호가 수신되는 경우에도 무리 없이 충돌 회피 동작이 가능한 알고리즘의 고도화를 수행하였으며 Fig. 3의 충돌 회피 알고리즘 기반으로 0.5마일의 최근접 접근 범위인 4단계에서의 충돌 경고에 대하여 조타 동작이 가능한 알고리즘을 구성하였다.

2.3 국내외 충돌 회피 규정

조우 상황에 따른 소형 선박의 조타 계획을 수립하기 위해서는 국제 및 국내 항해에 사용되는 기준에 따라 회피동작을 계획하고 상황에 따라 소형 선박의 실정에 맞게 적용할 필요가 있다. 항법 등 해상교통안전에 관한 법률은 크게 국제해사기구(IMO) 국제해상충돌예방규칙(COLLREG)과 선박입출항법 및 해사안전법으로 나눌 수 있다. 국제해상충돌예방규칙은 각국의 법률에서 규정하는 사항이 있으면 국내법을 준수하도록 명시하고 있으며 선박입출항법은 무역항(개항)을 통과하는 선박에 적용되는 법률이기 때문에 소형 선박의 항법을 규정하고 있지 못하다. 따라서, 국내항해가 주요 목적인 선박을 대상으로 본 연구에서는 해사안전법에 근거한 항법 관련 규정을 적용하였다.

해사안전법에서는 기본적으로 등화기준에 따라 가능한 원거리에서 충분한 시간을 갖고 상대선박이 쉽게 자신의 조선의도를 파악할 수 있도록 크게 변침함과 동시에 속도조절도 함께 병행되어야 함을 규정하고 있다. 또한 선박간의 조우상황에 대해서는 추월(Overtaking), 정면(Head-on), 교차(Crossing) 3가지 경우로 분류하고 있다. 자선이 타선을 추월하는 상황의 경우 타선을 추월하고 완전히 멀어질 때까지 타선의 진로를 피해야 함을 명시하고 있다. 선박이 서로 선수를 마주보는 상황인 정면 상황에 대한 침로 변경은 각 선박의 좌현(port side)을 지날 수 있도록 두 선박 모두 침로를

우현(starboard side) 변침하도록 정하고 있다. 교차 상황인 경우는 피항선(Give-way)은 유지선(Stand-on)의 선수 진로를 방해하지 않도록 우현 회두로 침로 변경을 하고 유지선은 타선의 조선이 없어 충돌 위험이 발생할 경우를 제외하고 침로를 유지하여야 함을 명기하고 있다.

2.4 충돌 회피 제어

앞에서 언급한 Fig. 3의 충돌 회피 알고리즘을 기준으로 4단계 충돌 경고가 발생하면 두 선박의 조우 상황을 판별하고 추월, 정면, 교차의 각 조우 상황 별 충돌 회피 알고리즘에 따라 조타 제어가 작동된다. 조타 제어기는 충돌 경고가 발생하면 자동으로 우현 15°조타와 선수 방향 +20°유지 명령을 수행하고 4 단계 충돌 경고 발생 지점으로부터 0.1 NM이상 벗어나면 선박 속도를 제어 가능한 충돌 회피 알고리즘을 개발하였다.

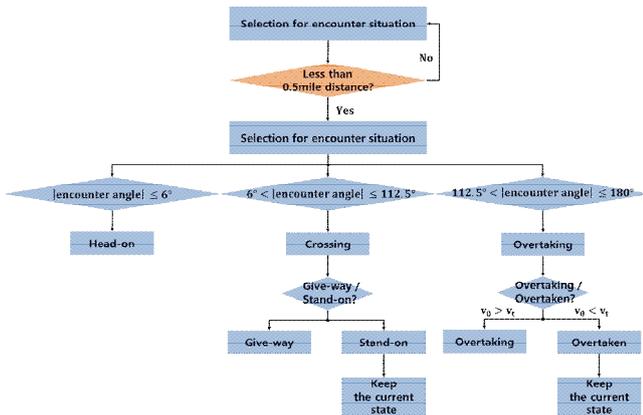


Fig. 4. Collision avoidance algorithm according to the encounter angle in two vessels within 0.5 mile distance.

