

항로형태 및 선박크기에 따른 근접도 평가기법에 관한 고찰

김성철* · 권유민***

*, ** 목포해양대학교 대학원

A Review of Proximity Assessment Measurements According to Fairway Patterns and Ship Size

Sung-Cheol Kim* · Yu-Min Kwon***

*, ** Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Republic of Korea

요 약 : 해상교통안전진단제도의 해상교통시스템 적정성 평가 항목 중 통항안전성 근접도 평가 기준은 충돌확률이 1.0×10^{-4} 미만일 경우에 선박의 안전 확보가 가능하다고 제시하고 있다. 1970년대 선박 충돌에 관해 Fujii 와 Macduff의 연구를 시작으로 많은 연구자와 연구기관에서 충돌확률 예측 모델을 제시하였다. 이 같은 다양한 연구에서 충돌확률은 1.0×10^{-4} 을 크게 벗어나지 않는 수준이지만, 대부분 가정된 상황을 기준으로 제시됨에 따라 다양한 형태의 실제 항로 기준에 적용하는데 근거가 부족한 문제가 있다. 이 연구는 직선항로와 곡선항로를 통항한 선박들의 GICOMS 데이터를 이용하여 선박의 크기별로 근접도 평가를 조사하였다. 이를 근거로 모든 선박에 일률적으로 적용되던 평가 기준을 선박의 크기별로 근접도 평가를 적용 하는 것이 보다 더 합리적이라 판단되어 항로 형태에 따른 선박 크기별 충돌확률을 제시하였다. 향후 보다 다양한 상황과 형태의 항로에서의 해상교통시스템 적정성 평가 기법에 대한 정확성 개선연구가 필요하다.

핵심어 : 해상교통안전진단제도, 통항안전성, 근접도 평가, 충돌확률, 직선항로, 곡선항로

Abstract : An acceptable proximity assessment collision probability is widely considered to be less than 10^{-4} in maritime traffic safety audit schemes. In the 1970s, Fujii, Macduff and colleagues introduced various models for collision probability of aberrancy in the community. Although existing studies ensured acceptable proximity collision probability, around 10^{-4} , they were constrained by assumptions. A lack of support for the proximity probability criterion has been investigated in this study for practical use. The appropriate proximity probability for different size vessels in both straight and curved lanes has been analyzed based on GICOMS data. As a result, reasonable proximity collision probabilities were determined for various vessel traffic conditions. Accordingly, necessary improvements in the maritime traffic system have been suggested in consideration for various maritime traffic situations and conditions.

Key Words : Maritime traffic safety audit scheme, Safety of navigation, Proximity assessment, Collision probability, Straight lane, Curved lane

1. 서 론

선박이 대형화 되고 각종 해상공사로 인한 해양사고의 위험성이 높아짐에 따라 항만의 건설이나 항로 및 정박지의 변경 또는 선박의 안전에 영향을 미칠 수 있는 위험요인들을 미리 평가하고 고려함으로써 해양사고를 방지하기 위해 2009년부터 해상교통안전진단제도가 시행되어지고 있다(Kim,

2016). 해상교통안전진단의 평가 항목 중 통항안전성 평가 시 근접도 평가는 통항에 지장을 초래하는 장애물과의 최근접 통항 거리를 기초로 산출한 충돌확률이 1.0×10^{-4} 미만일 때 해상교통환경 변화에 따른 통항안전성 확보가 가능하다고 해상교통안전진단 시행지침(Ministry of Oceans and Fisheries Notification No. 2017-21, 2017)에 명시하고 있다.

충돌확률에 관한 많은 연구들은 항로를 이탈하는 원인이 되는 선박 충돌사고에 관한 예측 모델을 만들고자 하는 목적으로 연구되어 왔으며 1970년대에 Fujii et al.(1974)와 Macduff (1974)의 선박 충돌에 관한 연구에서 시작되어 많은 후속 연

* First Author : sckim@mmu.ac.kr, 061-240-7421

† Corresponding Author : ymk@mmu.ac.kr, 061-240-7816

구들이 새로운 방법론 및 시각으로 충돌확률에 관한 보완된 기준들을 제시하였다.

국내 연구로 Cho et al.(2010)은 선박과 해상교량의 충돌에 의한 해상교량의 파괴확률을 산정하였으며, Yim and Kim(2010)은 목포대교를 통항하는 선박들의 충돌확률 계산에 필요한 통계 변수 추정을 통하여 선박과 교량의 충돌 모델을 개발하고자 하였고, Bae and Lee(2012)의 연구에서는 해상교량 건설시 선박충돌을 고려한 최소 항로 폭을 제안하여 해상교량과의 사고 확률을 줄이고자 노력하였다. 이와 같이 대부분의 국내 연구들은 선박과 해상교량과의 충돌에 대한 해상교량 파괴에 대한 연구가 수행되어 왔다.

