한국항해항만학회지 제27권 제4호, pp. 351~357, 2003 (ISSN-1598-5725)
Journal of Korean Navigation and Port Research

신 충돌위험도평가의 기울기계수 결정에 관한 연구

정 태 권*

* 한국해양대학교 운항시스템공학부

A Study on Determination of Gradient Coefficients in the New Evaluation of Collision Risk

*Tae-Gweon Jeong**

* *Division of Ship Operation Systems Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Republic of Korea*

요 약 : 충돌위험도의 정량적인 평가는 항해·충돌방지 전문가 시스템 개발에 있어서 중요한 역할을 한다. 이 연구에서는 sech 함수를 이용한 새로운 충돌위험도 평가법에서 나타난 기울기계수를 결정하는 방법을 이론적으로 분석하고 실제 상황에 적용할 수 있는 값을 제시하였다.

핵심용어 : 충돌위험도, sech 함수, 최근접거리, 접근시간, 기울기계수, 진폭계수

Abstract : *Evaluating the risk of collision quantitatively plays a key role in developing the expert system of navigation and collision avoidance. This study analysed theoretically and thoroughly how to determine the gradient coefficients as described in the new evaluation of collision risk using sech function, and suggested the appropriate values as applicable.*

Key words : *collision risk, sech function, distance to CPA, approach time, gradient coefficient, amplitude coefficient*

1. 서 론

충돌의 위험도를 정량적으로 평가하는 것은 항해·충돌방지 전문가 시스템을 구성하고자 할 때 특히 중요하다. 이것에 관한 연구는 과거로부터 사용되어 온 최근접거리(Distance to CPA)와 최근접시간(Time to CPA)에 의한 평가(A G Bole et al., 1982), 예상위험구역(Predicted Area of Danger)에 의한 평가(R F Riggs et al., 1979), (A G Bole et al., 1992), 충돌침로·충돌속력 범위에 의한 평가(今津, 1977, 1980, 1981), (H Imazu, 1978, 1979), 충돌위험구간(Sector of Danger)에 의한 평가(T. Degre et al., 1981), (W Burger, 1998), 추측위치오차로 구한 충돌확률에 의한 평가(今津, 1984) 등이 있는데 이들 평가에는 제각기 문제점을 갖고 있다. 이들 문제를 해결하기 위하여 *sech* 함수를 이용한 새로운 충돌위험도 평가(정, 2003)가 제안되었는데, 이 평가에서는 최근접거리 혹은 접근시간이 0이 될 때 충돌위험도가 무한대로 증가하는 문제, 최근접점 전후에서 나타나는 극단적인 불연속의 문제 등을 해결한 것으로 볼 수 있다.

이 연구에서는 *sech* 함수를 이용한 신 충돌위험도평가에서 나타난 기울기계수를 결정하는 방법을 이론적으로 고찰하고 그 방법에 의하여 실제에 적용 가능한 값을 제시하는데 목적을 두었다.

2. 신 충돌위험도평가의 기울기계수

*a, b*에 대한 결정기법

sech 함수를 이용한 신 충돌위험평가는 식 (1)과 같이 표현된다(정, 2003).

$$CR = \left.\begin{array}{l} p \cdot \sec h(a \cdot dcpa) + q \cdot \sec h(b \cdot ta) \\ + r \cdot \Phi(\theta, \alpha) \end{array}\right\} \quad (1)$$

단, CR은 충돌위험도이고, $dcpa$는 최근접거리이며, t_a는 목표의 접근시간이다. 또 p, q, r, a, b는 충돌위험도의 변화를 적절하게 결정하기 위한 계수인데, 진폭계수 p, q, r는 *sech* 함수의 진폭을 결정하며, 기울기계수 a, b는 *sech* 함수의 변화 정도를 결정한다. 그리고 $\Phi(\theta, \alpha)$는 본선이 유지선인지 피항선인지 등을 표시하는 본선상태의 결정함수로서, 목표의 방위 θ 및 애스펙트 α로 결정되며, 그 크기는 본선이 유지선일 때는 0, 피항선일 때는 1로 한다.

이 연구에서는 진폭계수 p, q를 각각 1, 본선상태의 결정함수 $\Phi(\theta, \alpha)$의 진폭계수 r을 0이라고 가정하고 기울기계수 a, b를 검토하기로 한다.

2.1 최근접거리와 접근시간

이 연구에서 사용되는 최근접거리를 수식으로 표현하면 식

* 대표저자 : 정태권(종신회원), tgjeong@mail.hhu.ac.kr, 051)410-4246

(2)와 같다.

$$dcpa = R\sin\zeta \tag{2}$$

단, $dcpa$는 최근접거리(마일), R은 목표까지의 거리(마일), ζ는 목표의 상대운동방향(상대침로, C_r)에서 목표까지의 방위(θ)에 180°를 더한 값을 뺀 것의 절대값이다. 즉, $\zeta = |C_r - (\theta + 180)|$ 로 표시되고 그 범위는 $0 \le \zeta \le 180$ 이다.

