

## 항해위험평가모델에 의한 연안역 항해의 안전 제고에 관한 연구

김원옥\* · 강성진\* · 윤대근\*\* · 배준영\*\*\* · 김창제†  
(\*한국해양수산연수원 · \*\*목포해양대학교 · \*\*\*동주대학교 · †한국해양대학교)

### A Study on the Coastal Navigation Safety by Navigational Risk Assessment Model

Won-Ouk KIM\* · Song-Jin KANG\* · Dae-Gwun YOUN\*\* · Jun-Young BAE\*\*\* · Chang-Je KIM†  
(\*Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology · \*\*Mokpo National Maritime University · \*\*\*Dongju College · †Korea Maritime and Ocean University)

#### Abstract

The major cause of the marine accidents is the collision with a moving object such as ship as well as the fixed object such as breakwater. Therefore, the most effective way to reduce the maritime ship accidents is the prevention of collision. In order to decrease the collision, it is principle that the navigation officer promptly judges the dangerous condition and makes the quick response. The ship does not allow any object or other ships approaching its surrounded area called ship area so that it prevents the collision. Generally, the ship which has high speed or poor maneuvering capability shall be managed from the distance so that the other ship does not invade its ship domains(watching distance, blocking distance). Accordingly, this study sets the navigational risk assessment model by applying ship dynamic domain and collision judgement method considered ship length, speed and navigational capability. It also reviewed the validity of the model and evaluated the perilous water way (Maenggol Channel) and a curved route near Maenggol Channel. As a result, in case of a ship with 100m in length passing Maenggol Channel, it represented "warning" level before 1.5nm to the entry, "dangerous" level 0.75nm before to it and "very dangerous" level 0.5nm before to it and then "dangerous" level again up to the entry. Applying to the curved route also showed the same results as the Narrow Channel or Maenggol Channel. This analysis highly matched with the actual navigation results. In the future, this model will be useful for coastal navigation safety chart development and safety evaluation for route or port development. It also allows to evaluate the dangerous route or the best route by applying the result into ECDIS so that it will finally help to reduce the marine accidents. Eventually the model will be effective for the marine traffic simulation evaluation forced by Maritime Traffic Safety Act.

**Key words : Marine accidents, Ship domain, Watching distance, Blocking distance, Collision judgement, Navigational risk assessment model, Marine traffic flow simulation**

#### I. 서론

선박은 육상교통수단과 비교하여 상대적으로

넓은 해역을 항행하고, 선박의 항행속력은 빠르지 않는데도 불구하고 해양사고가 발생한다. 이런 해양사고의 80% 이상이 항해사의 인적오류,

† Corresponding author : 051-410-4226, kimc@kmou.ac.kr

즉 부적절한 주변상황의 인식과 그 결과로 인한 잘못된 판단에 기인한다. 해양사고를 미연에 방지하기 위해서 인적오류가 발생한 원인을 해명하고 효과적인 대책을 강구할 필요가 있다. 선박에 의한 해양사고 중 가장 비율이 큰 것은 선박과 같은 이동물 또는 방파제 등과 같은 고정물과의 충돌이다. 선박에 의한 해양사고를 획기적으로 줄일 수 있는 가장 효과적 방법은 충돌방지이다. 선박 충돌을 줄이기 위해서는 항해사가 위험상황을 신속히 판단하여 조치하는 것이 원칙이다. 그러나 해상에서는 다양하고 복잡한 상황이 발생하기 때문에 실제 상황에서는 이런 조치를 취하기가 쉽지 않다.

항해사는 처음에 상황인식을 한 후, 정보를 수집하여 피항 여부를 판단하고 조치를 취한다. 상대선이 자선의 어떤 영역부분, 즉 경계영역(watching area)에 근접하면 그 선박에 대한 정보를 수집하고 경계를 늦추지 않다가, 자선의 일정영역, 즉 한계영역(blocking area)에 침범하지 못하도록 조치를 취한다(Arimura et. al., 1988, Kijima and Furukawa, 2003).

