

국제해상충돌예방규칙에 따른 충돌회피 알고리즘에 관한 연구

A Study on Ship Collision Avoidance Algorithm by COLREG

김동균 · 정중식 · 박계각

Dong-Gyun Kim, Jung Sik Jeong and Gyei-Kark Park

목포해양대학교 해양정보시스템학

요 약

최근접점과 최근접시간에 기초를 둔 종래 선박충돌회피 알고리즘은 국제해상충돌예방규칙(COLREG, International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972)에 의한 선박간의 항법규정을 고려하지 않는다는 문제점이 있다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 조우선박의 상대방위를 측정함으로써 자신이 피항선인가 유지선이 될 것인가를 판단한다. 피항시점을 결정하기 위하여 타원형의 선박안전영역 모델을 이용하여 타선과 위험한 위치에 도달하는 지점과 시간을 계산함으로써 피항을 수행한다. 두 선박의 위치, 속도 및 방위를 임의로 생성하여 타원모델에 의한 충돌회피 과정을 시뮬레이션 한다. 또한 실제적인 해양사고 발생 자료를 이용하여 충돌위험 분석 및 선박간 충돌회피를 위한 방안을 제시한다. 제안한 알고리즘은 안개 및 기상악화의 경우 시계가 제한되거나 야간항해 중 항해등의 식별이 어려워 피항선과 유지선의 판단이 불확실한 경우에도 국제해상충돌예방규칙에 의한 충돌회피 동작에 효과적으로 적용할 수 있다.

키워드 : 충돌회피, 피항관계, COLREG, 충돌회피 알고리즘

Abstract

On the basis of DCPA(Distance to Closest Point of Approach) and TCPA(Time to CPA), the conventional algorithms for collision avoidances have a drawback that the '72 COLREGs(International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972) has not taken into account to prevent collisions between ships. In this paper, the proposed algorithm decides whether the own ship is a give-way vessel or a stand-on vessel by observing the relative bearing of the encountered ship. To determine the ship position and time for collision avoidance, the proposed algorithm utilizes the ellipse model for ship safety domain. The computer simulation is done to represent the process of adversive behavior. Using the proposed method, the past maritime accident is analyzed. The proposed method can be effectively applied to collision avoidance by COLREGs even when the target ship's navigational lights is invisible in poor weather and/or in the restricted visibility.

Key Words : DCPA, TCPA, '72 COLREGs, Navigational light

1. 서 론

기술의 발전으로 항해시스템은 과거보다 훨씬 빠르고 편하게 발전되어 왔다. 전자해도표시장치(ECDIS, Electronic Chart Display and Information System)가 종이해도를 대신하여 사용되기 시작되었고, 선박자동식별장치(AIS, Automation Information System)는 이미 국제협약의 대상 선박에 의무적으로 설치되어 상대선박의 선명, 선종, 방위 및 위치정보를 실시간으로 알 수 있게 되었다. 그러나 이러한 항해시스템의 자동화에도 불구하고 해양사고의 사고건수는 크게 줄어들지 않고 있다. 해양사고예방을 위한 선박간의 충돌방지를 위한 알고리즘은 거의 대부분 최근접점에서 상대선박과의 거리(DCPA, Distance to Closest Point of Approach)와 최근접점에 이르는 시간(TCPA, Time to CPA)에 기초를 두고 개발되어 왔다. 그러나 대부분의 선박충돌회피 알고리

즘이 국제 해상충돌 예방규칙('72 COLREGs, International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972)을 고려하지 않았다는 문제점이 있다[1][2][3][4]. 강[5]은 DCPA, TCPA, VCD(Variation of Compass Degree)의 세 입력변수를 가지고 선박의 충돌위험도를 결정하였다. 본 논문에서는 상대방위를 관측하여 본선이 COLREG에 의한 피항선 또는 유지선의 위치에 있는가를 판단하여 충돌회피 동작을 수행하는 알고리즘을 제안한다. 즉, 제안된 방법은 선박간 조우 상황을 분류하고 피항선과 유지선의 관계를 판단한 후, DCPA와 TCPA를 고려하여 Rafal[1]이 언급한 타원모델에 토대를 둔 상황접근 지수를 계산하여 충돌회피 시점을 결정한다. 제2절에서는 타원모델 기반의 충돌회피 방법을 소개하고, 제3절에서 '72 COLREGs 기반한 충돌회피 알고리즘을 제안한다. 제4절에서 알고리즘의 유효성을 보여주기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되고 제5절에서 결론을 언급한다.

