

목포 연육교 건설에 따른 선박 통항 안전성 평가

양찬수* · 공인영** · 이창민***

*,**,*** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Vessel Traffic Safety Assessment for the Construction of the Mokpo Bridge

Chan-Su Yang* · In-Young Gong** · Chang-Min Lee***

*,**,*** Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering/KORDI, Yuseong PO Box 23, Daejeon, 305-600, Korea

요 약 : 현재 목포 북항과 고하도를 연결하는 목포 연육교의 건설이 추진 중에 있으며, 이 교량은 2009년 말에 완공될 예정이다. 항행수역에 건설되는 교량에 대해서는 선박 운항 측면에서의 안전성 평가가 필수적이지만, 아직 이에 대한 구체적인 지침이 마련되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는, 목포 연육교 평면 배치 계획에 대한 선박 운항 측면에서의 평가 절차를 소개하고, 교량의 계획 단계에서부터 고려되어야 하는 사항들에 대해 검토하였다. 교량의 주경간 등 전반적인 배치 계획에 대한 평가를 위해, 대상 해역에 교량이 건설된 상황을 설정하여 실시간 시뮬레이션(real time simulation) 및 배속 시뮬레이션(fast time simulation) 등의 운항 시뮬레이션을 실시하였다. 이로부터, 선박과 교각과의 충돌 위험도를 추정하기 위해, 항로상에서의 선박의 항행 궤적 분포는 정규분포를 따른다는 가정 하에 통계적 분석을 수행하였다.

핵심용어 : 교량, 주경간(主徑間), 실시간 시뮬레이션, 배속 시뮬레이션

Abstract : A bridge which connects Mokpo North Harbor and Goha Island is going to be constructed until 2009. For the bridges being built in the navigable water area, it is indispensable to carry out vessel traffic safety assessment from the viewpoint of shiphandlers, however, there exist no specific guidelines for the necessary conditions which the bridge designers can rely on.

In this paper, traffic safety assessment procedures for the layout of the bridge are briefly introduced, and the conditions which should be taken into account at the initial design stage of the bridge are surveyed. For the safety assessment of the bridge design, ship navigation simulations, such as RTS(real time simulation) and FTS(fast time simulation), are carried out, the results of which are statistically analysed to estimate the probability of collision between the ship and the pier of the bridge.

Key words : bridge, main span, real time simulation, fast time simulation

1. 서 론

건설교통부의 통계에 따르면, 연도교 10개를 비롯한 연육교 12개(총 연장: 약 17km)의 교량이 연안의 항행 수역에 건설되었다(www.moct.go.kr) (Fig. 1). 그 외에 육지 사이를 연결하는 고속국도인 서해대교(길이: 7,310m, 폭: 63m, 주경간장: 470m)가 있다. 또한, 남해안과 서해안을 중심으로 교량이 계속해서 항행수역에 건설될 것으로 예상되고 있다. 이들 대부분의 교량은 선박의 항행수역에 놓여 있어 선박과의 충돌 위험이 항시 존재하고 있다.

항행수역에 있는 교량을 비롯한 해양 구조물은 대부분의 외력에 견딜 수 있도록 설계되지만, 이론적으로 가능한 모든 하중을 견뎌낼 수는 없다. 선박 운항적 측면에 있어서도, 교량은 위험 요소 중의 하나이며, 선박과 충돌 시 교각의 붕괴와 더불어 육상과 해상에서의 물류 차단뿐만 아니라 많은 인명 피해를 초래할 가능성이 있다(양·공, 2003; Yang, 2003; Lasen, 1993).

목포에서는 육지와 섬을 잇는 연육교 설치를 계획하고 있다. Fig. 2는 목포항의 항로와 지리적 배치상황을 나타내고 있으며, 여기에 2009년까지 건설될 예정인 목포연육교(이하 목포대교라 한다)의 위치를 삽입하였다. 목포대교의 조감도 및 교량과 항로와의 구성요소를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다(구성요소에 관해서는 庄司(1991) 참조). 교량설치 예정지는 고하도의 북단부근(용머리 좌측)과 목포 북항 주변을 연결하는 해역이다. 이 교량은 앞으로 고하도 남서방향에 개장되는 신의항(2011년까지 단계별 개발)의 화물 수송을 담당하게 될 것이다(목포지방해양수산청, 2003).

항행수역에 건설되는 교량에 대해서는 선박 운항 측면에서의 안전성 평가가 필수적이지만, 아직 이에 대한 구체적인 지침이 마련되어 있지 않은 실정이다. 이에 우리나라에서는 관련 당사자들이 주어진 조건에 대해서 당시의 정치, 경제, 사회, 문화적 상황을 고려하여 상대적인 교량건설의 선박 운항 안전평가를 수행하고 있는 실정이다.

* 대표저자: 양찬수(정회원), yangcs@kriso.re.kr, 042)868-7276

** 중신회원, iygong@kriso.re.kr, 042)868-7261

*** 정회원, cmlee@kriso.re.kr, 043)868-7263

목포대교 건설에 있어, 대상 교량의 주경간장은 500m로 주어졌다(Fig. 4의 S). 본 연구에서는, 목포대교 평면 배치 계획에 대한 선박 운항 측면에서의 평가 절차를 소개하고, 교량의 계획 단계에서부터 고려되어야 하는 사항들에 대해 검토하였다. 교량의 주경간 등 전반적인 배치 계획을 평가하기 위해, 대상 해역에 교량이 건설된 상황을 설정하여 실시간 시뮬레이션(real time simulation, RTS) 및 배속 시뮬레이션(fast time simulation, FTS)의 운항 시뮬레이션을 실시하였다. 이로부터, 선박과 교각과의 충돌 위험도를 추정하기 위해, 항로상에서의 선박의 항행 궤적 분포는 정규분포를 따른다는 가정 하에 통계적 분석을 수행하였다. 이 결과로부터, 주어진 주경간장과 교량의 위치에 대한 선박운항 안전성의 향상을 위한 대안을 제시하고자 한다.

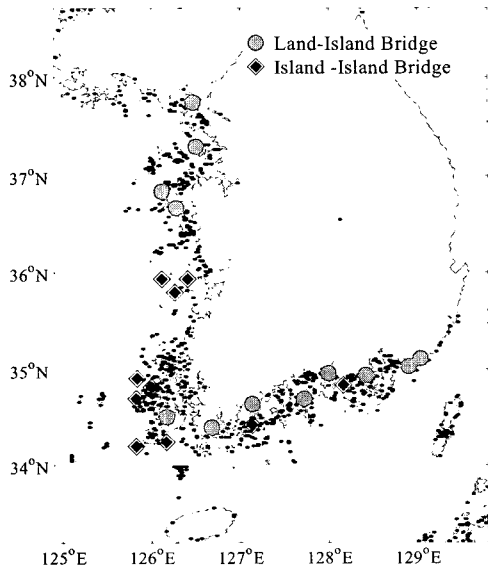


Fig. 1 Status of bridges in navigational waters as of 2002.