한편, 접근시간은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$t_a = \frac{R}{v_r \cos\zeta} \tag{3}$$

단, t_a는 목표의 접근시간(분), v_r는 목표의 상대속력(마일/분)이다. 이 식은 $\zeta = 90(°)$ 근처에서 접근시간 t_a의 절대값이 무한대로 증가하게 된다.

식 (2)를 이용하여 접근시간을 다시 표현하면 식(4)와 같이 된다.

$$\left.\begin{aligned} t_a &= \frac{2 \cdot dcpa}{v_r \sin 2\zeta} \quad \text{if } \zeta \neq 0(°) \text{ or } \zeta \neq 180(°) \\ &= \pm \frac{R}{v_r} \qquad \text{if } \zeta = 0(°) \text{ or } \zeta = 180(°) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

식 (4)를 보면 ζ가 0(°)이나 180(°)이 아닌 경우에는 ζ가 45(°) 또는 ζ가 135(°)에서 접근시간 t_a가 극소 혹은 극대가 됨을 알 수 있다. 그 때의 접근시간은 식 (5)와 같다.

$$t_a = \pm \frac{2 \cdot dcpa}{v_r} \tag{5}$$

식 (3)에서 접근시간 t_a가 ζ=90°근처에서 $\pm\infty$로 되는 문제는 식 (5)를 이용하여 식 (6)과 같이 수정하면 해결될 수 있다. 그래서 이 연구에서는 접근시간으로 식 (6)을 사용하기로 한다.

$$\left.\begin{aligned} t_a &= \frac{2 \cdot dcpa}{v_r} \qquad \text{if } 045° < \zeta \le 90° \\ &= -\frac{2 \cdot dcpa}{v_r} \qquad \text{if } 090° < \zeta < 135° \\ &= \frac{R}{v_r \cos\zeta} \qquad \textit{otherwise} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

2.2 기울기계수 a, b 의 결정조건

목표물의 최근접거리는 시간에 따라 거의 일정하지만, 식 (6)에 따라 수정된 접근시간은 감소하다가 최소값에 이르고 그 최소값을 최근접점까지 유지하다가, 최근접점을 통과하는 순간 부호는 (-)로 바뀌고 그 절대값은 계속 증가한다. 따라서 식 (1)의 충돌위험도는 접근시간의 영향으로 목표가 본선에 접근함에 따라 크게 되었다가, 멀어질수록 작아지게 된다. 그러므로 어떤 목표가 충돌의 위험성이 있어 피항조치를 한 경우의 충돌위험도도 그 목표가 본선에 접근함에 따라 증가하는 것은 당연하다. 이 점을 생각할 때 피항조치를 취한 직후의 충돌위험도보다 피항조치를 하여 목표가 충분한 통과거리로 본선을 지나는 경우에도 목표가 접근함에 따라 증가한 그 충돌위험도가 크다면 피항 조치를 다시 하여야 한다는 등의 조치가 필요한 것으로 판단하게 되어 불합리하다.

식 (1)에서 진폭계수 p, q 를 각각 1이라고 가정하고, 이런 점을 고려하여 기울기계수 a, b를 결정하기로 한다. 여기서 고려할 것은 피항 동작을 취한 시점의 충돌위험도가, 피항동작을 취하고 나서 목표가 접근함에 따라 최대가 된 충돌위험도의 값보다 크도록 조정하여야만 타당할 것이다. 충돌위험도의 차이를 표시하는 Ψ는 피항조치를 취한 직후의 충돌위험도에서 피항조치를 취한 후 최대가 된 충돌위험도를 뺀 것이다. 이를 식으로 표시하면 식 (7)과 같다.

$$\left.\begin{aligned} \Psi &= \{\sec h(a \cdot dcpa_1) + \sec h(b \cdot ta_1)\} \\ &\quad - \{\sec h(a \cdot dcpa_2) + \sec h(b \cdot ta_2)\} \\ &= \{\sec h(a \cdot dcpa_1) - \sec h(a \cdot dcpa_2)\} \\ &\quad + \{\sec h(b \cdot ta_1) - \sec h(b \cdot ta_2)\} \\ &= \Psi a + \Psi b \\ \Psi a &= \sec h(a \cdot dcpa_1) - \sec h(a \cdot dcpa_2) \\ \Psi b &= \sec h(b \cdot ta_1) - \sec h(b \cdot ta_2) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

단, $dcpa_1$, ta_1는 피항조치를 취하려고 할 때의 최근접거리(마일)와 접근시간(마일/분)을 각각 표시하고, $dcpa_2$, ta_2는 피항조치를 취한 후 접근시간이 최소가 될 때 즉, 충돌위험도가 최대가 될 때의 최근접거리와 접근시간을 각각 표시한다. Ψ가 항상 0보다 크기 위해서는 $\Psi a + \Psi b$가 0보다 크면 된다. 그런데 피항 조치를 한 경우라면 $dcpa_2$는 $dcpa_1$보다 항상 크므로 변수값이 클수록 작아지는 $\sec h$함수 특성 때문에 Ψa는 0보다 큰 값이 된다. 또 $dcpa_1$과 $dcpa_2$는 알고 있는 값이므로 Ψa는 a의 변수가 된다.

