

통항 선박과 목포 대교의 충돌 위기 평가 모델 개발

*임 정 빈

*목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

Development of Collision Risk Evaluation Model Between Passing Vessel and Mokpo Harbour Bridge

*Jeong-Bin Yim

*Division of Maritime Transportation System, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 본 논문에서는 현재 건설 중인 목포 대교와 통항 선박 사이에 발생 가능한 충돌 위기를 평가하기 위한 선박-교량 충돌 모델 (Real-Time Bridge-Vessel Collision Model, RT-BVCM)을 제안하였다. RT-BVCM의 수학 모델은, 항행환경으로 선박이 이탈하게 되는 원인 확률과, 선박의 크기와 교량 구조로 인한 기하학적 확률, 선박의 충돌 침로와 정지거리에 기인한 충돌 회피 실패 확률 등으로 구성하였다. 그리고 이러한 확률적인 수학 모델은 1부터 5까지의 위기수준을 갖는 위기지수로 나타났다. 본 연구에서 제안한 RT-BVCM은 기존 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)에 제시된 선박-교량 충돌 모델과 달리, 충돌 회피를 위한 충분한 시간을 확보할 수 있는 장점이 있다. 3,000 GT와 10,000 GT 실험 선박에 다양한 항행환경을 적용한 시뮬레이션 실험 결과, 제안한 모델이 목포 대교와 통항 선박 사이의 충돌위기 평가 모델로 타당함을 확인하였다.

핵심용어 : 목포 대교, 충돌 사고, 충돌 모델, 위기지수, 충돌 회피

Abstract : To assess the possible collision risk between Mokpo Harbour Bridge, which is under construction, and passing vessels, we proposed Real-Time Bridge-Vessel Collision Model (RT-BVCM) in this paper. The mathematical model of RT-BVCM consists of the causation probability by the vessel aberrancy due to navigation environments, the geometric probability by the structural feature of a bridge relative to a ship size and, the failure probability by the ship collision track and the stopping distance which is not to come to a stop before hitting the obstacles. Then, the probabilistic mathematical model represented as risk index with the risk level from 1 to 5. The merit of the proposed model to the collision model proposed by AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) is that it can provide enough time to take adequate collision avoiding action. Through the simulation tests to the two kinds of test ships, 3,000 GT and 10,000 GT, it is clearly found that the proposed model can be used as a collision evaluation model to the passing vessel and Mokpo Harbour Bridge.

Key words : Mokpo Harbour Bridge, Collision Accident, Collision Model, Risk Index, Collision Avoidance

1. 서 론

90년대 들어 국내에는 서해대교, 인천대교, 거가대교, 목포대교 등 많은 해상 교량이 건설되었거나 건설 및 설계 중에 있다. 이러한 해상 교량은 대부분 주요 해상 교통로에 건설되고 있기 때문에 선박과 해상 교량 사이(이하 선박-교량)의 충돌사고 발생 가능성이 상존하고 있다(인천대교 홈페이지, 2010; 건설교통부, 2007).

현재 선박의 안전운항 측면에서 선박-교량 충돌사고 예방을 위한 시스템은, 주로 레이더(Radar), 선박자동식별장치(Automatic Identification System, AIS) 등을 이용한 선박관제 시스템(Vessel Traffic System, VTS) 또는 항만관리 시스템(Port Traffic Management System, PTMS) 등이 대표적으로 사용되고 있다. 이러한 시스템은 운용자의 인적과실이 개입될

여지가 있고, 사고에 임박해서 충돌 여부를 판단하기 때문에 대응조치를 위한 충분한 여유 시간을 확보할 수 없는 문제점이 있다.

한편, 교량 설계 측면에서는, 선박-교량 충돌사고가 발생한 경우를 가정하여 교량의 확률적인 파괴빈도를 계산한 후, 이를 기반으로 충돌방지 파일(pile), 펜더(fender), 돌핀(dolphin) 등의 해상 구조물을 충돌사고 대응 시스템으로 적용하고 있다(이 등, 2008; 해양수산부, 2007).

이와 같이 현재 선박-교량 충돌사고와 관련해서는 사전 대응 개념의 선박 안전운항 측면과 사후 대응 개념의 교량설계 측면이 서로 분리되어 있어, 이 양자를 모두 포함할 수 있는 체계적인 대응 시스템의 개발이나 선박-교량 충돌사고 평가기법의 개발이 시급한 실정이다.

세계적으로 선박-교량 충돌사고에 의한 교량파괴빈도는 100

* 종신회원, jbyim@mmu.ac.kr 061)240-7170

년에 0.1건~0.01건 정도인 것으로 알려져 있으나, 최근 들어 선박의 대형화, 고속화, 비표준 선형의 출현 등으로 파괴빈도가 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(Larsen, 1993).

국내에서는 2007년 4월 거대 크레인을 장착한 바지선과 제2진도대교 상판이 충돌한 사고, 2007년 5월 예인선과 (구)거제대교 교각과 충돌한 사고 등이 보고되어 있으며, 인천대교의 경우는 항로 만곡부에 건설된 관계로 선박-교량 충돌위험이 큰 것으로 보고되고 있다(이, 2004). 특히 2012년 준공을 목표로 현재 건설 중인 목포대교는 지리적인 조건이 대단히 열악한 통항로에 건설 중인 바, 이에 대한 대비가 필요하다.

해외에서는, 2007년 11월 미국 샌프란시스코만에서 코스코 부산호가 도선사가 마약을 섭취한 상태에서 선박 조종에 실패하여 교각과 충돌한 사고가 발생한 바 있다(SEABGB, 2008). 또한, 2008년 4월 중국 닝보에서는 선박이 교량 상판과 충돌하여 교량이 붕괴된 사고가 발생하는 등, 선박-교량 충돌사고 통계를 시작한 1297년부터 2007년까지 세계 곳곳에서는 선박과 교량 사이의 충돌 사고가 끊임없이 발생하고 있다(Wikipedia, 2008).

본 연구의 최종 목표는, 현재 건설 중인 목포 대교와 통항 선박 사이의 항행안전을 확보하기 위하여, 선박이 목포대교로 근접함에 따라 발생 가능한 충돌 위기를 실시간 자동으로 평가하기 위한 교량 위기관리 시스템(Bridge Risk Management System, BRMS)을 개발하는데 있다. BRMS를 개발하기 위해서는, (1)통항하는 선박의 제원과, 통항로 환경, 기상환경 등의 정보를 실시간으로 입수하기 위한 하드웨어 시스템, (2)입수한 정보를 이용하여 통항하는 선박과 교량 사이의 충돌 위기를 평가할 수 있는 실시간 충돌 모델(Real-Time Bridge-Vessel Collision Model, RT-BVCM) 그리고 (3)실시간 충돌 모델과 하드웨어 시스템을 통합하여 현장에 적용하기 위한 통합 시스템 등의 개발이나 구축이 단계적으로 필요하다.

본 연구의 목적은 상기 (2)항의 RT-BVCM 개발에 있으며, 연구 범위는 목포대교를 중심으로 목포구부터 목포내항까지에 출입하는 선박을 대상으로 한다. 현재 상기 (1)항의 하드웨어를 개발하고 있는데, 최종 시스템인 BRMS가 개발되면 목포대교와 통항하는 선박사이의 충돌 위기 평가 시스템으로 활용할 예정이다.

2. 연구개발 개요

2.1 목표 시스템 개요

Fig. 1은 현재 목포대교가 건설 중인 교하도 주변의 목포항 해도(국립해양조사원, 2009)에 나타낸 최종 목표 시스템의 구축 개념도이다. 선박에 설치된 선박자동식별장치(Automatic Identification System, AIS)로부터 선박의 위치, 톤수, 길이, 폭 등의 선박정보를 획득하고, AIS 미설치 선박의 정보는 무선주파수인식장치(Radio Frequency Identification System, RFID)를 개발하여 획득할 예정이다. 육상에 설치한 교량 위기관리 시

스템(BRMS)에서는 AIS와 RFID를 통한 선박정보 이외에 기상, 습도, 풍향/풍속 등의 환경정보를 실시간으로 측정된 후, 실시간 충돌 모델(Real-Time Bridge-Vessel Collision Model, RT-BVCM)을 통해서 해당 선박의 현재 위치에서의 교량과 충돌할 위기수준을 평가하게 된다.

