

속력을 고려한 선박충돌회피모델에 관한 연구

양형선*

*목포해양대학교 마린시뮬레이션센터 전임연구원

A Study on the Ship Collision Avoidance Model considered Speed

*Hyoung-Seon Yang**

**Full-time Researcher of Marine Simulation Center, Mokpo Maritime University*

요 약 : 선박의 충돌회피 방법을 제시하는 관점에 있어, 두 선박의 조우각도에 따름 속력이 충분히 고려되어야 할 것이다. 하지만 선박의 충돌회피를 위해 새롭게 연구된 근접상황 선박충돌회피지원 모델의 Safe-Guard Ring 설정은 본선과 상대선박의 속력비가 약 1.7 이하로 제한되어 있으므로 제한된 범위 이외의 경우에서 충돌 위험이 존재 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 두 선박이 조우하는 각도 및 속력을 고려한 Safe-Guard Ring 설정을 연구함으로써 안전한 충돌회피 조종을 위한 선박충돌회피모델을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 선박충돌회피모델, 잔존충돌한계영역, 선박조종성능, 충돌원충영역, 가변충돌원충영역

ABSTRACT : *From a point of view of suggesting the method to avoid ship's collision, the speed of ships has to be considered sufficiently according to encounter angle of ships. But with respect to the establishment of Safe-Guard Ring of Ship Collision Avoidance Support Model in Close Quarters Situation that had been newly studied to avoid ship's collision, the ratio of own ship's speed to a target ship's speed was limited to about less than 1.7. Therefore in this paper, as doing a study concerned with the establishment of Safe-Guard Ring reflected the encounter angle and the speed of ships, we will propose the new model of ship collision avoidance for safe maneuver of ship's collision avoidance.*

KEY WORDS : *Ship Collision Avoidance Model, Potential Collision Limit Area, ship maneuvering performance, Safe-Guard Ring, variable Safe-Guard Ring*

1. 서 론

현재까지 선박충돌회피시스템에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며, 충돌위험도 판정을 위한 TCPA(Time of the Closest Point of Approach)와 DCPA(Distance of the Closest Point of Approach)를 입력변수로 이용한 퍼지추론과 국제해상충돌예방규칙을 기초로 한 두선박의 다양한 조우상황 분석 등의 연구는 선박자동충돌회피 기능을 발전시켜 왔다(Hara, 1990; Hammer, 1993). 또한 근접거리 충돌상황에 대한 분석과 선박조종성능 특성을 포함하여 다양한 조우상황에서 충돌회피 방법을 제시할 수 있는 충돌회피지원모델도 연구되고 있다(양과 예, 2005). 하지만 선박의 충돌회피 방법을 제시하는 관점에 있어 근접하는 두 선박의 속력 또한 고려되어야 할 것이다. 선박의 충돌회피를 위해 새롭게 연구된 근접상황 선박충돌회피지원 모델의 Safe-Guard Ring 설정은 본선과 상대선박의 속력비가 약 1.7 이하로 제한되어 있으므로 제한된 범위

이외의 경우에서 충돌 위험이 존재 할 수 있다(양과 예, 2005).

따라서 본 연구에서는 두 선박이 조우하는 각도 및 속력이 고려된 Safe-Guard Ring 설정에 관하여 연구함으로써, 최선의 피항행위의 수행을 가능하게 할 수 있는 충돌회피모델을 제시하고자 한다.

2. 속력을 고려한 선박충돌회피모델

2.1 가변 Safe-Guard Ring

접근하는 상대선박과의 충돌위험이 존재하는 경우에 일반적으로 CPA(the Closest Point of Approach), DCPA 및 TCPA를 고려하여 충돌회피 조종을 행한다. 또한 초기 실행 각도에 따라 상대선박과의 항과거리가 결정된다. 하지만 선박조종성능을 정확하게 계산하는 것은 어려운 일이므로, 그 항과거리

*대표저자 : 양형선(정회원), epicyang@hanmir.com 061)240-7070

가 어느 정도 되는가를 짧은 시간에 정확하게 판단한다는 것은 더욱 힘든 일이다. 근접하는 두 선박이 침로와 속도가 일정하다고 가정하면, 두 선박의 속도성분과 방향성분을 갖는 벡터들의 합으로 상대침로와 상대속도를 계산함으로써 DCPA 및 TCPA를 계산할 수 있다. 만약 근접하는 상대선박의 침로와 속도가 일정하게 진행된다면 상대선박과의 일정한 거리로 항과하기 위해서, 자선 침로의 초기 변침각을 어느 정도로 유지하여야 하는가를 고려하여 선행 연구된 근접상황 선박충돌 회피지원모델(양과 예, 2005)에 반영함으로써 상대선박의 속력을 고려한 선박충돌회피모델 개발이 가능할 것이다.