접수일자 : 2011년 3월 19일

완료일자 : 2011년 4월 27일

본 논문은 본 학회 2011년도 춘계학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

2. 타원모델 기반의 충돌회피 방법

Fuji 등[6]은 그림 1과 같이 선박의 충돌 회피를 위해 타

원모델 기반의 선박 안전영역을 이용하여 그 위험도를 계산하였다.

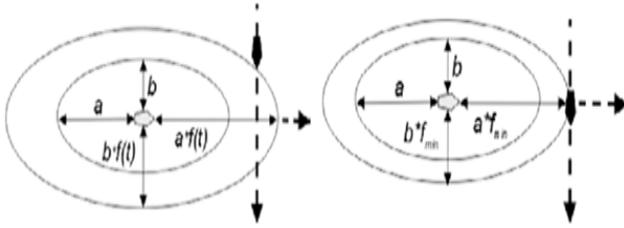


그림 1. $f(t)$ 의 개념
Fig. 1. Concept of $f(t)$

본선을 중심에 둔 장반경 a 와 단반경 b 를 가진 타원을 가정할 때 이 본선이 확보할 수 있는 타원영역은 다음 식 (1)과 같은 가중치(상황접근지수), $f(t)$ 에 의하여 확장될 수 있다.

$$f(t) = \frac{DCPA}{D(t)} \quad (1)$$

여기서 $a \leq D(t) \leq b$, $f(t)$ 값은 본선과 상대선의 움직임에 의하여 변화하는 장단축의 크기에 작용하는 파라미터이다. 즉, 시간 t 에서 계산된 $a \cdot f(t)$ 와 $b \cdot f(t)$ 는 상대선의 타원형 안전영역의 장반경과 단반경을 나타낸다. $f(t)$ 의 최소값은 f_m 으로 정의되고 본선이 상대선에 접근하여 f_m 에 이른 시간을 T_m 으로 정의한다. 원형모델에 비교하여 타원모델은 선박조선자의 관점을 고려한 것으로 Fujii 등은 $a=6L$ 및 $b=3L$ 로 제안하고 있다. 여기서 L 은 선박의 길이를 나타낸다.

3. CORLEG에 따른 충돌회피 알고리즘

COLREG[7]에서는 선박간 항법 관계를 크게 1) 정면으로 마주치는 상태 2) 횡단상태 3)추월상태의 3가지로 나누어 규정한다.

1) 정면으로 마주치는 상태

상호간에 상대선의 마스트 정부등(Masthead Light)과 양현등(Both sidelights)을 선수미선 방향을 중심으로 좌우 $5^\circ \sim 6^\circ$ 범위내에서 바라보며 접근하는 두 선박은 각각 우현으로 변침하여 상대선을 좌현에 두고 좌현 대 좌현으로 항과 해야 한다.

2) 횡단상태

타 선박을 자선의 우현측에 두고 타 선박의 홍등을 바라보고 있는 선박이 우현측으로 진로를 피하여야 한다.

3) 추월상태

다른 선박의 정형 후 22.5° 를 넘는 후방 즉, 추월당하는 선박과의 관계에 있어서 야간에는 그 선박의 선미등만을 볼 수 있고 현등을 볼 수 없는 선박은 추월선으로 보아야 한다. 추월선은 완전히 앞질러 멀어질 때까지 추월당하는 선박의 진로를 피하여야 할 의무를 벗어나지 못한다. 그림 2는 선수미선을 중심으로 등화가 비치는 범위를 나타내었다. 따라서 자선은 타선의 상대방위에 따라서 볼 수 있는 등화가 정

해진다. 이 개념을 이용하여 본선이 위치한 곳에서 상대선의 어떠한 등화를 바라보는가에 따라 1), 2) 및 3)의 항법관계를 판단하고 피항선 또는 맞 유지선의 동작을 수행한다.

