

## 근접상황 선박충돌회피지원모델에 관한 연구(II)

양형선\* · 예병덕\*\*

\* 한국해양대학교 대학원, \*\* 한국해양대학교 교수

### Ship Collision Avoidance Support Model in Close Quarters Situation(II)

Hyoung-Seon Yang\* · Byeong-Deok Yea\*\*

\* Graduate course of Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

\*\* Division of Ship Operation System Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**요 약** : 본 연구는 근접상황 선박충돌회피지원시스템 개발을 위한 기초연구로써, 근거리 조우상황에서 항해사의 부적절한 조선으로 발생하는 선박충돌사고를 감소시키기 위한 선박충돌회피지원모델을 제시한다. 이 모델은 선박의 다양한 조우상황을 비교하고, 자선의 선회특성을 이용하여 상대선박의 침로, 속도 유지에 대한 충돌회피 가능영역과 방법을 나타냄으로써 근접상황에서도 신속한 피항동작 검토 및 결정을 가능케 하며 효과적인 충돌회피 조선을 지원할 것이다.

**핵심용어** : 충돌회피지원, 근접상황, 잔존충돌한계영역, 선박조종성능, 충돌완충영역

**Abstract** : In this paper, as a fundamental study of ship collision avoidance supporting system in close quarters situation, we propose ship collision avoidance support model for decreasing ship collision accidents those have occurred due to navigator's unsuitable maneuvering in close encounter. This model will effectively support maneuvering for collision avoidance through displaying the feasible area and the method of collision avoidance using own ship's turning characteristic about action of target ship's keeping course and velocity.

**Key words** : Ship collision avoidance support, Close quarters situations, Potential collision limit area, Ship maneuvering performance, Safe-guard ring

## 1. 서 론

선박충돌회피에 있어 중요한 요소는 조종성능 특성과 선박 조종자의 의도라고 할 수 있다. 이러한 사항은 근접상황에서 특히 중요하다. 최근 5년간 국내 선박충돌사고를 대상으로 한 상대선 초인 거리를 분석하면 선박충돌사고의 약 45%가 2마일 이하의 근접초인으로 발생한다(해양안전심판원, 2004). 근접초인은 상대선박의 거동을 판단하기 위한 여유시간 상실을 유발하며, 여기에 조종성능 특성에 대한 지식 및 경험 부족과 결합하여 결국 부적절한 충돌회피 조선의 원인이 된다. 근접상황에서 이루어지는 충돌회피 동작은 신속하고 정확하게 진행되어야만 하며, 주어진 TCPA 시간에 본선이 취해야만 하는 최선의 행위를 간구할 수 있어야 한다.

현재까지 선박충돌회피시스템에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며, 충돌위험도 판정을 위한 TCPA와 DCPA를 입력변수로 이용한 퍼지추론과 국제해상충돌예방규칙을 기초로 한 두선박의 다양한 조우상황 분석 등의 연구는 선박자동충돌회피 기능을 발전시켜 왔다(Hara, 1990; Hammer, 1993). 하지만 근접거리 충돌상황에 대한 분석과 선박조종성능 특성

을 포함하여 다양한 조우상황에서 충돌회피방법을 제시 할 수 있다면 시스템의 효율성은 더욱 증가할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 근접상황에서 이루어지는 충돌상황 분석을 통하여 주어진 시간 내에 선박이 취할 수 있는 최선의 피항행위를 가능하게 하고 충돌회피방법을 제시 할 수 있는 충돌회피지원 모델을 제안한다. 또한 선회조종성능 특성과 선회특성을 이용함으로써 그 효율성과 실용성은 증가할 것이다.

## 2. 선박운동모델

충돌회피지원 모델과 수치계산을 위한 선박 조종운동방정식은 지구고정좌표계  $O-XY$ 와 선체고정좌표계  $o-xy$ 로 구성된다. 수면에서 회두각( $\psi$ ) 변화는 지구고정좌표계를 이용한 선체고정좌표계는 선체중앙을 원점으로 하여 전진방향을  $+x$ , 우현방향을  $+y$ , 연직하방을  $+z$ 로 하는 직각 오른손 좌표계로 정의하였다.