최근에 자선의 제원, 선속, 조종성, 만남상태와 상대선의 상태에 의존하는 동적선박영역이 선박영역의 범위로서 많이 검토되고 있다(Wang, 2010, 2013). 또한, 선박이 항해 중에 선박과 같은 이동장애물, 방파제나 주변 환경과 같은 고정장애물을 만나는 경우, 항해사는 심리적 부담감을 가지며, 이런 심리적 부담감을 지표화한 선박 조종환경의 평가방법이 활용되고 있다(Inoue et. al, 1996, 1997a, 1997b, 1997c, Gong, 2003). 한편, 연안해역, 협수로 등 교통량이 빈번한 제한수역에서 대형선이나 고속선은 각각 마주치는 물표에 대해 소형선 또는 저속선에 비해 먼 거리에서 위험상황을 인지하여 조치를 취한다.

즉, 연안의 제한해역에서 선박의 안전을 확보하기 위해서는 선박의 크기, 속력 등 자선의 환경에 주변 환경이 부여하는 항해위험을 평가할 필요가 있다. 따라서 이 연구는 선박의 길이와

속력 및 선박조종성능이 고려된 동적선박영역을 고찰하고, 그 결과를 충돌위험평가식(Kobayashi and Endoh, 1976)에 적용하여 주변 환경이 부여하는 항해위험을 평가한 것으로 이 결과는 연안 항해용 안전해도 개발, 항로나 항만개발 시 안전성평가에 유용할 것으로 판단된다.

## II. 경계영역거리

선박영역은 어떤 선박이 다른 선박주변의 어떤 영역에 침범하는 것을 피하는 영역으로 선박의 길이를 기준으로 한 정적선박영역(Fujii, 1971, Coldwell, 1983)과 선박의 길이 뿐 만 아니라 선속, 조종성능과 상대선의 주변 환경을 반영하는 동적선박영역(Kijima and Furukawa, 2001, 2003)으로 분류할 수 있다.

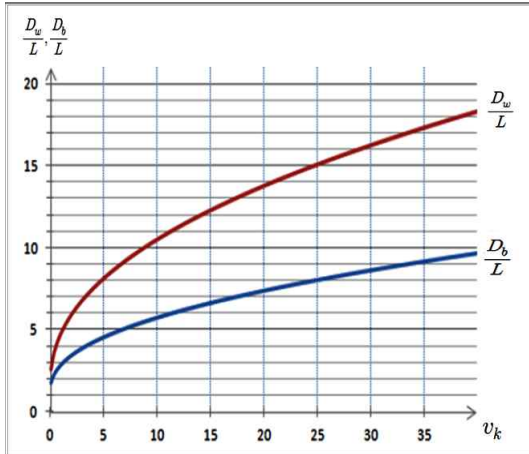
일반적으로 선박영역의 범위에 선박의 제원이거나 속력, 조종성능특성이 반영되어, 속력이 빠르거나 조종성능이 열악한 선박은 먼 거리에서 피항조치를 해야 한다. 선박이 장애물을 인지한 후, 장애물에 대한 정보수집, 장애물의 집중 감시 등의 과정을 거쳐 피항 조치를 한다. 경계영역에 침입한 장애물에 대해 주의 깊게 경계를 하고 한계영역에 침입하지 못하도록 조치를 한다.

이때 항해사는 경계영역에 침입한 장애물에 대해서 위험을 느끼고, 더욱이 장애물이 한계영역에 도달하면 아주 큰 위험을 느낀다. 제한수역에서 선박의 전방에 형성되는 경계영역 및 한계영역의 각각의 최대값인 무차원 경계영역거리  $D_w/L$  ( $L$ 은 자선의 길이) 및 무차원 한계영역거리  $D_b/L$  를 다음 식으로 나타낸다(Arimura et. al., 1988, Kijima and Furukawa, 2003).

$$D_w/L = 2D_b/L - 1 \dots\dots\dots (1a)$$

$$D_b/L = 1 + 1.34 \times \sqrt{[10^{(0.3591 \log v_s + 0.0952)}]^2 + [10^{(0.5441 \log v_s - 0.0795)}]^2/4} \dots\dots\dots (1b)$$

여기에서,  $v_k$ 는 노트(knots)로 나타낸 자선의 속력이다. 식(1)은 자선의 조종성능 및 속력이 반영된 거리를 나타낸 것으로, 선박이 진행하는 자선의 전방영역에 주목한다. [Fig. 1]에 자선의 속력에 따른 경계영역거리 및 한계영역거리를 나타낸다.