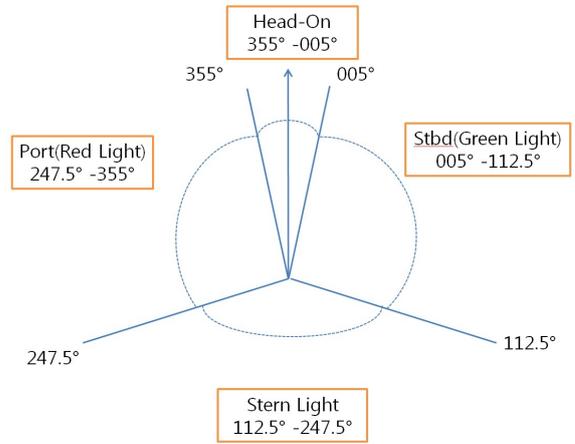


그림 2. 항해등의 시인범위
Fig. 2. Visible range of navigation lights

그림 3은 타선과의 위치 관계를 분류하였다.

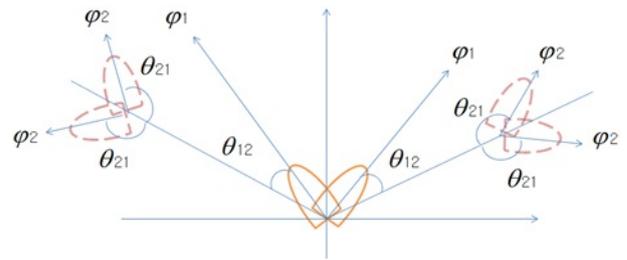


그림 3. 타선과의 위치 관계
Fig. 3. Relationship with Target Ship(T.S)

그림 3에서 실선으로 나타낸 선박은 자선(OS, Own Ship)을 점선으로 나타낸 타선(TS, Target Ship)을 나타내며, φ_1 과 φ_2 는 각각 본선과 타선의 진방위, θ_{12} 는 본선이 타선을 보는 상대방위, θ_{21} 은 타선이 본선을 보는 상대방위를 나타낸다. 본선과 조우하는 선박의 상대방위로부터 항해등의 시인각도는 다음 4가지 경우로 설명할 수 있다.

가. OS가 TS의 우현에 있는 경우

그림 4와 같이 선박이 위치할 경우에 본선의 피항의무 규정의 기준이 되는 θ_{21} 는 다음과 같은 식으로 주어질 수 있다.

$$\varphi_1 + \theta_{12} + 180^\circ = \varphi_2 + \theta_{21}$$

나. OS가 TS의 좌현에 위치한 경우

- TS의 선수방위가 $\varphi_1 + \theta_{12}$ 보다 작은 경우

그림 5에서 항법관계를 규정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\varphi_1 + \theta_{12} + 180^\circ = \varphi_2 - \theta_{21}$$

다. OS가 TS의 좌현에 위치한 경우

- TS의 선수방위가 $\varphi_1 + \theta_{12}$ 보다 작을 경우

그림 6에서는 다음과 같은 식으로 θ_{21} 을 구할 수 있다.