선박의 조종운동은 평면상에서의 Surge, Sway, Yaw 운동이며, 선박 무게중심의  $x_G$  좌표인  $x_G$ 를 원점으로 하는 조종운동방정식은 식(1)과 같다.

\* 대표저자 : 양형선(정회원), epicyang@hanmir.com 061)284-8459

\*\* 정회원, byea@mail.hhu.ac.kr 051)410-4243

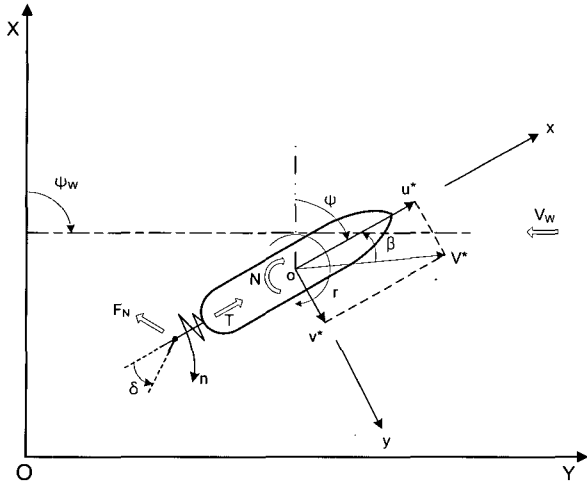


Fig. 1 Coordinate system

$$\begin{aligned} m(\dot{u}-vr-x_G\dot{\phi}^2) &= X \\ m(\dot{v}+ur+x_G\dot{\phi}) &= Y \\ I_{zz}\dot{r}+mx_G(\dot{v}+ur) &= N \end{aligned} \quad (1)$$

$m$ 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.  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 는 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 수학모델(Owaga, 1977~1980)을 사용하여  $x, y$ 축 방향의 부가질량과  $z$ 축 주위의 부가관성모멘트는 식(2)와 같이 정의될 수 있다.

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

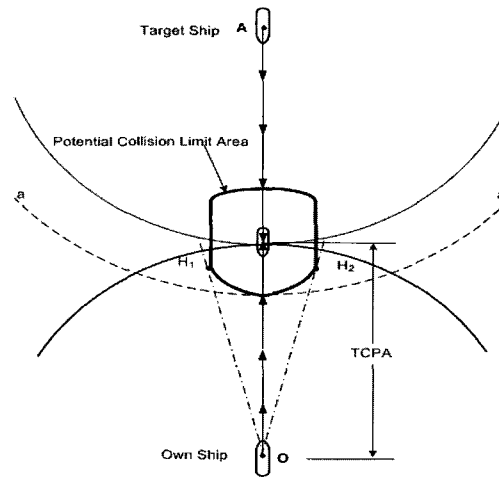
여기서, 첨자  $H, P, R$ 은 각각 선체(Hull), 프로펠러(Propeller), 타(Rudder)에 의한 유체력 또는 외력성분을 나타낸다. 그리고  $m_x, m_y$ 는  $x, y$ 축 방향의 부가질량,  $I_{zz}$ 는  $z$ 축에 대한 선박의 관성모멘트,  $J_{zz}$ 는  $z$ 축 방향의 부가관성모멘트,  $\alpha$ 는  $m_y$ 중심의  $x$ 좌표를 나타낸다.