2. 교량의 설치단계별 선박 운항적 측면에서의 고려사항

선박과 교량의 충돌의 문제를 다루기 시작한 것은 1983년에, 국제교량구조공학협회(International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE)와 미국 선박충돌에 관한 위원회의 활동에 의해서 이루어졌다. 그 후, 미국도로교통안전협회(American Association of State Highway and Transportation Officials, 이하 AASHTO라 한다)는 선박 통항과 교량사이의 관계에 관한 연구를 통해, 고속도로 교량의 선박충돌사고에 대비한 설계 안내서(Guide Specification-1991)를 채택하였다(AASHTO, 1991). 이 설계 이론에서, 교량의 일반적인 설계는 선박이 교량과 충돌하여 인명 손실 등 막대한 피해로 이어질 위험을 감소시키기 위한 것이어야 한다는 것이다. 또한, 이 위험의 감소는 비용 효율적 방법으로 달성되어야 한다(AASHTO, 1991; Duan · Chen, 1999).

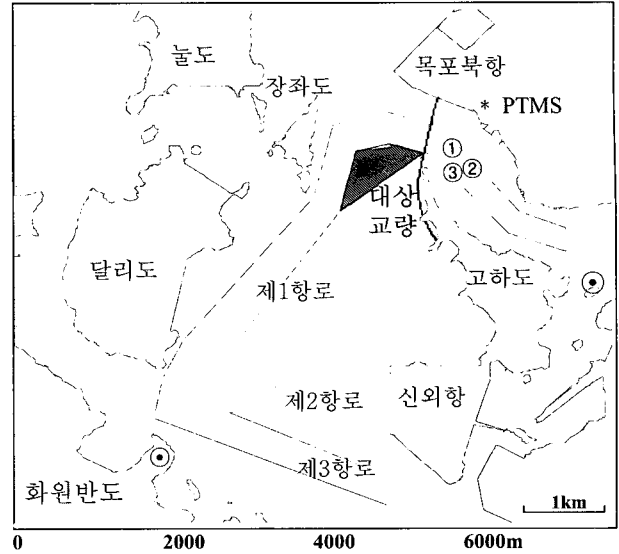


Fig. 2 Map of Mokpo harbor including the Mokpo Bridge tentatively called The symbols(⊙) represent radar sites. The numbered circles and shaded part are the locations of marine accidents around the Mokpo Bridge during the years from 1993 to 2002 and a proposed dredge area.

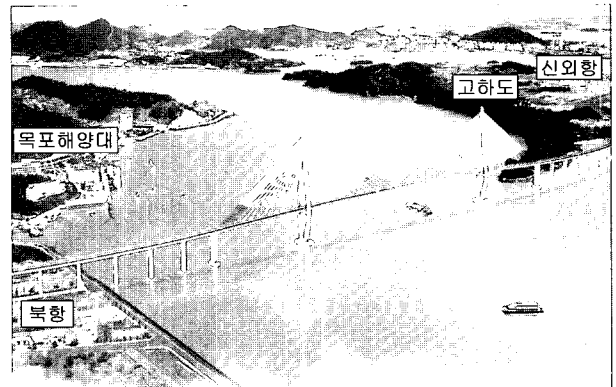


Fig. 3 A "bird's eye view" image of the Mokpo Bridge

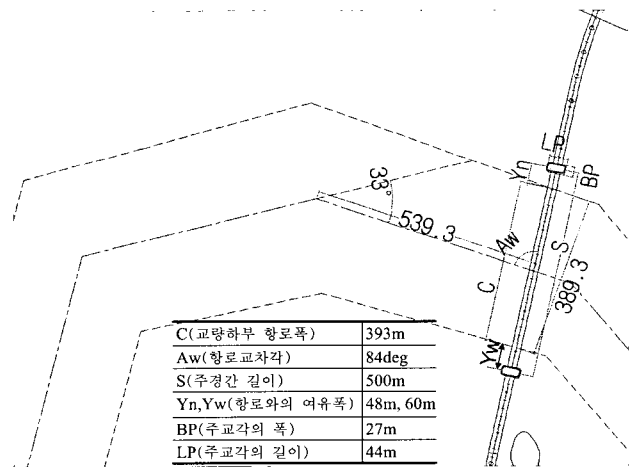


Fig. 4 Channel layout and geometry in the vicinity of the bridge site.

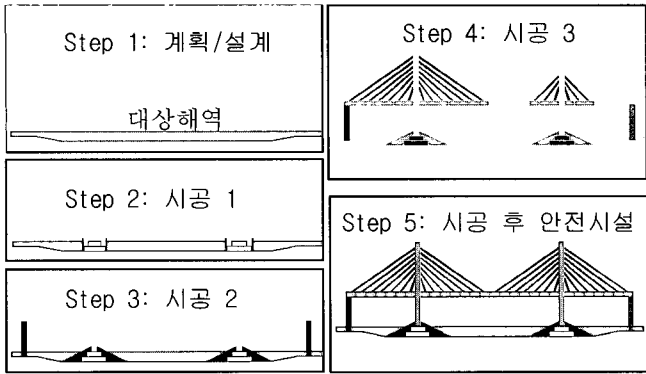


Fig. 5 Construction procedures of bridges with a focus on a navigational safety.

Fig. 5는 선박의 항행 안전의 관점에서 교량 건설 및 운항 안전성의 검토를 위하여 교량의 설치 단계별 상황을 나타낸 그림이다. 항행수역에 교량이 설치되는 경우, 교량을 통과하는 선박은 추가로 지물(地物)의 영향을 받게 되어 항행의 어려움이 증가되는 것이다. 이에 따라, 교량의 초기 설계 및 계획 단계(Fig. 5의 Step 1)에서부터 완공 후의 상황(Fig. 5의 Step 5)에 대해서 선박 통항의 안전성을 검토하여 모든 계획을 수립해야 한다.

참고로, 선박운항관점에서 필요한 교량관련 용어를 부록에 정리하여 두었다. 지금까지의 교량과 선박의 운항에 관한 연구와 보고서를 살펴보면, 주경간장을 교간장, 중앙 경간장, 최대 경간장, 지간장 등으로, 같은 의미에 대해서도 다양한 용어가 사용되고 있는 것을 알 수 있다(건설교통부, 2004; Yang, 2003; 양·공, 2003; 윤 등, 2003; 해양수산부, 2001).