$$\varphi_1 - \theta_{12} + 180^\circ = \varphi_2 - \theta_{21}$$

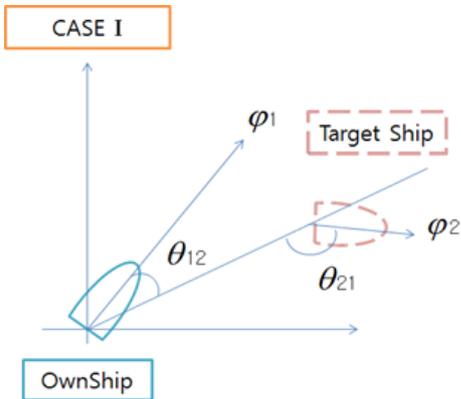


그림 4. 자선이 타선의 우현에 위치
Fig. 4. OS on the starboard side of TS

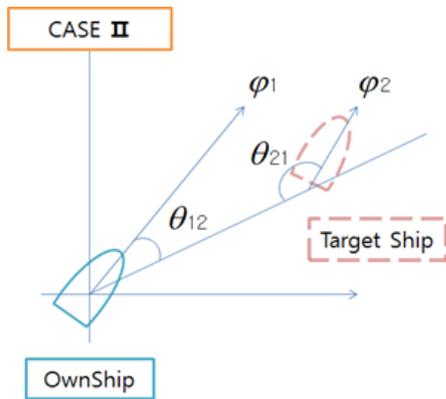


그림 5. 자선이 타선의 좌현에 위치
Fig. 5. OS on the port side of TS

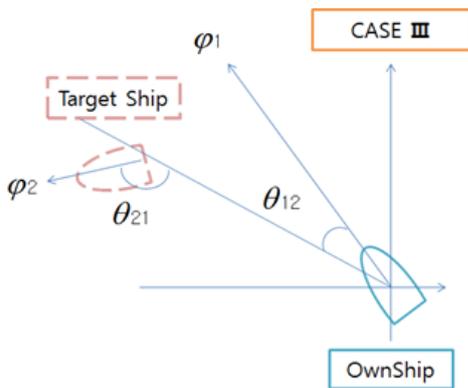


그림 6. 본선이 타선의 좌현에 위치
Fig. 6. OS on the port side of TS

라. OS가 TS의 우현에 위치한 경우
- TS의 선수방위가 $\varphi_1 + \theta_{12}$ 보다 큰 경우
그림 7과 같이 선박이 위치할 경우 다음과 같은 식으로 θ_{21} 을 구할 수 있다.

$$\varphi_1 - \theta_{12} + 180^\circ = \varphi_2 + \theta_{21} = 45^\circ$$

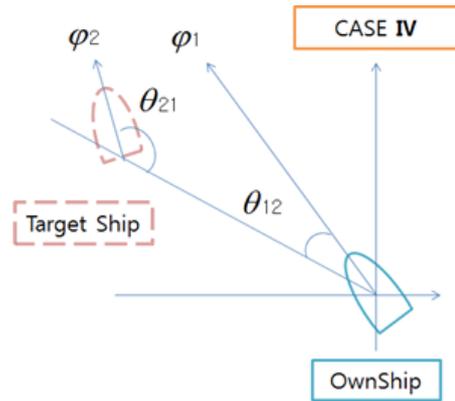


그림 7. 본선이 타선의 우현에 위치
Fig. 7. OS on the starboard side of TS

위에서 소개한 4 가지 경우에 대한 선박간 위치에 따라 피항관계 규정을 위한 θ_{21} 을 구하기 위해 일반화 시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi_1 \pm \theta_{12} + 180^\circ = \varphi_2 \pm \theta_{21}$$

이러한 4가지 경우를 고려하여 본선에서 관측한 상대방 위에 따라 선박충돌회피를 위한 프로그램을 다음과 같이 작성하였다.

```

if  $\theta_{21}$ 의 절대값  $\leq 5^\circ$ 
=> 타선의 정면을 바라보고 있다
else if  $\theta_{21}$ 의 절대값  $\leq 112.5^\circ$ 
=> 타선의 우현 또는 좌현을 바라보고 있다.
{
    if  $\theta_{12} > 0^\circ$ 
    타선은 본선의 우현에 위치
    else 타선은 본선의 좌현에 위치
    if  $\theta_{21} > 0^\circ$ 
    본선은 타선의 우현을 보고 있음
    else 본선은 타선의 좌현을 보고 있음
}
else 타선의 선미등을 바라보고 있다.
end
    
```