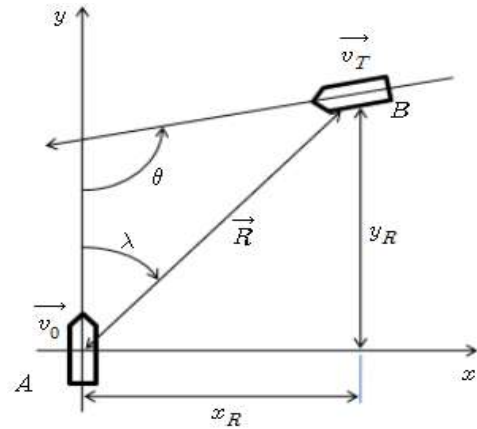


[Fig. 1] Blocking Distance

### Ⅲ . 충돌위험평가

#### 1. 이동 장애물

자선이 항해 중에 선박과 같은 이동장애물을 만나는 경우 [Fig. 2]에 나타낸 바와 같이, 자선(A)이 항해 중에 상대선(B)의 존재를 인지 또는 파악하여, DCPA(Distance of Closest Point of Approach) TCPA(Time of CPA)를 기초정보로 활용하여 충돌위험을 판단하는 것이 충돌위험평가식(Kobayashi and Endoh, 1976)의 기본개념이며, Fig. 2의 기호는 각각 다음과 같다. 좌표계로서 직교좌표계( $x, y$ )를 사용하며, 좌표의 원점에 자선의 중심이 존재하고,  $y$ 축은 자선의 침로이다.  $\vec{v}_0$ 는 자선의 벡터,  $\vec{v}_T$ 는 상대선의 상대벡터,  $(x_R, y_R)$ 은 상대선의 좌표,  $\vec{R}$ 은 상대선의 위치 벡터,  $\theta$ 는 침로 교각,  $\lambda$ 는 상대선의 방위(각도)이다.

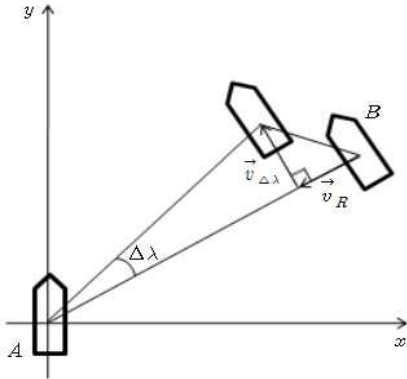


[Fig. 2] Position Diagram

[Fig. 2]와 같이 상대선 B가 상대방위  $(360-\theta)$ 도로 항해하는 경우, [Fig. 3]에 상대선의 상대위치의 변화를 나타낸다.  $\vec{v}_R$ 은 상대선의 접근속도 벡터이며 이 값이 클수록 위험은 증가한다.  $\vec{v}_\lambda$ 은  $\vec{v}_R$ 에 대한 직교성분이고, 상대선이 멀어져가는 속도벡터를 나타내며, 이 값이 클수록 안전해진다. [Fig. 3]에서  $\Delta\lambda$ 는 자선에서 보는 상대선의 이동 각도를 나타낸다. 충돌위험은  $\vec{v}_R$ 과  $\vec{v}_\lambda$ 값의 어느 하나의 값에 의하여 평가되는 것이 아니라 이 두 값 사이의 대소 관계에 의해 상대운동의 벡터의 방향, 크기가 결정되며, 이 값이 충돌의 위험에 대응하는 값이 된다. 따라서, 상대선의 접근속도벡터  $\vec{v}_R$ , 상대선이 멀어져가는 속도벡터  $\vec{v}_\lambda$  및 상대선의 상대위치  $\lambda$ 를 이용하여 충돌위험평가식(Collision Judgement: CJ)을 다음 식과 같이 나타낸다.

$$CJ = \frac{v_R}{R} - av_\lambda + b|\lambda| \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에서  $a, b$ 는 실험결과로부터 정해지는 계수이며, 시뮬레이션 실험으로부터 각각 다음 값으로 나타낸다.