### 3. 선박 충돌회피지원 모델

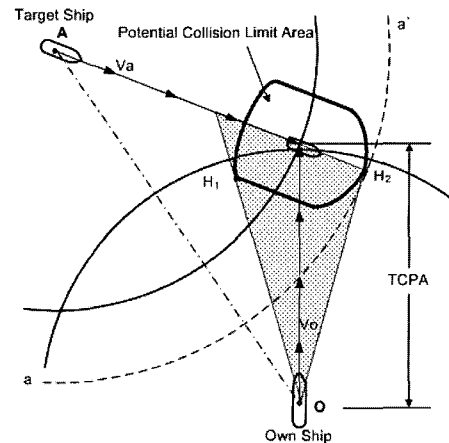
선박의 충돌회피문제에 있어서 가장 문제시 되고 있는 것은 상대선박의 의도를 미리 파악할 수 없고 단지 선박의 진행 사항으로만 그 의도를 예측해야 한다. 따라서 선박충돌회피지원모델 개발을 위한 알고리즘은 상대선박의 침로와 속도를 유지한다는 가정에서 계획이 수립된다. 상대선박의 속도와 침로 정보를 이용하여 상대선의 행동유지에 대한 피항행위 결정과

주어진 시간 안에 충돌회피가능 여부를 확인 할 수 있는 상호 선박의 행동분석은 근접상황 충돌회피를 위한 동작에도 중요한 영향을 미친다.

선박이 접근하는 상황은 추월하는 경우를 제외하고 마주치는 경우와 횡단하는 경우로 분류할 수 있다. 상대선박은 잔존 충돌한계영역(Potential Collision Limit Area)(양, 2004)을 갖고 이동하며, 두 선박이 계속해서 속도와 침로를 유지하여 진행할 경우 충돌한다고 가정한다. 이러한 상황에서 자선의 선회동작에 따른 충돌회피 가능성을 Fig. 2를 통하여 다음과 같이 정하였다.



(a) Notation in meeting encounter



(b) Notation in crossing encounter

Fig. 2 Collision avoidance model

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 마주치는 경우 TCPA 내에 잔존충돌한계영역과 접하는 선분  $OH_1$ 과  $OH_2$ 를 벗어나 선회할 수 있다면 충돌을 피할 수 있다. 또한 Fig.2(b)에서 보는 바와 같이 횡단하는 경우 자선의 좌현 선회시 TCPA 안에 선분  $OH_1$ 을 벗어나 선회할 수 있다면 충돌을 피할 수 있으며, 자선의 우현 선회시 TCPA 안에 선분  $OH_2$ 를 벗어날 수 있다면 충돌을 피할 수 있다. 이러한 가설을 피항 규칙(Rule)으로 정리하면 다음과 같다.

Rule 1 : 자선이 좌현 선회할 경우 TCPA 안에 선분 OH<sub>1</sub>을 벗어나 선회 할 수 있다면 충돌을 피할 수 있다.

Rule 2 : 자선이 우현 선회할 경우 TCPA 안에 선분 OH<sub>2</sub> 벗어나 선회 할 수 있다면 충돌을 피할 수 있다.

수립된 규칙의 타당성을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 0.1~0.6 deg./sec의 선회률(R.O.T; Rate Of Turn)로 진행되는 선박 O와 상대선박 A의 근접 거리를 도출하여 각각의 접근하는 조우각에 따라 비교 및 검토하기로 한다.