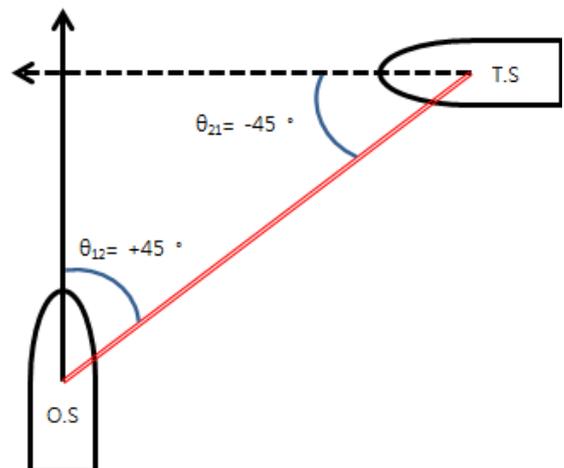


그림 8. 피항의무 판단
Fig. 8. Decision making for give-way vessel

그림 8과 같은 상황이 발생할 경우 위 코드에 따라 선박 간 충돌회피 동작을 수행한다. 먼저 θ_{21} 은 5° 이상 112.5° 이하이며 θ_{12} 는 양수, θ_{21} 는 음수이다. 이 경우 타선은 본선의 우현에 위치하게 되며, 타선의 흥등이 비치는 범위에 있다. 따라서, 본선은 타선의 진로를 방해하고 있으며 피항의 의무를 지니기 때문에 침로를 변경해야 한다. 그림 9의 충돌회피 알고리즘은 본선이 '72 CORLEGs에 따라서 피항선 인지 또는 유지선 인지를 파악한다. 피항 의무를 가진 선박의 $f(t)$ 값이 f_m 이하로 될때 피항동작을 실시한다. 피항동작은 상대방이 본선의 피항의도를 알 수 있게 최소 15° 이상이 되도록 변경을 시행한다.

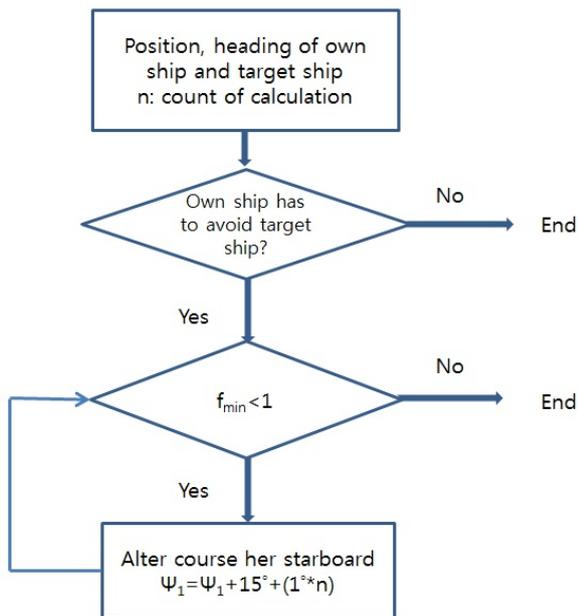


그림 9. 충돌회피 알고리즘의 흐름도
Fig. 9. Flow chart for collision avoidance

4. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 10은 본선의 충돌회피 과정을 나타내었다. 실선은 본선의 영역이며, 점선은 타원이 경계에 위치하도록 한 영역이다. 본선은 000° 로 항해중이며, 타선은 270° 로 항해중이다. 본선이 피항선임을 판단하여 우현으로 변경하였다. 본선의 위치(x_1, y_1)은 (0,0), 타선의 위치(x_2, y_2)는 (1,1), 본선 길이 $L=200m$, $a=7L=0.76$ 마일, 단반경 $b=3L=0.32$ 마일, 본선의 속력, $v_1=14$ 노트, 타선의 속력, $v_2=12$ 노트로 설정하여 시뮬레이션을 실행하였다.