이 같은 다양한 연구에서 제시된 충돌확률의 기준들은 대체로 1.0×10^{-4} 을 크게 벗어나지 않는 수준이지만, 대부분의 연구들은 가정된 상황을 기준으로 제시됨에 따라 다양한 형태의 실제 항로 기준에 적용하는데 근거가 부족한 문제가 있다. 또한 해상교통안전진단의 근접도 평가에서도 항로의 특성이나 선박의 크기가 고려되지 못하고 일괄적으로 적용되고 있다. 이에 본 연구에서는 목포대교와 인천대교를 통항한 선박들의 항적을 활용하여 선박 크기에 따른 통항선박과 교각과의 충돌확률을 분석하여 보다 구체적이고 합리적인 방안을 도출하고자 한다.

2. 선행연구 고찰

충돌확률에 관한 많은 연구들은 항로를 이탈하는 원인이 되는 선박 충돌사고에 관한 예측 모델을 만들고자하는 목적을 위하여 연구되어왔다. 충돌확률에 관한 연구는 1970년대에 Fujii와 Macduff의 선박 충돌에 관한 연구에서 시작되어 많은 후속 연구들이 새로운 방법론 및 시각으로 충돌확률에 관한 보완된 기준들을 제시하였다. 선박 충돌 사고는 해상교통 체계에 심각한 문제를 가져 올 수 있기 때문에 선박 충돌 사고위험을 예측할 수 있는 모델의 중요성이 강조되어왔다. 이러한 선박 충돌 사고 위험 예측 모델의 필수 요소가 항로 충돌확률에 관한 기준이다. 다만, 소개된 많은 선행 연구들이 모두 해상교통 상황에 관한 가정을 포함하고 있으며, 그러한 가정이 포함된 충돌확률 기준들은 실제 여러 가지 형태의 해상교통환경에 적용하기에는 완벽하지 못한 실정이다. 이런 특정한 해상 교통 환경에 대한 대상 해역의 예측 모델은 지형적 요소를 감안하여 분석하는 방법론이 주로 사용되고 있다.

본 선행 연구 조사에서는 체계적인 선행 연구 조사를 위해서 모델의 핵심 내용에 따라서 충돌확률 예측 모델을 구분하여 핵심 내용 및 장·단점을 정리하고자 한다.

2.1 Macduff 연구

현재 선수 방향을 유지했을 때 항로를 이탈할 확률을 예측하는 아이디어에서 출발한 모델들이다. Fig. 1은 항로 폭(C) 및 선박 정지거리(T)를 고려하여 선박이 수로의 벽과 충돌할 확률을 나타낸 것으로 항로 이탈을 의식하지 않은 상황을 가정하여 Macduff는 충돌확률을 3.7×10^{-4} 으로 제시하였으며, 제안된 충돌확률은 아래 식(1)을 활용하여 산출하였다.

$$PG = 4T/\pi C \quad (1)$$

where PG : Geometric probability

C : Wide of the channel

T : Stopping distance of the ship

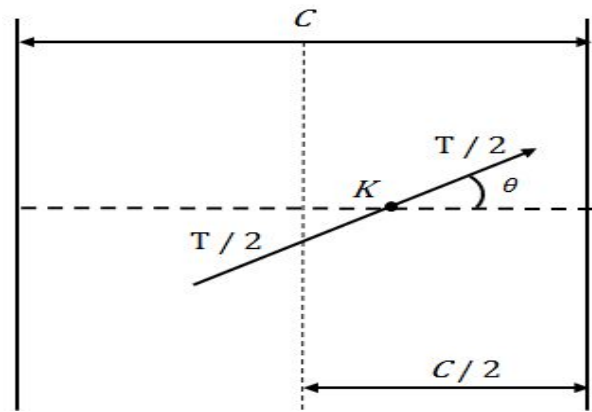


Fig. 1. Probability of hitting the wall of the channel.

2.2 Fujii 연구

Fujii는 항로 충돌확률을 1.55×10^{-4} 으로 제시 하였으며, 아래 식(2)와 같이 항로 이탈확률에 선속(V), 선박 폭(d), 통항 밀도(ρ) 을 인과관계 확률에 추가하여 고려하였다.

$$PG = P_c \times D \times \rho \times V \quad (2)$$

where PG : Expected number of groundings

P_c : Causation probability

D : Width of the shoal

ρ : Traffic density

V : Ship's speed

다만 해당 충돌확률은 선박의 통항 밀도는 균일 분포(uniform distribution)의 가정 하에 계산되었으므로 이 또한 실제 환경과의 차이가 있다. 하지만, 식(2)에서 알 수 있듯이 항로 이탈확률은 선속, 선박 정지거리를 제외하고는 거의

변하지 않은 요소들로 구성되어 있어서 선박의 특성에 따른 항로 이탈확률 변화가 미비한 점이 문제점으로 지적된다. 해당 모델 또한 항해의 절차나 과정은 무시하고 항해 환경만을 고려한 점이 실제항해 절차(위치 확인 등)에 부합되지 않은 문제점이 있다. 기타 위험에 기여할 수 있는 인적 요소, 선박 조종성 등의 다양한 요소가 인과 확률에 포함되지 않은 단점이 있다.