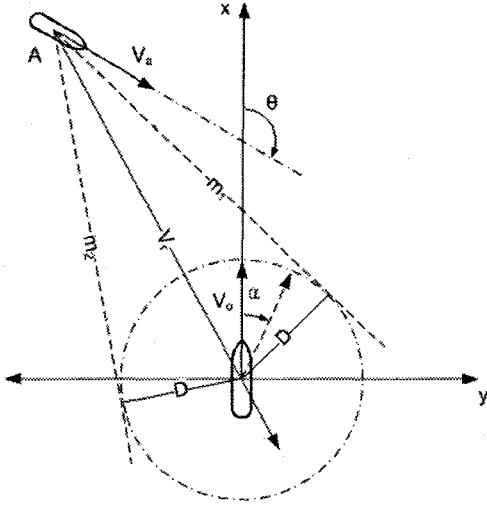


Fig. 1 Notations in a two-ship encounter

Fig. 1은 x-y직교좌표 평면을 항해하는 두 선박의 조우상황을 나타낸 것으로서, 계속해서 진행할 경우 충돌하게 됨을 알 수 있다. 여기서 상대선박 A의 속도를 V_a , 자선의 속도를 V_o , 두 선박의 조우각을 θ , 선박 A의 상대속도를 V , 선박 A와의 항과거리를 D , D 를 유지하기 위한 자선의 초기 변침각을 α , 그리고 자선의 원점으로부터 반지름 D 를 갖는 원에 접하는 두 개 직선의 기울기를 각각 m_1, m_2 로 정의한다. 두 선박이 초기 침로와 속도를 유지할 경우 합벡터 (x_r, y_r) 와 그 기울기 m 은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_r &= V_a \times \cos\theta - V_o \\ y_r &= V_a \times \sin\theta \\ m &= \frac{x_r}{y_r} = \frac{V_a \times \cos\theta - V_o}{V_a \times \sin\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 선박 A의 시점좌표를 (x_{a0}, y_{a0}) 라고 한다면, 시점좌표를 지나고 기울기가 m 인 직선의 방정식은 식 (2)와 같다.

$$my - my_{a0} - x + x_{a0} = 0 \quad (2)$$

직교좌표 x-y의 원점으로부터 위의 직선에 이르는 수직거리 D 는 다음 식 (3)으로 계산될 수 있다.

$$D = \frac{-my_{a0} + x_{a0}}{\sqrt{1+m^2}} \quad (3)$$

$$m = \frac{-2x_{a0}y_{a0} \pm \sqrt{(2x_{a0}y_{a0})^2 - 4(D^2 - y_{a0}^2)(D^2 - x_{a0}^2)}}{2(D^2 - y_{a0}^2)} \quad (4)$$

여기서 상대선박의 시점좌표와 항과거리 D 값이 주어지면 식 (4)를 이용하여 기울기 m 을 구할 수 있다. m 이 0보다 크면 상대선박이 자선의 좌현 쪽에서 접근하고 0보다 작으면 자선의 우현에서 접근하는 것을 의미한다. 또한 두 개의 기울기 값, 즉 m_1, m_2 가 구해지면, $|m_1| < |m_2|$ 일 때 m_1 은 자선이 상대선박 A의 선미를 항과하고 m_2 는 자선이 상대선박 A의 선수를 항과하는 것을 의미한다. 식 (5)를 이용하여 얻어진 m 은 Fig. 1에서 표시한 바와 같이 두 선박의 조우각을 θ 와 변침각을 α 를 사용하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 θ 의 값이 주어지면 식 (6)과 (7)로 조우각 α 를 구할 수 있다.

$$m = \frac{V_a \times \cos\theta - V_o \cos\alpha}{V_a \times \sin\theta - V_o \sin\alpha} \quad (5)$$

$$V_a (\cos\theta - m \sin\theta) = V_o (\cos\alpha - m \sin\alpha)$$

$$V_a (\cos\theta - m \sin\theta) = k \text{로 치환}$$

$$\text{if } m < 0, \alpha = \pm \cos^{-1}\left(\frac{k}{V_o \sqrt{1+m^2}}\right) - \tan^{-1}(m) \quad (6)$$

$$\text{if } m > 0, \alpha = \pm \sin^{-1}\left(\frac{k}{V_o \sqrt{1+m^2}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{m}\right) \quad (7)$$

단, $-180^\circ < \alpha < 180^\circ$

Fig. 2는 두 선박의 항과거리 D 를 유지하기 위한 기울기 m 값이 정해졌을 때, 초기 변침각 α 의 정의를 표현한 것으로서, 두 개의 α 값이 생성되는 것을 나타내고 있다. 따라서 상대선박과의 피항 동작을 좌현 변침 또는 우현 변침의 선택에 따라 α 값이 결정 된다.

