

해상교량의 교통안전성평가에 관한 기초연구

박진수† · 박영수* · 이형기**

A Study on the Traffic Safety Assessment on the Bridge Design

Jin-Soo Park†, Young-Soo Park*, Hyong-Ki Lee**

Abstract : Recently bridge design or construction works on marine traffic route are undertaking in Korean water such as, No. 2 Incheon airport bridge, Busan Namhang grand bridge, Mokpo grand bridge, Geoka grand bridge, and etc.. Unfortunately, however, there is no research on the assessment of the traffic safety on the bridge design so far in Korea. It is the right time to build a guidelines on the assessment parameter of the traffic safety considering the grand bridge design is undertaking. Therefore this study reviews the Korean guidelines on the fairway design, survey the assessment parameters of the traffic safety, suggest the assessment flow and techniques. Consequently this study aims to enhance the traffic safety and reduce the marine accident on the Korean coastal waters.

Key words : Bridge, Traffic safety, Assessment parameter and techniques, Dynamic simulation, Marine traffic flow simulation

1. 서 론

최근 들어 우리나라에도 선박 통항로 상에 해상교량의 설치 또는 설계가 진행중이다. 영종도 신공항과 인천 송도를 연결하는 인천신공항 제2연육교가 설계되어 추진 중이고, 부산의 제2영도대교가 계획 중이며, 목포대교 및 거가대교 등이 건설이 추진되고 있다. 인천신공항 제2연육교는 2001년 한국해양연구원에서 인천신공항 제2연육교에 대한 선박조종시뮬레이션을 실시(한국해양연구원, 2001)하였으나, 한국도선사협회 인천지회에서는

675미터의 교각폭을 1000미터로 확대하고 교각의 위치를 남쪽으로 변경할 것을 요청하는 등 해상교통안전성에 대한 의견이 다르다. 또한 목포대교의 경우 설계상의 교각폭과 교량하부의 높이는 400~500미터 및 53미터이지만 한국도선사협회 목포지부에서는 교각 폭 654미터, 교각하부 높이 58미터를 요구하고 있는 실정이다. 또한 거제도과 가덕도를 연결하는 거가대교의 경우 교각 폭이 230미터와 475미터로 계획 중에 있지만, 마산과 진해를 입·출항하는 선박에 대한 안전성 평가가 선행되어 할 것으로 사료된다. 이처럼 해상교량의 건설

† 책임저자(한국해양대학교 교수), E-mail : jspark@hhu.ac.kr
* 한국해양대학교 전임강사
** 한국해양대학교 조교수

은 선박의 통항안전에 큰 영향을 미친다. 즉 교각 하부 높이에 의해 선박의 높이를 제한함으로써 통항 선박을 제약하고, 교각 폭에 의해 수역이 제약되며, 교각 주변에 난류가 발생하고, 바람이 변하여 선박운동에 영향을 미친다. 또한 조선자의 시계를 제약하고, 레이더 영상, 선박의 통항패턴뿐만 아니라 조선자에게 심리적 영향을 준다. 따라서 해상교량 건설시에는 안전성에 대한 신중한 검토가 필요하다. 그러나 교각 폭과 교각하부의 높이의 증가는 건설비가 증가되기 때문에 업계의 이해가 상충된다. 이제 우리나라에도 해상교통로 상에 대형 교량이 설치 또는 설계 중임을 감안할 때, 해상 교량 설계시에 해상 교통안전을 위해 고려해야 될 요소들에 대한 지침이 필요하다.

이 연구에서는 해상교량 설계시에 해상교통의 안전을 위한 안전성 평가요소와 평가 방법을 제안하기 위해 우리나라의 항로설계기준을 고찰하고, 안전성을 평가하기 위한 요소를 조사하고, 그 평가의 흐름도 및 평가방법을 제안한다.

우리나라의 항로설계기준에서는 “항로를 횡단하여 가교할 경우에는 높이 방향 및 폭 방향에 충분한 여유를 확보할 필요가 있다”라고 명기되어 있고 고려 사항에 대하여는 다음과 같이 열거하고 있다.(한국항만협회, 2000)

- (1) 높이 방향의 여유에 관한 사항
 - ① 선박의 마스트 높이, 선박의 트림
 - ② 조석, 파고
 - ③ 조선자의 심리적 영향
- (2) 폭방향의 여유에 관한 사항
 - ① 탁월풍, 조류, 교각 형상에 의한 조류 변화
 - ② 선박의 속력, 조종 성능, 정지 성능
 - ③ 조선자의 심리적 영향

이러한 기준에서는 고려사항에 대하여 기술하고 있을 뿐 설계기준의 흐름과 구체적인 내용에 대하여는 논하고 있지 않다.

이 연구에서는 우리나라에서 지금까지 연구된 선례가 없는 각 고려 사항에 대하여, 구체적으로 연구해야 할 요소들을 조사하고, 이런 요소의 평가 방법에 대하여 논한다.