2.3 Pedersen 연구

몇 가지 단점에도 불구하고, Fujii 이론은 Pedersen(1995)에 의해 인용되어 활용되었다. Pedersen 모델이 Fujii 모델을 채용하여 확장한 모델이기 때문에 Pedersen의 충돌확률 또한 항로 이탈을 의식하지 않은 상황을 가정하였다. 따라서 선박의 조종성과 항해자의 재량 등이 반영되지 못하여 현실적인 적용에 제한이 있는 점이 단점이라고 할 수 있다. Fig. 2는 선박의 통항 밀도($f(z)$)와 변침 각도(θ), 위험물과의 이격거리(d)를 반영하여 충돌확률을 산출하였으며, 충돌확률은 1.59×10^{-4} 로 제시하였다.

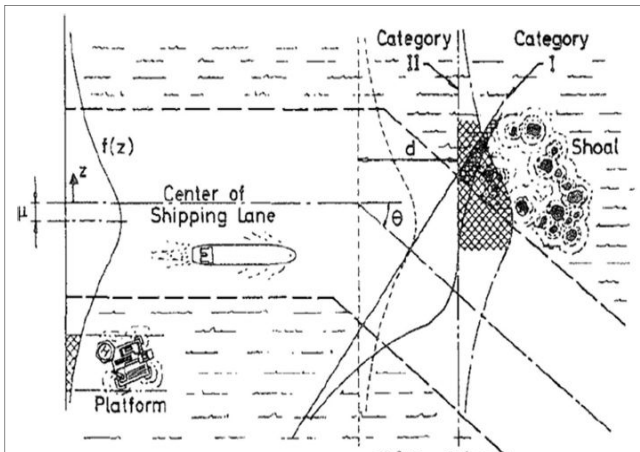


Fig. 2. Distribution of ship traffic on a navigation route (Pedersen, 1995).

2.4 COWI

Fig. 3는 덴마크의 컨설팅그룹인 COWI(Christen Ostenfeld and Wriborg Jønson)가 수행한 항로이탈·좌주 위험 모델로 기본적으로 Pedersen의 모델을 사용하였으며, AIS자료를 통해서 장애물 인근 지역에서 실제 선박들의 Course over ground(COG) 분포를 사용한 점이 보완되었다. Skourup et al.(2008)은 항로 충돌확률을 항로 이탈을 발생시킬 가능성이 있는 대지 침로 (A_1 및 A_2)를 활용하여 충돌확률을 산출하였다.

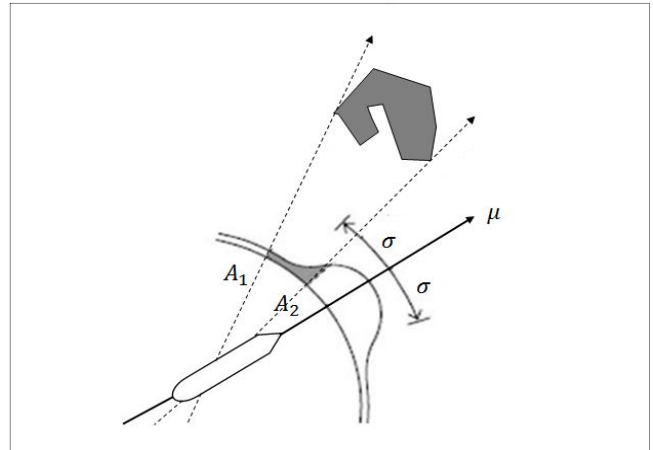


Fig. 3. Ship maneuverability based on the course over ground of the ships (COWI, 2008).

COWI 모델에서는 3.0×10^{-4} 를 충돌확률 기준으로 제시하였다. 해당 모델에서는 COG를 사용함으로써 선박의 조종성을 감안할 수 있게 된 점이 보완 되었지만, 여전히 인과 요소 확률은 기존의 Fujii 또는 Pedersen 모델의 방법을 채용하였기 때문에 근본적인 개선은 없는 단점이 있다.