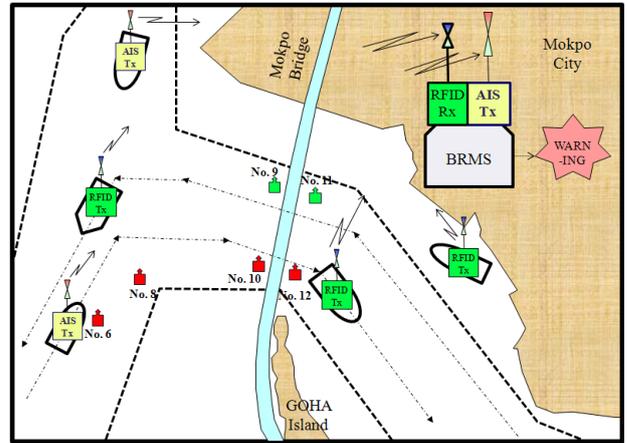


Fig. 1 Concepts to Bridge Risk Management System(BRMS)

여기서, 현재 Fig. 1 지역은 목포항 VTS(Vessel Traffic Center)에서 감시하고 있는데, 항로의 지형적인 특징으로 입출항 선박의 대각도 침로 변경이 수시 발생하면서 선박과 목포대교 교각 사이에 충돌 침로가 형성된다. 이에 목포항 VTS 운영자는 선박이 교량을 완전히 통과하기 전까지 상당한 주의를 하고 있으나, 선박이 교각과의 충돌에 직면해서야 충돌 여부를 알 수 있기 때문에 사고 예방을 위한 충분한 시간적 여유를 확보할 수 없는 문제점이 있다. 특히 AIS가 미장착된 거대 블록(Block) 수송선박의 경우 레이더 이외에는 적절한 감시 수단이 없는 문제점이 있다.

Fig. 1의 시스템은 선박이 부두에서 출항하는 당시부터 또는 선박이 목포구에 도달하는 시기부터 충분한 시간적인 여유를 갖고 목포대교와의 충돌 위기를 실시간으로 평가할 수 있다, 특히 AIS가 미장착된 선박에는 RFID를 장착하여 통항하는 모든 선박을 평가할 수 있다.

2.2 목포항 현황

최근 10년간(1994~2003년) 목포항에서 발생한 해양사고 조사 연구결과(정 등, 2005)에 의하면, 목포구에서 충돌, 좌초 등이 많이 발생하고, 항내에서도 선박 충돌사고가 발생하는 것으로 나타났다. 해양사고 발생시각은 주로 야간에 많이 발생하고 있으며, 사고 발생 수역이 목포대교 건설 장소를 포함하는 목포항 VTS 관제범위이고, 해양사고의 주된 유발원인은 경계미흡 26%, 항법규정 미준수 23% 등, 인적과실에 의한 사고가 가장 많은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다(목포지방해양안전심판원, 2007). 그리고 목포항 입출항 선박 척수와 화물운송은 2000년 9천1백 척에 6백만 GT(Gross Tonnage)이던 것이, 2003년에는 1만1천 척에 6백9십만 GT로 소폭 증가하다가 2008년에

는 선박 척수는 9천1백여 척으로 다소 감소하였으나, 대형 선박의 증가로 화물운송은 1천4백만 GT로 증가하고 있다(목포지방해양항만청, 2009). 또한, 목포항의 자연환경은, 안개가 잦고, 조차가 크며, 도서가 산재하여 유향이 매우 복잡하고, 낙조류가 창조류보다 유속이 크다. 특히, 목포대교 건설지역인 달리도 및 고하도 해역의 최강 창조류는 0.3~1.0 kts(knots)이며 최강 낙조류는 0.3~1.7 kts에 이른다. 연평균풍속은 4.3 m/s로 비교적 강하고, 겨울철에는 돌풍 현상과 소낙성 눈이 자주 내린다(이, 2008).

이와 같이 목포항은, 입출항 선박의 대형화, 열악한 자연환경, 인적과실에 의한 해양사고 등의 특징을 갖고 있기 때문에 목포대교 부근에서의 충돌 사고 개연성이 잠재되어 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 것과 같은 첨단 시스템을 활용한 고도의 해양사고 예방 방법이나 기술의 개발이 필요한 실정이다.

2.3 목포대교 건설에 따른 문제점

Fig. 2는 목포대교의 설계사양을 나타내고, Fig. 3은 목포항 해도에서 측정된 목포대교 건설지역의 지리적인 특징을 나타낸다. 목포항 도선사와의 인터뷰 결과(임, 2009b)와 목포대교 설계회사의 시뮬레이션 결과(박, 2004; 오션스페이스, 2005)를 검토한 결과, 목포대교 건설에 따른 문제점을 다음과 같이 확인하였다.

2004년에 설계 선박 길이 250 m, 55,000 DWT(Dead Weight Tonnage)을 기준으로 설계한 목포대교는, 건설지역 앞의 직선해역이 대단히 협소하고, 굴곡이 심한 장소에 건설되고 있어 통항 선박과의 충돌 위험에 노출되어 있다. 특히 항로 중심선의 교각은 통상적으로 30°를 넘지 않는 것이 바람직한데, 고하도 부근에서는 30°를 초과하고 있다. 더욱이 교량 주 항로의 수직 폭과 수평 폭의 경우, 현재 대불공단에서 수송하는 비표준 거대블록이 출현하여 충분하지 못한 경우도 발생하고 있으며, 중소형 선박과 바지선, 어선, 차도선 등이 혼재되어 수시로 대형상선들의 입출항로를 방해하고, 양방향 통항방식을 채용하고 있으나 통항분리대가 설정되어 있지 않아 위험하다.

따라서 종합적인 선박-교량 충돌 예방 대책이 시급한 실정인데, 특히 목포대교 설계 당시 비표준 거대블록에 대해서는 검토하지 못한 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점은 본 연구에서 제안하는 바와 같이 AIS가 미장착된 모든 선박에 RFID를 장착하면 해결 가능할 것으로 고려된다.

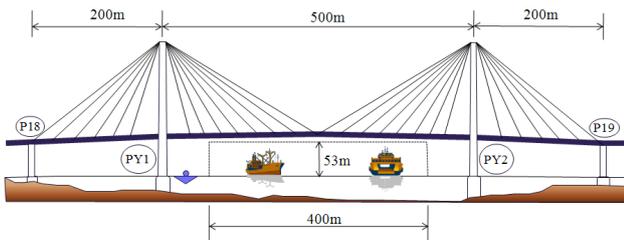


Fig. 2 Side view of Mokpo bridge

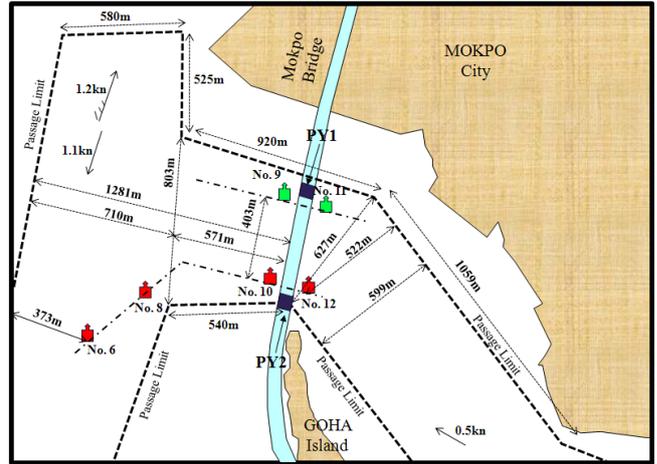


Fig. 3 Geometric feature of traffic route near the Mokpo Harbour Bridge, drawing based on Korean Chart No. 301

3. 선박-교량 실시간 충돌 모델 개발

3.1 기준 모델의 검토

선박-교량 충돌사고를 야기하는 위기의 종류와 원인은 대단히 방대하기 때문에 이를 모두 고려하여 충돌사고 모델을 설계할 수 없다. 본 연구에서는 해상 교량 설계에 일반적으로 적용하고 있는 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)의 설계기준에 제시된 선박-교량 충돌 모델을 기준으로 선박-교량 실시간 충돌 모델(RT-BVCM)을 개발하였다. AASHTO 설계기준에 기술된 선박-교량 충돌 모델은 다음 식(1)의 선박-교량 연간교량파괴빈도 $F_{Failure}$ 에 포함되어 있다(AASHTO, 1991).

$$F_{Failure} = \sum N_i P_{C,i} \sum P_{G,i,k} P_{F,i,k} \quad (1)$$

여기서,

N_i : i 개로 구분한 선박 그룹(group)의 연간통항횟수,

$P_{C,i}$: 그룹 i 에 속하는 선박이 항로를 이탈하는 경우 교량과 충돌하게 되는 항로이탈확률,

$P_{G,i,k}$: 항로를 이탈한 i 의 선박 그룹이 k 번째의 교각이나 상판과 충돌할 기하학적 확률,

$P_{F,i,k}$: i 의 선박 그룹이 k 번째의 교각이나 상판과 충돌하는 경우의 교량파괴확률.