2.1 Step 1: 교량 계획 및 초기 설계 단계

새로운 교량을 건설할 경우에는, 계획 단계부터 교량과 선박의 충돌에 대해 충분히 고려하는 것이 중요하다(AASHTO, 1991; Duan·Chen, 1999; National Research Council, 1983). 그 주된 이유는, 선박충돌의 가능성을 클 경우 교량건설의 총비용이 크게 변동할 수 있기 때문이다. 따라서 선박의 충돌위험을 사전에 조사하기 위해서는 항로 배치와 교량 주변 수역 및 해상교통 특성을 고려하고, 이의 결과를 바탕으로 교량의 종류, 위치 그리고 배치를 결정하여야 한다. 하지만 우리나라의 경우, 이 과정에서의 선박운항관련 전문가의 참여가 거의 이루어지지 않고 있으며, 실질적으로는 사업 수행 계획을 갖고 있는 회사에서 교량의 종류, 위치, 배치를 정한 후 연구기관에 검토를 요청하는 절차를 밟고 있다(건설교통부 익산 지방 국토 관리청, 2003).

우선 교량 건설 주변 해역에서의 해상교통 특성 및 해양사고 발생현황을 검토해보았다. Fig. 6은 1993년에서 2001년 동안 목포항 입항 선박의 척수 및 물동량 변화를 나타낸 것이다. 입항척수 및 물동량이 연도에 따라 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 북항과 목포 신외항의 개발과 더불어, 기존 목포항의 물동량은 2006년 6,372톤, 2011년 4,617톤, 2020년

4,731톤으로 대폭 감소할 것으로 예상되고 있다(건설교통부 익산 지방 국토 관리청, 2003). 또한 입출항 선박의 약 96%는 3,000 GT 미만이다. 따라서 대형화물선은 목포 신외항을 점진적으로 이용하게 되므로 입출항내서에는 대상선박을 50,000 DWT톤급 화물선으로 정하였다. 본 연구에서는 통항 최대 선박으로 55,000 DWT톤급 일반화물선(전장: 218m, 선폭: 32.3m, 만재흘수: 12.9m)을 설정하였다.

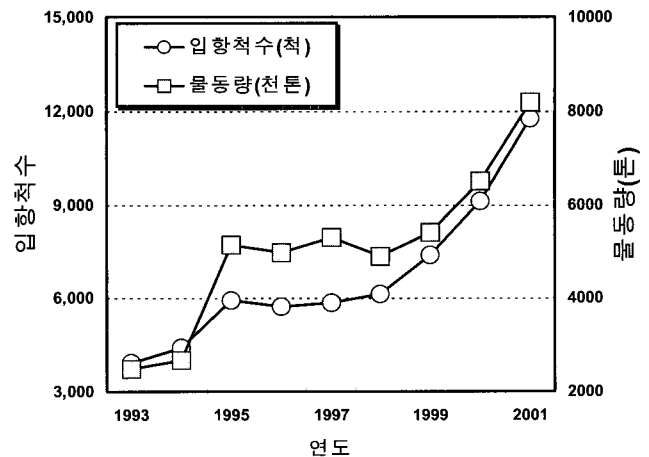


Fig. 6 Temporal changes of vessel arrival in number and cargo handling by Mokpo port (Source: 2002 Statistical Year Book of Maritime Affairs and Fisheries).

지난 10년 동안(1993년~2001년) 목포지방해양안전심판원에서 재결한 해양사고는 총 903건으로, 이 중 항계 내에서는 24건, 교량건설 주변해역에서는 3건의 해양사고(Fig. 2 참조: 충돌 2건(①,②), 화재 1건(③))가 있었다. 이 두 충돌사건은 시계제한 상태에서 발생한 것으로, 항법 미준수가 사고의 주된 원인이었다. Fig. 2의 충돌사고①의 경우, 남서풍 4Kts, 육안 가시거리가 약 300m로 항행금지 규정을 무시하고 출항하여, 오후 3시 45분경 추월과 횡단에 관한 항법을 지키지 않아 충돌하게 되었다. 즉, 이 사고는 대상해역에만 국한되는 원인에 의한 사고는 아닌 것으로 판단되나, 교량 건설 후에는 시계제한에 따른 항행통제가 이루어져야 한다.

교량 주경간의 폭이 선박 길이의 3배 이하인 경우에, 그리고, 직진 거리가 선박의 길이의 8배 이하인 경우에 사고의 위험성이 높다는 것은, 교량과 선박간의 충돌사례 분석 조사에서 보고된 바 있다(庄司, 1991). 대상 교량의 주경간장(500m)과 대상선박의 길이(218m, Ls) 비(S/Ls)는 약 2.3이며, 교량통과 전의 직진거리(입항시 540 m, 출항시 940 m) R과 대상선박의 길이비(R/Ls)는 입출항시 각각 2.5, 4.3의 값을 가진다. 이로부터 일반적인 교량 설계 기준인 S/Ls값이 3.0 이상, 혹은 R/Ls 값이 8.0 이상인 조건을 모두 만족시키지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한, 제원에 의하면, 입항의 경우가 출항의 경우보다 상대적으로 어려운 조건임을 알 수 있다. 이러한 제원만

으로 판단하자면, 대상 해역에 주경간장 500m인 교량이 건설 될 경우, 안전하게 입항할 수 있는 최대 크기의 선박은 전장 약 167m(약 20,000 ~ 30,000 DWT급 일반화물선) 이하의 선박으로 추정된다.

Fig. 4에서와 같이 교량은 125도 이상의 대각도 번침이 요구되는 항로상에 놓이도록 되어 있다. 이로 인해 발생할 수 있는 조종의 어려움을 감소시키기 위하여, Fig. 2의 빗금부분 해역에 대한 준설을 통해 항로폭을 확장할 계획이다.

목포항의 항만 교통 정보 서비스 시스템(Port Traffic Management Service, 이하 PTMS라 한다)은 유달산의 아래 남서쪽에 위치하고 있으며(Fig. 2), 몽하도, 화원반도, 외달도에 설치된 레이더(Fig. 2의 '㉠' 위치)의 정보에 주로 의존하여 선박운행 지원 서비스를 실시하고 있다. 그러나 PTMS 현황 조사 결과, 목포대교 주변 해역은 레이더 음영(陰影)수역에 들어가기 때문에 PTMS의 지원을 받기 어려운 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같은 사장교의 배치계획을 바탕으로 형하고(Vertical Clearance)와 항로폭(가항수역 폭)을 평가하였다. 이 장에서는 형하고의 내용을 소개한다.