2.5 IWRAP

IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment Program)은 특정한 항로에서 충돌과 좌초의 확률을 정량적으로 평가하기 위한 해상 교통 위험 요소 평가를 위한 모델링 소프트웨어이다. 특정 지역의 고유한 지형을 감안하여 항로 이탈 및 좌초의 위험성을 평가하기 위하여 만들어진 모델이다. 베이시안 모델은 위험 예측을 핵심 알고리즘으로 하는 대표적인 확률적 분석 모델이고, Fujii와 Macduff 모델에 기초하여 항로에서의 통항 분포와 위험을 인지하지 않은 채로 자연스럽게 항해 중임을 가정하여 선박의 기하학적 항로 이탈 빈도를 결정했다. 인과관계 확률의 의미는 항해자가 하지 않아야 할 행동을 할 확률을 의미한다. 다시 말해 “위험을 인지하지 않은 자연스러운 항해”를 전제로 추정하며, IWRAP 소프트웨어에 이러한 가정들이 계산되는 과정을 구현하였다. Ravn(2012)은 인과 관계 확률이 1에 가까우면 항해자가 항상 잘못 항해하는 것이고, 0에 가까우면 올바르게 항해함을 의미한다고 하였다.

2.6 교량 충돌확률

선박 충돌에 관한 주요 모델의 선박과 해상 교각과의 충돌확률은 Larsen과 Damgaard에 의해 Table 1과 같이 정리되었다.

Table 1. Collision probability of ship and bridge

Location	Collision probability ($\times 10^{-4}$)	Environment	Reference
Japanese Strait	1.86	Ship	Fujii & Mizuki
Great Belt East and West Bridge	3.1	Pilot not on board	COWI
Gibraltar Strait	0.6	Improved safety of ship passage	COWI
Sunshine Bridge	1.3	ship	Knott et al.
Francis Scott Key Bridge	2.0	Barge	Knott et al.
Wm Preston Lane Bridge	1.0	Ship	Knott et al.
Dames Point Bridge	4.1	Barge	Knott et al.
Vicksburg Bridge	5.4	-	Modejeski & Masters
Huey Long Bridge	2.5	-	Modejeski & Masters
Greater New Orleans Bridge	1.3	-	Modejeski & Masters

3. 해상교통흐름 조사 및 충돌확률 분석 결과

통항로 특성에 따른 근접도 산출을 위해 곡선항로 형태의 목포대교와 직선항로 형태의 인천대교를 대상으로 하였으며, 충돌확률의 확률밀도함수는 정규분포를 따른다는 가정하에 대상해역의 AIS 데이터를 이용하여 실제 통항선박의 항적과 주교각과의 이격거리를 산출하여 평균과 표준편차를 계산하여 충돌확률을 구하였다. Table 2는 2010년부터 2016년까지 지난 7년간 목포해양대학교 해상교통안전진단 사례 중에서 선박조종시물레이선에 사용된 대상 선박을 선박 크기별로 분류한 것이다. 평가 대상 선박은 선박크기별로 다양하게 평가 되었다. 따라서 본 연구에서도 충돌확률을 선박의 크기별로 조사하였다.

Table 2. Ship distribution according to ship size

(Unit : Ship)

G/T	<100	100 - 500	500 - 3K	3K - 5K	5K - 10K	10K - 20K	20K - 50K	50K - 100K	100K <
No.	0	2	17	3	8	12	9	10	4

선박이 항로상을 통항하는 경우 항로 단면에서의 선박 항행 분포는 일반적으로 정규분포(Normal Distribution)를 따르며 아래 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

where x = Distance from point

μ = Average

σ = Standard deviation

선박이 교각에 충돌하거나 항로를 이탈할 확률은 아래 식(4)로 구할 수 있다. 기하학적 확률분포 P는 교각과의 양 측면에 놓인 두 선박의 중심선 사이의 범위에서 정규분포곡선을 적분한 면적이다.

$$P(z \geq z_o) = 1.0 - \int_0^{z_o} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (4)$$

3.1 목포대교

Fig. 4는 2012년 1월부터 2013년 4월까지 기간 중 약 20일 동안 목포대교를 통항하는 선박들의 교통흐름을 나타낸 것이다. 출항 선박들은 주경간의 항로 중앙을 통과하는 흐름을 보이고 직선항로가 충분히 확보되지 않은 입항 선박들은 곡선항로의 우측 항로를 따라 주경간 항로 중앙 보다는 항로의 우측으로 치우쳐서 통항하는 흐름을 보였다.

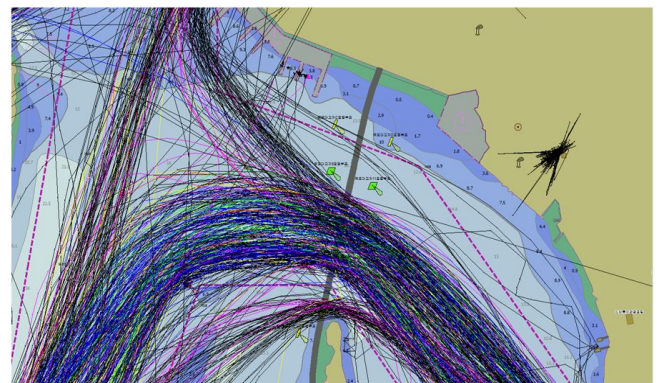


Fig. 4. Navigational traffic flow in fairway of Mokpo bridge (Traffic volume of 3 months).