위의 식(1)의 네 가지 요소 중에서, N_i 는 i 그룹의 선박이 교량과 충돌하는 경우의 파괴빈도 계산을 목적으로 한 것이고, $P_{F,i,k}$ 는 교량의 파괴확률을 고려하기 위한 것이기 때문에 RT-BVCM에는 적용하지 않았다. 또한, 나머지 두 가지 요소 역시 선박과 교량이 충돌하는 경우를 전제로 전개한 것이기 때문에 다음과 같이 수정 및 보완하여 새로운 모델을 제안하였다.

3.2 $P_{C,i}$ 의 검토

위의 식(1)의 AASHTO 모델에서 $P_{C,i}$ 는, 항로의 기상조건이나 운항환경 등에 의해 선박이 항로를 이탈하는 경우 교량과 충돌할 확률로서, 과거 선박-선박 또는 선박-교량 충돌사고 데이터로부터 관련 변수를 도출할 수 있다. 그러나 교량건설 부근에서 이러한 사고는 극히 제한적으로 발생하거나, 사고가 발생하지 않는 경우가 많기 때문에 과거 사고 데이터에 기초한 변수 도출은 불가능하다. 또한, 위의 식(1)의 AASHTO 모델에서 $P_{C,i}$ 는 단순한 항행환경만을 교량 설계에 적용하고 있는데, 본 연구는 선박 안전을 대상으로 하기 때문에 선박의 침로와 정지 거리에 의해서 야기될 수 있는 선박-교량 충돌확률을 별도로 고려해야 한다. 본 연구에서는 AASHTO 설계기준에 제안된 보정요소 변수에 Larsen(1993)이 제안한 보정요소 변수를 추가한 항로이탈 확률 $P_{A,i}$ 를 고려하고, Kunz(1998)가 제안한 선박의 침로와 정지거리에 의한 충돌회피 실패확률 $P_{V,i}^{s(t)}$ 를 별도로 고려하여 모델을 개발하였다.

3.2.1 항로이탈 확률 $P_{A,i}$

본 연구에 적용한 보정요소에 의한 항로이탈 확률 $P_{A,i}$ ($0.0 \leq P \leq 1.0$)는 다음 식(2)와 같다.

$$P_{A,i} = B_R R_{HCurr}^t R_{PCurr}^t R_{TDens} R_{Bend} R_{Vis}^t R_{Dark}^t R_{Wind}^t \quad (2)$$

여기서,

B_R : 항로이탈의 기본 비율,

R_{HCurr}^t, R_{PCurr}^t : 각각 시각 t 에서의 선박 진행방향에 수평과 수직으로 흐르는 조류에 대한 보정요소,

R_{TDens} : 목포대교 주변의 교통밀집 정도,

R_{Bend} : 항로상에 존재하는 만곡부에 대한 보정 요소,

R_{Vis}^t : 시각 t 에서의 시정에 대한 보정 요소,

R_{Dark}^t : 시각 t 에서의 어두운 정도에 대한 보정 요소,

R_{Wind}^t : 시각 t 에서의 풍속에 대한 보정 요소.

위의 식(2)의 보정요소 중에서, $B_R, R_{HCurr}^t, R_{PCurr}^t, R_{TDens}, R_{Bend}$ 등은 AASHTO 설계기준에 제시된 것이고, $R_{Vis}^t, R_{Dark}^t, R_{Wind}^t$ 등은 AASHTO 설계기준에는 없으나 다양한 문헌에서 제기한 보정 요소들이다(Larsen, 1993; Fujii et al., 1984). 상기 보정요소들의 값은 다음과 같다.

(1) B_R 의 경우, AASHTO 설계기준에 의하면 선박은 0.6×10^{-4} , 마지선은 1.2×10^{-4} 등으로 나타나 있다.

(2) R_{HCurr}^t 와 R_{PCurr}^t 의 경우, AASHTO 설계기준에는 시각 t 에 관계없이 평균적인 유속에 대해서 $R_{HCurr} = (1 + V_{HCurr})/10$, $R_{PCurr} = 1 + V_{PCurr}$ 등으로 주어진다. 여기서, V_{HCurr} 와 V_{PCurr}

는 선박 진행 방향에 수평 유속(kts)과 수직 유속(kts)을 각각 나타내고, 목포항의 $V_{PCurr}=0.0$ 이다. 한편 본 연구에서는 실시간으로 선박-교량 충돌사고 확률을 계산하기 위해 다음과 식(3)과 같이 보간법을 적용하여 시각 t 에서의 유속을 적용하였다.

$$R_{HCurr}^t = \frac{1 + V_{HCurr}^{t_x}}{10} \quad (3)$$

여기서,

$$V_{HCurr}^{t_x} = V_{HCurr}^{t_m} \cos \left\{ 90^\circ - \left(\frac{t_x \sim t_s}{t_m \sim t_s} \times 90^\circ \right) \right\} \quad (4)$$

이고, t_x : 현재 시각, t_m : t_x 직전 또는 직후의 최강 유속 시각, t_s : t_x 직전 또는 직후 전류 시각, $V_{HCurr}^{t_m}$: t_x 직전 또는 직후의 유속.

(3) R_{TDens} 의 경우, AASHTO에서는 저밀도는 1.0, 평균밀도는 1.3, 고밀도는 1.6으로 주어진다. 본 연구에서는 Fujii et al.(1984)이 제안한 교통밀집도 계산 식, $\rho = Q(L)/WV_a$ 을 이용하여 다음 식(5)와 같이 교통밀집도 R_{TDens} 을 계산하였다.

$$R_{TDens} = \frac{Q(L)}{WV_J} \quad (5)$$

여기서, $Q(L)$: 선박 GT에 대한 Table 1의 L-변환 가중치를 곱한 교통량, W : 항로 폭(Km), V_J : J 척의 통항 선박에 대한 평균 선속(Km/Hr.).

Table 1 L-Conversion weighting proposed by Fujii et al.(1984)

GT	< 20	~100	~500	~3,000	~20,000	~100,000	100,000>
L-Conversion	1/6	1/4	1/2	1	2	4	6

목포항 Pot-Mis에서 획득한 출입선박의 통계자료를 위의 식(5)에 적용하여 계산한 과정과 결과를 Table 2에 나타냈다. 계산결과, 목포항의 $R_{TDens}=0.0011$ 이다. 한편, Fujii et al.(1984)이 1980년의 통계 값을 적용하여 계산한 일본 Uraga 해협의 $R_{TDens}=0.57$, Akashi 해협의 $R_{TDens}=0.705$, Bisan East의 $R_{TDens}=0.76$ 으로 나타났고, 1972년의 통계 값을 적용한 Dover 해협의 $R_{TDens}=0.016$ 등으로 계산되었다.

따라서 목포항의 교통밀집정도는 저밀도로 고려할 수 있다. 그러나 목포항은 수심이 10 m 내외인 관계로 중대형 선박과 거대한 블록 운송용 바지선이 고조시 동시에 출입하는 특징을 갖기 때문에 본 연구에서는 AIS 또는 RFID 등을 이용하여 매시간의 교통밀집 정도를 실시간으로 측정할 예정이다.

Table 2 Calculation results of R_{TDens}

GT Band	< 20	~100	~500	~3,000	~20,000	~100,000	100,000 >
Traffic Volume in 8 years	29	249	204	35	37	1	1
Traffic Volume/day ($\times 10^{-3}$)	9.9	85.27	69.86	11.99	12.67	0.34	0.34
L-Conversion ($\times 10^{-3}$)	1.65	21.32	34.93	11.99	25.34	1.36	2.04
Traffic Volume-L/Hr. ($\times 10^{-3}$)	0.069	0.89	1.46	0.50	1.06	0.057	0.085
Sum Traffic Volume-L/Hr.	0.00412						
$W\bar{V}_j$	3.73 ($W=0.403$ km, $\bar{V}_j=5$ kts)						
R_{TDens}	0.0011						

(4) R_{Bend} 는, 항로상에 존재하는 선회 또는 만곡부를 나타내는 보정 요소로서, 목포대교 부근 항로와 같이 선회지역에서 3,000 feet(914 m) 이내에 있거나 또는 만곡부의 선회지역에 있는 경우는 $R_{Bend} = 1 + \theta/45^0$ (θ 는 선회 각도)가 된다. 목포대교 부근의 항로는 $\theta = 40^0$ 이다.

(5) R_{Vis}^t 는 시각마다 변하는 시정에 대한 보정요소로서, 충돌 확률은 시정(거리)에 역으로 비례하고, 200 m 이내 시정의 안개일 때 청명한 시정과 비교하여 100배로 충돌 확률이 증가하는 것으로 보고되어 있다(Larsen, 1993). 따라서 청명한 날씨에 대해서 $R_{Vis}^t = 1/100$, 200m 이내의 짙은 안개에 대해서 $R_{Vis}^t = 1.0$ 으로 두고, 안개 정도에 따라서 이 사이의 값을 선형적으로 취한다.