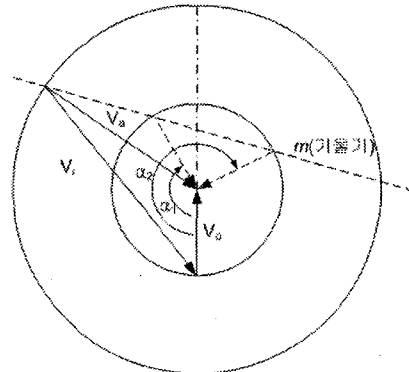


Fig. 2 Velocity triangle showing the effect of course change

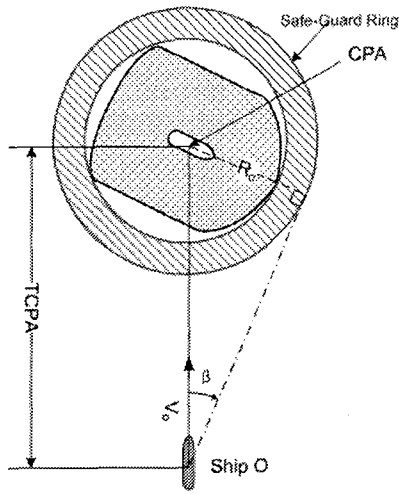


Fig. 3 Notations of R_d and β

Fig. 3은 근접상황 선박충돌회피지원모델의 잔존충돌한계영역과 Safe-Guard Ring을 나타낸 것으로써 선박의 길이(L: 자선의 L.O.A)에 따라 그 크기가 변화하며 상대선박의 속도는 자선 속도의 1.7배 이하에 고정 되어 있다(양과 예, 2005). 또한 이 모델은 TCPA 내에 자선이 β 각 이상을 변침할 수 있다면 충돌을 회피할 수 있다는 규칙을 갖는다. 이 때의 β 는 식 (8)로 계산될 수 있다.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{R_d}{TCPA \times V_o}\right) \quad (8)$$

여기서, β 각은 상대선박의 속도를 고려하지 않고 있으므로 상대선박의 속도가 고려되어 있는 위의 식에서 계산된 초기 변침각 α 를 사용함으로써 Fig. 3에서 표현된 R_d 의 길이를 확장할 필요가 있다. R_d 의 길이는 다음 식 (9)를 사용한다.

$$R_d \geq (TCPA \times V_o + L) \sin \alpha \quad (9)$$

여기서, L은 선박의 길이를 의미하고 α 값은 두 선박의 조우각이 135도일 때 값으로 주어진다. 초기 변침각 α 는 피항 동작 시작점에서 α 각 만큼 변침되어 진행되어야 한다는 것을 의미하며 선박에서는 이러한 순간적인 조치가 불가능하다. 따라서 선회반경의 리치(Reach)는 일반적으로 선박 길이의 약 $1L \sim 2L$ 로 추정함으로써 그 최소값 $1L$ 을 반영하였으며, 수회의 실험결과 조우각 135도에서 가장 위험한 조우상황이 발생 되었으므로 그 때의 α 값을 산정하였다.

R_d 의 길이가 확장된다는 것은 Safe-Guard Ring의 반경이 확장된다는 것을 의미하며, 두 선박이 마주치는 경우와 90도로 횡단하는 경우에는 이렇게 확장된 영역이 필요하지 않으므로 Fig. 4에 표시된 바와 같이 가변 Safe-Guard Ring을 고안하였다. R_d 의 방향은 상대선박의 침로와 같은 방향으로 표시

된다. R_d 의 길이가 선행 연구된 Safe-Guard Ring(양, 2005)의 반지름보다 작을 경우 기존의 모습을 갖게 되지만, 그 보다 클 경우 상대선박의 침로 방향으로 확장된 점에서 Safe-Guard Ring의 원에 접하는 경계선을 갖는다.