형하고는 기준수면과 교량 최하면과의 수직거리이며, 선박 통행을 위해서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{형하고} = \text{통항선박의 높이(최대 마스트높이)} + \text{여유량} \quad (1)$$

통항 선박은, 이 수역을 항행하는 최대 크기 선박의 경하 상태를 고려한다. 여유량은 파랑에 의한 선체상하운동, 이상 조위에 대한 수위의 여유량, 선체 트림의 영향, 조선상의 심리적 영향이 포함된다. 일본의 경우, 대형 교량의 경우 이 여유량은 2m 정도로 하고 있다(庄司, 1991). 기준 수면은 약최고고조면으로 약 0.5m 이고, 최대 마스트높이는 46.0m(6만총톤급 자동차 운반선)이다. 이의 결과, 형하고는 53m로 하였다.

하지만, 우리나라의 경우 교량의 위치를 결정하는 중요한 요소 중의 하나는 지역사회의 문화와 전통의 이해에 있다. 목포의 고하도는 임진왜란 때 이충무공에 의해 전략지로 활용되어 왜적의 침투를 막아낸 곳으로서 이를 기념하기 위해 이충무공기념비(지방유형문화재 39호)가 서 있으며, 목포의 유달산과 함께 충무공의 전설적 일화와 호국 열이 서린 섬이라고 할 수 있다. 즉, 이와 같은 지역주민의 정서적 배경을 고려한 교량설계가 중요한 변수이었다. 따라서 1997년부터 시작된 두 번의 타당성 조사 용역 결과(목포시, 1997; 기획예산처, 2000), 해저 터널안은 교량건설보다 약 2.6배의 공사비 소요가 예상되고, 다른 교량 노선들은 용머리와 고하도를 가로지르기 때문에 최종적으로 용머리를 우회하는 노선이 선정되었다.

2.2 Step 2-4: 시공 단계 1-3

Fig. 5의 Step 2에서 4는 교량의 건설 작업 과정의 예를 나타내고 있다. 교량의 건설 공사 기간 중에도, 공사로 인한 항로의 추가적인 폐쇄는 거의 없으나, 교량의 주교각 기초부 설

치 공사 및 상감판의 연결 시 단기간에 걸쳐 일부의 추가적인 해역 점유가 발생할 것으로 예측된다.

따라서, 공사 기간 중에도, 대형선박의 운항이 예상되는 경우에는, 교량 건설 해역 부근에서 대형 선박 간에 조우가 발생하지 않도록 PTMS 등을 이용하여 관제를 수행할 필요가 있다.

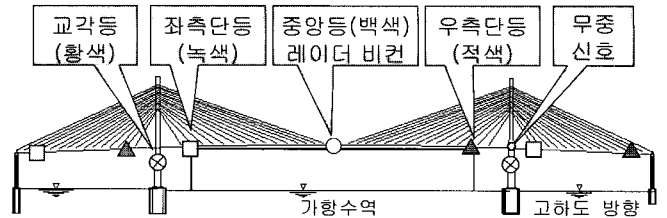


Fig. 7 Installation example on a bridge to aid navigation.

2.3 Step 5: 시공 후 안전시설

교량 건설 후의 안전대책은 방호 대책(庄司, 1999)과 예방 대책이 있다. 방호 대책은 교각 주위에 설치하는 충격완화 장치를 말하며, 예방 대책은 항로표지와 PTMS 등 다양한 형태로 항행환경 정보를 제공하고 안전을 지원하는 것이다.

선박이 교각에 충돌하는 상황을 방지하기 위한 예방대책으로는, 교량과 항로상의 항로표지, 다양한 형태의 새로운 항행 규정의 도입, PTMS 등의 선박 관제 시스템의 시행 등이 포함된다. 항로표지로는, 교량등과 같은 등화, 전파표지, 음향표지, 주간 시각표지 등이 있을 수 있다. Fig. 7은 목포대교에 대한 예방대책의 예를 보여주고 있다. 교량등으로서는 중앙등, 측단등, 교각등 등이 있으며, 주간에도 그 식별이 용이하도록 교량표(Bridge Mark)와 함께 표시할 필요가 있다. 이를 기반으로 교량 건설 후의 상황에 대한 시뮬레이션의 수행을 통해 안전성 향상방안을 검토하여야 한다.

목포 PTMS의 기능을 강화하고, 레이더 음영수역에 대한 대처하기 위한 방안은 장좌도(교량의 서쪽방향 섬)에 레이더와 CCTV를 설치하여 교량하부 통항 선박의 물류추적 장애를 해결하도록 하여야 한다. 또한, 대형선의 교행이 이루어지지 않도록 선박운항관리가 필요하다.

3. 배속 시뮬레이션 및 분석

배속 시뮬레이션과 실시간 시뮬레이션을 통해 주경간 및 교각의 위치 등 교량 건설계획의 타당성을 선박 운항 관점에서 검토하였다. 배속 시뮬레이션을 통해 대상해역의 조류, 바람이 선박에 미치는 영향을 분석하여, 실시간 시뮬레이션 시나리오 자료로 활용되었다.

3.1 대상 해역의 항행환경 모델링

목포지방 기상대의 자료(1992년~2001년)에 의하면 대상 해역의 연평균 풍속은 4.1m/sec, 최대풍속은 21.4m/sec이다. 본 연구에서는 선박 출항통제 기준 및 도선사협회 목포지회의 의

건 등을 고려하여, 일반적으로 폭풍주의보가 발효되어 선박 운항이 어려워지는 풍속 30kts를 바람의 최대 풍속으로 설정하였다. 조류분포는 대조시의 창조 및 낙조류 분포를 시뮬레이션 시스템에 입력하여 사용하였다. Fig. 8은 최강 창조류 분포도를 도시한 것이며, 조류는 전반적으로 항로방향으로 흐르며, 고하도 북단 주변에서 상대적으로 강한 유속이 나타나고 있다.

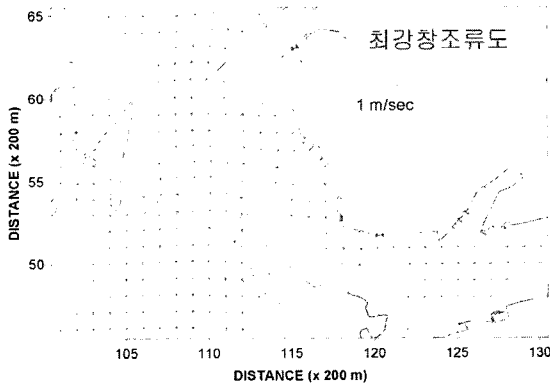


Fig. 8 Channel layout and geometry in the vicinity of the bridge site.