그림 11은 타선과의 위치에 따른 $f(t)$ 의 변화를 나타낸 그림이다. 내부의 장반경 a 와 단반경 b 로 된 타원영역내에 타선이 침범하지 못하게 피항하도록 설계하였다. 그림 12는 2010년 11월 10일 22:55분경 실제 충돌사고가 발생했던 해군 고속정과 어선 간 사고 위치를 나타낸 것이다. 해군 고속정은 선속은 12노트이며 250° 로 항해 중 100° 로 크게 변경하였다. 어선은 10노트로 250° 를 유지하며 항해하던 중 충돌하였다. 사고당시 AIS의 정보를 활용하여 선박의 위치, 선속, 침로 등의 정보를 이용하여 선박의 위험도를 계산하였다.

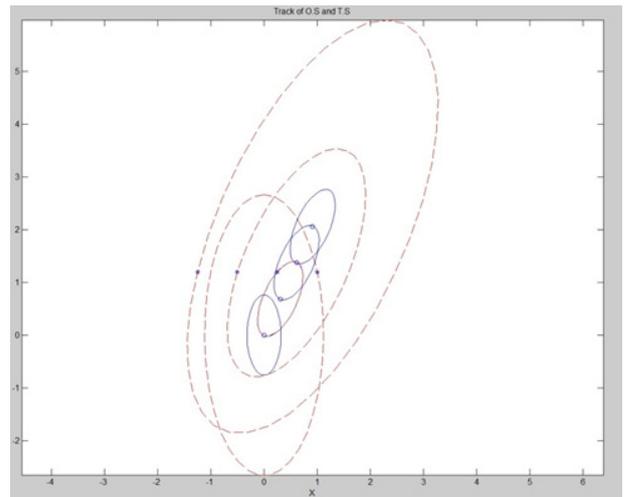


그림 10. 타원모델기반 충돌 회피동작
Fig. 10. Collision avoidance based on ellipse model

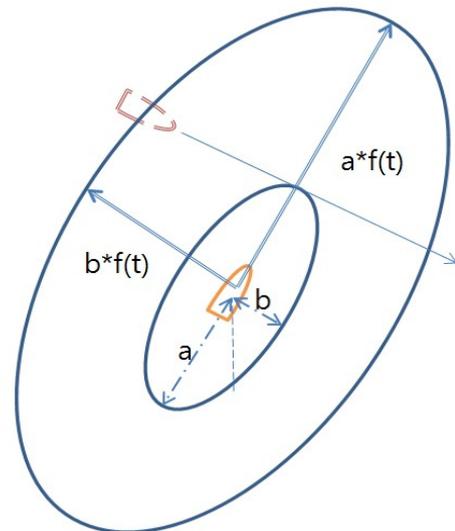


그림 11. 타선과의 위치에 따른 $f(t)$ 의 변화
Fig. 11. $f(t)$ determined by relative position

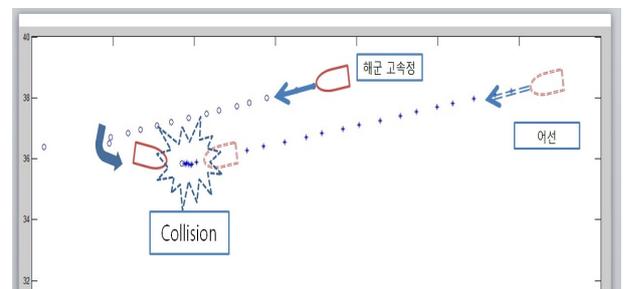


그림 12. 충돌선박의 항적
Fig. 12. Tracks of two ships in collision

선박의 위험도는 Lisowski[8]의 논문에서 제시된 다음 식 (2)를 이용하였다.

$$r = [a_1 * f_{\min}^2 + a_2 * (\frac{T_{f\min}}{T_s})^2 + a_3 * f(t)^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 r : 위험도 지수,
 a_1, a_2, a_3 : 선박 주변 상황 및 선박 크기 등에 따른 계
 수(기상, 속력, 선박크기 등)
 f_m : 가장 작은 $f(t)$ 값
 T_m : f_m 에 이르는 시간
 T_s : 선박의 안전 조건 가능한 최소 시간

위험도는 계산결과의 역수를 취한다. 즉, $f_m, T_m, f(t)$ 값이 커지면 위험도가 낮아짐을 뜻한다. T_s 는 접근하는 자선의 피항에 필요한 최소의 시간이다.