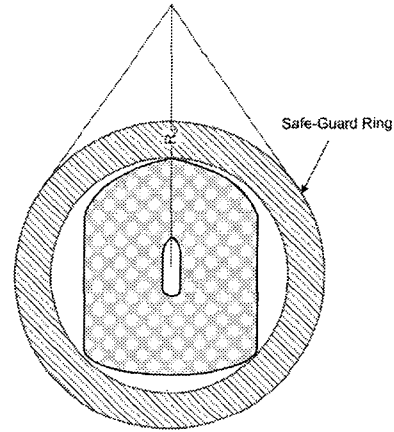


Fig. 4 Variable Safe-Guard Ring

2.2 선박운동모델

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 선박충돌회피모델과 수치계산을 위한 선박 조종운동방정식은 지구고정좌표계 $O-XY$ 와 선체 고정좌표계 $o-xy$ 로 구성된다. 수면에서 회두각(ψ) 변화는 지구고정좌표계를 이용한다. 선박의 조종운동은 주로 평면상에서의 Surge, Sway, Yaw 운동이라 할 수 있으며, 선박 무게중심의 x좌표인 x_G 를 원점으로 하는 조종운동방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

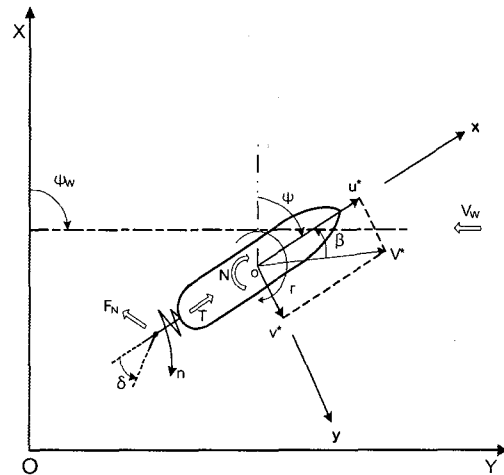


Fig. 5 Coordinate system

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G \dot{r}^2) &= X \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_{zz} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N \end{aligned} \quad (10)$$

m 은 선체의 질량, I_{zz} 는 z 축 주위의 관성 모멘트이다. u , v , r 은 각각 선체 중앙에서 x 축 방향 속도성분, y 축 방향 속도성분, z 축 주위의 각속도 성분이다. \dot{u} , \dot{v} , \dot{r} 은 시간에 대한 1차 도함수이며, X , Y , N 은 각각 x , y 축 방향 유체력과 z 축 주위의 유체력 모멘트를 나타낸다. 또한 선박에 작용하는 힘의 상호 간섭을 고려함으로써 선박의 운동을 보다 잘 표현한다고 알려진 일본 MMG 수확모델(Owaga, 1977~1980)을 사용하여 x , y 축 방향의 부가질량과 z 축 주위의 부가관성모멘트는 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} (m+m_x)\dot{u} - (m+m_y)vr - (m\alpha_G+m_y\alpha)r^2 &= X_H+X_P+X_R \\ (m+m_y)\dot{v} + (m+m_x)ur + (m\alpha_G+m_y\alpha)\dot{r} &= Y_H+Y_P+Y_R \\ (I_{zz}+J_{zz})\dot{r} + (m\alpha_G+m_y\alpha)\dot{v} + m\alpha_Gur &= N_H+N_P+N_R \end{aligned}$$

여기서, 첨자 H, P, R은 각각 선체(Hull), 프로펠러(Propeller), 타(Rudder)에 의한 유체력 또는 외력성분을 나타낸다. 그리고 m_x , m_y 는 x , y 축 방향의 부가질량, I_{zz} 는 z 축에 대한 선박의 관성모멘트, J_{zz} 는 z 축 방향의 부가관성모멘트, α 는 m_y 중심의 x 좌표를 나타낸다.

2.3 속력을 고려한 선박충돌회피모델

위에서 제안된 가변 Safe-Guard Ring과 선박운동의 수학적 모델을 적용하여 속력을 고려한 선박충돌회피모델을 Fig. 6과 같이 근접상황 충돌회피지원모델을 새롭게 구성하였다.

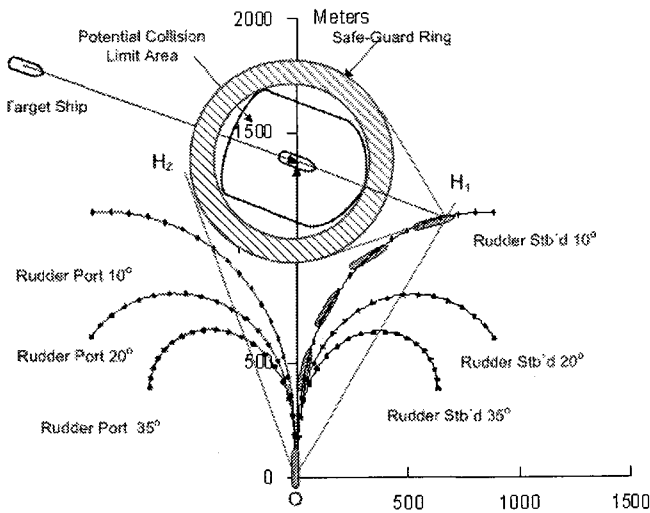


Fig. 6 New Model for Ship Collision Avoidance

Fig. 6에서 보는 바와 같이 마주치는 경우 TCPA내에 자선의 좌현 선회시 TCPA 안에 선분 OH₁을 벗어나 선회할 수 있다면 충돌을 피할 수 있으며, 자선의 우현 선회시 TCPA 안에 선분 OH₂를 벗어나지 않을 수 있다면 충돌을 피할 수 있다. 이러

한 가설을 피항 규칙(Rule)으로 정리하면 다음과 같다.