Table 1 Scenario of Fast Time Simulation

입출항	바람		조류
	풍속	풍향	
입항 출항	0 - 30 (5 노트 간격)	N - NW (45도 간격)	정조 강창조 강낙조

배속 시뮬레이션은 Table 1과 같이 336가지 경우의 조합에 대하여 수행되었다. 이러한 배속 시뮬레이션은 고도의 판단 능력을 요구하는 인간의 조선 행위에 대한 재현이 어렵다는 단점이 있는 반면, 인간의 판단을 대신한 자동 운항 알고리즘에 의해, 주어진 상황에 대한 고속의 연산이 가능하여 상대적으로 매우 많은 경우에 대한 시뮬레이션이 가능하다는 장점이 있다(공 등, 2001).

3.2 배속 시뮬레이션 결과

Fig. 9와 Fig. 10은 55,000 DWT 일반화물선의 입항 및 출항 배속 시뮬레이션시의 궤적 분포를 각각 도시한 것이다. 장좌도 남동측 해역에서, 입출항 궤적 모두 상대적으로 넓은 분포를 보이는 것은, 그 해역에서의 상대적으로 강한 조류에 기인한 것으로 판단된다(Fig. 8 참조). 또한, 입항 시 교량 통과 직전에 보이는 궤적의 분포는, 선박의 선회가 시작되기 이전의 궤적 분포가 영향을 미친 것으로 판단된다.

입출항시, 모든 풍향과 풍속에 대하여 타 사용량(정조시)은 큰 변화를 보이지 않았으나, 입항 시에 바람의 영향이 상대적으로 강하였다(그림 생략). 입항 시에는, 서풍(W), 남서풍

(SW)이 타 사용량을 증가시키며, 북동풍(NE), 동풍(E) 등은 선박의 선회를 도와, 풍속이 증가하면서 타 사용량이 오히려 감소하는 현상을 보였다. 출항 시에는 바람의 영향이 그리 크지 않았다.

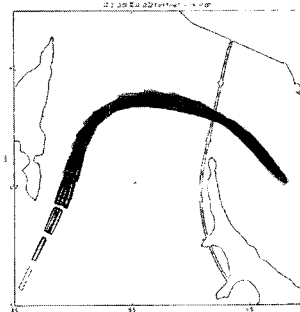


Fig. 9 Trajectory of incoming simulation

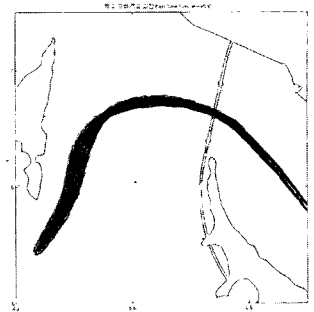


Fig. 10 Trajectory of outgoing simulation

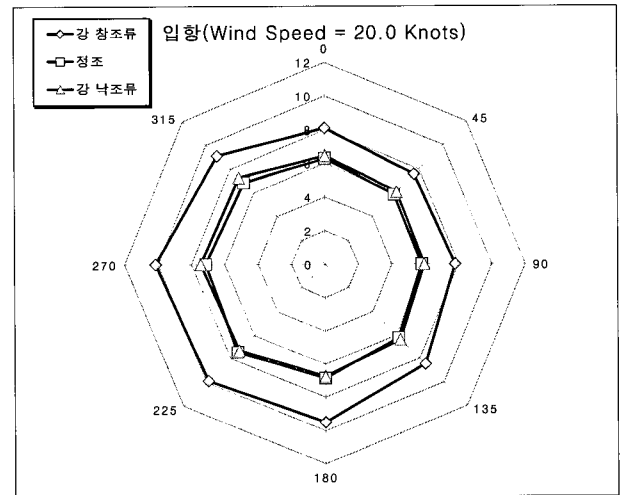


Fig. 11 Average rudder angle used(Inbound condition, Wind speed of 20 Knots)

Fig. 11과 Fig. 12는 조류가 입출항 선박의 운항에 미치는 영향을 파악하기 위해, 타 사용량 변화를 조류 조건과 풍향, 풍속을 변수로 해서 극선도로 도시한 것이다. 입항 시에는 창조류가, 출항 시에는 낙조류가 각각 선박의 타 사용량을 전반적으로 증가시키고 있음을 알 수 있다. 또한, 입항시의 창조류의 영향이 출항시의 낙조류의 영향보다 큰 것을 알 수 있다. 입항 시에는, 남풍(S), 남서풍(SW), 서풍(W), 북서풍(NW) 계열의 강한 바람이 창조류와 동시에 존재할 경우에, 타 사용량이 많이 증가하는 등, 입항시의 선박운항 난이도를 증가시킬 수 있는 조건임을 보여주고 있다. 출항 시에는 조류의 영향이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

4. 실시간 시뮬레이션 및 분석

실시간 시뮬레이션에서는, 항로폭, 즉 주경간장에서 교각폭

(BP, Fig. 4)을 뺀 가항수역폭에 대한 선박통항 안전성 평가를 수행하였다.

4-8분간은 최대 타각(35도)을 사용하고 있으며, 그 동안에는 선박 입장에서서는 더 이상의 제어 여유를 가지고 있지 못하였다.

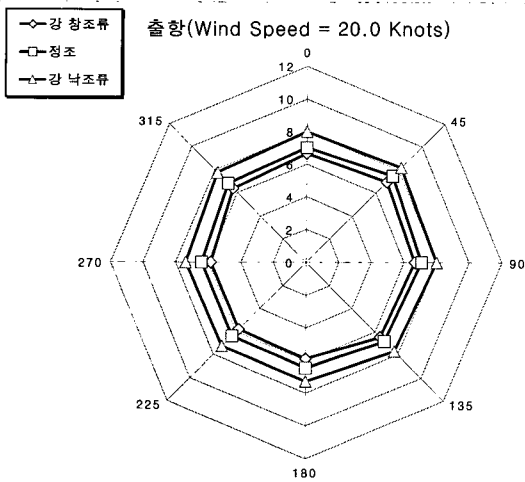


Fig. 12 Average rudder amount used(Departure, Wind speed of 20 Knots)

대상 선박이 여러 가지 항행 환경 하에서 입항 및 출항하는 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 대상 해역에서의 해상/기상 조건 등 각종 상황을 변화시키면서, 총 60 가지(입항 28, 출항 32) 경우에 대한 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 3장의 배속 시뮬레이션 분석 결과를 바탕으로, 바람(20~30kts)과 조류(강창조와 강낙조)의 조합이 선박 운항에 불리하게 작용하는 경우를 중심으로 실시간 시뮬레이션 시나리오를 구성하는 등, 악조건 위주로 실시간 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 중에는 예선을 사용하지 않았고, 교량 부근에서 타 선박과 조우(遭遇)하는 상황이 발생하지 않도록, PTMS 등에 의하여 관제를 수행한다고 가정하였기 때문에 대상선박은 단독으로 교량을 통과한다고 가정하였다. 하지만 추가로 소형선과의 교행상황에 대해서도 시뮬레이션을 실시하여 검토하였다.