[Fig. 3] Vector Indications

$$a \approx 3.75 \times 10^{-5} \dots\dots\dots (3a)$$

$$b \approx (1.3 \sim 1.7) \times 10^{-4} \dots\dots\dots (3b)$$

그리고 우변 제 3항의  $\lambda$ 는 상대선의 상대위치이며, 좌현 정횡( $-90^\circ$ )으로부터 우현 정횡( $90^\circ$ )까지를 각도( $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ )로 나타낸 값이다. 이 값은 상대선의 위치에 따라 피항동작의 난이도를 나타내는 값으로 상대선이 자선의 선수쪽( $\lambda \approx 0^\circ$ )에 존재하는 경우일수록 피항동작을 취하기가 쉽다는 것을 의미한다. 식(2)에서, 제1항은,  $v_R/R \approx 1/TCPA$  ( $TCPA \approx R/v_R$ )이며 그대로 직진하는 경우, 최접근 지점까지 남겨진 시간  $TCPA$ 의 역수로 위험도를 나타낸다. 제2항은,  $v_\lambda \approx DCPA/TCPA$ 이며 그대로 직진하는 경우 상대선이 멀어져가는 속도로 안전도를 나타낸다. 제3항의  $\lambda$ 는 상대선의 위치에 따라 피항동작의 난이도를 나타낸다. 복수의 선박이 존재하는 경우, 식(2)를 식(4)와 같이 적분하여 총 충돌위험  $CJ_t$ 를 평가한다.

$$CJ_t = \sum_{i=1}^n CJ_i \dots\dots\dots (4)$$

여기에서,  $i$ 는 선박의 수를 나타낸다.

## 2. 고정 장애물

자선이 연안이나 협수로 등을 항해할 때, 선박과 같은 이동 장애물 뿐만 아니라 방파제, 제방 또는 해안 등을 포함한 여러 가지 고정 장애물을 만나게 된다. 고정 장애물인 경우에 자선의 침로를 기준으로  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위에서  $1^\circ$  간격으로 식(2)를 적용한다.

## IV. 항해위험평가모델

### 1. 항해위험평가지표

식(2)에서 자선침로전방(정선수방향)에 정지하고 있는 장애물을 고려할 때, 식(2)는 다음 식이 된다.

$$CJ = \frac{v_R}{R} \dots\dots\dots (5)$$

$$= \frac{v_o}{R}$$

여기에서,  $v_R = v_o$ 이다.

식(5)의 거리  $R$ 에 식(1)에서 구한  $D_w$  또는  $D_b$ 를 대입하여 다음 식과 같이 항해위험을 평가한다.

$$CJ_w = \frac{v_o}{D_w} \dots\dots\dots (6a)$$

$$CJ_b = \frac{v_o}{D_b} \dots\dots\dots (6b)$$

식(6)은 자선의 길이, 속력 및 조종능력 등을 반영하여 항해위험의 최소값을 산정한 것이다. 구체적으로는, 고정 장애물이 존재할 때 자선 정선수를 기준으로  $-90^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지  $1^\circ$  간격으로 식(2)를 산정하여  $CJ$  값이  $CJ_w$  이상인 값을 평균하고, 평균한 값을 다음 식에 의해 지표화한다.

$$0 \leq CJ < CJ_w : [\text{주의}]$$

$$CJ_w \leq CJ < CJ_b : [\text{위험}] \dots\dots\dots (7)$$

$$CJ_b \leq CJ : [\text{매우위험}]$$

### 2. 항해위험평가모델의 적용

항해안전평가모델을 적용하는 알고리즘은 다음

과 같다.

가) 식(1)을 이용하여 자선의 속력 및 길이에 따른 한계영역거리  $D_b$ 와 경계영역거리  $D_w$ 를 구한다.

나) 식(6)에서  $CJ_b$  및  $CJ_w$ 를 구한다.

다) 자선 정선수를 기준으로  $-90^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 1도 간격으로 식(2)를 산정하여  $CJ$  값이  $CJ_w$  이상인 값을 평균하고, 평균한 값을 식(7)에 적용시켜 항해위험을 평가한다.