추월, 정면, 교차의 3가지 조우 상황의 판단은 일반적으로 두 선박의 조우 각도에 의해 결정된다. 두 선박의 조우 각도에 따라 추월, 정면, 교차 상황으로 판단하였다.

Fig. 4는 두 선박의 0.5마일 이내의 근접 접근 상황에서의 조우 상황에 따른 회피 동작 알고리즘을 보여준다.

Fig. 5는 0.61마일 범위에서 조우하는 두 선박이 정면과 추월 상황에서의 피항선과 유지선의 회피 동작 시나리오를 각각 보여준다. 각 조우 시나리오의 조건은 두 선박이 0.61마일 이내로 접근하면 피항선은 조타각을 15°로 자동 변경하여 현재 속력으로 회피 동작을 수행하도록 설정하였다. 유지선의 경우는 조타각, 클러치, 속력에 대해서 현상태로 유지하는 조건을 부여하였다.

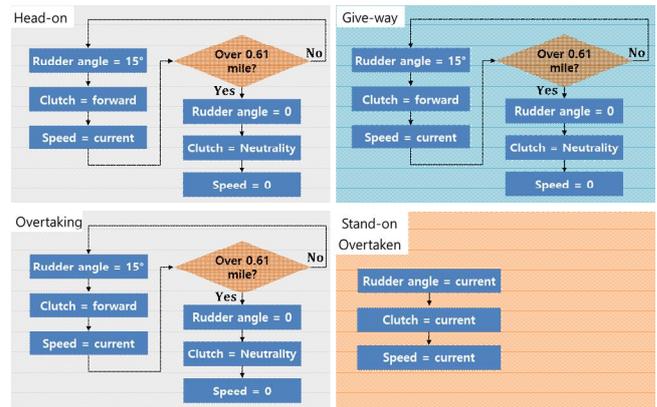


Fig. 5. The collision avoidance scenarios for each encounter condition.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 방법

충돌 회피 시뮬레이션에 적용할 대상 선박은 9.77톤급 어선을 선정하였고, 선박의 제원은 전장 20m, 폭 4m, 추진 성능은 750마력이다.

본 연구에 사용한 시뮬레이션은 MMG(Mathematical Modeling Group)모델을 이용하여 실제 선박의 움직임 구현이 가능하고, 선체, 추진마력, 타 등의 요소들을 적용하였으며, 본 시뮬레이션을 이용하여 다양한 운항조건에서 선박의 조종 성능에 미치는 영향을 수치적으로 확인할 수 있다.

시뮬레이션을 진행함에 앞서 충돌 회피를 위한 적합한 회피 타각의 결정이 선행되어야 한다. IMO 표준조타명령(Standard Wheel Orders)에서는 0°~35° 범위에서 5° 간격으로 타각 제어를 권고하고 있지만, 소형 선박의 선형 특성을 고려하여 적절한 회피 조타각의 적용이 필요하다. 소형 선박에 대한 회피 조타각 파악을 위해서 9.77톤급 낚시 어선 운항자를 대상으로 설문조사를 수행하였고, 설문조사 결과를 바탕으로 고속 활주형 소형 선박의 일반적인 타각은 10°, 20°, 35°로 나타났다. 소형 선박의 선형 특성과 취약한 복원성 등의 운항 특성을 고려하여 전타각인 35°를 제외한 나머지 10°와 20°의 평균값을 변침을 위한 기준 조타각으로 고려하였다. 또한 추월, 정면, 교차 상황에서 경고 발생 시 우현으로 자동으로 15°로 조타하고 선수 방위가 기존 선수 방위 대비 20°에 이르면 타를 중립으로 유지하고 0.1해리 전진 후 정지 및 클러치 중립의 조건으로 설정하였다.