- Rule 1 : 자선이 좌현 선회할 경우 TCPA 안에 선분 OH₁을 벗어나 선회할 수 있다면 충돌을 피할 수 있다.
- Rule 2 : 자선이 우현 선회할 경우 TCPA 안에 선분 OH₂ 벗어나 선회할 수 있다면 충돌을 피할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 수립되고 제안된 모델에 관한 유용성을 확인하기 위해 우현타각 10°, 20°, 35°로 발생하는 자선의 선회궤적과 초기속력 및 침로를 유지하는 상대선박과의 위치변화를 분석하기로 한다. 시뮬레이션 검토를 위해 사용된 모델선박의 제원은 Table 1과 같다. 또한 시뮬레이션 검토를 위한 계획은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 자선의 우현에서 접근하는 상대선박과의 충돌회피를 위한 우현 타각 사용을 원칙으로 한다. 선체에 작용하는 유체력 미계수 추정을 위해, 선체의 주요목 자료만으로 유체력 미계수의 개략적인 값을 구할 수 있는 Inoue(Inoue, 1981)의 연구 결과를 이용하였다.

Table 1 Principal dimensions of the model ship

Type	Container	Rudder	Propeller
LOA	: 200 m	H _R : 7.7m	Pitch : 6.8575m
Breadth	: 25.4m	L _R : 4.21m	D _P : 6.5m
Draft	: 8.5m	A _R : 30.48m ²	Blade : 5
Cb	: 0.559		

근접상황 충돌회피지원시스템 개발에 관한 연구(양, 2005)의 결과를 이용하여 잔존충동한계영역과 접하는 원의 지름은 600m, Safe-Guard Ring 폭은 100m, 자선의 속도는 8.5m/sec로 초기화하였다. 또한 상대선박의 초기 속도와 가변 Safe-Guard Ring의 Rd의 값은 Table 2와 같다. 만약 Rd의 계산 값이 Safe-Guard Ring 바깥쪽 원의 반지름, 즉 400m보다 작으면 400m를 최소값으로 설정하고 400m보다 크면 Rd의 계산 값을 적용하였다. 상대선박의 시점은 Fig. 6에 나타낸 Rule 2를 만족하는 최소한의 지점으로 설정되었다.

Table 2 Speed ratio and Rd for simulation

Speed ratio(V _s /V ₀)	1.0	1.5	2.0	2.5
Length of R _d	400m	425m	455m	511m

Fig. 7 ~ Fig. 18은 위에서 제안된 계획에 의해 시뮬레이션된 선박의 위치변화를 나타낸 것으로서, 상대선박의 침로를 090~180도로 설정하여 다양한 조우상황에 대하여 검토하였다.

Fig. 7 ~ Fig. 9의 경우 충분한 피항동작을 할 수 있는 것으로 분석되며, Fig. 10의 경우 조우각 100°에서 근접거리가 가까워지는 문제가 있지만 사용할 수 있는 우현타각의 여유가 있으므로 TCPA의 시간의 만료한 시점에서 10°이상의 타각을 사용한다면 충분한 피항동작을 취할 수 있다. Fig. 11의 경우에도 충분한 피항동작을 할 수 있는 것으로 분석되며, Fig. 12 ~ Fig. 14의 경우 조우각 110°에서 근접거리가 가까워지는 문제가 있지만 사용할 수 있는 우현타각의 여유가 있으므로 TCPA의 시간의 만료한 시점에서 20°이상의 타각을 사용한다면 충분한 피항동작을 취할 수 있다. Fig. 15의 경우 조우각 120°에서 근접거리가 가까워진다는 단점이 있지만 TCPA의 시간의 만료한 시점에서 35°이하의 타각을 사용한다면 충분한 피항동작을 취할 수 있다. Fig. 16과 Fig. 17의 경우 조우각 120°에서 근접거리가 가까워지며, Fig. 18에서는 조우각 120°와 130°에서 근접거리가 가까워지는 단점이 존재하는 것으로 분석 되었다. 하지만 상대선박이 약간의 피항 동작을 지원해 준다면 충돌은 존재하지 않을 것으로 판단되며, 근접된 조우 상황에서 피항의무에 대한 최선의 행동을 나타낼 것으로 사료된다. 또한 충돌이 있다 하더라도 상대선박의 선수방위와 거의 유사한 자선의 선수방위를 갖게 되므로 충돌의 충격은 최소화 될 것이다.