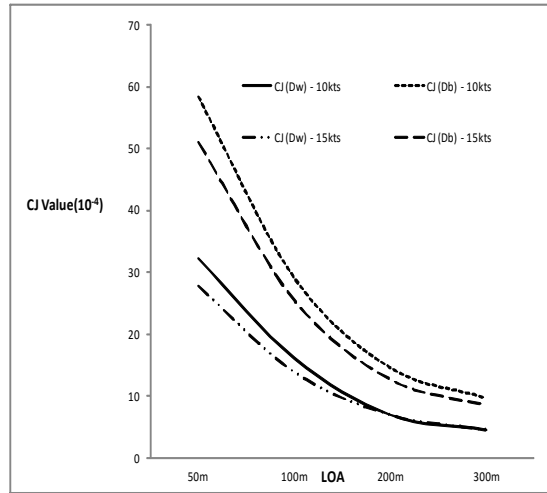
<Table 1> Navigational Risk Assessment Index ( $\times 10^{-4}$ )

Index LOA (m)	warning		dangerous		very dangerous	
	10 kts	15 kts	10 kts	15 kts	10 kts	15 kts
50	~32.2	~27.7	32.2 ~58.2	27.8 ~50.9	58.3~	51.0~
100	~16.0	~13.8	16.1 ~29.0	13.9 ~25.4	29.1~	25.5~
200	~7.9	~6.9	8.0 ~14.5	7.0 ~12.6	14.6~	12.7~
300	~5.3	~4.5	5.4 ~9.6	4.6 ~8.4	9.7~	8.5~

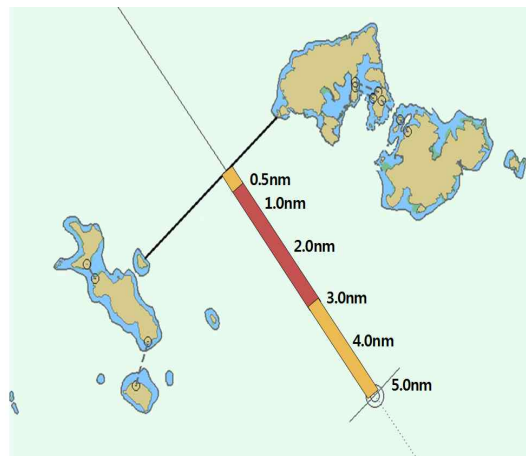
<Table 1>은 선박의 길이 및 속력의 크기에 따른 항해위험평가지표를 구한 결과이다. 선박이 클수록 고속일수록 항해위험평가지표 값은 작아진다. 즉, 대형선 또는 고속선일수록 지표값이 작아도 [위험] 또는 [매우위험] 단계가 됨을 알 수 있다.

[Fig. 4]는 <Table 1>의 결과를 선박의 길이 및 속력에 따라서 [위험], [매우위험] 단계를 나타낸 것이다.

[Fig. 5]의 맹골수도의 수로 중앙을 운항하는 선박의 충돌위험평가 값을 [Fig. 7]에, 여러 가지 시나리오 중 10노트로, 5마일 전 부터 항해하는 100미터 길이인 항해위험평가 결과를 [Fig. 5]에 [위험: 노란색] 또는 [매우위험: 붉은색]으로 나타낸다. 맹골수도는 우리나라 남서해역에 위치하며, 남해안에서 서해안으로 이동하는 선박들의 단축 코스로 많이 이용되고 있다. 하지만 해역이 협소

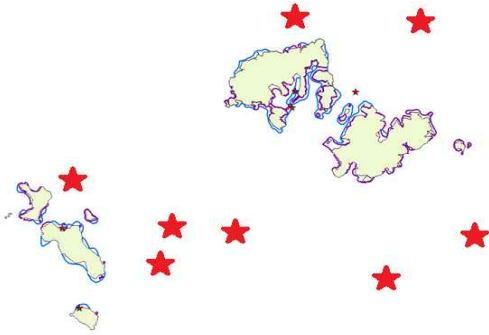


[Fig. 4] Navigational Risk Assessment Index according to Ship's Length and Speed



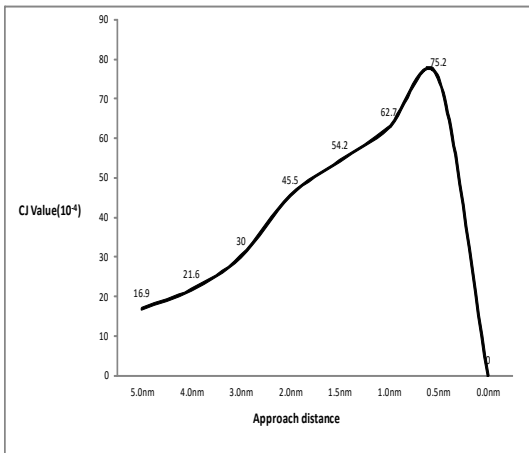
[Fig. 5] Navigational Risk Assessment in Maenggol Channel(LOA: 100m, Speed: 10kts)