3.2 시뮬레이션 수행

3.2.1 추월 상황 시뮬레이션

Table 1은 두 선박의 추월 상황 시뮬레이션의 초시 조건을 나타내었으며, 두 선박 간 거리는 1.5해리 상태에서 전방의 타

선은 5노트로 속력으로 등속 운동을 하고, 자선은 15노트의 속력으로 뒤에서 추월하는 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1. Initial condition for the virtual Overtaking simulation

Item	Own ship	The other ship
Distance between vessels	1.5 NM	
Heading(°)	0	0
Speed(knots)	15	5

Fig. 6은 자선의 속력이 15노트인 경우의 추월 상황의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 시작 후 약 7분이 경과한 시점에서 선박 간 거리가 0.5NM로 좁혀져 4단계 경고가 발생하였으며, 자선이 즉시 우현으로 조타하여 회피 동작이 작동하고 정지하는데 까지 0.234 NM 이동하였고 선박 간 최단 거리는 0.412 NM로 나타났다.

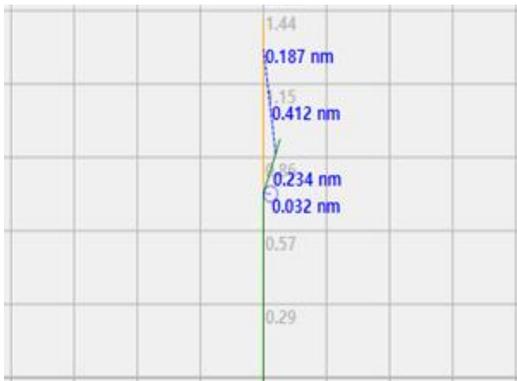


Fig. 6. The simulation results for the overtaking condition (Own ship: 20 knots, the other ship: 5 knots).

3.2.2 정면 상황 시뮬레이션

정면 상황 시뮬레이션은 선박 간 거리가 약 1.5해리인 상태에서 180°로 마주보는 조우 상황을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 타선의 속도는 15노트로 고정하고 자선의 속도를 15노트로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 2는 정면 상황 시뮬레이션의 초기 조건을 나타내었다.

Table 2. Initial condition for the virtual Head-on simulation

Item	Own ship	The other ship
Distance between vessels	1.5 NM	
Heading(°)	0	180
Speed(knots)	15	15

Fig. 7은 자선과 타선의 속력이 15노트인 경우의 정면 상황의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 자선과 타선의 선회

반경은 약 0.033 NM으로 동일하고, 자선과 타선의 회피 동작 후 각각 0.231 NM 이동하여 정지하였다. 회피 동작 후 정지하기까지 선박 간의 최단 거리는 0.161 NM으로 나타났다.

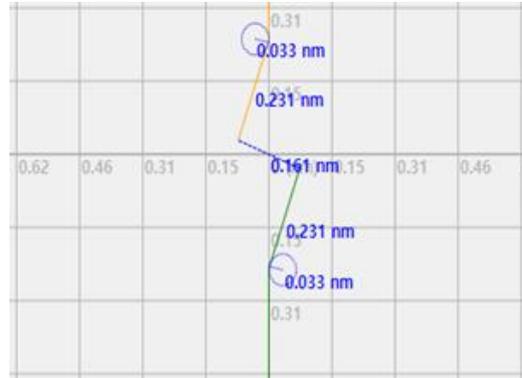


Fig. 7. The simulation results for head-on condition (Own ship: 20 knots, the other ship: 15 knots).

3.2.3 교차 상황 시뮬레이션

교차 상황에서의 시뮬레이션은 선박 간 거리가 약 1.5해리인 상태에서 두 선박의 선수 방위각이 90°를 이룬 상태로 자선이 타선의 좌현에 접근하는 상황을 고려하였다. 이때 자선이 피항선이 되고 타선이 유지선이 된다. 타선의 속력을 15노트로 유지하고, 자선의 속력을 15노트로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3은 교차 상황 시뮬레이션의 초기 조건을 나타내었다.