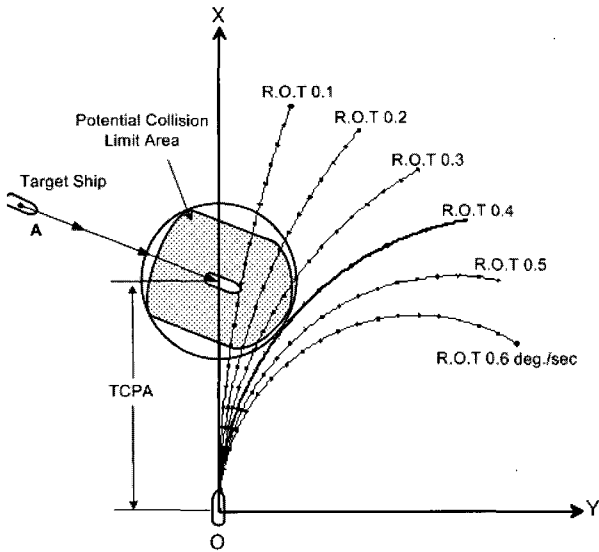


Fig. 3 Manoeuvre by rate of turn for avoidance collision

선박 A와 O가 계속 침로와 속력을 유지한다면 충돌하는 상황을 가정한다. 그리고 피항을 하기 위해 일정한 선회율로 진행되는 선박 O의 선회계곡과 상대선박 A의 잔존충돌한계영역에 한 원이 접하는 상태에서 그 원의 원점을 CPA로 하여 상대선박의 출발좌표를 정함으로써 선박 A의 각 선회율에 따른 가장 가까운 위치에서 상대선박의 좌표가 설정될 것이다. 또한 두선박이 조우하는 여러 가지 상황을 분석하기 위해 상대선박의 침로를 090°~180°로 설정하여 CPA점을 기준으로 상대선박의 침로에 따른 각각의 좌표를 설정하였다. 선박 A의 속력을  $V_a$ , 침로를  $\theta_a$ 라고 하면 중점좌표  $(x_a, y_a)$ 를 갖는 벡터와 진운동은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_a &= V_a \times \cos \theta_a \\ \vec{y}_a &= V_a \times \sin \theta_a \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_a(t) &= x_a(0) + \sum_{t=0}^{t-\Delta t} (V_a \times \cos \theta_a) \Delta t \\ y_a(t) &= y_a(0) + \sum_{t=0}^{t-\Delta t} (V_a \times \sin \theta_a) \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

선박 O의 속력을  $V_o$ , 침로를  $\theta_o$  라 하면 시점좌표는 원점을 갖고, 중점좌표  $(x_o, y_o)$ 를 갖는 벡터와 일정한 선회율 ROT로

진행하는 선박의 진운동은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_o &= V_o \times \cos \theta_o \\ \vec{y}_o &= V_o \times \sin \theta_o \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_o(t) &= x_o(0) + \sum_{t=0}^{t-\Delta t} (V_o \times \cos \theta_o(t)) \Delta t \\ y_o(t) &= y_o(0) + \sum_{t=0}^{t-\Delta t} (V_o \times \sin \theta_o(t)) \Delta t \\ \theta_o(t) &= \theta_o(0) + \sum_{t=0}^{t-\Delta t} ROT \times \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

두 선박이 초기 침로와 속도를 유지할 경우 합벡터  $(\vec{x}_r, \vec{y}_r)$ 과 상대속도  $V_r$ , 기울기  $m$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_r &= V_o \times \cos \theta_o - V_a \times \cos \theta_a \\ \vec{y}_r &= V_o \times \sin \theta_o - V_a \times \sin \theta_a \\ V_r &= \sqrt{x_r^2 + y_r^2} \\ m &= \frac{x_r}{y_r} \end{aligned} \quad (7)$$

위 식을 이용하여 TCPA와 DCPA를 구할 수 있다. 상대선박과의 CPA를 구하기 위해 우선 TCPA를 계산하여야 한다. 상대선박의 시점좌표  $(x_{a0}, y_{a0})$ 를 지나고 기울기  $m$ 인 합벡터의 직선의 방정식은 다음과 같다.

$$my - my_{a0} - x + x_{a0} = 0 \quad (8)$$

원점을 지나고 이 직선에 법선 방정식과 그 교점 P  $(x_1, y_1)$ 라고 하면 P와 TCPA 그리고 CPA점  $(X_{cpa}, Y_{cpa})$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$x + \frac{1}{m}y = 0 \quad (9)$$

$$P(x_1, y_1) = \left( \frac{-my_{a0} + x_{a0}}{m^2 + 1}, \frac{my_{a0} - x_{a0}}{m + \frac{1}{m}} \right) \quad (10)$$