1) 교통흐름

Table 3과 Table 4는 GICOMS 자료를 바탕으로 선박들 크기와 종류별로 교통량을 분석하였다. 목포대교를 이용한 전체 선박 중 입항선박이 695척, 출항선박이 666척으로 총 1,325척이 통항하였다. 선박 크기별로는 100-500톤 미만의 선박이 27.4%로 가장 많은 비중을 차지하였으며, 3K 미만의 선박이 1,156척으로 87.2%를 차지하였다. 선박의 종류별로는 예인선이 34.6% 가장 많았으며, 여객선 21.3%, 일반화물선 18.9%, 기타 14.0%, 위험화물선 11.2% 순이었다.

항로형태 및 선박크기에 따른 근접도 평가방법에 관한 고찰

Table 3. Ship distribution according to ship size for Mokpo bridge
(Unit : Ship)

G/T	Entering	Leaving	Sum	Ratio(%)
<100	164	166	330	24.9
100 - 500	248	248	496	27.4
500 - 3K	161	169	330	24.9
3K - 5K	35	34	69	5.2
5K - 10K	23	21	44	3.3
10K<	28	28	56	4.2
Total	659	666	1325	100

Table 4. Ship distribution according to ship type for Mokpo bridge
(Unit : Ship)

Ship type	Entering	Leaving	Sum	Ratio(%)
Passenger ship	137	145	282	21.3
Tug & Towing	232	227	459	34.6
Other type	95	91	186	14.0
Gen. cargo ship	123	127	250	18.9
Dangerous ship	72	76	148	11.2
Total	659	666	1325	100

2) 이격거리 분석에 따른 충돌확률

목포대교를 통행하는 선박들의 근접도 평가를 위해 Fig. 5와 같이 입항 선박은 남측 충돌 방지공에서 선박까지의 이격거리를 조사하였고 출항 선박은 북측 충돌 방지공에서 선박까지의 이격거리를 조사하였다.

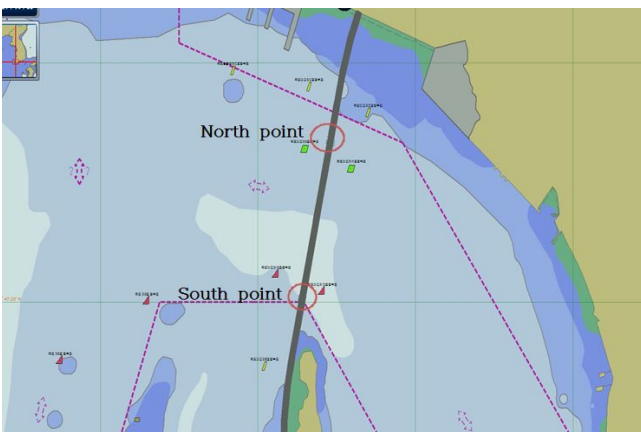


Fig. 5. Locations of selected anti-collision protections of Mokpo Bridge.

Table 5와 Table 6은 선박의 크기에 따른 목포대교를 통행하는 입·출항 선박에 대한 위험장애물로부터 통행 선박까지의 이격거리를 기준으로 평균, 표준편차를 이용한 근접도 및 충돌확률을 보여 준다. 입항 선박의 경우 5K 이상의 선박에서는 해상교통안전진단 시행지침에 명시된 안전기준 1.0×10^{-4} 미만의 값을 보였으며, 5K 미만의 선박에서는 기준 값보다 훨씬 큰 충돌확률을 보였다. 출항 선박에서는 100톤 미만의 선박에서만 기준 값을 만족하지 못하였고 100톤 이상의 선박에서는 충돌확률이 1.0×10^{-4} 미만으로 해상교통안전진단의 안전기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 한편 항로형태별로는 곡선구간항로에서 직선구간항로로 통행하는 입항선박의 충돌확률 값이 직선구간항로에서 곡선구간항로로 통행하는 출항선박의 경우에 비해 충돌확률 값이 크게 나타났다.