표 1. 충돌회피를 위한 위험도의 계산
 Table 1. Risk Parameter for collision avoidance - The case study of a maritime accident

| No. | $f(t)$ | $d(\text{nm})$ | T_m | f_m | r |
|-----|--------|----------------|-------|-------|-------|
| 1 | 30.7 | 2.8 | 0.99 | 1.81 | 0.033 |
| 2 | 29.3 | 2.8 | 2.22 | 0.05 | 0.034 |
| 3 | 28.8 | 2.7 | 1.54 | 4.66 | 0.034 |
| 4 | 27.9 | 2.6 | 1.59 | 11.46 | 0.033 |
| 5 | 28.2 | 2.6 | 1.31 | 5.52 | 0.035 |
| 6 | 27.6 | 2.5 | 1.21 | 2.83 | 0.036 |
| 7 | 28.0 | 2.5 | 1.46 | 9.35 | 0.034 |
| 8 | 27.2 | 2.5 | 1.43 | 8.83 | 0.035 |
| 9 | 26.3 | 2.4 | 1.47 | 15.53 | 0.033 |
| 10 | 26.6 | 2.4 | 1.39 | 8.91 | 0.036 |
| 11 | 25.5 | 2.4 | 1.43 | 15.02 | 0.034 |
| 12 | 25.4 | 2.3 | 1.92 | 0.80 | 0.039 |
| 13 | 25.3 | 2.3 | 1.39 | 15.37 | 0.034 |
| 14 | 25.4 | 2.2 | 1.37 | 16.08 | 0.033 |
| 15 | 24.5 | 2.2 | 1.34 | 15.17 | 0.035 |
| 16 | 24.7 | 2.1 | 0.97 | 2.30 | 0.040 |
| 17 | 23.6 | 1.9 | 0.12 | 0.79 | 0.042 |
| 18 | 25.0 | 2.5 | 0.12 | 0.58 | 0.040 |
| 19 | 11.5 | 1.0 | 0.06 | 0.22 | 0.087 |
| 20 | 6.8 | 0.6 | 0.03 | 0.24 | 0.147 |
| 21 | 0.9 | 0.1 | 0.00 | 0.36 | 1.002 |

표 1은 사고 선박 중 피항 의무를 가진 어선에서 접근하는 상대선박의 시간에 따른 $f(t)$, 두 선박간의 거리- d , T_m , f_m , r 을 계산한 것이다. No. 16 부터 f_m 값이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 해군 고속정이 갑작스럽게 침로를 변경하였기 때문으로 볼 수 있다. 이후 r 값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서 관측된 선박의 시간간격은 1분30초에서 2분에 이른다. 이러한 상대선의 움직임에 따른 위험도 계산을 통하여 항해 중인 항해사에게 충돌 사고를 피하기 위해 일정 위험도가 넘을 경우 추천침로를 알려 줄 수 있다. 예를 들면, 위험도가 0.6 이상이 될 경우, 본선의 피항의무를 확인하고 그 후 변침각도 및 침로를 항해사에게 권고해 줄 수 있다.