2. 안전성 평가요소 및 평가방법

해상교량의 안전성 평가요소로서는 항행환경의 평가요소, 교각폭의 평가요소, 교각하부 높이의 평가요소로 구성된다.

2.1 항행환경

1) 자연환경

해상교량 건설 대상해역의 바람, 조류, 파랑, 파고, 시정 등과 같은 자연환경에 대하여 기존 자료를 조사하여야 한다.

바람은 대상 해역 인근의 기상관측소에서 관측한 연간 풍향, 풍속의 발생 빈도 및 과거에 발생한 최대풍속 및 태풍 발생 시의 최대풍속, 순간최대풍속 등을 조사한다. 이는 교각주변에 있어서의 바람의 변화가 주변에 미치는 영향을 산출하거나 동요시물레이션의 시나리오 설정시의 기초자료가 된다.

파도는 유의파의 풍향·파고 및 풍향·주기별 발생빈도 및 과거에 발생한 최고파고와 주기를 조사한다. 이는 교각주변의 난류의 범위 및 난류가 선박에 미치는 영향을 산출하는 수조실험 및 동요시물레이션의 시나리오 설정시의 기초자료가 된다.

그리고 대상 해역의 수로지, 기존의 조류관측보고서, 조류도에서 유향과 유속을 조사한다. 이는 교각주변의 난류의 범위 및 난류가 선박에 미치는 영향을 산출하는 수조실험 및 동요시물레이션의 시나리오 설정시의 기초자료가 된다.

또한, 대상 해역의 시정을 조사한다. 시정은 선박 통항에 아주 중요한 요소이기 때문에 시정이 제한되는 비율, 안개 지속시간, 계절별 발생 빈도 등을 조사해야 한다.

2) 교통환경

교통환경은 교량건설 대상 해역을 항행하는 항행선박과 그 해역에서 조업하는 어선의 상황을 파악해야 한다. 항행선박의 조사는 교량 건설 대상 주변해역의 항행 실태조사를 실시하여, 통항 선박의 선종별, 선형별 통항 척수, 시간대별 선박 통항 척수, 선종별·선형별 통과 척수 등을 조사한다. 또한 소형선, 어선, 대형선의 현황, 통항 선박의

항적, 교통흐름 등을 조사해야 한다. 조사자료는 해상교통류 시뮬레이션의 항행모델구축, 평가 비교대상에 활용된다. 또한 조사 대상해역에서 조업하는 어선의 상황을 파악해야 한다.

3) 해양사고

대상 해역에서 과거에 발생한 해양사고에 대하여 종류별, 선박의 크기별로 정리한다. 해양사고의 원인을 분석하여 기관 고장, 타기 고장, 조류, 바람, 수면부족이나 경계소홀, 항법위반, 어선의 영향, 시정제한 등에 의한 해양사고를 조사하여 교각과의 충돌 확률을 산출하는 기초자료로 활용한다.

4) 장래 교통환경

건설 대상 주변해역에서 장래 선박교통량에 대하여 기존 데이터를 기초로 정리한다.

장래의 해상교통환경 조사항목은 첫째, 현재 운항 중인 선박치수의 특성을 고려하여 운항될 선박의 치수를 조사하고, 장래에 출현할 최대 선박의 치수를 검토한다. 이는 마스트 높이의 도출 및 동요시뮬레이션의 시나리오 설정시 대상 선형의 기초자료가 된다.

둘째, 교통실태조사 및 해양수산통계연보 등에서 통항 선박의 척수를 조사한다. 이는 해상교통류 시뮬레이션의 기초자료가 된다.

셋째, 교통실태 조사결과를 기초로 현행 중·기점 패턴을 구한 후, 5년, 10년, 20년 등 예상 대상년도의 중·기점 패턴을 구한다. 이는 해상교통류 시뮬레이션의 기초자료가 된다.

넷째, 교통실태조사를 실시한 결과, 각 항만의 입항실적, 항만계획자료에 의해 장래입항척수를 구하고, 항만관리자에 대하여 설문조사를 실시하여 그 결과를 고려한다. 이는 해상교통류 시뮬레이션의 기초자료가 된다.

다섯째, 교통실태조사를 기초로 교량을 통항한 실적 및 입·출항 흘수를 파악하여, 마스트 높이를 추정한다. 현재 최대선박을 파악하여 주된 선박, 조선소, 하주 등에 대한 설문조사를 실시하여 장래성을 가미한다. 교량을 통항하는 최대 마스트의 높이는 대상해역을 통항한 실적이 있는 선박, 통항 실적은 없지만 현존하는 선박, 금후 대형화

가 상정된 선박을 대상으로 한 관점에서 검토되어야 한다. 즉, 통항 실적 선박은 대상해역을 통항하는 유조선, LNG, 컨테이너선, 일반화물선, 자동차선, 여객선, 공사작업선, 해양구조물, 범선 등 각 선종의 최대 선박의 마스트 높이를 조사해야 하고, 현존 선박은 대상해역을 통과하지는 않았지만 현존하는 선박의 선종별 최대선박의 마스트 높이를 조사해야 하며, 대형화 예정 선박은 선박회사, 조선소, 하주 등 관계자에게 설문조사를 실시하여 선종별 최대 마스트 높이의 장래동향을 조사해야 한다.