상대속도비 2.5의 조우각 120°~130°에서 항파거리가 가까워지므로 충돌위험이 존재한다는 단점이 있으나, 두 선박이 조우하는 여러 각도에서 수행된 시뮬레이션 검토 결과, 위에선 제안된 충돌회피지원모델의 유용성이 높음을 확인하였다. 또한, 제안된 모델은 상대선박과의 충돌회피방법을 신속하게 결정할 수 있으므로 여러 가지 충돌상황 및 조우각에 따른 충분한 피항행위를 실행할 수 있을 것이다.

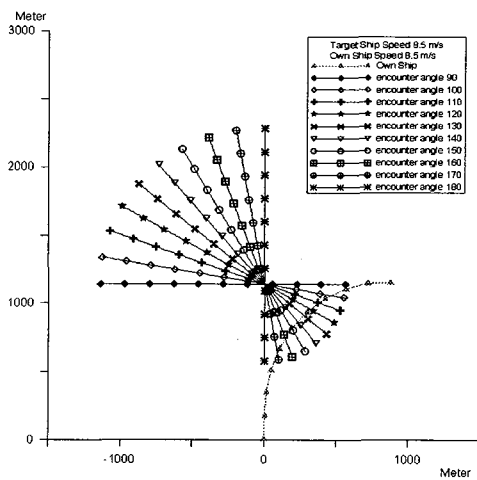


Fig. 7 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 10°, speed ratio=1.0)

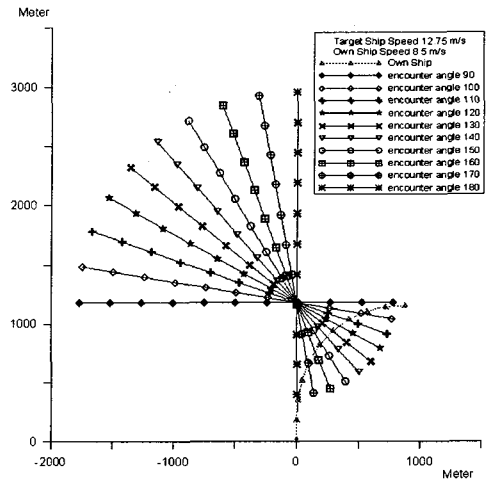


Fig. 8 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 10°, speed ratio=1.5)

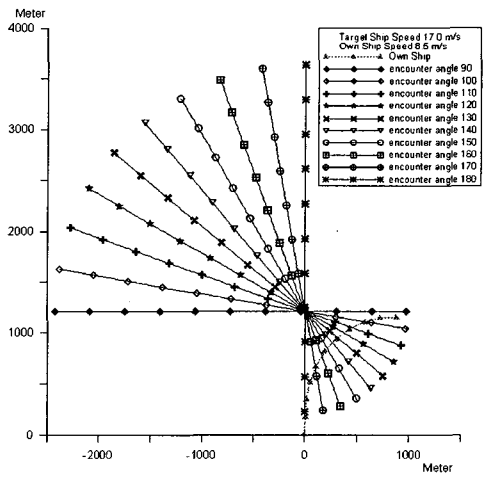


Fig. 9 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 10°, speed ratio=2.0)

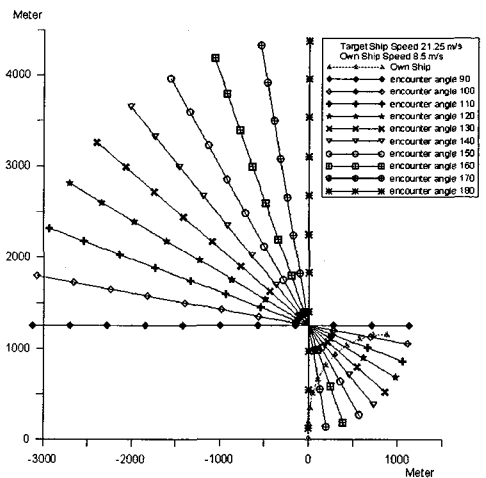


Fig. 10 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 10°, speed ratio=2.5)