Table 3. Initial condition for the virtual Crossing simulation

Item	Own ship	The other ship
Distance between vessels	1.5 NM	
Heading(°)	90	0
Speed(knots)	15	15

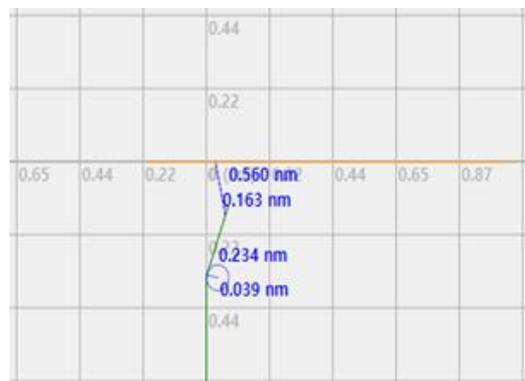


Fig. 8. The simulation results for crossing condition (Own ship: 15 knots, the other ship: 15 knots).

Fig. 8은 자선의 속력이 15노트인 경우의 교차 상황의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 4단계 경고 발생 이후 자선은 우현으로 조타하였고, 자선의 이동거리 0.234 NM 이동한 지점에서의 선박 간 최단 거리는 0.163 NM로 나타났다.

3.2.4 시뮬레이션 결과에 대한 고찰

시뮬레이션을 통해 추월, 정면, 교차 3가지 조우 상황을 모사하고 속도 별 선박의 회피 동작에 대한 안전성을 검토하였다. 추월, 정면 조우 상황에서는 4단계 경고 후 선박은 충돌을 회피 및 정지하여 선박 간의 충분한 거리를 확보할 수 있었으며, 교차 상태에서는 자선의 속력이 20노트 이상의 고속으로 주행한 경우 선박 간의 충돌 위험이 큰 것으로 나타났다. 다만, 상기 시뮬레이션은 조류, 너울, 바람 등 여러 환경 변수가 제외한 이상적인 상황에서 시뮬레이션이 수행되었다는 점에서 아쉬움이 있어, 실제 해상에서의 실선 시험을 통해서 충돌 회피 시스템에 대한 검증은 실시하였다.

4. 성능 시험

4.1 실선 시험 환경

본 연구에서 고려한 충돌 회피 시스템과 조우 시나리오에 따른 충돌 회피 동작을 확인하기 위해 실선 시험은 전북 군산시 야미도 부근 해상에서 실선 시험을 수행하였다. 야미도 부근의 평균 수심은 약 8.4 m, 최대 파고 0.8 m, 풍속 1.6 m/s로 비교적 조용한 해상 환경에서 실선 시험을 수행하였다. 실선 시험을 진행한 선박은 시뮬레이션에서 적용한 선박과 동일한 제원으로선 전장 20 m, 폭 4 m, 750 마력의 총톤수 9.77 톤 선박 두 척으로 선정하였다. Fig. 9는 실선 시험에 사용된 선박을 보여준다. 실선 시험은 선박의 성능을 고려하여 10노트와 15노트의 속력에 대해서 수행하였다.



Fig. 9. The test ship for collision avoidance test in sea.

Fig. 10는 실선 시험에 적용된 충돌회피 조타 보조 장치를 보여주며 이는 충돌 회피 동작을 위한 타각 지시등의 제어를 역할을 수행한다.



Fig. 10. The collision avoidance control device.

4.2 실선 시험 결과

4.2.1 추월 상황 결과

일정시간 등속 항해를 하면서 두 실선 시험 선박이 평균 속력이 유지된 상태에서 실선 시험을 시작하였다. 시뮬레이션 결과와 비교를 위해 자선의 속력이 15노트의 추월 상황의 결과를 보면 시험 시작 후 “조우 각도: 141.8°, DCPA: 0.49 NM, TCPA: -0.00045분” 시점에서 4단계 충돌 경고가 발생하며, 피향선인 자선의 제어가 작동하였다. 종료 시점에서의 DCPA는 0.66NM로 나타났다. Table 4와 Fig. 11에 추월 상황의 실선 시험 결과를 나타내었다. 종료 시점에서의 실선 시험과 시뮬레이션의 DCPA의 결과를 비교하면 실선 시험의 결과가 약 1.6배 크게 나타났다.