Table 5. Analysis of collision probability for entering vessel

G/T \ Distance	Min. [m]	Mean [m]	Standard deviation [m]	Collision probability
<100	12.9	114.7	50.1	1.1×10^{-2}
100 - 500	37.0	120.6	40.7	1.5×10^{-3}
500 - 3K	43.3	137.9	39.2	2.2×10^{-4}
3K - 5K	74.1	145.6	40.6	1.7×10^{-4}
5K - 10K	92.6	176.3	45.2	1.5×10^{-5}
10K<	111.1	180.8	41.7	7.4×10^{-6}

Table 6. Analysis of collision probability for leaving vessel

G/T \ Distance	Min. [m]	Mean [m]	Standard deviation [m]	Collision probability
<100	91.1	210.0	72.5	1.9×10^{-3}
100 - 500	109.6	225.8	51.1	5.1×10^{-5}
500 - 3K	109.5	212.5	48.7	6.3×10^{-6}
3K - 5K	109.8	221.6	42.2	7.5×10^{-8}
5K - 10K	165.2	214.6	40.1	4.3×10^{-8}
10K<	136.8	223.1	41.3	3.3×10^{-8}

3.2 인천대교

2012년 1월부터 2013년 4월까지 기간 중 약 20일간 인천대교를 통과한 선박들의 항적 흐름은 Fig. 6과 같다. 교량 통과 전후 8L 이상의 충분한 거리의 직선항로가 확보된 항로를

따라 소형선은 측경간을 대형선은 주경간을 주 항로로 통항하였다.

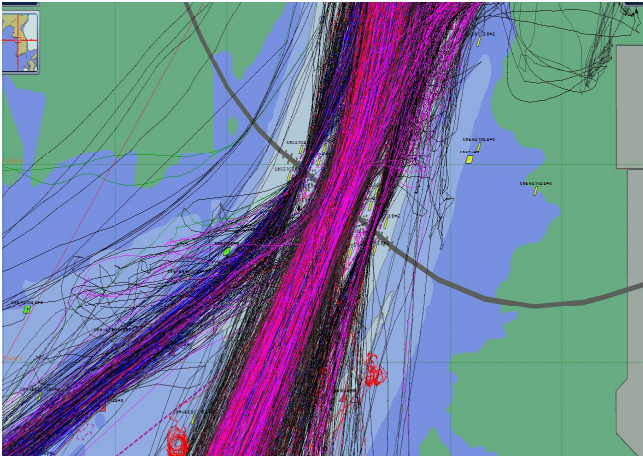


Fig. 6. Navigational traffic flow in fairway of Incheon bridge (Traffic volume of 20 days).

1) 교통흐름

Table 7과 Table 8은 인천대교를 통과한 선박들의 항적을 선박의 크기별, 종류별로 분류하였다. 인천대교를 주 항로를 이용한 전체 선박 중 입항 선박이 799척, 출항 선박이 979척으로 총 1,478척이 통항하였으며, 1일 평균 약 74척이 통항한 것으로 조사되었다. 선박 크기별로는 10K 이상의 선박이 390척, 26.4%로 가장 많은 비중을 차지하였으며, 100톤 미만의 선박이 8.3%로 가장 적었다. 인천대교를 통항하는 선박들은 선박의 크기와 상관없이 비교적 고르게 항로를 이용하고 있었다. 선박의 종류별로는 일반화물선이 46%로 가장 많았으며, 위험화물선 19.1%, 여객선 13.2%, 기타 12.9%, 예인선 8.8%로 조사되었다.

Table 7. Ship distribution according to ship size for Incheon bridge (Unit : Ship)

G/T	Entering	Leaving	Sum	Ratio(%)
<100	71	51	371	8.3
100 - 500	167	82	371	16.8
500 - 3K	180	162	342	23.1
3K - 5K	80	77	157	10.6
5K - 10K	104	114	218	14.7
10K<	197	193	390	26.4
Total	799	679	1478	100.0

Table 8. Ship distribution according to ship type for Incheon bridge (Unit : Ship)

Ship type	Entering	Leaving	Sum	Ratio(%)
Passenger ship	103	92	195	13.2
Tug & Towing	86	44	130	8.8
Other type	118	72	190	12.9
Gen. cargo ship	351	329	680	46.0
Dangerous ship	141	142	283	19.1
Total	799	679	1478	100.0

2) 이격거리 분석에 따른 충돌확률

인천대교를 통항하는 선박들의 근접도 평가를 위해 Fig. 7과 같이 입항 선박은 동측 충돌 방지공에서 선박까지의 격거리를 조사하였고 출항 선박은 서측 충돌 방지공에서 선박까지의 이격거리를 조사하였다.

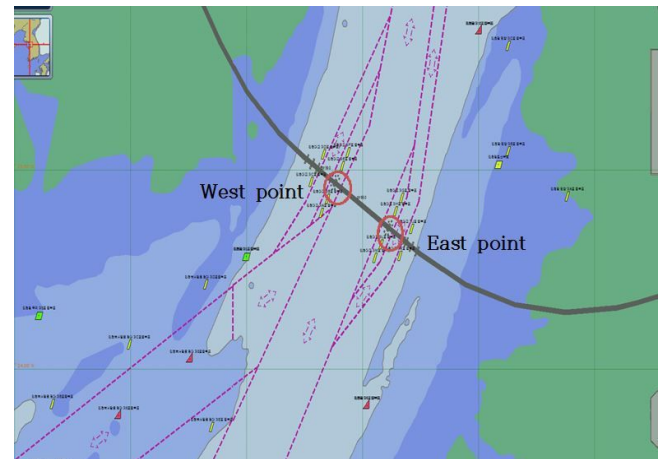


Fig. 7. Locations of selected anti-collision protections of Incheon Bridge.