장좌도와 고하도 사이의 항로 굴곡부 남단 해역은, 준설이 진행 중이기 때문에, 본 해역이 준설되면 55,000 DWT급의 일반화물선도 본 해역을 이용할 수 있을 것이다. 시뮬레이션 시에는 이러한 사항을 고려하여, 선박 운항자가 필요하다고 판단하는 경우에는, 본 해역에서도 선박이 운항할 수 있도록 대상 해역의 수심을 설정하였다.

Fig. 13은 실시간 시뮬레이션 장면을 나타낸 것이고, Fig. 14와 Fig. 15는 55,000 DWT 일반화물선의 입항 및 출항 실시간 시뮬레이션시의 궤적 분포를 각각 도시한 것이다. 입출항시 모두 선박 운항 궤적이 상당한 영역에 걸쳐 분포되어 있는 현상을 볼 수 있다.

교량 하부를 포함하여 출항보다 입항의 궤적이 더 넓게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이는 배속 시뮬레이션 결과 분석에서 예측된 바와 같이, 입항시의 난이도가 출항시의 난이도보다 더 높음을 의미한다. 입항 선박이 선회하고 있는 동안의 약

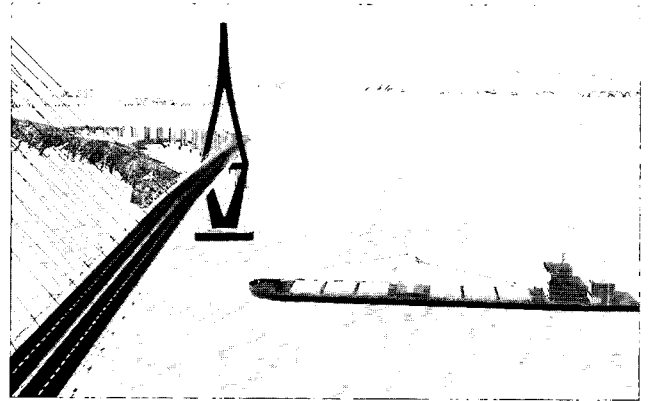


Fig. 13 An Example of real time simulation scene.

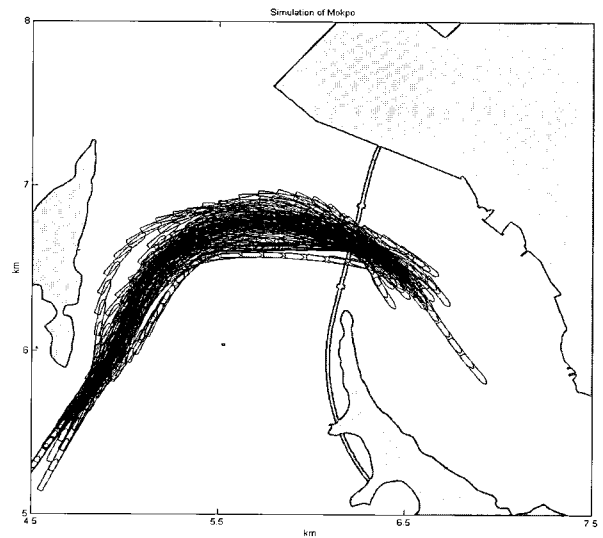


Fig. 14 Trajectory of incoming simulation: RTS

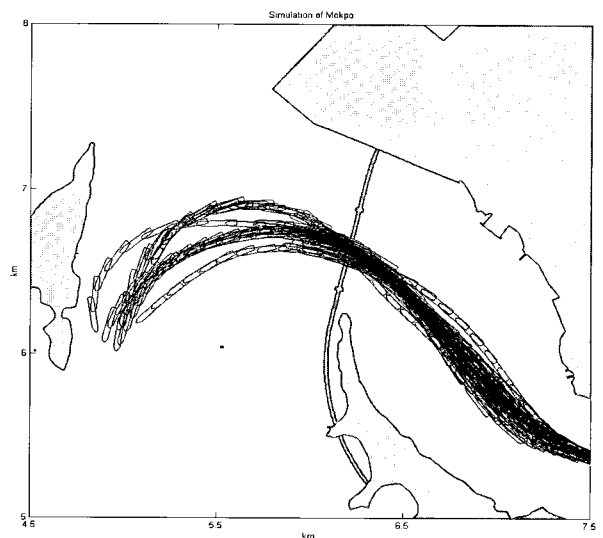


Fig. 15 Trajectory of outgoing simulation: RTS

출항 시에는, 교량 통과는 별 문제가 없으나, 타 사용시점을 놓칠 경우 장좌도에 선박이 근접하는 문제가 발생할 소지가 있음을 알 수 있다.

선박이 항로상을 통항하는 경우, 어떤 항로 단면에서의 선박의 항행 궤적의 분포는 정규분포(Normal Distribution)를 따르는 것으로 알려져 있다(Witt, 1981; 藤井 등, 1981; Elzinga · Bogaerts, 1984; Gluver · Olsen, 2001). 본 연구에서는, 선박의 항행수역에 놓이는 교량에 대한 선박의 충돌 위험 분석을 위해 위의 가정에 근거한 통계적 분석 기법을 사용하였다.

55,000 DWT급 일반화물선이 단독으로 교량을 통과하는 경우, 교량을 통과하는 순간의 위치는 이들의 평균 이격 거리를 중심으로 정규분포를 한다고 가정하였다. 위의 가정을 사용하면, 정규분포의 누적 확률분포 함수를 이용하여, Fig. 16에서와 같이 주교각의 두 끝단(PY1, PY2)과의 충돌 확률을 추정할 수 있다.

항로상의 특정 단면에서의 선박 항행 궤적의 폭 방향 분포 확률은, 다음과 같은 확률밀도 함수로 표현되는 정규분포로 나타낼 수 있다.