(6) R_{Dark}^t 는 저녁에는 주간에 비하여 4배 충돌 확률이 높은 것으로 보고되어 있다(Larsen, 1993). 따라서 주간에 $R_{Dark}^t = 1/4$, 야간에 $R_{Dark}^t = 1.0$ 으로 두고, 조도의 양을 측정하여 이 사이의 값을 선형적으로 취한다.

(7) R_{Wind}^t 는, 풍속 11~14 m/sec.는 풍속 6~8 m/sec.와 비교하여 충돌 확률이 3배 높은 것으로 보고되어 있다(Larsen, 1993). 따라서 풍속 6~8 m/sec. 이하에 대해서 $R_{Wind}^t = 1/3$, 풍속 11~14 m/sec. 이상에 대해서 $R_{Wind}^t = 1.0$ 등으로 두고, 6~8m/sec.부터 11~14m/sec.까지에 대해서는 $R_{Wind}^t = 1/2$ 로 근사하였다.

3.2.2 충돌회피 실패 확률 $P_{V,j}^{s(t)}$

충돌회피 실패 확률 $P_{V,j}^{s(t)}$ 은 Kunz(1998)가 제안한 것으로, 시각 t 에서의 선박 j 의 위치가 $s(t)$ 인 경우, 이 선박이 교량과 충돌침로를 형성함과 동시에 선박이 교량과 충돌하기 이전에 정지하지 못하여 충돌회피에 실패할 확률을 의미한다.

$P_{V,j}^{s(t)}$ ($0.0 \leq P \leq 1.0$)는 다음 식(6)과 같이 $s(t)$ 위치에 있는 선박이 교량과 충돌침로를 형성할 확률 $P_{CT,j}^{s(t)}$ ($0.0 \leq P \leq 1.0$)와, 교량과 충돌하기 이전에 정지하지 못할 확률 $P_{NS,j}^{s(t)}$ ($0.0 \leq P \leq 1.0$)로 구성된다.

$$P_{V,j}^{s(t)} = P_{CT,j}^{s(t)} P_{NS,j}^{s(t)} \quad (6)$$

여기서,

$$P_{CT,j}^{s(t)} = F_{\theta,j}^{s(t)}(\theta_1) - F_{\theta,j}^{s(t)}(\theta_2) \quad (7)$$

$$P_{NS,j}^{s(t)} = 1 - F_{x,j}^{s(t)}(s | x_{stop}) \quad (8)$$

위의 식(6)에 대한 개념은 다음 Fig. 4와 같고, 위의 식(7)의 충돌침로 θ_1 과 θ_2 에 대한 $F_{\theta}(\theta)$ 는 통계 값에 근거하여 평균 μ_{θ} 와 표준편차 σ_{θ} 에 대한 정규분포 $N(\mu_{\theta}, \sigma_{\theta}^2)$ 로 나타낼 수 있다. 또한 식(8)의 정지거리 $F_{x,i}^{s(t)}(s | x_{stop})$ 역시 통계 값에 근거하여 $s(t)$ 위치에서의 정지거리 x_{stop} 에 대한 평균 $\mu_{x_{stop}}$ 과 표준편차 $\sigma_{x_{stop}}$ 에 대한 정규분포 $N(\mu_{x_{stop}}, \sigma_{x_{stop}}^2)$ 로 나타낼 수 있다.

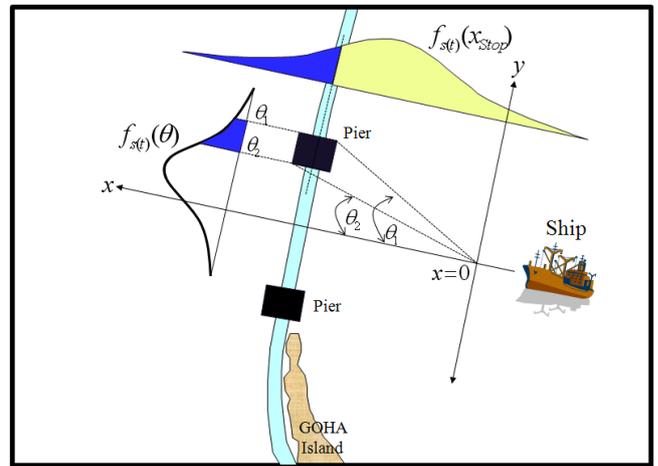


Fig. 4 Concepts to the probability of collision track and of not to come to stop before collision

이러한 μ_{θ} 와 $\mu_{x_{stop}}$ 및 σ_{θ} 와 $\sigma_{x_{stop}}$ 등은 과거 사고기록을 통한 충돌침로 θ 와 정지거리 x_{stop} 의 분포함수를 통해서 계산할 수 있으나, 현재 목포대교 부근에서의 충돌사고 기록이 없기 때문에 통계적인 분포함수를 구할 수 없다.

우선, 충돌침로에 관해서, Kunz(1998)는 다양한 실험 데이터에 기반을 두고 충돌침로에 대한 평균 $\mu_{\theta}=0^{\circ}$, 표준편차 $\sigma_{\theta}=10^{\circ}$ 가 타당함을 보고한 바 있다. 본 연구에서도 이 값을 적용하였다.

다음으로, 정지거리에 대한 $\mu_{x_{stop}}$ 와 $\sigma_{x_{stop}}$ 는 선박의 크기, 속도, 선종, 역 추진력 등 복잡한 선박 제원을 토대로 계산할 수 있으나, 목포항과 같이 중소형 선박의 통항이 많고, 5.0 kts 정도의 저속으로 항행하는 제한된 구역에서의 정지거리에 대한 적합한 이론식이나 실험 결과는 보고된 바 없다. 본 연구에서는 다음과 같은 네 가지 관련 연구를 분석하여 이 값들을 정하였다.

- (1) IMO(2002a, 2002b, 2003)에 의하면, 정지거리

$S = A \cdot \log_e(1+B) + C$ 으로 계산될 수 있는데, A, B, C 등은 선형, 선종, 길이, 역 추진력 등에 따라 결정되는 계수이다. 이 식은 선박길이 100 m 이상인 선박이 15 kts로 항해하는 경우 적용되는 것으로 본 연구에 직접 적용은 불가능하다.

(2) Kunz(1998)는 독일 지침을 준용하여 선박의 크기와 조류를 고려한 최대 크기의 선박인 경우, 허용 가능한 최대 정지거리를 대략 $x_{max} = 550$ m 정도로 기술한 바 있다.

(3) Fujii et al.(1984)은 일본 연안에서 다수의 관측 자료를 분석한 결과, 일반적인 선박운항속도 V_n (kts)은 $\log_{10} V_n = 0.29\lambda + 0.52 \pm 0.06$ 으로 나타낼 수 있고, 후진타력에 의한 정지거리 D_s (m)는 만재 시, $\log_{10} D_s = 1.10\lambda + 0.78 \pm 0.18$ 로 나타났다. 여기서, $\lambda = \log_{10} L_{pp}$ 이고, 500 GT 이하인 경우 $L_{pp} = LOA / 1.10$ 이며, 500~3,000 GT인 경우 $L_{pp} = LOA / 1.08$ 이고, 3,000 GT 이상인 경우 $L_{pp} = LOA / 1.06$ 이고, LOA 는 선박의 전장(Length Overall)을 의미한다.

(4) 또한 Fujii et al.(1971)과 Frandsen et al.(1991)은 선박의 충돌 회피에 필요한 완충영역을 제시하기 위하여 선박영역이론(ship domain theory)을 보고한 바 있는데, 항만과 같은 협수로에서 5.0 kts의 저속으로 항해하는 경우, 그리고 마주치는 선박은 없으나 추월하거나 서로 교차하는 상황이 발생하는 경우, 완충영역은 선수방향으로 평균 6.0 LOA, 측면방향으로 1.6 LOA가 필요함을 보고한 바 있다.

상기 네 가지 경우에 대해서, 10,000 GT, 130 m 길이의 표준 벌커선을 예로 들면 다음과 같다.

위의 (3)의 Fujii et al.(1984)이 제안한 식에 의하면, $L_{pp} = 130/1.06 = 122.64$ m, $\lambda = 2.089$, $\log_{10} V_n = 1.186 \sim 1.066$, 따라서 $V_n = 15.3 \sim 11.6$ kts가 되고, $\log_{10} D_s = 3.258 \sim 2.898$ 임으로 $D_s = 1,811 \sim 790$ m가 된다. 따라서 V_n 이 5.0 kts인 경우의 D_s 를 근사적으로 위 계산결과의 1/3을 취하는 경우 약 $D_s = 600 \sim 263$ m가 된다. 한편, 위의 (4)의 Fujii et al.(1971)이 제안한 완충영역의 경우, 선박 중심으로부터 선수방향으로 평균 $6.0 LOA / 2.0 = 390$ m로 계산된다. 이러한 값들은 위의 (2)의 Kunz(1998)가 제안한 최대 선박에 대한 최대 허용 값 $x_{max} = 550$ m와 근사한 값으로 고려된다.