Table 4. The summary on the sea trial test for overtaking conditions

Condition	Category	Vessel position		
		Start	4-stage	End
10-5 overtaking	Encounter angle (°)	299.4	119.4	-
	DCPA (NM)	0.52	0.49	0.61
	TCPA (min.)	-0.0001	0.00042	-
15-5 overtaking	Encounter angle (°)	33.1	141.8	-
	DCPA (NM)	0.55	0.49	0.66
	TCPA (min.)	-0.0001	-0.00045	-

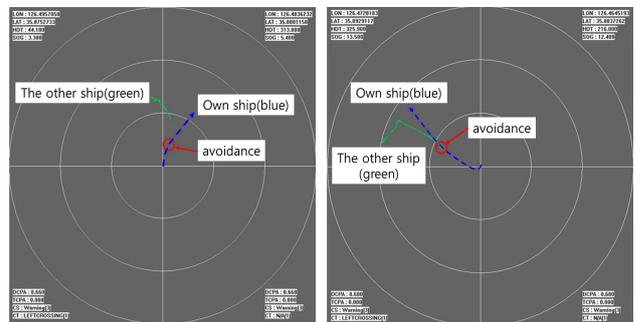


Fig. 11. The test results in each overtaking condition.

4.2.2 정면 상황 결과

정면 상황 조건에서도 일정시간 등속 항해를 하면서 두

실선 시험 선박이 평균 속력이 유지된 상태에서 실선 시험을 시작하였다. 시뮬레이션과 동일한 조건인 자선이 15노트인 경우를 보면 시험 시작 후 “조우 각도: 0.3°, DCPA: 0.49 NM, TCPA: 0.00045분” 시점에서 4단계 충돌 경고가 발생하며, 피항선인 자선의 제어기가 작동하였다. 종료 시점에서의 DCPA는 0.64NM로 나타났다. Table 5와 Fig. 12에 정면 상황의 실선 시험 결과를 요약하여 나타내었다. 종료 시점에서의 실선 시험과 시뮬레이션의 DCPA의 결과를 비교하면 실선 시험의 결과가 약 4.0배 크게 나타났다.

Table 5. The summary on the sea trial test for head-on conditions

Condition	Category	Test location		
		Start	4-stage	End
12-13 head-on	Encounter angle (°)	180.6	0.6	-
	DCPA (NM)	0.52	0.49	0.66
	TCPA (min.)	-0.00044	0.00045	-
15-15 head-on	Encounter angle (°)	179.7	0.3	-
	DCPA (NM)	0.53	0.49	0.64
	TCPA (min.)	-0.00044	0.00045	-

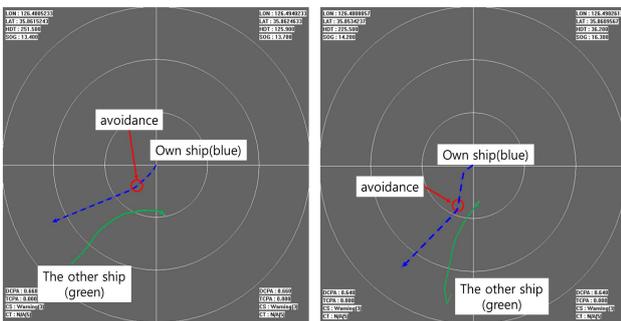


Fig. 12. The test results in each head-on condition.