Table 9와 Table 10은 선박의 크기에 따른 인천대교를 통항한 선박에 대한 충돌확률을 보여 준다. 인천대교를 기준으로 직선항로 형태로 구성된 입·출항 선박 모두 동일하게 3K 이상의 선박은 1.0×10^{-4} 미만으로 안전기준을 만족하였으나, 3K 이하의 선박은 1.0×10^{-4} 값보다 큰 충돌확률을 보였다. 이와 같은 결과는 직선항로를 통항하는 선박들은 항로의 중앙에서 자신의 우측 통항로를 주 항로로 이용한 결과로 보이며, 3K 이하의 중·소형선의 경우에는 항로 전체를 넓게 이용한 결과로 나타났다.

Table 9. Analysis of collision probability for entering vessel

G/T \ Distance	Min. [m]	Mean [m]	Standard deviation [m]	Collision probability
<100	73.3	214.4	87.8	7.3×10^{-3}
100 - 500	91.8	239.9	123.6	2.6×10^{-2}
500 - 3K	128.8	273.9	78.4	2.4×10^{-4}
3K - 5K	184.4	271.5	59.5	2.6×10^{-6}
5K - 10K	128.8	339.1	68.6	3.9×10^{-7}
10K<	129.6	281.9	72.3	4.8×10^{-5}

Table 10. Analysis of collision probability for leaving vessel

G/T \ Distance	Min. [m]	Mean [m]	Standard deviation [m]	Collision probability
<100	74.1	198.3	95.9	1.9×10^{-2}
100 - 500	55.6	207.8	97.4	1.6×10^{-2}
500 - 3K	92.6	240.6	83.3	1.9×10^{-3}
3K - 5K	148.1	243.4	53.2	2.4×10^{-6}
5K - 10K	92.6	246.8	64.7	6.9×10^{-5}
10K<	129.6	271.1	62.9	8.1×10^{-6}

3.3 항로 형태별 비교분석

목포대교와 인천대교를 통항하는 선박들의 실제 항적으로 살펴본 충돌확률은 선박 크기에 따라 직선항로와 곡선항로에서 서로 다른 특징을 보여 주었다. 인천대교의 경우 주교각을 기준으로 직선항로에서 직선항로로 통항하는 대부분 선박들은 자선의 항로 우측을 따라 일정하게 통과함으로써 3K 이하의 선박을 제외하고는 이격거리에 따른 표준편차 값이 적게 나타나 1.0×10^{-4} 미만의 매우 낮은 충돌확률을 보였다. 반면 곡선에서 직선항로로 진행하는 목포대교의 경우 5K 이상의 선박을 제외한 나머지 선박들에서 1.0×10^{-4} 이상의 높은 충돌확률을 보였다. 한편 통항 선박들이 직선항로에서 곡선항로로 진행하는 방향에서는 100톤 미만의 선박을 제외하고 모든 선박에서 1.0×10^{-4} 미만의 충돌확률을 보였다. 이와 같이 직선항로에서 선박들은 침로변경 없이 교각과 같은 위험장애물과의 통과하기 때문의 일정한 이격거리를 유지하기 쉽고 편차가 작아 충돌확률이 작았다. 반면 곡선항로에서의 선박들은 위험장애물을 통과하면서 변침을 하기 때문에 일정한 침로를 따라갈 수 없고 편차가 커지기 때문에 충돌확률이 크게 나왔다.

3.4 항로형태와 선박크기에 따른 충돌확률 제시

본 연구에서는 직선항로와 곡선항로에서 실제통항선박의 충돌확률을 근거로 Table 11과 같이 직선항로와 곡선항로에서의 선박크기별로 충돌확률을 제시하고자 하며, 향후 후속 연구에서 본 연구가 제시한 충돌확률에 대해 선박조종시물레이션 등을 통하여 검증되어야할 필요성이 있다.

Table 11. Collision probability for lane and ship size

Lane	G/T	Collision probability
Straight lane	<500	1.0×10^{-2}
	500 - 3K	1.0×10^{-3}
	3K<	1.0×10^{-4}
Curved lane	<500	1.0×10^{-2}
	500 - 5K	1.0×10^{-3}
	5K<	1.0×10^{-4}

4. 결 론

전 세계적으로 1970년대부터 지금까지 많은 연구자와 연구 기관에서 해양사고의 위험을 줄이고자 선박 충돌에 대한 모델과 기준들을 제시하였다. 우리나라는 2009년부터 해상교통안전진단 시행지침을 마련하여 충돌확률이 1.0×10^{-4} 미만일 때 선박이 안전하다고 평가 하고 있다. 그러나 충돌확률에 대한 구체적인 방법에 대해서는 제시하지 않고 있다. 이에 여러 가지 항로 형태와 선박의 크기에 따라 충돌확률 값이 어떻게 다르게 나타나는지 목포대교와 인천대교를 통항하는 선박들의 실제 항적을 가지고 충돌확률을 분석 하였다.