따라서 본 연구에서는 계산이 간단함과 동시에 선박의 길이에 따라서 완충거리가 결정되는 위의 (4)의 완충영역 계산식 $6.0 LOA / 2.0$ 을 선박 정지거리 계산에 적용하였다. 따라서 정지거리의 $\mu_{x_{stop}} = 6.0 LOA / 2.0$ 이고, $\sigma_{x_{stop}}$ 는 AASHTO 기준을 참고하여 선박의 전장(LOA)으로 정하였다.

3.3 기하학적 확률 $P_{G,i,k}$

AASHTO 설계기준에 나타난 $P_{G,i,k}$ 는 교량의 기하학적 특징에 기인하여 i 의 선박그룹이 k 개의 교각이나 상판과 충돌할 확률을 나타낸다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 통항로를 따라 항행하는 선박이 충돌하게 되는 주 교각만을 대상으로 하고, 상

판은 선박의 최고 높은 시설물이나 화물의 최대 높이가 교량의 통과 높이를 초과하는지의 여부로 충돌을 판단하였다.

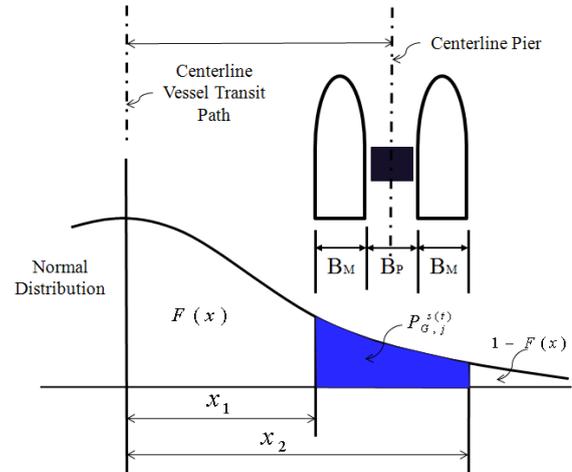


Fig. 5 Geometric probability $P_{G,j}$ to the vessel collision with main pier

따라서 AASHTO 모델에서 제안된 $P_{G,i,k}$ 는 j 의 선박에 대한 $P_{G,j}$ 로 나타나고, $P_{G,j}$ ($0.0 \leq P \leq 1.0$)는 위의 Fig. 5와 같이 선박 위치 $s(t)$ 에 대해서 독립적이고, 통항로의 폭과 선박의 폭, 주 교각의 폭 등을 변수로 갖는 다음 식(9)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{G,i} = \{1 - F_{x,i}(x_1)\} - \{1 - F_{x,i}(x_2)\} \quad (9)$$

여기서, $F_x(x)$ 는 μ_x 와 σ_x 에 대한 정규분포 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ 으로 나타낼 수 있고, AASHTO 기준에 의하면 $\mu_x =$ 항로 중간선, $\sigma_x = LOA$ 이다. x_1 과 x_2 는 다음 식(10)과 같이 항로 중심으로부터 선박까지의 단거리와 장거리를 각각 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{x_B - (B_M + B_P/2)}{LOA} \\ x_2 &= \frac{x_B + (B_M + B_P/2)}{LOA} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

여기서,

x_B : 통항로 중심부터 주 교각 중심까지의 거리(m),

B_M : 선폭(m),

B_P : 주 교각의 폭(m),

LOA : 선박 전장(m).

상기 보정 요소 이외에 항로표지, VTS 존재 여부, 선박의 표준형태 여부와 선원에 의한 인적과실 및 장비나 기기에 의한 과실 유발 등도 충돌 확률에 크게 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다(Larsen, 1993). 그러나 이에 관한 실험 값이 보고된 바 없기 때문에 본 연구에서는 논외로 하고, 추후 최종 목표 시스템이 개발되면 실험을 통하여 검토할 예정이다.

3.4 선박-교량 실시간 충돌 모델

3.4.1 모델 구성

지금까지 검토한 내용을 종합하면, 선박-교량 실시간 충돌 모델(RT-BVCM)은 다음 식(11)과 같이, j 번째 선박이 $s(t)$ 위치에서 교량과 충돌할 확률 $P_{C,j}^{s(t)}$ ($0.0 \leq P \leq 1.0$)로 나타낼 수 있다.

$$P_{C,j}^{s(t)} = P_{A,j}^{s(t)} P_{V,j}^{s(t)} P_{G,j},$$

$$(P_{C,j}^{s(t)} = 1.0, \text{ if } B_M \geq x_B \text{ or } B_H \geq y_B) \quad (11)$$

여기서,

$P_{A,j}^{s(t)}$: 환경영향으로 인한 항로이탈 확률,

$P_{V,j}^{s(t)}$: 선박 침로와 정지거리에 의해서 발생하는 충돌확률,

$P_{G,j}$: 교각의 기하학적 구조로 인한 충돌확률.

그리고 위의 식(11)의 조건부에서, 선폭 B_M 이 통항로 중심부터 주 교각 중심까지의 거리 x_B 보다 크거나, 수면으로부터 선박에서 제일 높은 시설까지의 최대 높이 B_H 가 수면으로부터 교량 상판 하부까지의 높이 y_B 보다 큰 경우는 교량과 충돌하기 때문에 $P_{C,j}^{s(t)} = 1.0$ 으로 두었다.

한편, 위의 식(11)에서, 세 가지 확률이 곱해지기 때문에 어느 한 가지 확률이 영(0)의 값에 수렴하는 경우 $P_{C,j}^{s(t)} \approx 0.0$ 이 된다. 예를 들어, 항행환경이 대단히 양호하여 $P_{A,j}^{s(t)}$ 가 영의 값으로 수렴하는 경우, 선박이 충돌침로를 형성하여 $P_{V,j}^{s(t)} \approx 1.0$ 이 되더라도 $P_{C,j}^{s(t)} \approx 0.0$ 이 된다. 이러한 문제는 AASHTO 모델이 선박과 교량이 충돌한 경우를 가정하여 개발된 것이기 때문인데, 본 연구에서는 선행 연구결과(임, 2009a)에서 제안한 5단계 위기수준(Risk Level) 평가방법을 적용하였다. 이 방법은, 예를 들어 위의 식(11)에서 $P_{V,j}^{s(t)}$ 를 계산한 경우, 다음 Table 3과 같이 $P_{V,j}^{s(t)}$ 에 대한 4단계 기준 값을 C_{PV_1} 부터 C_{PV_4} 로 두고, $P_{V,j}^{s(t)}$ 값에 해당하는 1부터 5까지의 위기지수(Risk Index, RI) RI_{PV} 를 위기수준으로 사용하는 것이다. RI_{PV} 가 1인 경우는 '안전함'을 의미하고, RI_{PV} 가 3이상부터는 '주의'를 의미하며, RI_{PV} 가 5인 경우에는 충돌에 임박한 '매우위험' 등을 의미하기 때문에 단순한 숫자를 통해서 위험수준을 쉽게 알 수 있다. 여기서 판전은 4단계 기준 값을 정확하게 구하는 것이다.

Table 3 The four scales and its Risk Index, RI_{PV} (Example)

Range	RI_{PV}	Meaning
$P_{V,j}^{s(t)} \geq C_{PV_4}$	5	Very Danger
$C_{PV_4} > P_{V,j}^{s(t)} \geq C_{PV_3}$	4	Danger
$C_{PV_3} > P_{V,j}^{s(t)} \geq C_{PV_2}$	3	Caution
$C_{PV_2} > P_{V,j}^{s(t)} \geq C_{PV_1}$	2	Watching
$C_{PV_1} > P_{V,j}^{s(t)}$	1	Safety

3.4.2 기준 값 설정

우선, 위의 식(2)의 $P_{A,j}^{s(t)}$ 와 위의 식(6)의 $P_{V,j}^{s(t)}$ 그리고 위의 식(9)의 $P_{G,j}$ 등을 전개하면서 기술한 m_k 개의 변수와 이에 대한 $m_k(l)$ 개의 변수 값들을 조합하면, $P_{A,j}^{s(t)}$ 에 대해서는 CN_{PA} 개의 누적 확률 수를 구할 수 있고, $P_{V,j}^{s(t)}$ 에 대해서는 CN_{PV} 개, $P_{G,j}$ 에 대해서는 CN_{PG} 개의 누적 확률 수를 각각 구할 수 있다. 그리고 CN_{PV} , CN_{PA} , CN_{PG} 등에 대해 각각 25%, 50%, 75%, 97.5%인 위치의 확률 값 $P_{V,j}^{s(t)}(CN_{PV})$, $P_{A,j}^{s(t)}(CN_{PA})$, $P_{G,j}(CN_{PG})$ 등을 구하면 기준 확률 값이 된다(임, 2009a).