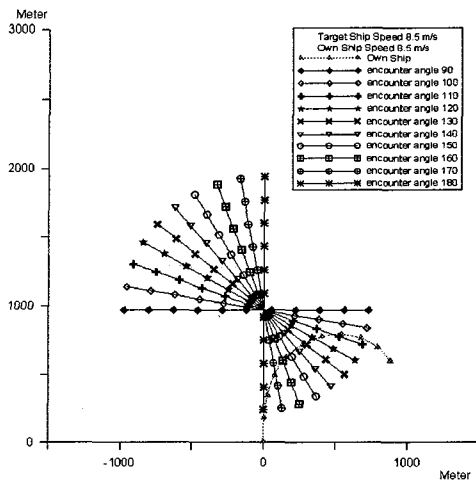


Fig. 11 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 20°, speed ratio=1.0)

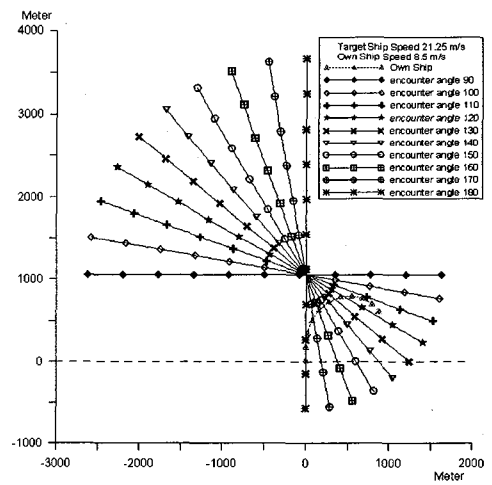


Fig. 14 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 20°, speed ratio=2.5)

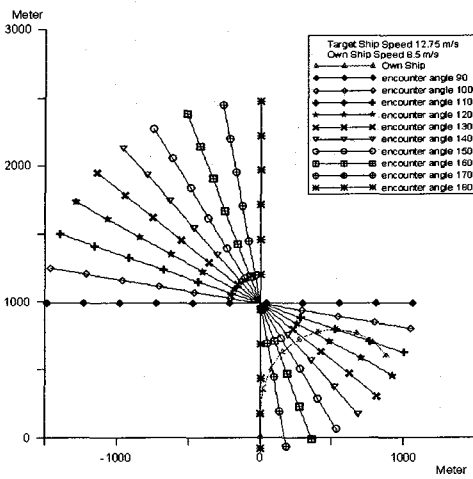


Fig. 12 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 20°, speed ratio=1.5)

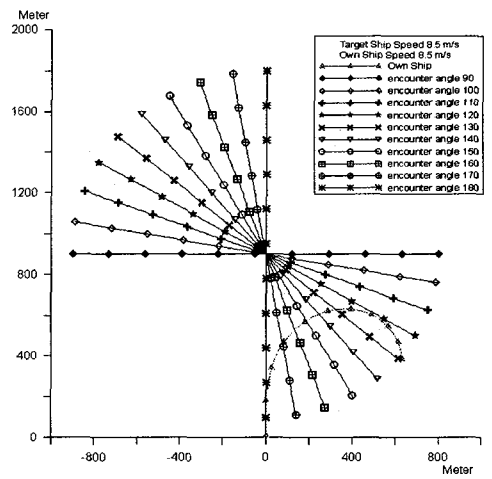


Fig. 15 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 35°, speed ratio=1.0)

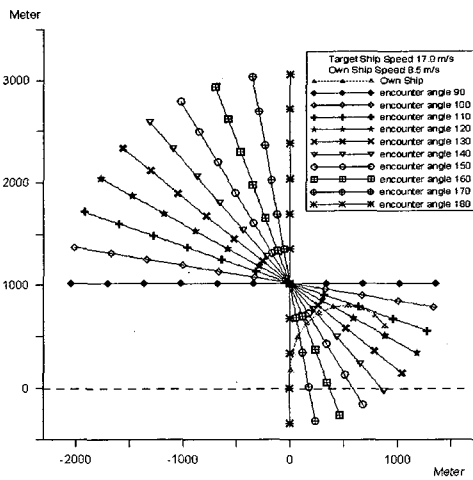


Fig. 13 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 20°, speed ratio=2.0)

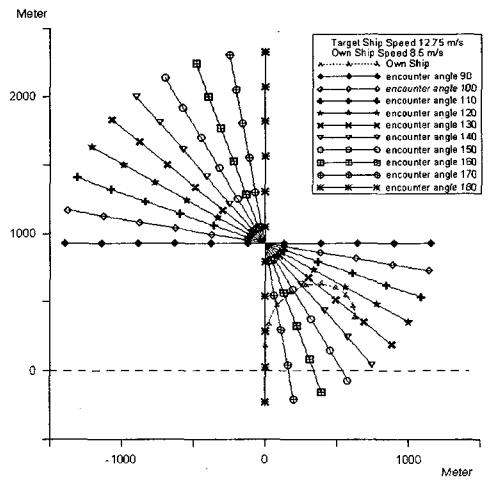


Fig. 16 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 35°, speed ratio=1.5)