목포대교 항로는 목포대교를 기준으로 목포항 안쪽으로는 직선항로, 바깥쪽으로는 곡선항로로 설계되어 있다. 이러한 항로는 곡선에서 직선으로 진입할 때 대부분의 선박이 곡선항로에 가깝게 접근하여 위험장애물을 통과함으로써 선박과 위험장애물과의 이격거리가 짧게 나타나 충돌확률이 1.0×10^{-4} 이상의 값을 보였으며, 선박의 크기가 작을수록 그 값은 더욱 커졌다.

인천대교 항로는 인천대교를 기준으로 직선항로 구간으로 설계되어 있으며 선박은 이러한 항로의 우측을 따라 충돌방지공과 일정한 이격거리를 두고 통과하였다. 충돌확률은 3K 이하의 선박에서만 1.0×10^{-4} 이상의 값을 보였다.

이와 같은 결과로 비추어 볼 때 이 연구에서는 항로 설계의 형태에 따라 충돌확률이 달라짐을 알 수 있었고, 선박의 크기에 따라서도 그 값이 현저히 다를 수 있었다. 그러

므로 해상교통안전진단의 현행 근접도 평가 방법에서 충돌 확률 값을 설정할 때 항로 형태와 선박의 크기에 따라 다르게 적용하는 게 타당할 것으로 보인다.

이 연구는 교량이 설치된 항로에서 실제통항선박들이 주 교각의 항로를 따라 통항할 경우 선박과 교각과의 충돌확률을 얻기 위한 것으로 항로 밖을 통항하는 선박들은 대상선박에서 제외하였다. 또한 대상해역을 목포대교와 인천대교를 통항하는 선박으로 한정된 연구인만큼 보다 더 다양한 항로의 특성을 가진 항로에 대해서 후속 연구가 필요할 것으로 보이며, 항로설계 지침에 따른 선박이격거리에 대한 연구도 수행할 필요가 있다.

References

- [1] Bae, Y. G. and S. L. Lee(2012), Determination of Channel Width and Span Length for Offshore Bridge Considering the Ship Collision, *www.yooshin.co.kr*, pp. 73-87.
- [2] Cho, B. I., D. H. Kim and Y. M. Oh(2010), Collision Fragility Analysis of Offshore Bridge by Ship, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 224-229.
- [3] COWI(2008) Risk analysis for Sea traffic in the area around Bornholm. Danish Maritime Authority, Kongens Lyngby.
- [4] Fujii, Y., H. Yamanouchi, and N. Mizuki(1974), II—The probability of stranding, *The Journal of Navigation*, Vol. 27, No. 2, pp. 239-243.
- [5] Kim, I. C.(2016), A study on Adopting an Ex Post Facto Management System and Reforming the Maritime Traffic Safety Audit Scheme, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22, No. 7, pp. 807-813.
- [6] Macduff, T.(1974), The probability of vessel collisions. *Ocean Industry*, Vol. 9, No. 9.
- [7] Ministry of Oceans and Fisheries(2017), Maritime Safety Audit Scheme Index of Enforcement, Ministry of Oceans and Fisheries Notification No. 2017-21(2017), pp. 28-33.
- [8] Pedersen, P. T.(1995), Collision and grounding mechanics, *Proceedings of WEMT*, 95(1995), pp. 125-157.
- [9] Ravn, E.(2012), A tool that makes the link between aids to navigation, traffic volume and the associated risk. Efficient, Safe and Sustainable Traffic at Sea. Valby: The Danish Maritime Safety Administration, Vol. 12, No. 4, pp. 231-238.
- [10] Skourup, H., R. Forsberg, S. L. S. Sørensen, C. J. Andersen, U. Schäfer, G. Liebsch, J. Ihde and U. Schirmer(2008), Strengthening the vertical reference in the southern baltic Sea by Airborne Gravimetry, *Observing our Changing Earth: Proceedings of the 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, July 2-13, 2007*, pp. 133-135.
- [11] Yim, J. B. and D. H. Kim(2010), Statistical Parameter Estimation to Calculate Collision Probability Between Mokpo Harbor Bridge and Passing Vessels, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 609-614.

Received : 2017. 09. 20.

Revised : 2017. 11. 23. (1st)

: 2017. 12. 06. (2nd)

Accepted : 2017. 12. 28.