Table 4에 $P_{V,j}^{s(t)}(CN_{PV})$, $P_{A,j}^{s(t)}(CN_{PA})$, $P_{G,j}(CN_{PG})$ 등의 최대(Max), 최소(Min), 중앙(Median), 평균(Mean), 표준편차(std), 분산(var.) 등을 나타냈고, Table 5에 $P_{A,j}^{s(t)}$, $P_{V,j}^{s(t)}$, $P_{G,j}$ 등에 대한 기준 확률 값 C_{P_1} 부터 C_{P_4} 까지를 나타냈다.

Table 4 Statistics to the probability set of three factors with the variables m_k with its values $m_k(l)$

Statistics Factors	Max	Min	Median	Mean	std	var.
$P_{A,j}^{s(t)}(CN_{PA})$	$\frac{9.79}{\times 10^5}$	9.44×10^{-9}	$\frac{7.86}{\times 10^7}$	4.55×10^{-6}	$\frac{9.28}{\times 10^6}$	8.61×10^{-11}
$P_{V,j}^{s(t)}(CN_{PV})$	$\frac{5.00}{\times 10^{-1}}$	7.39×10^{-32}	$\frac{4.68}{\times 10^{-7}}$	2.83×10^{-2}	$\frac{8.15}{\times 10^{-2}}$	6.65×10^{-3}
$P_{G,j}(CN_{PG})$	$\frac{1.30}{\times 10^1}$	0.0	$\frac{9.30}{\times 10^2}$	8.14×10^{-2}	$\frac{3.99}{\times 10^2}$	1.60×10^{-3}

Table 5 Probability criteria table to the three factors with four scales

Criteria Factors	C_{P_4}	C_{P_3}	C_{P_2}	C_{P_1}
$P_{A,j}^{s(t)}$	3.06×10^{-5}	4.896×10^{-6}	7.86×10^{-7}	1.47×10^{-7}
$P_{V,j}^{s(t)}$	3.37×10^{-1}	2.62×10^{-3}	4.68×10^{-7}	9.55×10^{-13}
$P_{G,j}$	1.29×10^{-1}	1.16×10^{-1}	9.31×10^{-2}	5.29×10^{-2}

3.4.3 위기지수로 나타낸 선박-교량 충돌 모델

상기 내용을 종합하여 위의 식(11)의 $P_{C,j}^{s(t)}$ 에 위기지수 개념을 도입한 모델 식 RI_{PC} 는 다음 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$RI_{PC} = RI_{PV} \times r_{PV} + (RI_{PA} - 1.0) \times r_{PA} + (RI_{PG} - 1.0) \times r_{PG},$$

$$(RI_{PC} = 5.0, \text{ if } RI_{PC} \geq 5.0) \quad (12)$$

여기서,

RI_{PV} , RI_{PA} , RI_{PG} : 각각 $P_{V,j}^{s(t)}$, $P_{A,j}^{s(t)}$, $P_{G,j}$ 등에 대해서 Table 7의 기준 값으로 평가한 위기지수, r_{PV} , r_{PA} , r_{PG} : 각각 RI_{PV} , RI_{PA} , RI_{PG} 등에 대한 가중치로서, $r_{PV}=1.0$, $r_{PA}=0.25$, $r_{PG}=0.25$.

위의 식(12)에서, RI_{PV} 는 통항 선박의 위치와 침로 등을 이용하여 주 교각과 선박 사이의 충돌위험 수준을 나타내기 때문에 RI_{PA} 및 RI_{PG} 와는 독립적으로 작용해야 한다. 예를 들어, 기상환경이나 선박 크기 등과 관계없이 선박이 충돌 침로를 형성하고 정지거리가 충분하지 못하면 교량과 충돌할 수 있음을 고려해야 한다. 따라서 RI_{PV} 에 대한 가중치 $r_{PV}=1.0$ 으로 정하였고, $RI_{PV} \times r_{PV}$ 의 범위는 1.0~5.0이 된다.

다음으로, RI_{PA} 와 RI_{PG} 에 1.0을 감한 것은, 항행환경이 양호하여 $RI_{PA}=1.0$ 을 나타내고, 선박의 크기가 작아서 $RI_{PG}=1.0$ 임에도 불구하고, 이 둘의 합인 2.0의 위기수준이 RI_{PC} 에 바이어스로 작용하는 것을 방지하기 위한 것이다. 그리고 $r_{PA}=0.25$, $r_{PG}=0.25$ 의 가중치는, RI_{PA} 와 RI_{PG} 가 RI_{PC} 에 미치는 영향의 정도에 관한 보고가 전무하기 때문에 임의로 균등 가중치를 부여한 것이고, 아울러 $(RI_{PA} \times r_{PA} + RI_{PG} \times r_{PG})$ 의 최대 값이 2.0이 되도록 정한 것이다. 예를 들어, 항행환경이 최고 열악한 상황에서 대형 선박이 출현하여 $(RI_{PA} \times r_{PA} + RI_{PG} \times r_{PG})=2.0$ 인 경우, 대형 선박의 침로와 정지거리에 대한 위기지수 RI_{PV} 가 비록 1.0이라 하더라도 $RI_{PC}=3.0$ 을 나타내어 만일의 위기상황에 대비하기 위함이다. 아울러 r_{PV} 와 r_{PG} 는 향후 BRMS이 개발된 이후 다양한 현장실험 데이터를 토대로 정확한 값을 산정할 예정이다. 그리고 상기 내용을 종합하면, RI_{PC} 의 범위는 1.0~7.0으로 나타나기 때문에 위의 식(12)에 조건부 ($RI_{PC}=5.0$, if $RI_{PC} \geq 5.0$)를 부가하여 RI_{PC} 의 최대 값이 5.0이 되도록 조정하였다.

4. 모델 평가 및 결과

4.1 모델 평가 방법

우선, 다음 Table 6에 나타난 바와 같이 3,000 GT 선박과 10,000 GT 선박이 다양한 항행환경에서 다음 Fig. 6과 같이 주 교각에 점점 접근하면서 충돌 침로로 향해하는 경우와 정상 침로로 향해하는 경우 등에 대한 네 가지 시나리오를 작성하였다. 그리고 이러한 네 가지 시나리오 각각에 대한 위의 식(12)의 RI_{PC} 계산결과를 분석하여 모델의 유효성을 평가하였다.

Table 6 Scenarios to the 3,000 GT and 10,000 GT

Scenario Number		1	2	3	4						
Ship's Size (GT)		3,000		10,000							
Ship's Course		Col.	Nor.	Col.	Nor.						
Factors	m_k	Values				Values					
	B_R	Vessel=0.6×10 ⁻⁴		0.6×10 ⁻⁴		0.6×10 ⁻⁴		0.6×10 ⁻⁴			
	V_{Hcurr}^i	0.3~1.7 kts		0.3	0.3	1.7	1.7	0.3	0.3	1.7	1.7
	V_{Pcurr}^i	0.0 kts		0.0				0.0			
	R_{TDens}	Low=1.0 Average=1.3 High=1.6		1.0	1.0	1.6	1.6	1.0	1.0	1.6	1.6
	R_{Bend}	1.89		1.89				1.89			
Causation Prob. $P_{A,j}^{s(t)}$	R_{Vis}	Clear=1/100, Mist=1/10, Foggy=1.0		1/100	1/100	1.0	1.0	1/100	1/100	1.0	1.0

R_{Dark}	Day=1/4, Blurred=1/3, Twilight=1/2, Night=1.0	1/4	1/4	1.0	1.0	1/4	1/4	1.0	1.0	
	R_{Wind}	Week=1/3, Average=1/2, Strong=1.0	1/3	1/3	1.0	1.0	1/3	1/3	1.0	1.0
Failure Prob. $P_{V,j}^{s(t)}$	θ_1	0~90(deg.)	0~90	$\theta_2 \sim 90$	0~90	$\theta_2 \sim 90$	0~90	$\theta_2 \sim 90$	0~90	$\theta_2 \sim 90$
	θ_2	0~90(deg.)	0.0	1~90	0.0	1~90	0.0	1~90	0.0	1~90
	μ_θ	0.0(deg.)	0.0				0.0			
	σ_θ	10.0(deg.)	10.0				10.0			
	$\mu_{x_{stop}}$	(6.0×LOA)/2.0 (m)	228.39				350.55			
	$\sigma_{x_{stop}}$	LOA (m)	76.13				116.85			
	x_{stop}	10.0×LOA ~ 0.0×LOA (m)	761.3 ~ 0.0				3505.5 ~ 0.0			
Geometric Prob. $P_{G,j}$	x_B	200 (m)	200				200			
	B_M	Var. (m)	16.14				23.54			
	B_P	15 (m)	15				15			
	LOA	Var. (m)	76.13				116.85			
	μ_x	200 (m)	200				200			
	σ_x	LOA (m)	76.13				116.85			