$$TCPA = \frac{\sqrt{(x_{a0} - x_1)^2 + (y_{a0} - y_1)^2}}{V_r} \quad (11)$$

$$X_{cpa} = V_a \times TCPA \times \cos \theta_a + x_{a0} \quad (12)$$

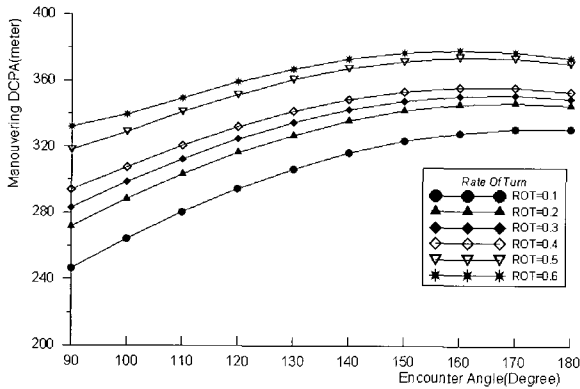
$$Y_{cpa} = V_a \times TCPA \times \sin \theta_a + y_{a0} \quad (13)$$

여기서 잔존충돌한계영역의 중방향 길이를 지름으로 하고 좌표축의 원점(0, 0)을 지나고 중심점(a, b), 반지름  $r$ 인 원에 접하는 직선 방정식을  $x = my$ 라고 가정하면 이 직선과 원의 중심(a, b)의 거리는  $r$ 이다. 따라서 기울기  $m_c$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

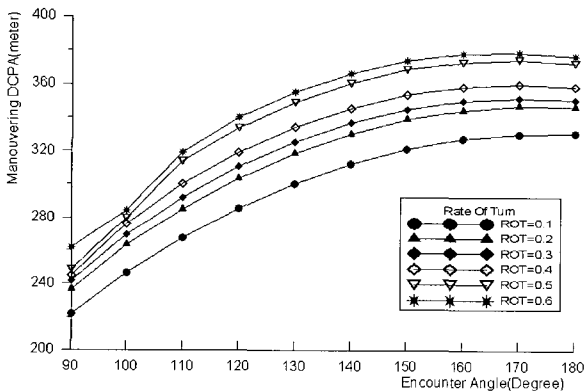
$$\frac{|m_c a - b|}{\sqrt{m_c^2 + (-1)^2}} = r \quad (12)$$

$$m_c = \frac{ab + \sqrt{(ab)^2 - (a^2 - r^2)(b^2 - r^2)}}{a^2 - r^2} \quad (\text{단, } a > r) \quad (13)$$

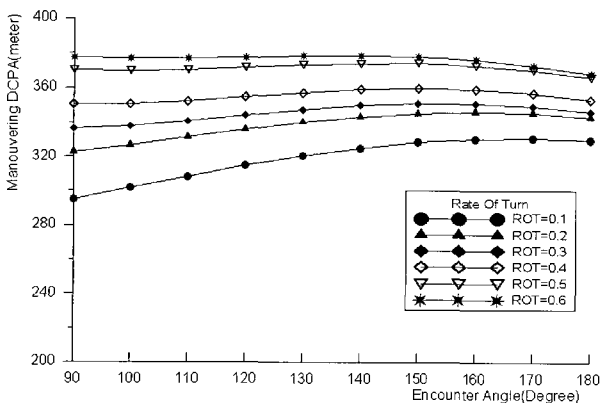
여기서 원의 중심(a,b)는 CPA점을 의미한다. 본선으로부터 CPA점에 그려지는 원에 접하는 경계선 OH<sub>1</sub>과 OH<sub>2</sub>를 계산하여 설정하고 선회률에 의해 진행되는 자선의 궤적이 TCPA 안에 벗어날 수 있는 위치에 선박 A의 좌표를 설정하여 각 조우상황에 따른 DCPA를 산출해 보았다.



(a) Va=Vo=8.5m/sec



(b) Va=10.0 m/sec, Vo=8.5 m/sec



(c) Va=6.0 m/sec, Vo=8.5 m/sec

Fig. 4 Variations of manoeuvring DCPA according to encounter angle

먼저 규칙 1의 경우 Fig. 2에 도시된 것으로도 상대선박 A를 피할 수 있는 것을 쉽게 파악 할 수 있으므로 이에 대한 검토는 생략 하였다. 규칙 2의 경우 상대선박과 자선의 속도차이도 고려되어야 하므로 Fig. 3에 나타낸 바와 같이  $V_a > V_o$ ,  $V_a = V_o$  그리고  $V_a < V_o$  에 따른 DCPA의 결과를 알아보았다. 여기서 사용된 선박의 전장은 200m, 잔존충돌한계영역의 종방향 길이는 640m 원의 반지름은 320m를 적용하였다.