그런데 두 변수 a, b에 대한 식 (7)의 Ψ가 극소값 혹은 극대값을 가질 필요조건은 Ψ를 a, b로 편미분한 결과가 동시에 0이 되어야 한다(C. Henry Edwards et al 2002, Glyn James 2001).

우선 기울기계수 a를 구하기로 한다. Ψ를 a로 편미분한 결과는 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \Psi}{\partial a} &= \frac{\partial \Psi a}{\partial a} \\ &= -dcpa_1 \sec h(a \cdot dcpa_1)\tanh(a \cdot dcpa_1) \\ &\quad + dcpa_2 \sec h(a \cdot dcpa_2)\tanh(a \cdot dcpa_2) \\ &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

식 (8)에서 0를 만족하는 기울기계수 a값을 구하기는 정말 어렵고 또 그 값이 극대 혹은 극소인지 판정하기도 어렵다. 그래서 이 연구에서는 그래프를 이용하여 $\partial\Psi/\partial a$가 0에 가까울 때의 a값을 찾는다. 최근접거리는 $dcpa_1 < dcpa_2$이므로 식

(7)의 Ψa는 이 a값에서 최대값을 갖게 된다.

한편 기울기계수 b는 다음과 같이 구한다. $a=\xi$에서 Ψa가 극대값을 갖는다고 가정하면 Ψ는 항상 0보다는 커야 하므로 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\left.\begin{aligned}\Psi &= \Psi a(\xi) + \Psi b \\ &= \Psi a(\xi) + \sec h(b\cdot ta_1) - \sec h(b\cdot ta_2) > 0\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

단, $\Psi a_{\ a=\xi} = \Psi a(\xi)$임.

식 (9)를 $\Psi = 0$이라고 놓고 접근시간 ta_1에 대하여 정리하면 식 (10)과 같다. 또 Ψ를 변수 b로 편미분한 결과는 식 (11)과 같다

$$\left.\begin{aligned}\sec h(b\cdot ta_1) &= \sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi) \\ ta_1 &= \frac{asech[\sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)]}{b}\end{aligned}\right\} \quad (10)$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial \Psi}{\partial b} &= \frac{\partial \Psi b}{\partial b} \\ &= -ta_1 \sec h(b\cdot ta_1)\tanh(b\cdot ta_1) \\ &\quad + ta_2 \sec h(b\cdot ta_2)\tanh(b\cdot ta_2) \\ &= 0\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

$\tanh(b\cdot ta_1) = \sqrt{[1-\sec h^2(b\cdot ta_1)}$과 식 (10)을 이용하여 식 (11)을 접근시간 ta_1에 대하여 정리하면 식 (12)와 같다.

$$\left.\begin{aligned}ta_1 &= \frac{ta_2 \sec h(b\cdot ta_2)\tanh(b\cdot ta_2)}{\Omega_b\cdot\sqrt{1-\Omega_b^{\,2}}} \\ \Omega_b &= \sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

피항조치를 취한 후의 최소 접근시간 ta_2는 식 (5)로 구할 수 있다. 즉, 피항 조치를 한 후 목표의 상대속력 v_r과 최근접거리 $dcpa_2$를 알고 있으면 곧바로 구할 수 있다. 그러면 접근시간 ta_1과 기울기계수 b는 식 (10)과 식 (12)를 이용하면 구할 수 있게 된다. 그러나 이렇게 두 식을 이용하여 교점의 좌표를 구하는 방식은 다소 번잡스럽기 때문에 다음 방법을 사용한다. 즉, 식 (12)와 식 (10)의 차를 식 (13)과 같이 Δta_1으로 표시하고 이 Δta_1이 0이 되는 기울기계수 b를 구하면 된다. 이 기울기계수 b를 식 (10)에 대입하면 접근시간 ta_1을 구할 수 있다.

$$\left.\begin{aligned}\Delta ta_1 = &\frac{ta_2\cdot \sec h(b\cdot ta_2)\tanh(b\cdot ta_2)}{\Omega_b\cdot\sqrt{1-\Omega_b^{\,2}}} \\ &- \frac{asech[\sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)]}{b} \\ = &\ 0\end{aligned}\right\} \quad (13)$$

이렇게 구한 기울기계수 b에서 $ta_1 > ta_2$이므로 Ψb는 최소값을 갖는다. 그런데 앞에서 $\Psi = 0$으로 가정하였기 때문에 그 최소값은 0이 되어 의미가 없다. 즉, 식 (10)을 만족하는 기울기계수 b와 접근시간 ta_1는 모두 $\Psi = 0$가 된다. 그래서 다른 방법을 고찰할 필요가 있다.