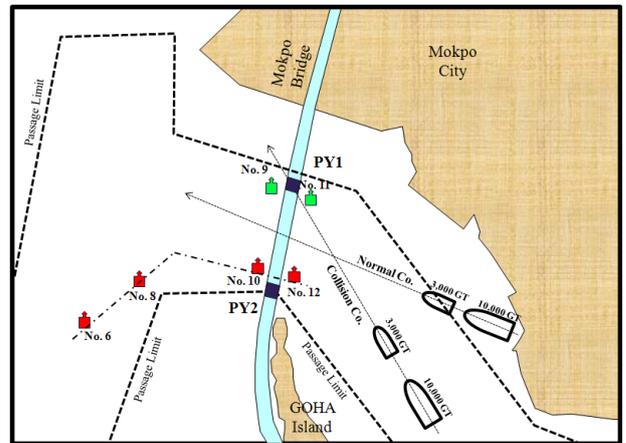


Fig. 6 Vessel track in case of collision course and of normal course described in the scenario No. 1 to No. 4

4.2 모델 평가

Table 6의 네 가지 시나리오에 대한 선박-교량 충돌 위기지수 RI_{PC} 계산결과를 Fig. 7의 (a)와 (b) 및 Fig. 8의 (a)와 (b)에 나타냈는데, Fig. 7(a)부터 Fig. 8(b)까지의 그림 설명은 동일하기 때문에 Fig. 7(a)을 대표로 설명한다. Fig. 7(a)는 Table 6의 시나리오 1번에 대한 시뮬레이션 결과로서, 3,000 GT 선박이 항행환경이 양호한 상태에서 충돌 침로를 유지하는 경우의 선박-교량 충돌 위기지수 RI_{PC} (그림에 'RI_{PC}(Collision Co.)'로 표시)와 정상 침로를 유지하는 경우의 RI_{PC} (그림에 'RI_{PC}(Normal Co.)'로 표시)를 나타낸다. x-축은, 선박 위치가 교량으로부터 선박 전장(LOA)의 9배에 해당하는 거리('X9'로 표시)부터 LOA의 0배(즉, 선박이 교량에 도달함을 의미)에 해당하는 거리('X0'으로 표시)까지를 나타내고, y-축은 위의 식(12)으로 계산한 RI_{PC} 값이다.

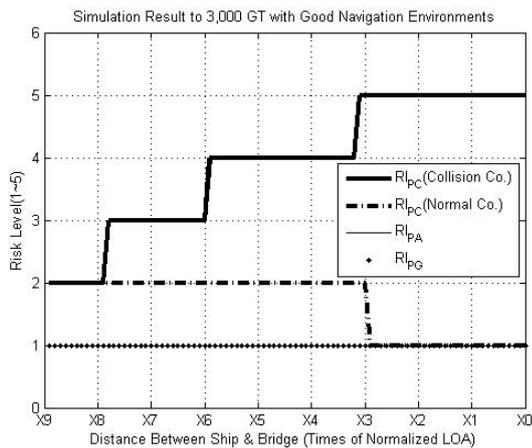
Table 6의 시나리오 1번에 나타난 3,000 GT 선박의 시뮬레이션 결과인 Fig. 7(a)과 시나리오 3번에 나타난 10,000 GT 선박의 시뮬레이션 결과인 Fig. 7(b)를 서로 비교하면서 설명하면 다음과 같다. 시나리오 1번과 3번은 Table 6과 같이 모두 양호

한 항행환경이기 때문에 두 그림 모두 선박의 항로이탈 위험지수 RI_{PA} (그림에 'RI_{PA}'로 표시)는 1.0을 나타내고, 선박 크기에 영향을 받는 교량의 기하학적 구조에 따른 충돌위기 위험지수 RI_{PC} (그림에 'RI_{PC}'로 표시)는 3,000 GT 선박의 경우 1.0, 10,000 GT 선박의 경우 2.0으로 나타났다.

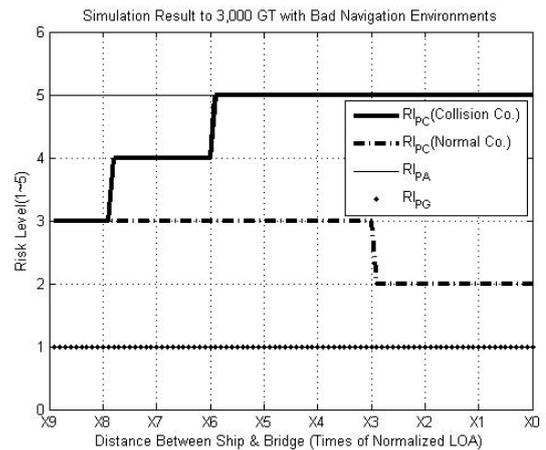
이러한 공통 환경을 기반으로 3,000 GT 선박과 10,000 GT 선박 모두, 'RI_{PC}(Collision Co.)'로 나타낸 충돌 침로인 경우의 RI_{PC} 는, 'X9' 위치부터 단계적으로 증가하다가, 'X3' 위치에 오면, 최대 값인 5.0을 나타낸다. 여기서, 'X3' 위치는 선박의 최대 허용 가능한 정지거리의 평균 $\mu_{x_{stop}}$ ($6.0LOA/2.0$)인데, 이 위치에서 선박이 충돌 회피를 위한 역추진(Crush Astern)을 시작해야 선박-교량 충돌을 방지할 수 있다. 따라서 'X3'의 위치부터 'X0'의 위치까지 RI_{PC} 가 5.0을 나타내는 것은 타당한 결과이다. 반면, RI_{PC}(Normal Co.)로 나타낸 정상 침로를 유지하는 경우의 RI_{PC} 를 보면, 3,000 GT와 10,000 GT 모두 'X9'부터 'X3'까지 2.0 이상을 나타내고, 'X3' 위치부터는 선박-교량 충돌 위험이 해소되기 때문에 1.0에 접근하고 있다.

마지막으로, 열악한 항행환경에 대한 Table 6의 시나리오 번호 2번(3,000 GT)과 4번(10,000 GT)에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)와 같다. 최악의 항행환경에 대한 시나리오 결과이기 때문에 두 결과 모두 RI_{PA} 는 5.0을 나타내고, 선박 크기에 영향을 받는 RI_{PC} 는 3,000 GT 선박의 경우 1.0, 10,000 GT 선박의 경우 2.0으로 나타났다.

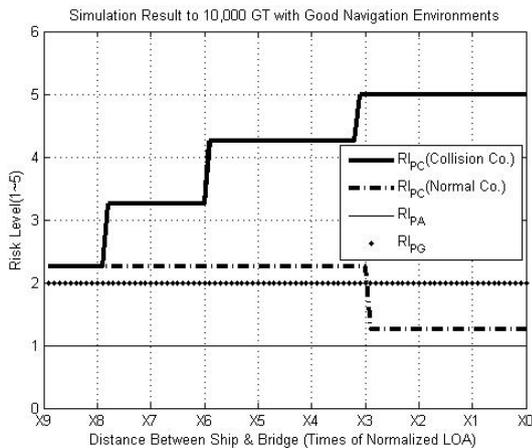
이러한 공통 환경을 기반으로, 3,000 GT 선박과 10,000 GT 선박 모두, 'RI_{PC}(Collision Co.)'로 나타낸 충돌 침로를 갖는 경우의 RI_{PC} 는 'X9' 위치부터 3.0 이상을 나타내고, 'X6' 위치부터 최대 값인 5.0을 나타낸다. 참고로, 위의 Fig. 7에 나타난 양호한 항행환경에서는 선박의 최대 허용 가능한 정지거리의 평균 $\mu_{x_{stop}}$ 와 같은 'X3' 위치부터 5.0을 나타냈으나, Fig. 8의 경우는 열악한 항행환경으로 인하여 'X6' 위치부터 5.0을 나타내고 있다. 반면, RI_{PC}(Normal Co.)로 나타낸 정상 침로를 유지하는 경우의 RI_{PC} 는, 3,000 GT 선박과 10,000 GT 선박 모두 'X9'부터 'X3'까지 3.0 이상을 나타내고, 'X3' 위치부터는 선박-교량 충돌 위험이 해소되기 때문에 2.0으로 감소하고 있다.