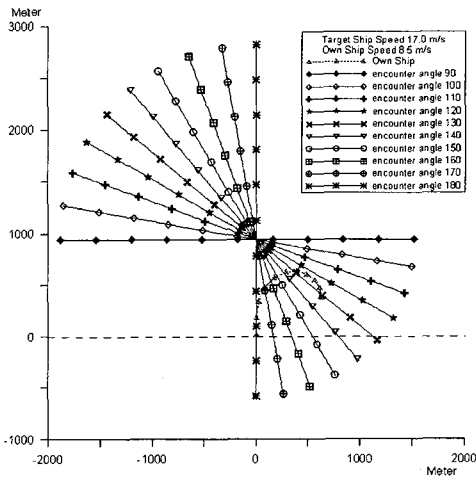


Fig. 17 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 35°, speed ratio=2.0)

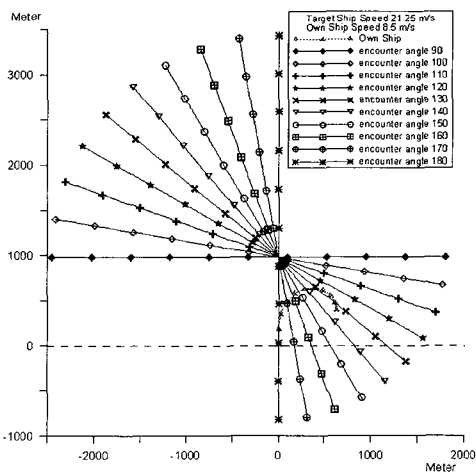


Fig. 18 Ships' trajectory of simulation (Rudder=Stb'd 35°, speed ratio=2.5)

4. 결 론

본 연구에서는 선박의 충돌회피지원모델에 있어, 수학적 모델을 통하여 가변 Safe-Gurad Ring을 제시하였으며, 이를 바탕으로 두 선박의 여러 가지 조우각에서 선박의 속력을 고려한 선박충돌회피모델을 제안하였다.

제안된 모델의 실용성을 확인하기 위해 수학적 시뮬레이션을 실행하였다. 그 결과 상대속도비 2.5 상태의 조우각 120°~130°에서 항과거리가 가까워지므로 충돌위험이 존재한다는 단점이 있으나, 유용성이 높음을 확인하였다. 검토를 통하여 상대선보다 속력이 작을 경우 피항동작 결정과 실행이 신속하게 이루어져야 한다는 것을 확인하였으며, 따라서 본 연구에서 제안된 모델은 상대선박과의 충돌회피방법을 신속하게 결정할 수 있으므로 여러 가지 충돌상황 및 조우각에 따른 충분한 피

항행위를 실행할 수 있을 것이다.

아울러, 선박의 조종성능은 조류와 천수구역에서 더 많은 영향을 받는다. 선박의 선회성능에 영향을 주는 외력 분석을 통하여 선박조종방정식이 재구성 되어 지원 된다면, 그 실용성을 증가할 것이다. 향후 연구에 있어서 이러한 사항은 반영해야 할 과제이며, 또한 상대선박의 예측치 못한 행동에 대해 충돌회피 가능한 영역과 한계를 파악할 수 있는 모델의 개발은 선박자동충돌회피시스템을 위하여 계속해서 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 양형선, 예병덕(2005), "근접상황 선박충돌회피지원모델에 관한 연구(II)", 한국해양학회지, 제29권 10호 pp. 827-832.
- [2] 양형선(2005), "근접상황 충돌회피지원시스템 개발에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, pp. 31-33, 43-45.
- [3] Hammer A. and Hara K.(1990), "Knowledge Acquisition for Collision Avoidance Maneuver by Ship Handling Simulator", MARSIM & ICSA 90, Tokyo.
- [4] Hara K. and Hammer A.(1993), "A safe Way of Collision Avoidance Maneuver based on Maneuvering Standard using Fuzzy Reasoning Model", MARSIM 93, St. John's.
- [5] Inoue, S. et al.(1981), "Hydrodynamics Derivatives on Ship Maneuvering", International Shipbuilding Progress, Vol. 28, No. 325.
- [6] Owaga et al.(1977~1980), MMG Report- I, II, III, IV, V, Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol 575, 577, 578, 579, 616.