2.3 기울기계수 b 및 접근시간 ta1의 범위

기울기계수 b의 범위는 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (9)의 $\Psi a(\xi) + \Psi b > 0$ 조건을 이용하면 정리하면 다음 식과 같다.

$$\Psi a(\xi) + \sec h(b\cdot ta_1) - \sec h(b\cdot ta_2) > 0$$
$$\sec h(b\cdot ta_1) > \sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)$$

그런데 좌변이 기울기계수 b나 접근시간 ta_1이 0보다 항상 크므로 좌변의 범위는 $0 < \sec h(b\cdot ta_1) < 1$ 이 된다. 그러므로 우변의 범위도 $0 < \sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi) < 1$이 될 수 밖에 없다. 그런데 $\Psi a(\xi) > 0$이고 또 $\sec h(b\cdot ta_2)$는 1보다 클 수 없으므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Psi a(\xi) < \sec h(b\cdot ta_2) < 1$$
$$asech[\Psi a(\xi)] > b\cdot ta_2 > asech(1)\,(=0)$$

따라서 기울기계수 b의 범위는 식 (14)와 같다.

$$0 < b < \frac{asech[\Psi a(\xi)]}{ta_2} \quad (14)$$

한편, 접근시간 ta_1의 범위는 다음과 같이 구할 수 있다. 우선 $\sec h(b\cdot ta_1) > \sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)$ 조건을 이용하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$\left.\begin{aligned}b\cdot ta_1 &< asech[\sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)] \\ ta_1 &< \frac{asech[\sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)]}{b}\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

또 접근시간 ta_1는 피항 조치 후 접근 시간 ta_2보다 크다고 가정한다. 목표의 상대속력이 아주 느린 경우에는 이 접근시간 ta_2가 크게 되는 경우도 있지만, 이 경우에도 $\Psi > 0$조건에 영향을 주지는 않는다.

$$ta_2 < ta_1$$

따라서 접근시간 ta_1의 범위는 식 (16)과 같이 표현된다. 그러나 접근시간 ta_1은 기울기계수 b의 해당 값에서만 식 (16)에 따른 범위를 갖는다.

$$ta_2 < ta_1 < \frac{asech[\sec h(b\cdot ta_2) - \Psi a(\xi)]}{b} \quad (16)$$

한편 식 (10)에서 접근시간 ta_1를 변수 b로 편미분을 하고 식 (13)을 이용하면 식 (17)과 같이 표현된다. 결국 식 (17)은 식 (13)을 b로 나눈 것이다. 즉 식 (13)이나 식 (17)에서 0이 되는 b값을 구하면 그 b값에서 접근시간 ta_1는 최소값을 갖는다.

$$\frac{\partial ta_1}{\partial b} = \frac{1}{b}\left\{\frac{ta_2 \cdot \sec h(b \cdot ta_2)\tanh(b \cdot ta_2)}{\Omega_b \cdot \sqrt{1-\Omega_b^2}} - \frac{asech[\sec h(b \cdot ta_2) - \Psi a(\xi)]}{b}\right\} = \frac{\Delta ta_1}{b} = 0 \quad (17)$$

3. 기울기계수 a, b의 결정 및 검증

3.1 기울기계수 a, b 의 값 결정

기울기계수 a, b의 결정은 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 먼저 피항 조치 전후의 최근접거리 $dcpa_1$과 $dcpa_2$, 그리고 피항조치 후 최대가 되는 접근시간 ta_2를 정하는 것부터 시작한다. 식 (8)에서 최근접거리 $dcpa_1$과 $dcpa_2$를 이용하여 기울기계수 a와 그 때의 Ψa 값을 계산한다. 그 다음 방정식 (10)과 부등식 (14)과 (16)를 이용하여 기울기계수 b와 이 b에 대한 접근시간 ta_1의 범위를 구한다. 해당 기울기계수에 대하여 접근시간의 범위를 만족하면 항상 $\Psi > 0$이 된다. 그렇게 구한 기울기계수 a, b를 실제로 예상할 수 있는 상황에 적용하여 피항조치의 직전의 충돌위험도 CR_1과 피항 조치 후 최소 접근시간에서의 충돌위험도 CR_2를 비교한다. 만일 조치 후인 CR_2가 크면 최근접거리 $dcpa_2$를 증가시켜 앞의 과정을 그대로 시행한다. CR_2가 작으면 그 때의 a, b 값을 기울기계수 a, b 값으로 결정한다.

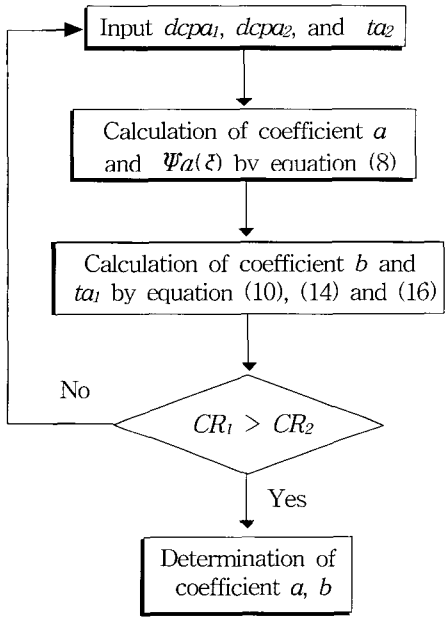

Fig. 1 Procedure of getting Coefficient a, b

1) 최근접거리의 결정

최근접거리 $dcpa_1$이 얼마 미만일 때 피항을 할 것인가는 그때 상황에 따라 다를 수밖에 없다. 여기서는 통상적으로 보아 비교적 안전하다고 보아지는 1.5마일을 정하였다. 또 최근접거리 $dcpa_2$는 <Fig. 1>의 절차에 따라 결정되는데 2.3마일이 된다. 이를 다시 설명하면 목표가 1.5마일 이내로 본선을 지나는 경우에 2.3마일 이상으로 통과하도록 피항조치를 한다는 것이고 1.5마일 이상으로 떨어져 지나는 목표에 대하여서는 그대로 두는 것이 된다.