Fig. 4에서 보는바와 같이 두 선박이 조우하는 각도 160° 이상에서는 DCPA의 변화가 거의 없으며, 그 거리 또한 약 320m 이상이 되는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 본선의 속력이 상대선박 속력보다 클 경우 선회률에 따라 약간의 차이가 있으나 DCPA 변화정도가 각각의 조우각에 따라 거의 변화가 없는 것을 알 수 있으며 그 거리 또한 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 상대선박 보다 속력이 빠르다는 것은 충돌을 벗어나기 위한 선택적 우위를 차지할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4(b)는 상대선박이 본선보다 속력이 빠를 경우를 나타낸 것으로서, 조우각 160° 이하에서 DCPA가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 그 거리 또한 잔존충돌한계영역 320m 이하로 적어지므로 충돌회피에 문제가 되는 것을 알 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 Fig. 5와 같이 충돌완충구역이 될 수 있는 Safe-Guard Ring을 적용하여 선박이 차지하는 점용면적을 확장하였다.

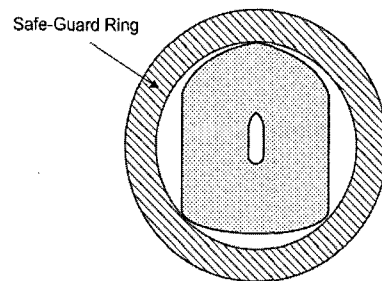


Fig. 5 Safe\_Guard Ring

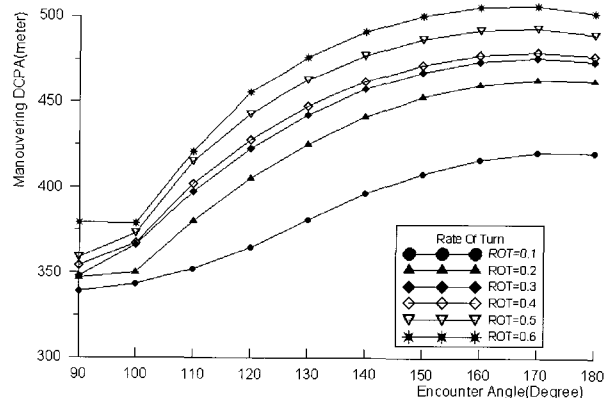


Fig. 6 Variations of manoeuvring DCPA(application safe-guard areas to Fig.3(b))

여기서 잔존충돌한계영역을 포함하고 Safe-Guard Ring의 폭을 1/2L(L: 자선의 L.O.A.)로 설정하여 Fig. 4(b)의 경우를 다시 산출한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 두 선박의 조우각 모두에서 잔존충돌한계영역인 반경 320m 이상의 DCPA를 갖는 것을 확인 할 수 있으므로 상대선박과 충돌을 면할 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 일정 선회율로 진행하는 선박을 기준으로 수립되고 제안된 모델에 관한 유용성을 확인하기 위해 선박조종 성능을 갖는 조종운동방정식의 역학적 모델을 통해 우현타각 10°, 20°, 35°로 발생하는 선회궤적과 초기속력과 침로를 유지하는 상대선박과의 조우각 및 속력 차이를 비교하여 DCPA 변화를 분석하기로 한다. 시뮬레이션 검토를 위해 사용된 모델선박의 제원과 계획은 Table 1과 Fig. 7에 나타낸 바와 같고 선체에 작용하는 유체력 미계수 추정을 위해, 선체의 주요 목 자료만으로 유체력 미계수의 개략적인 값을 구할 수 있는 Inoue(Inoue, 1987)의 연구 결과를 이용하였다. 또한 잔존충돌한계영역과 접하는 원의 지름 640m, Safe-Guard Ring 폭 100m, 모델선박 속력 8.5m/s로 설정함과 동시에 상대선박 침로를 090~180도로 설정하여 다양한 조우상황을 재현하였다.