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

여기서 x : 기준점으로부터 선박 중심의 이격 거리

μ : x 값의 평균

σ : x 값의 표준편차

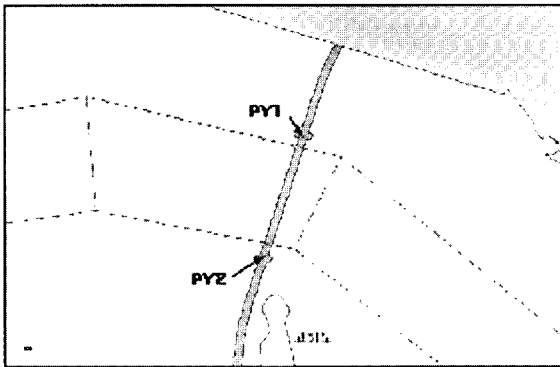


Fig. 16 Locations of reference points (PY1, PY2)

Table 2 Collision probabilities at the locations of PY1 and PY2

주경간장 (m)	확률(PY2, %)	확률(PY1, %)	이동시 평균 (북쪽으로 24m)
350	0.298	0.939	0.539
400	0.082	0.298	0.159
450	0.020	0.084	0.042
500	0.004	0.021	0.01
550	0	0.004	0
600	0	0	0

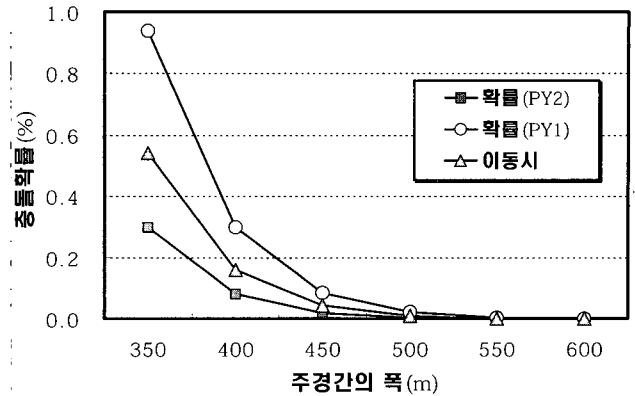


Fig. 17 Collision probabilities at the locations of PY1 and PY2

정규분포의 확률은 $(\mu - 2\sigma)$ 에서 $(\mu + 2\sigma)$ 의 범위에 전체의 95%, $(\mu - 3\sigma)$ 에서 $(\mu + 3\sigma)$ 의 범위에 전체의 99%가 포함된다. 따라서 x 를 기준화한 z 에 대한 표준정규분포의 식을 사용하여 충돌확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(\geq z) = 0.5 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp -\frac{1}{2}(z)^2 \quad (3)$$

Table 2와 Fig. 17은, 원래 설계의 교각노선에서 교량 주경간의 폭이 350m에서 600m까지 변화할 때, 입출항시 선박이 주교각의 중앙 끝단(PY1, PY2)에 충돌할 확률을 Table과 그래프로 나타낸 것이다. Table에서 0은 확률이 0.001% 미만임을 의미한다. 입출항시 북측 교각(PY1)에의 충돌확률이 남측 교각(PY2)에의 충돌확률보다 큰 것으로 나타났다.

입항과 출항에 대하여 각각 충돌확률을 비교해보면, 입항시의 충돌확률이 출항시의 충돌확률보다 큰 것으로 분석되었으며, 입항 시에는 북측 교각(PY1)에의 충돌 확률이 남측 교각(PY2)에의 충돌 확률보다 커지는 것으로 분석되었다. 선박이 교각에 충돌할 가능성이 있는 가장 높은 확률은, 입항시 북측 교각에 대한 충돌 확률인 0.154%이다. 이 값은, 네덜란드 응용과학연구소(Netherlands Organization for Applied Scientific Research, 이하 TNO라 한다)에서 권장하는 항로침범 확률인 0.1%보다 다소 높은 값이기는 하지만, 55,000 DWT급 대형선박의 실제 입출항 예상 빈도, 표본 추출을 위한 실시간 선박운항 시뮬레이션 시 악조건 위주의 시나리오 설정, 대상선박의 조종성능을 불량하게 설정한 것 등을 고려한다면, 실용적으로는 충분한 안전성을 보장하고 있다고 판단된다.

이로부터 교각의 위치를 현재 계획 위치에서 북쪽으로 약 24m 정도 이동하는 것이 충돌확률을 보다 감소시킬 수 있는 것으로 추정되었다. 24m 이동시의 교각에 대한 평균충돌확률은 Table 2와 Fig. 17에 나타내었다. 다음과 같이 분석 결과를 정리하였다.

- 1) 주경간의 폭이 넓어질수록 충돌 확률은 급격하게 감소한다. 하지만, 주경간의 폭이 500m를 넘어서면, 충돌확률의 감소 추세는 그리 뚜렷하지 않다.

- 2) 고하도 복단을 중심으로 선회하여 출입항하기 때문에, 교각에의 충돌확률은 출항할 때보다 입항할 때가 더 높다.
 - 3) 입항할 때는, 남측 교각보다 북측 교각에의 충돌확률이 더 크다.
 - 4) 주경간장 500m인 목포대교의 교각을 전체적으로 현재 위치에서 24m 북측으로 이동하면, 양측 교각에 대한 평균 충돌확률은 0.01% 정도의 값을 가지는 것으로 분석되었다.
- 추가로, 길이 50m 이내의 소형 선박과의 교행 시 측경간을 이용하여 입출항하는 것을 검토한 결과, 불가능하지는 않지만 다소 위험이 존재하는 것으로 판단되었다. 따라서 소형선박이 부득이 대형선박과 동시에 운항할 수밖에 없는 경우에는, 측경간을 이용하기보다는, 선속을 조정하여 시차를 두고 교량을 통과하도록 유도하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 목포항 목포대교에 대해서 선박 운항자적 관점에서 고려해야 될 사항을 검토하고, 교량에 대한 안전 통행을 위해 필요한 제안을 내 놓았다. 다음은 주요 결과를 정리한 것이다.