2) 접근시간 ta_2의 결정

피항조치 후 최소의 접근시간 ta_2는 식 (5)에 따라 결정된다. 이 식에서 최근접거리는 앞에서 말한 것처럼 2.3마일이 되므로 최소의 접근시간이란 결국 목표의 상대운동 속력으로 결정된다. 여기서는 목표의 상대운동 최대속력은 통상적인 선박의 운항을 고려하여 1.0(마일/분) 즉, 60노트로, 상대운동 최소속력은 0.1(마일/분) 즉, 6노트로 한다.

그런데 다행스러운 것은 최대속력 조건이 충돌위험도 비교조건을 만족하면 최소속력 조건은 이 비교조건을 자연스럽게 만족하므로 사실상 최대속력만을 고려 대상으로 한다. 최대속력 조건에서의 접근시간 ta_2는 4.6(분)이 된다.

3) 기울기계수 a, b와 접근시간 ta_1 결정

기울기계수 a에 대하여서는 최근접거리 $dcpa_1$이 1.5마일 $dcpa_2$가 2.3마일일 때 식 (7)과 식 (8)의 Ψa과 $\partial \Psi a / \partial a$의 그래프를 이용하여 구한다<Fig.2>. 이 그림에서 보듯이 $\partial \Psi a / \partial a$가 0이 되는 곳 즉, $a = 0.785$에서 $\Psi a(\xi)$는 최대값 +0.243을 가짐을 알 수 있다.

기울기계수 b에 대하여서는 우선 그 범위를 살펴보기로 한다. 이 연구에서 $dcap_1$=1.5(마일), $dcpa_2$=2.3(마일) 조건인 경우 $\Psi a(\xi)$=0.243이므로 $asech[\Psi a(\xi)]$=2.0945이다. 또 ta_2 =4.6(분)이라고 하면 식 (14)을 이용하여 구하면 기울기계수 b의 범위는 $0 < b < 4.55$이다.

기울기계수 b에 대하여서는 식 (10)의 접근시간 ta_1을 <Fig. 3>처럼 b의 범위에 대하여 그리고, 그 ta_1의 범위는 식 (16)으로 구한다.

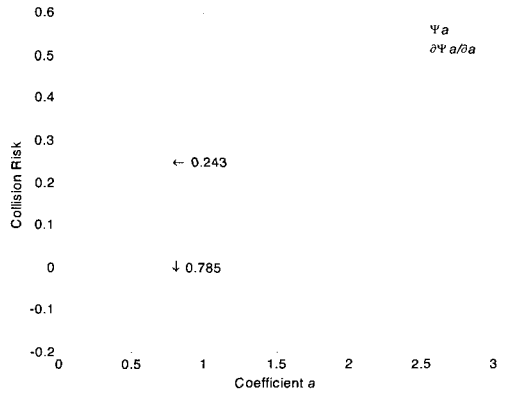

Fig. 2 Collision Risk Ψa by Coefficient a

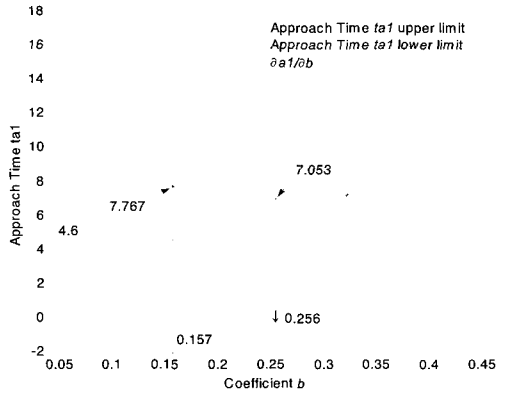

Fig. 3 Approach Time ta_1 by Coefficient b

<Fig. 3>을 보면 기울기계수 b가 0.256일 때, $\partial ta_1/\partial b = 0$ 이 되며 접근시간 ta_1의 최소값 7.053(분)이다. 이 경우 접근시간 ta_1는 4.6~7.053(분)의 범위를 가질 때 $\Psi > 0$조건을 만족하게 된다. 또 기울기계수 b가 0.157인 경우에는 접근시간 ta_1의 범위가 4.6~7.767(분)일 때, $\Psi > 0$조건을 만족하게 된다. 그런데 접근시간 ta_1이 최소값이고 ta_2와의 차이가 가장 작을 때 기울기계수 b=0.256을 만족하면 다른 경우에도 다 만족하게 된다. 따라서 여기서는 기울기계수 a=0.785, b=0.256인 조건에 대하여 검증하기로 한다.