Table 1 Principal dimensions of the model ship

Type : Container	Rudder	Propeller
L <sub>pp</sub> : 175 m	H <sub>R</sub> : 7.7m	Pitch : 6.8575m
Breadth : 25.4m	L <sub>R</sub> : 4.21m	D <sub>p</sub> : 6.5m
Draft : 8.5m	A <sub>R</sub> : 30.48m <sup>2</sup>	Blade : 5
C <sub>b</sub> : 0.559		

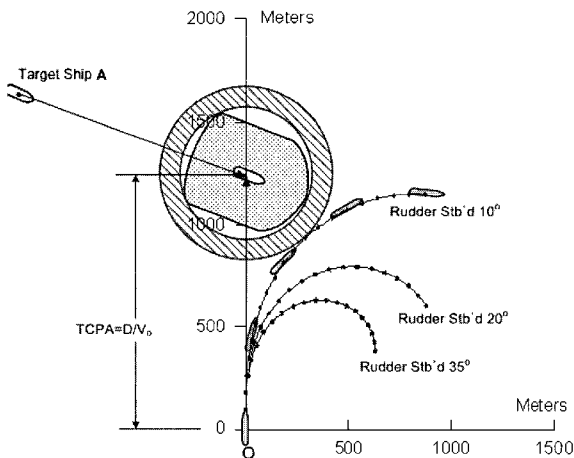
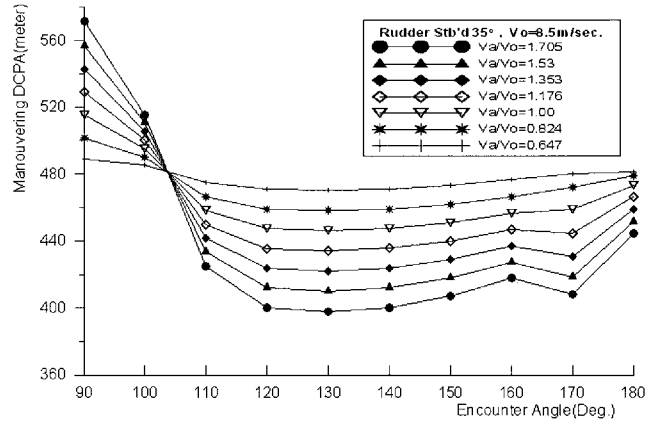


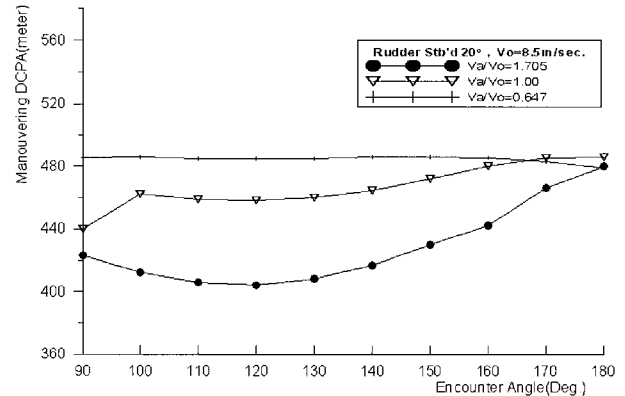
Fig. 7 Planning diagram for simulation

Fig. 8은 본선의 타각사용으로 발생하는 선회와 상대선박의 진행을 시뮬레이션 분석을 통하여 각각의 조우각 및 속력차이 별로 DCPA의 변화를 나타낸 것이다. 계획된 모든 상황에서