4.2.3 교차 상황 결과

교차 조건에서도 일정시간 등속 항해를 하면서 두 실선 시험 선박이 평균 속력이 유지된 상태에서 실선 시험을 시작하였다. 시뮬레이션과 동일한 조건인 자선과 타선이 모두 15노트로 운항한 경우 시험 시작 후 “조우 각도: 82.2°, DCPA: 0.48 NM, TCPA: 0.00045분” 시점에서 4단계 충돌 경고가 발생하였으며, 피항선인 자선의 제어기가 작동하였다. 종료 시점에서의 DCPA는 0.61NM로 나타났다. Table 6과 Fig. 13에 교차 상황의 실선 시험 결과를 요약하여 나타내었고, Fig. 12에 교차 실선 시험의 이동 결과를 원형 좌표에 각각 나타내었다. 종료 시점에서의 실선 시험과 시뮬레이션의 DCPA의 결과를 비교하면 실선 시험의 결과가 약 3.7배 크게 나타났다.

Table 6. The summary on the sea trial test for crossing conditions

Condition	Category	Test location		
		Start	4-stage	End
10-10 crossing	Encounter angle (°)	73.0	107.0	-
	DCPA (NM)	0.63	0.44	0.61
	TCPA (min.)	0.0005	0.0003	-
15-15 crossing	Encounter angle (°)	97.8	82.2	-
	DCPA (NM)	0.52	0.48	0.61
	TCPA (min.)	-0.00044	0.00045	-

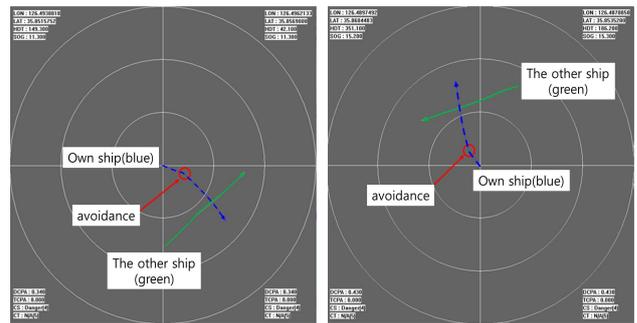


Fig. 13. The test results in each crossing condition.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 선행연구에서 진행한 충돌 회피 보조 시스템의 회피 동작 알고리즘을 개선하기 위해 소형 선박의 근접 접근 상황을 고려하여 조우 상황에 대해서 충돌 회피 알고리즘을 고도화 하였으며, 조우 상황에 따른 회피 동작 알고리즘과 충돌 회피 동작 보조 시스템을 실선에 적용하여 해상 실선 시험을 수행하였다.

실선 시험 전 시뮬레이션을 통해서 충돌 회피 동작 알고리즘을 확인하였다. 두 소형 선박이 4단계의 충돌 경고 알람 상황에서 추월, 정면, 교차의 3가지 조우 시나리오에 따라 충돌 회피 시뮬레이션을 수행하였다. 각 조우 시나리오의 조건은 두 선박이 0.61마일 이내로 접근하면 피항선은 조타 각을 15°로 자동 변경하여 현재 속력으로 회피 동작을 수행하도록 설정하였다. 유지선의 경우는 조타각, 클러치, 속력에 대해서 현상대로 유지하는 조건을 부여하였다. 시뮬레이션의 결과로는 추월 및 정면 상황에서는 4단계 경고 발령 후 두 선박은 충돌을 회피 동작 및 정지를 수행하여 두 선박 간의 충분한 거리를 확보할 수 있었고, 교차 상태에서는 20 노트 이상의 고속 주행 상황에 대해서는 선박 간의 거리가 상당히 근접하여 충돌 위험성이 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 고도화한 충돌 회피 알고리즘을 검증하기 위해 실선 시험을 수행하였다. 실선 시험은 시뮬레이션과 동

일한 조건의 선박을 선정하여 각 조우 시나리오에 따라서 2 가지 속력에 대해서 실선 시험을 수행하였다. 충돌 회피 알고리즘과 조타 보조 장치가 탑재된 두 실선은 조우 상황에 따라서 충돌 회피 동작을 성공적으로 수행하였고, 충돌 회피 알고리즘에 의한 제어 동작을 검증하였다. 본 연구의 범위에서는 충돌 회피 알고리즘에 의해 피항선이 안전하게 충돌 회피 후 다른 방향에서 접근하는 제 3의 선박과 2차 충돌을 예방하기 위한 동작이 포함되지 않은 부분이 다소 아쉬움으로 남는다. 향후 연구에서는 충돌 회피 이후 2차 충돌을 예방할 수 있는 충돌 회피 알고리즘의 고도화가 필요할 것으로 사료된다.