3.2 기울기계수 a, b의 검증

앞에서 구한 기울기계수 a, b에 대하여서는 다음과 같이 검증한다. 최근접거리 1.5마일로 접근하고 있는 목표에 대하여 최근접거리가 2,3마일이 되도록 피항조치를 하여, <Fig. 1>처럼 피항조치 직전과 피항조치후의 최대가 되는 충돌위험도를 비교하여 직전의 충돌위험도가 조치후의 값보다 큰지를 확인함으로써 이뤄진다. 여기서는 목표와 본선의 상황에 대한 하나의 예로서 마주치는 상태를 다루기로 하며, 본선과 목표의 침로 및 속력, 목표의 초기 위치, 본선 피항조치 시기 등이 <Table 1>에 나타나 있다.

여기의 예에서 본선의 침로는 000(°)이고, 목표의 침로는 180(°)이다. 목표의 상대속력이 1.0(마일/분)인 경우에는 본선과 목표의 속력이 각각 0.5(마일/분)이고, 목표의 상대속력이 0.7(마일/분)인 경우에는 본선 및 목표의 속력이 각각 0.35(마일/분)이다. 목표의 초기위치는 000°9.0마일이고 피항조치 시기는 접근시간 7.0분으로 한다.

목표의 상대속력이 0.5(마일/분)인 경우에는 본선과 목표의 속력이 각각 0.25(마일/분)이고, 목표의 상대속력이 0.1 (마일/분)인 경우에는 본선과 목표의 속력이 각각 0.05 (마일/분)이다. 목표의 초기위치는 상대속력 0.5(마일/분) 경우 000°7.0마일, 상대속력 0.1(마일/분) 경우 000°5.0마일이다. 피항조치를 접근시간 7.0으로 결정하면 그 시간에 도달할 때 목표가 본선에 너무 접근하기 때문에 타당치 않으므로 접근거리가 최근접거리보다 큰 3.25마일이 될 때 하기로 한다.

Table 2 Relative Speed =1.0(mile/min)

	Distance to CPA	Approach Time	Range	Collision Risk
Just before Action	1.5	6.998	6.82	0.887
Max. after Action	2.3	4.635	3.20	0.878

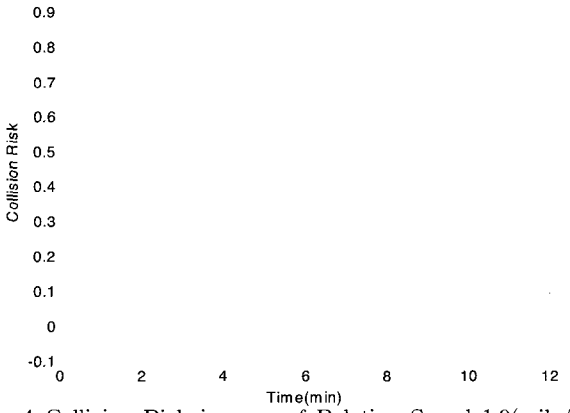

Fig. 4 Collision Risk in case of Relative Speed 1.0(mile/min)

Table 1 Data of Ownship and Target

	Relative Speed v_r=1.0(mile/min)	Relative Speed v_r=0.7(mile/min)	Relative Speed v_r=0.5(mile/min)	Relative Speed v_r=0.1(mile/min)
Ownship	Course 000° Speed 0.5(mile/min)	Course 000° Speed 0.35(mile/min)	Course 000° Speed 0.25(mile/min)	Course 000° Speed 0.05(mile/min)
Tatget	Course 180° Speed 0.5(mile/min)	Course 180° Speed 0.35(mile/min)	Course 180° Speed 0.25(mile/min)	Course 180° Speed 0.05(mile/min)
Initial Position	Bearing 000° Range 9.0miles	Bearing 000° Range 9.0miles	Bearing 000° Range 7.0miles	Bearing 000° Range 5.0miles
Time of Action	Approach Time ta_1=7(min)	Approach Time ta_1=7(min)	Range 3.25miles off	Range 3.25miles off

where, gradient coefficients a=0.785 and b=0.256.

<Table 2>와 <Fig. 4>는 목표가 상대속력 1.0(마일/분), 최근접거리 1.5마일로 다가오는 경우 접근시간 ta_1이 7.0분(접근거리 6.82마일)일 때 변침하여 최근접거리 2.3마일로 할 때 그 전후에서의 충돌위험도를 나타난 것이다. 변침 직전의 충돌위험도 0.887이 변침 후 최대가 되는 충돌위험도 0.878보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

<Table 3>와 <Fig. 5>는 목표가 상대속력 0.7(마일/분), 최근접거리 1.5마일로 다가올 경우 접근시간 ta_1이 7.0분(접근거리 4.64마일)일 때 변침하여 최근접거리 2.3마일로 할 때 그 전후에서의 충돌위험도를 나타난 것이다. 변침 직전의 충돌위험도가 0.887로 변침 후 최대가 되는 충돌위험도 0.669보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 상대속력 1.0(마일/분)과 같이 접근시간으로서 피항조치 시기가 결정된다.