하고 조류가 강하기 때문에 항해사에게는 매우 위험한 해역으로 평가되고 있다. 특히, 2014년 세월호 침몰 사건이 발생한 해역이기도 하다. 또한, 국립해양조사원의 안전해도 개발보고서에 포함된 사고이력 [Fig. 6]의 별표 해역(★)에 의하면 이 연구의 [매우위험]해역에서 통과선박의 사고가 타 수역보다 많이 발생함을 알 수 있다.



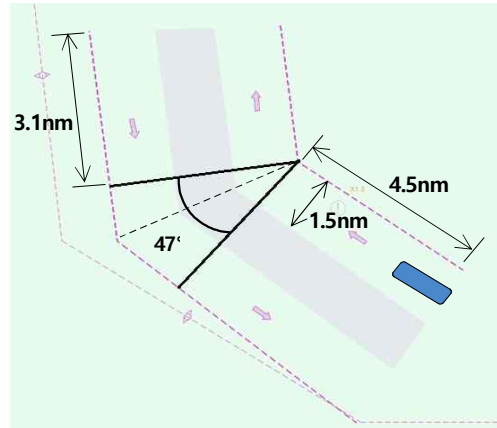
[Fig. 6] History of Marine accident in the Maenggol Channel

[Fig. 7]에서 거리는 [Fig. 5]의 실선으로 부터의 통과거리인 기준점에 대한 거리이며, 이 경우 바람, 조류 등 외력의 영향이 무시되었다. 선박의 길이가 100m, 운항속도가 10kts인 선박의 항해위험평가를 5.0마일(CJ:16.9) 전 부터 수행한 결과 [위험](CJ≥16.1)단계(그림의 노란색)를 나타내며, 3.0마일(CJ:30.0)에서는 [매우위험](CJ≥29.1)단계(그림의 빨간색)를 나타낸다. 그리고 0.5마일에서 최대값을 나타낸 후 급격히 감소한다. 실제 이 해역을 운항 경험이 있는 실습선의 항해사의 의견에 의하면 이 수로를 통과할 때 극심한 위험을 느끼고, 긴장상태를 유지한다고 한다.



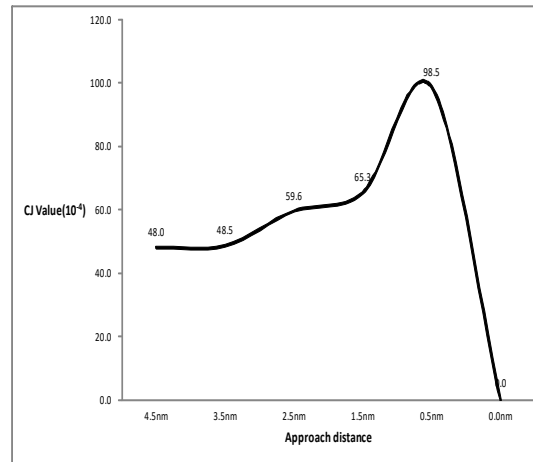
[Fig. 7] CJ Values according to distance in Maenggol Channel

[Fig. 8]은 맹골수도 서쪽에 위치한 곡선항로를 나타낸 것으로 서해안으로 올라가는 항로의 폭은 1.5nm, 곡선에 진입 전 항로의 길이는 4.5nm, 약 47°회전한 후 항로의 길이는 3.1nm이다.



[Fig. 8] Bended Channel

이 곡선항로를 길이 100미터인 선박이 10노트 로 항해하는 경우의 충돌위험평가 값을 [Fig. 9]에 나타낸다. 이 경우 항로법선(쇄선)을 제방으로 간주하고 충돌위험평가 값을 파악하였다.



[Fig. 9] CJ Values in Bended Channel

곡선구간 약 0.5마일 전에 충돌위험평가 값은 최대, 즉 변침 직전에 최대를 나타내며 이 현상은 현실과 잘 일치한다. 선박의 길이가 100m, 선

속 10노트를 기준으로 항해위험평가를 수행하면 변침전 4.5마일(CJ:48.0)에서부터 [매우위험] ( $CJ \geq 29.1$ ) 단계를 나타내며, 0.5마일에서 최대값을 나타낸 후 곡선향로를 통과 후 위험부담이 급격히 감소하여 다른 항로에 진입하면서[위험] 및 [주의] 단계에 도달하는데 이는 현실에 매우 부합된 결과이다.