시뮬레이션과 실선 시험의 결과를 비교하면 3가지 조우 상황에서 모두 시뮬레이션의 결과가 상당히 보수적인 결과를 보였다. 이는 실선 시험 당시의 바람, 파도, 해류 등의 환경적 영향이 작용한 것으로 사료되며, 속력에 의한 관성의 영향으로 계측 시점에서의 DCPA 계산에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 또한 통신 부분에서는 육상에서 사용하는 통신 프로토콜이 적용된 WAVE 통신 기반은 국제해사기구(IMO) 규정에 따른 통신 규약을 따르지 않아 해상에서 간헐적으로 해양 장비의 송·수신 등의 인터페이스의 장애를 초래하였다. 향후 연구는 WAVE 통신에 AIS 수신과 RF 모듈을 추가하여 단말기의 성능과 신호의 정확도를 향상시켜 충돌 회피 시스템을 고도화할 필요가 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 한국해양교통안전공단의 자체연구개발과제인 “통신기반 소형선박 충돌회피 보조시스템 개발”의 연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Hasegawa, K.(1987), Automatic Collision Avoidance System for Ship using Fuzzy Control, 8th Ship Control System Symposium, Hague.
- [2] Jung, H., S. G. Kim, and Y. G. Kim(2011), Use of Fuzzy Technique for Calculating Degree of Collision Risk in Obstacle Avoidance of Unmanned Underwater Vehicles, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 21, No. 1, pp. 112-119.
- [3] Kang, W. S., S. B. Jeon, and Y. D. Kim(2018), A Study on Marine Application of Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) Communication Technology, Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 4, pp. 445-450.
- [4] Kearon, J.(1997), Computer Programs for Collision Avoidance and Traffic Keeping, Academic Press, London, UK.
- [5] Kim, M. J., J. S. Oh, and Y. Y. Nam(2020), A Study on the Development of Collision Avoidance System for Small-Sized Vessel Using WAVE Communication Technology, Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 1, pp. 008-014.
- [6] Kim, S. W.(2013), A Study on Ship Collision Avoidance and Order of Priority Designation Model, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 11, pp. 5442-5447.
- [7] Kim, U. K.(2002), Data Fusion System for Autonomous Ship Control using Intelligence Techniques, Gyeongsang National University
- [8] Korean Maritime Safety Tribunal(KMST)(2019), Annual report of Marine Safety Judgement Cases, <http://www.kmst.go.kr>, Accessed: December.
- [9] Lee, H. J.(1993), Development of Collision Avoidance System by Fuzzy Theory, Seoul National University
- [10] Lee, J. S., M. Jung, and C. U. Song(2015), A Study on the Degree of Collision Risk with Relative Bearing at CPA, Vol. 39, No. 6, pp. 493-498.
- [11] Lee, M. K., Y. S. Park, and W. S. Kang(2019), A Study Construction of Collision Prevention Algorithm for Small Vessel Using WAVE Communication System, Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 25, No. 1, pp. 1-8.
- [12] Lee, S. J., H. S. Kim, Z. J. Long, and S. K. Lee(2011), A Study on the Korea Marine Accident and the Countermeasures, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 35, No. 3, pp. 205-211.
- [13] Song, B. H., K. H. Lee, M. A. Jeong, and S. R. Lee(2011), Bayesian Collision Risk Estimation Algorithm for Efficient Collision Avoidance against Multiple Traffic Vessels, The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences, Vol. 36, No. 3, pp. 248-253.

Received : 2021. 11. 17.

Revised : 2021. 12. 08. (1st)

: 2021. 12. 13. (2nd)

Accepted : 2021. 12. 28.