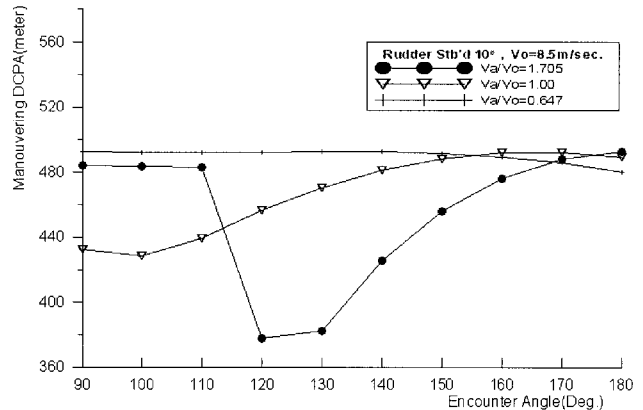
충돌한계영역인 320m 이상의 거리를 유지 하고 있으며, 특히 본선의 속력이 상대선 보다 작을 경우에는 그 거리 또한 감소 하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 근접상황에서는 상대선보다 속력이 작을 경우 피항동작 결정과 조선이 신속하게 이루어져야 할 것이다. 상대선박의 침로와 속력 데이터를 통해 TCPA가 정해지고 그 시간 내에 본선의 선회궤적의 변화를 사전에 파악 할 수 있다면 여러 가지 충돌상황 및 조우각에 따른 피항행위 결정을 신속하게 검토 할 수 있을 것이다.



(a) Starboard 35° turning



(b) Starboard 20° turning



(c) Starboard 10° turning

Fig. 8 The results of maneuvering according to encounter angles

## 5. 결 론

본 연구는 근접상황 선박충돌회피지원시스템 개발을 위한 기초연구로써 수행 되었으며, 근접거리 조우상황에서 항해사의 부적절한 조선으로 발생하는 선박충돌사고를 감소시키기 위한 새로운 충돌회피지원모델을 제안하였다.

제안된 모델은 두 선박이 충돌위험이 높은 상태로 근접 조우하는 경우 예상 CPA점에서 발생하는 잔존충돌한계영역에 Safe-Guard Ring을 적용하여 확장된 점용면적인 원에 접하고 본선을 기점으로 하는 경계선을 TCPA 안에 선회하여 벗어날 수 있다면 좌·우현 선회변침에 따른 상대선박과의 충돌을 피할 수 있으며 선회하여할 타각도 예측 할 수 있다. 따라서 선박조종성능의 선회특성을 갖는 조종운동방정식과 두 선박의 진행분석을 통하여 상대 선박의 속력과 침로 유지에 대한 피항조선의 기준을 제시하고 TCPA 시간 내에 두 선박이 조우하는 다양한 상황에 대해 자선의 선회조선에 대한 충돌회피 가능성과 그 한계를 신속하게 파악 할 수 있으며, 시뮬레이션을 통하여 모델의 실용성을 확인하였다.

향후 선박운동조종방정식에 외력에 대한 변수를 추가함으로써, 조류와 풍압력 등과 같은 외력으로 인해 발생하는 조종 성능 변화에 대해 충돌회피 동작의 진행을 예측하고 그와 동시에 충돌회피의 가능성을 판단 할 수 있는 기준으로 사용될 수 있으므로 올바른 충돌회피 조선을 취할 수 있도록 지원 가능할 것이다. 아울러 선박의 선회성능에 영향을 주는 외력 분석을 통하여 선박조종방정식이 재구성 되고, 선박 항해장비와 전기적 통신으로 연결하여 자동화된 시스템으로 지원 된다면, 그 실용성을 증가할 것이다. 향후연구에 있어서 이러한 사항은 반영해야 할 과제이며, 또한 상대선박의 예측치 못한 행동에 대해 충돌회피 가능한 영역과 한계를 파악할 수 있는 모델의 개발은 선박자동충돌회피시스템을 위하여 계속해서 연구 되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 양형선, 예병덕(2004), "근접상황 선박충돌회피지원모델에 관한 연구(I)", 한국항해항만학회지, 제28권 10호, pp. 827-832.
- [2] 해양안전심판원(2004), "사고통계분석 1998~2004(재결분)", <http://www.knmt.go.kr/statistics/statistics1.shtml>
- [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.

원고접수일 : 2005년 8월 10일

원고채택일 : 2005년 11월 29일