## V. 결론

이 연구는 선박의 길이, 속력 및 조종성능 등의 변화에 적용할 수 있는 항해위험평가모델을 구축하고 그 타당성을 검토한 것으로, 이상을 정리하여 종합하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

가) 선박의 길이, 속력 및 조종성능이 반영된 경계 및 한계 영역거리와 충돌위험평가식을 적용하여 항해위험평가지표를 유도하였고, 이 결과에 의해 항해위험평가모델을 구축하였다.

나) 선박이 섬 사이, 곡선향로를 항해하는 경우, 선속, 길이, 섬 간의 간격 또는 직선, 곡선향로 등에 관계없이 섬 사이 통과 전 또는 변침전에 최대의 위험을 느끼며 이 결과는 실제항해의 결과와 매우 잘 일치한다.

다) 선속 및 선박길이가 클수록, 장애물의 원거리에서 위험을 의식하며, 현실적인 결과와 매우 잘 일치한다.

라) 항해위험평가모델을 적용하면 위험항로 또는 최적항로 예측이 가능하므로 위험부담이 적은 최적항로를 선택할 수 있다.

항해위험은 선박의 속력, 길이 등에 따라 달라지며 항해위험평가 값은 대체로 선박이 빠를수록, 대형 선박 일수록 [위험] 단계, [매우위험] 단계가 먼거리에서 나타나며 현실과 매우 좋은 일치성을 나타낸다. 앞으로 이 모델은 연안항해용 안전해도 개발, 항로나 항만개발 시의 안전성평가에 유용할 뿐만 아니라 그 결과를 전자해도에 적용시키면 위험 항로 또는 최적항로 예측이 가능

하므로 결국 해양사고의 감소에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 이 연구의 결과는 해사안전법 시행규칙(2015.12.23.) [별표6] 안전진단 작성기준(제11조 제1항관련)에서 진단항목으로 규정된 교통류시물레이션평가에 유효할 것이다.

## References

- Arimura, N. · K. Yamada · K. Watanabe · N. Shiota and K. Ohtani(1988). A Study on Man-machine System in Vessel Traffic Flow, Ship's Research, 25(3), \Research Report, 55~71(in Japanese).
- Coldwell, T. G.(1983). Marine traffic behaviour in restricted waters, The Journal of Navigation, 36, 431~444.
- Fujii, Y. and K. Tanaka(1971). Traffic capacity, The Journal of Navigation, 24, 543~552.
- Gong I. Y.(2003). "A Review on the Characteristics of Environmental Stress Model for Maritime Traffic Safety Assessment", Journal of Korean Navigation and Port Research, 27(5), 479~486.
- Inoue K. · K. Hara · M. Kaneko and K. Masuda(1996). Assessment of the Correlation of Safety between Ship Handling and Environment, The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol 95, 147~153(in Japanese).
- Inoue K. · K. Masuda and W. Sera(1997b). Guidelines to Assess the Safety of Marine Traffic-I, The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol 98, 225~234(in Japanese).
- Inoue K. · K. Masuda · K. Hara and M. Miyasaka(1997a). Aggregate Evaluation of Environmental Stress due to Water Restriction and Traffic Congestion, The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol 97, 191~199(in Japanese).
- Inoue K. · M. Kubono · M. Miyasaka and D. Hara(1997c). Modeling of Mariners' Perception of Safety when Being Faced with Imminent Danger, The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol 98, 235~245(in Japanese).
- Kijima, K. and Y. Furukawa(2003). Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area, Proc. of IFAC Conf. on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Girona,

Spain. 262~267  
Kobayashi H. and M. Endoh (1976). “Analysis of Collision Avoiding Action of Ship”, Journal of Japanese Navigation Research, No. 55, 101~109(in Japanese).  
Wang, N.(2010). An Intelligent Spatial Collision risk Based on the Quaternion Ship Domain, The

Journal of Navigation, 63, 733~749.

- 
- Received : 20 December, 2016
  - Revised : 04 January, 2017
  - Accepted : 13 January, 2017