Table 3 Relative Speed =0.7(mile/min)

	Distance to CPA	Approach Time	Range	Collision Risk
Just before Action	1.5	7.000	4.64	0.887
Max. after Action	2.3	6.691	3.19	0.669

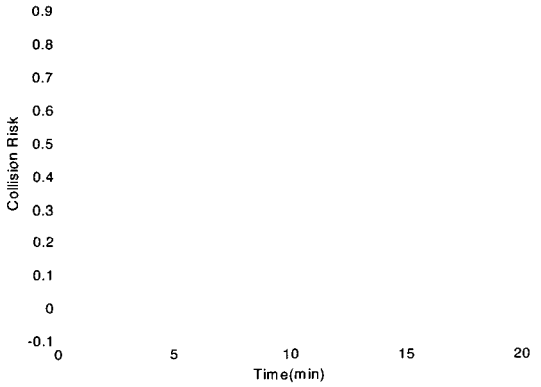

Fig. 5 Collision Risk in case of Relative Speed 0.7(mile/min)

<Table 4>와 <Fig. 6>는 목표가 상대속력 0.5(마일/분), 최근접거리 1.5마일로 다가올 때 접근거리 3.25마일일 때 변침하여 최근접거리 2.3마일로 할 때 그 전후에서의 충돌위험도를 나타난 것이다. 변침 직전의 충돌위험도가 0.862로 변침 후 최대가 되는 충돌위험도 0.488보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, <Table 5>와 <Fig. 7>은 목표가 상대속력 0.1(마일/분), 최근접거리 1.5마일로 다가올 때 접근거리 3.25마일일 때 변침하여 최근접거리 2.3마일로 할 때 그 전후에서의 충돌위험도를 나타난 것이다. 변침 직전의 충돌위험도가 0.005로 변침 후 최대가 되는 충돌위험도 0.003보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이들 경우에는 상대속력이 느리기 때문에 피항조치의 시기가 접근시간보다는 접근거리로 3.25마일로 결정된다.

Table 4 Relative Speed =0.5(mile/min)

	Distance to CPA	Approach Time	Range	Collision Risk
Just before Action	1.5	7.330	3.25	0.862
Max. after Action	2.3	9.649	3.24	0.488

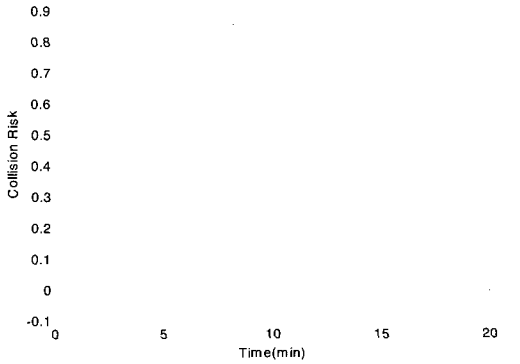

Fig. 6 Collision Risk in case of Relative Speed 0.5(mile/min)

Table 5 Relative Speed =0.1(mile/min)

	Distance to CPA	Approach Time	Range	Collision Risk
Just before Action	1.5	36.65	3.25	0.005
Max. after Action	2.3	48.00	3.24	0.003

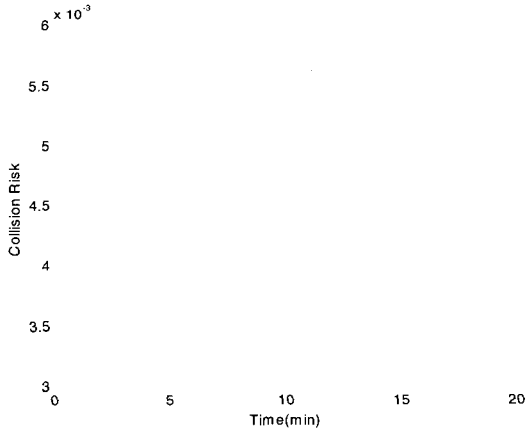

Fig. 7 Collision Risk in case of Relative Speed 0.1(mile/min)

이들에서 알 수 있는 바와 같이 기울기계수 a, b의 값 0.785와 0.256는 피항조치 후 최소의 접근시간 ta_2가 4.6분보다 큰 경우에는 피항조치 전의 충돌위험도가 후보다 큰 값이 되기 때문에 적절한 값으로 평가한다. 이것은 어떤 목표가 1.5마일 이내로 본선을 지날 것으로 예견되는 경우 접근시간이 7.0분 혹은 접근거리 3.25마일에서 피항조치를 취하여 2.3마일 이상

떨어져 통과하도록 조치를 하면 충돌위험도 값은 피항조치 직전보다 피항조치 후가 작게 된다는 뜻이다.