5. 결 론

이제까지 선박간의 충돌 방지를 위한 알고리즘은 거의 대부분 DCPA와 TCPA를 이용하여 왔지만 대부분의 선박 충돌회피 알고리즘은 '72 COLREGs를 고려하고 있지 않다. 본 논문에서는 상대방위를 관측하여 본선이 '72 COLREGs에 의한 피항선 또는 유지선의 위치에 있는가를 판단하여 충돌회피 동작을 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 선박간 조우상황을 분류하고 피항선과 유지선의 관계를 판단한 후, $f(t)$ 에 의한 충돌회피 시점을 계산하여 피항동작을 수행하였다. 또한 본선과 타선과의 위치관계에 따른 가능한 상황을 분류하였으며, 타선의 상대방위, 본선의 침로 등을 가지고 충돌회피를 위한 일반화된 식을 나타내었다.

제안된 알고리즘의 유효성을 보여주기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었다. 실제적인 해양사고 자료를 바탕으로 위험도의 변화를 계산하였으며 실제적인 상황에 잘 적용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 결과는 안개 및 기상악화의 경우 시계가 제한되거나 야간항해 중 항해등의 식별이 어려워 피항선과 유지선의 판단이 불확실한 경우에도 국제해상충돌예방규칙에 의한 충돌회피 동작에 효과적으로 적용할 수 있다.

향후 다수의 선박에 적용 가능한 알고리즘의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Rafal Szlapczynski, "A unified measure of collision risk derived from the concept of a ship domain," *The Journal of Navigation*, vol. 59, pp.477-490, 2006.
- [2] Rafal Szlapczynski, "Determining the Optimal Course Alteration Manoeuvre in a Multi-Target Encounter Situation for a Given Ship Domain Model", *Annual of Navigation 12/2007*, pp.75-85, 2007.
- [3] Thomas Statheros, Gareth Howells and Klaus McDonald-Marier, "Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques," *The Journal of Navigation*, vol. 61, pp.129-142, 2008.
- [4] Y. Xue, B.S. Lee, and D. Han, "Automation collision avoidance of ships," *Proc. IMechE*, vol. 223, Part M: J. Engineering for the Maritime Environment, pp. 33-46, 2009.
- [5] 강일권, "'72국제해상충돌방지규칙을 고려한 충돌위험도 결정시스템", *Fish Tech*, vol. 45(2), pp. 106-113, 2009.
- [6] Fuji J., Tanaka K., "Traffic capacity," *The Journal of Navigation*, vol. 24, pp. 543-552, 1971.
- [7] 윤점동, *1972 국제해상충돌예방규칙에 관한 협약*, 세종출판사, 2008.
- [8] J. Lisowski, "The dynamic game models of safe navigation", *TransNav2007*, pp. 23-30.

저 자 소 개



김동균(KIM, DONG GYUN)
2004년 : 목포해양대학교 해상운송시스템
학과 학사 졸업
2004년~2007년 : 승선
2009년~현재 : 동 대학원 해양정보시스템
학과 석사과정

관심분야 : 선박충돌회피, 퍼지 이론, 게임이론
E-mail : kimdg421@gmail.com



정중식(JEONG, JUNG SIK)
1987년 2월 : 한국해양대학교 항해학과
졸업(공학사).
1993년 2월 : 동 대학교 대학원 전자통신
공학과 졸업(공학석사)
2001년 9월 : 일본 동경공업대학 대학원
이공학연구과 전기전자 전공
(공학 박사)

2002년~현재 : 목포해양대학교 교수
관심분야 : 해양정보통신망, 해양안전시스템, 해상교통시스
템, 선박충돌회피, 통계적 파라미터 추정
E-mail : jsjeong@mmu.ac.kr



박계각(PARK, GYEI-KARK)
1982년 : 한국해양대학교 항해학과 졸업
(공학사)
1986년 : 동 대학원 수송공학과 졸업
(공학석사)
1993년 : 일본동경공업대학 시스템학과(공
학박사)
2010년 : 전남대학교 무역학과 경영학 박사
졸업

1995년~현재 : 목포해양대학교 교수
1995년~현재 : 한국지능시스템학회 이사, 부회장
2008년~현재 : 한국항만경제학회 이사
2009년~현재 : 한국해운물류학회 상임이사

관심분야 : 지능형 물류관리, 의사결정론
E-mail : gkpark@mmu.ac.kr