- 1) 교량의 건설 과정에 있어서, 선박운항적 측면의 고려사항을 검토하였다. 교량의 건설 계획단계에서부터 선박운항전문가의 참여가 이루어지지 않고 있기 때문에, 정해진 교량 위치 및 각종 제원을 가지고 평가하는 실정이다. 따라서, 획단계에서부터 참여할 수 있도록 하는 것이 교량과 선박의 충돌을 방지하기 위한 첫걸음이라고 본다.
 - 2) 대상해역에서 운항하는 55,000 DWT급 일반화물선(만재상태)에 미치는 바람의 영향은, 풍속보다는 풍향의 영향이 강한 것으로 분석되었다. 입항시, 남풍(S), 남서풍(SW), 서풍(W), 북서풍(NW) 계열의 강한 바람이 강한 창조류와 동시에 존재할 경우에는, 선박의 운항 난이도가 많이 증가하는 것으로 분석되었으며, 출항 시에는, 특별히 조류의 영향이 크게 나타나지 않았다.
 - 3) 충돌확률의 관점에서, 입항 시의 경우가 선박운항에 불리한 조건을 가지는 것으로 판단되었으나, 교각을 현재 위치에서 약 24m 정도 북측으로 이동하면, 입항시 교각에의 전반적인 충돌확률을 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.
 - 4) 주경간이 500m 이상이고, 본선의 단독 운항이 전제될 경우, 즉, 입항 시에는 장좌도 남단에서부터 교량 통과 후 안정적인 침로를 잡을 때까지, 그리고 출항 시에는 목포 해양대학교 전면 해역에서부터 교량 통과 후 장좌도 남단을 지나 선박이 안정적인 침로를 잡을 때까지, 타 선박과 조우하지 않도록 보장된다면, 입출항은 가능할 것으로 판단된다.
- 향후, 충돌확률 분석에 있어서 모평균의 추정과 더불어 표본조사의 정확도를 향상시킬 필요가 있다.

후 기

본 논문의 내용은 해양(연) 해양시스템안전연구소에서 기본

연구사업으로 수행중인 “해양위해도 통합관리시스템 기반기술개발”의 연구결과 중 일부임을 밝힌다. 또한 연구수행에 있어 많은 조언과 도움을 주신 도선사협회 목포지회의 이명식 도선사님과 (주)동강엠텍 조현기 지소장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 건설교통부(2004), <http://www.moct.go.kr>.
- [2] 건설교통부 익산 지방 국토 관리청(2003), 목포시 관내 국도대체 우회도로(고하~죽교) 기본설계보고서.
- [3] 공인영·손남선·조현기(2001), 선박 자동 운항 알고리즘에 의한 선박운항 안전성 평가, 선박해양기술, 32호, pp.1-10.
- [4] 기획예산처(2000), 목포 신외항 진입도로(해저터널) 타당성 조사 용역.
- [5] 목포시(1997), 목포 국도대체 우회도로 예비 타당성 조사 연구.
- [6] 목포지방해양수산청(2003), 해양수산 증장기 발전 계획.
- [7] 양찬수·공인영(2003), 선박과 교량의 상호작용: 일본 오사카항에 있어서 교량과 항행환경 조사, 선박해양기술, 36호, pp.23-29.
- [8] 윤명오·김현종·금종수·성유창(2003), 선박의 교량통행 안전성에 관한 연구, 해양환경안전학회지, 제9권, 제2호, pp.31-37.
- [9] 해양수산부(2001), 인천 국제공항 제2연육교 선박운항 안전성 평가 연구용역.
- [10] 해양수산부(2002), 해양수산통계연보.
- [11] 藤井弥平·卷島勉·原潔(1981), 해상교통공학, 海文堂, p. 204.
- [12] 庄司邦昭(1991), 선박의 항행수역에 만들어지는 교량의 안전대책, 航海, 제108호, pp.26-36.
- [13] 庄司邦昭(1999), 교량에 대한 선박 충돌 사고와 신소재 교각 방호 시설, 日本船長協會「船長」, 제116호, pp.52-68.
- [14] AASHTO(1991), Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C..
- [15] Duan, L. and Chen, W.-F.(1999), Bridge Engineering Handbook, CRC Press, p.2000.
- [16] Elzinga, Th. and Bogaerts, M.P.(1984), A Simulation Study for LNG Transport by GAS Carrier to Eemshaven, Proceedings of MARSIM 84.
- [17] Gluver, H. and Olsen, D.(2001), Survey of Ship Tracks in Fehmarn Belt, 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships, Denmark, pp.13-22.
- [18] Larsen, O. D.(1993), Ship collision with bridges - the interaction between vessel traffic and bridge

structures, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Structural Engineering.

[19] National Research Council(1983), Ship Collisions with Bridges-The Nature of the Accidents, Their Prevention and Mitigation, National Academy Press, Washington, D.C.,

[20] Yang, C.S.(2003), Review of Marine Traffic Flow Studies For Vessel Collision Design of Bridges, 2nd Joint Seminar Korea/Japan on Maritime Safety Assessment, pp. 4-1 - 4-4, Mokpo National Maritime University.

[21] Witt, Franz G. J.(1981), Analysis of Simulated Maneuvers, Proceedings of MARSIM 81, New York.

경간(徑間, Span): 교각상단 중심과 교각상단 중심간 거리.
 주경간(主徑間, Main span): 중앙경간 또는 최대경간이라고도 하며, 주교각에 대한 경간

측경간(側徑間, Side span length): 교각상단 중심과 교각상단 중심간거리

주경간장(主徑間, Main span length): 최대경간장 또는 중앙경간장이라고도 하며 주경간의 길이. 선박의 통항을 위한 가항폭과는 BP(Fig. 4)만큼 차이가 발생. 실질적으로는, 교각 방호시설(충돌방지공 등)을 고려해야하므로 약 2BP정도 차이가 발생.

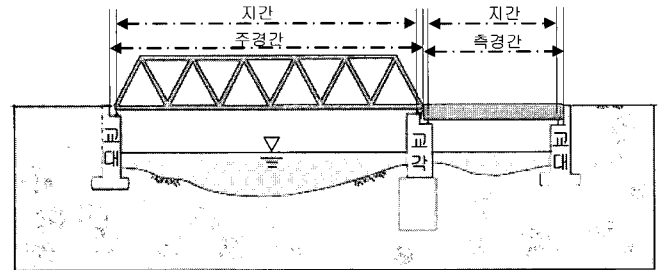
연육교(連陸橋, Land-island bridge): 교량의 가설위치에 따른 분류로 육지와 섬을 연결하는 다리

연도교(連島橋, Island-island bridge): 교량의 가설위치에 따른 분류로 섬과 섬을 연결하는 다리

부록. 용어 정의

이하의 건설교통부의 용어사전을 이용하여 주로 정리하였으며, 아래 그림에서와 같이 경간(徑間)과 지간(支間)의 차이는 있으나, 여기서는 편의상 경간만을 사용하기로 한다. 아래 그림에서와 같이 선박운항관점에서 사용하는 선박운항 폭(가항폭)에 대해서 주경간 또는 지간장은 조금 길다.

교량(橋梁, Bridge): 다리라고도 하며, 도로, 철도, 계곡, 호수, 해안 등의 위를 건너거나, 다른 도로, 철도, 수로, 가옥, 시가지 등의 위를 건너는 경우에 이들 위에 가설하는 구조물의 총칭



원고접수일 : 2004년 4월 28일
 원고채택일 : 2004년 9월 15일