그러나, 충돌위험도의 값은 피항 조치 직전에 1.0보다 작은 값으로 나타나고 있다. 이것은 기울기계수 b를 좀더 작은 값으로 한다면 더 크게 조정할 수 있다. 보다 적절한 기울기계수 b의 값은 충돌위험도의 문턱값과 관련하여 결정되어야 한다.

4. 결 론

이 연구에서는 *sech* 함수를 이용한 신 충돌위험도평가에서 나타난 계수를 결정하기 위한 첫 단계로서 기울기계수 a, b를 정하는 방법을 이론적으로 제시하고 그것을 마주치는 목표에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 최근접점에 도달하기 전에 접근시간 ta가 감소하다가 급속히 증가하고, 통과하고 나서 $-\infty$로 바뀌고 다시 급속히 증가하였다가 감소하는 등의 극단적인 불연속성 문제는 식 (6)으로 해결할 수 있다. 또 피항조치 후의 접근시간 ta_2도 쉽게 식 (6)으로 구할 수 있다.

② 기울기계수 a는 피항조치 전후의 최근접거리 $dcpa_1$와 $dcpa_2$로 결정되며, 충돌위험도 Ψa가 최대값을 갖는 식 (8)의 조건에서 구해진다.

③ 기울기계수 b는 단일한 값으로 정해지지 않고, $\Psi = 0$인 등충돌위험도선을 나타내는 식 (10)으로써 구해진다. 또 기울기계수 b가 가질 수 있는 범위는 식 (14)로 표시된다. 기울기계수 b와 불가분의 관계에 있는 피항조치 직전의 접근시간 ta_1은 그 때의 b값에서 식 (16)의 범위로 한정된다.

④ 최근접거리 1.5마일 이내, 상대속력 1.0(마일/분) 이내로 접근하는 목표의 경우 접근시간 7.0분에, 상대속력 0.5(마일/분) 이내의 목표의 경우에는 접근거리 3.25마일에서 최근접거리 2.3마일 되도록 피항조치를 하는 경우에는 기울기계수 a, b를 각각 0.785, 0.256를 적용하여도 무방하다.

그러나 이 *sech* 함수를 이용한 신 충돌위험도평가에서는 기울기계수 b가 넓은 범위의 값을 갖고 있는 점이 문제로 지적될 수 있는데, 이것에 대한 적절한 값 결정은 충돌위험도에 대한 문턱값의 최적치를 연구하면서 같이 검토해야 할 사항이다. 또 최근접거리가 0에 가까울 경우에는, 접근시간이 음수이거나 접근시간이 상당히 큰 값인데도 불구하고 미소한 최근접거리의 영향으로 충돌위험도가 1에 가까운 값으로 커지게 된다. 이것은 진폭계수 p, q를 조정하거나 본선상태 결정함수 $\Phi(\theta, \alpha)$를 활용하면 해결할 수 있다. 또 피항조치를 목표와의 거리 혹은 접근시간으로 결정할 것인가 등의 문제가 남아 있다. 이들에 대하여서는 향후 연구로 미룬다.

참 고 문 헌

[1] 정태권(2003), *Sech* 함수를 이용한 새로운 충돌위험도 평가법, 한국항해항만학회지,제27권, 제2호, pp.33~40

[2] 今津隼馬(1977), 衝突危險度の判定と避航措置, 避航操船シンポジウム, 日本航海學會, pp.80.

[3] 今津隼馬(1980), 船舶における等衝突危險度に關する研究, 航論, 63号, p.130.

[4] 今津隼馬(1981), 他船の行動変化を考慮した衝突危險度について, 航論64号, p.180.

[5] 今津・小山(1984), 避航開始時機の決定につて, 航論70号, p.203.

[6] 今津隼馬(1984), 避航と衝突予防装置, 成山堂書店, pp.80~89.

[7] A G Bole, K D Jones (1982), "Automatic Radar Plotting Aids Manual", Heinemann, p.120.

[8] A.G. Bole, W.O. Dineley (1992), "Radar and ARPA Manual", Butterworth-Heinemann, pp. 303~304.

[9] C. Henry Edwards and David E. Penny (2002), "Calculus", 66th edition, Prentice-Hall Inc., pp. 880~883, p 927

[10] Glyn James (2001), "Modern Engineering Mathematics", 3rd edition, Pearson Education Ltd., pp. 651~652

[11] H. Imazu (1978), "Collision Avoidance and Risk in Radar Navigation", Instituto Universitario Navale di Napoli

[12] H. Imazu & A.M. Sugisaki (1979), "A Theoretical Analysis of Collision Risk for Vessel", ISSOA-79, p.189.

[13] R.F. Riggs & J.P. O'Sullivan (1979), "An Analysis of the Point of Possible Collision", IAIN-1979, p.256.

[14] T. Degre & X. Lefevre (1981), "The Manoeuvring Room Concept", 4th International Symposium on VTR, p.169.

[15] W. Burger, M.Sc. (1998), "Radar Observer's Handbook for Merchant Navy Officers", Brown, Son & Ferguson, Ltd, pp.202~204.

원고접수일 : 2003년 6월 23일
원고채택일 : 2003년 8월 9일