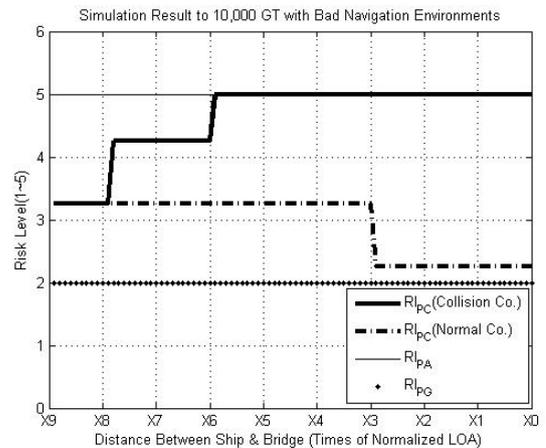
(a) in case of 3,000 GT



(a) in case of 3,000 GT



(b) in case of 10,000 GT



(b) in case of 10,000 GT

Fig. 7 Simulation results to the 3,000 GT(a) and 10,000 GT(b) with scenario No. 1 and No. 3 in good navigation environments

Fig. 8 Simulation results to the 3,000 GT(a) and 10,000 GT(b) with scenario No. 2 and No. 4 in rough navigation environments

4.3 모델 평가 결과

Fig. 7의 (a) 및 (b)와 Fig. 8의 (a) 및 (b)의 네 가지 시뮬레이션 결과를 통해서, 본 논문에서 제안한 실시간 선박-교량 충돌 모델 식(12)의 타당성을 확인하였다.

특히 제안한 모델은, 기상이나 항행환경 등에 기인한 항로 이탈 확률 $P_{A,j}^{s(t)}$ 와 교량과 선박 사이의 기하학적 구조로 인한 선박충돌 확률 $P_{G,j}$ 및 선박의 침로와 정지거리로 인한 선박-교량 충돌확률 $P_{V,j}^{s(t)}$ 등, 세 가지 확률에 대한 1부터 5까지의 위기 지수 RI_{PA} , RI_{PG} , RI_{PV} 등의 합으로 선박-충돌 위험수준을 평가하는 특징이 있다.

이러한 특징은, 기존 AASHTO 모델에서 제안한 선박-교량 충돌 모델과 달리, 실시간 선박 위치를 기준으로 선박-교량 충돌 위험수준을 평가할 수 있고, 선박 운항자 입장에서 바라본 사전 위기평가와 교량 설계자 입장에서 바라본 사후 위기평가 모두를 포함시킨 특징이 있다. 또한, 위기 지수를 도입하였기 때문에 $P_{A,j}^{s(t)}$, $P_{V,j}^{s(t)}$, $P_{G,j}$ 등의 세 가지 요소 중 어느 하나가 영(0)이 되는 경우 최종 결과 $P_{C,j}^{s(t)}$ 가 영이 되는 문제를 해결할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 목포항 항로에 건설되고 있는 목포대교로부터 멀리 떨어져 있는 선박이 점차 교량에 접근함에 따라 발생 가능한 선박-교량 충돌 위기 평가 모델(Real-Time Bridge-Vessel Collision Model, RT-BVCM) 개발에 관하여 기술하였다.

RT-BVCM의 수학 모델은, 항로이탈 확률 $P_{A,j}^{s(t)}$ 과 교량과 선박 사이의 기하학적 구조로 인한 선박충돌 확률 $P_{G,j}$, 선박의 침로와 정지거리를 변수로 하는 선박-교량 충돌확률 $P_{V,j}^{s(t)}$ 등을 도입하여 전개하였고, 이에 대한 위기 지수 RI_{PA} , RI_{PG} , RI_{PV} 등의 개념을 적용하여 개발하였다.

본 연구에서 개발한 RT-BVCM은 기존 AASHTO 설계기준에 나타난 선박-교량 충돌 모델과 달리, 실시간 선박 위치를 기준으로 충돌 위험수준을 계산할 수 있고, 선박이 교량에 접근하기 이전부터 충돌 위험수준을 평가할 수 있는 장점이 있다.

네 가지 시나리오를 토대로 본 연구에서 제안한 RT-BVCM을 평가한 결과, 제안한 RT-BVCM이 목포대교의 선박-교량 충돌위기 평가 모델로 타당함을 확인하였다.

현재 선박제원, 통항환경, 기상환경 등의 실시간 정보를 입수하기 위한 하드웨어 시스템을 개발하고 있는데, 본 연구 결과를 이 시스템에 적용하여 교량 위기관리 시스템(Bridge Risk Management System, BRMS)을 구축한 후, 현장 평가를 수행하여 본 연구에서 미흡한 부분을 수정 보완할 예정이다.

후 기

이 논문은 2008년부터 2010년까지 국토해양부지정 호남지역 Sea Grant 사업단 연구개발사업 과제 지원에 의해 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] 건설교통부 (2007), 현수교 등 특수교량 유지관리체계 조사, pp.15~22
- [2] 국립해양조사원 (2009), 해도 No. 301(2009년 소개정판)
- [3] 목포지방해양안전심판원 (2007), 2007년 8월 해양안전 예보
- [4] 목포지방해양항만청 (2009), 목포항 항만정보 Port-Mis 정보 홈페이지, <http://mokpo.mltm.go.kr>
- [5] 박광현 (2004), 고하-죽교간 교량가설공사(고하대교)의 계획과 설계, (주)유신기술 보고서, pp.1~19
- [6] 이명재, 김홍식, 박진호 (2008), "선박충돌방지공의 계획 및 위험도 분석," (주)유신기술회보, 제14호, pp.44~53
- [7] 이경우 (2008), 수치모델링을 통한 백사장 확보방안 용역 보고서, 목포시, pp.1~163
- [8] 이귀복 (2004), 인천 제2연육교 선박운항 안전성 평가 용역 결과, 인천항도선사, pp.1~7
- [9] 인천대교 홈페이지 (2010), <http://www.incheon-bridge.com>
- [10] 임정빈 (2009a), "상선 운항사고의 양적 위기평가기법 개발," 한국항해항만학회, 제33권 1호, pp.9~19
- [11] 임정빈 (2009b), "해상교량 설계측면과 선박운항 측면을 고려한 새로운 선박-교량 실시간 충돌위기 평가기법 소개: 목포항을 중심으로," 한국항해항만학회 2009공동학술대회 논문집, pp.321~323
- [12] 오션스페이스 (2005), *Ship Collision with Bridge*, 기술보고서, (주)오션스페이스 홈페이지 자료실, <http://www.oceanspace.com>
- [13] 정재용, 김철승, 박성현 (2005), "목포항의 해상교통시스템 설정에 관한 연구," 해양환경안전학회 제11권 제2호, pp.1~8
- [14] 해양수산부 (2007), 항만횡단 해상교량 건설시 기준 및 절차 수립에 관한 연구용역 최종 보고서, 제8장, pp.58~62
- [15] AASHTO (1991), *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, Vol. 1, pp.1~120
- [16] Frandsen A. G., Olsen D., Lund H. T. and Bach P. E. (1991), "Evaluation of Minimum Bridge Span Openings Applying Ship Domain Theory," Transportation Research Records 1313, pp.83~90
- [17] Kunz C. U. (1998), "Ship Bridge Collision in River Traffic, Analysis and Design Practice," Ship Collision Analysis, Edited by Henrik Gluver and Dan Olsen, A. A.

Balkema, Denmark, pp.13~21

- [18] Fujii Y. and Tanaka K. (1971), "Traffic Capacity,"
Journal of Navigation, Vol. 24(4), pp.543~552
- [19] Fujii Y., Yamanouchi H. and Matui T. (1984), "Survey
on Vessel Traffic Management System and Brief
Introduction to Marine Traffic Studies," Electronic
Navigation Research Institute Paper, No. 45, Ministry of
Transportation
- [20] IMO (2002a), MSC 76/8/2, Ship Design and Equipment:
Proposal for the revision of appendix 3 in MSC/Circ. 644
- [21] IMO (2002b), MSC 76/INF.16, Ship Design and
Equipment - Empirical formular for predicting stopping
distance
- [22] IMO (2003), DE 47/21, Revision of the Explanatory
Notes to the Standards for Ship Maneuverability:
Comments to the proposal for the revision of appendix 3
of MSC/Circ. 1053
- [23] Larsen O. D. (1993), *Ship Collision with Bridge*, IABSE,
pp.1~131
- [24] SEABGB (2007), Golden Gate Bridge Collision Illustrates
Need for Improved Vessel Monitoring,
<http://moondogofmaine.blogspot.com>
- [25] Wikipedia (2008), List of Bridge Disaster,
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge_disasters

원고접수일 : 2010년 4월 28일
심사완료일 : 2010년 7월 5일
원고채택일 : 2010년 8월 2일