2.2 교각 폭의 평가요소 및 평가방법

교량이 건설된 수면에 있어서 선박조종자의 입장에서 본 바람직한 구조물중심 간격을 구성하는 교각거리와 항행수로폭에 대해서 평가요소 및 평가방법은 다음과 같다.

1) 교각의 이격거리

선박조종자가 해상에 설치된 구조물 근방을 항행할 때, 안전을 위해 구조물과의 거리를 확보하려고 한다. 여기에서 항행 선박과 구조물과의 이격거리에 대해서 교각 주변에 있어서의 바람·조류의 흐름에 의한 영향, 교각에 의한 간섭력의 영향 등으로부터 필요한 이격거리(물리적으로 선박이 항행상 교각과의 최저한 확보하고자 하는 이격거리) 및 구조물 중심거리(폭)를 검토해야 한다.

교각과의 이격거리는 교각주변의 난류의 범위와 이 난류가 주변선박에 미치는 영향 및 교각에 의한 간섭영향 등의 요소를 검토할 필요하다. 즉, 교각 주변에 있어서의 조류의 변화는 교각의 형태(사각형, 원형)에 따른 수조실험을 실시하고, 교각 주변의 조류 변화가 주변 선박에 미치는 영향은 일정 풍속하에서의 수조 실험을 실시한다. 또한 교각 주변에 있어서의 바람의 변화는 풍속과 선속과의 비가 10 이상의 강풍역에서의 풍동실험을 실시하며, 교각에 의한 간섭력이 주변 선박에 미치는 영향은 수심과 흘수와의 비가 크게 되면 간섭력은 작아지기 때문에 교각 형상과 수심/흘수비를 고려하여 수치계산을 실시한다.

2) 교각 폭의 평가방법

교각 폭은 교량 건설을 기초로 교각 폭, 교각 위치, 교축법선을 변수로 하여 여러 안을 설정한다. 선박이 항행하고 있는 수역에 교각을 설치하면, 선박교통의 흐름이 변화하여, 부근 해역의 교통환경에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 교각 폭의 설정 조건에 맞추어, 장래의 선박교통량을 예상한 해상교통류 시뮬레이션을 실시하여, 선박종류의 관점에서 평가를 행한다. 해상교통류시뮬레이션은 ① 대상해역의 설정, ② 교각위치, 교축법선의 설정, ③ 가항폭, 離隔거리의 설정, ④ 통항선박 데이터의 설정(선박의 크기 구성, 발생척수, 항행속력, 통항경로대), ⑤ 시뮬레이션 시나리오의 설정, 실시, ⑥ 평가의 순으로 실시한다.

2.3 교량 하부 높이의 평가요소 및 평가방법

1) 검토방법

교량하부의 높이를 결정하기 위해서는 통항 선박의 마스트 높이, 선박의 파랑 중의 동요량이 중요한 요소가 된다. 이를 위해서는 대상해역의 관측 해상데이터를 사용하여 항행 선박의 동요시뮬레이션에 실시하여 파랑중의 선체동요를 구하여 교량하부의 높이를 검토해야한다.

교량 하부 높이를 검토하는 방법은 ① 대상 선박의 추출 · 정리, ② 자연조건의 정리, ③ 시뮬레이션 케이스의 선정, ④ 동요시뮬레이션의 실시, ⑤ 시뮬레이션 결과의 해석, ⑥ 교량 하부 높이의 검토 순서로 실시한다.

2) 동요시뮬레이션

항행 선박의 동요시뮬레이션은 파랑 중을 항행하는 선박은 자선의 관성력이나 중력, 해수에 의한 부력이나 저항, 파도나 바람의 힘 등이 작용하고 있기 때문에 이 힘의 조합을 계산하여 선체동요를 추정한다.

시뮬레이션 대상 선박은 마스트 높이 조사결과에 의해 입항실적, 입항 가능성이 있는 선박 중에서 마스트 높이가 높은 선종을 대상으로 한다. 또한 흘수에 대해서 마스트가 높고, 선체동요가 발생하기 쉬운 상태를 대상으로 한다.

그리고 시뮬레이션 실시 전에 파향 · 파주기 및 선속이 항행 선박의 동요에 어느 정도 영향이 있는가를 파악하기 위해, 한 주기, 파고의 파가 연속하는 규칙적인 파(규칙파)에 있어서의 선체동요를 계산하고, 대상 선형에 대해서 기본 감도분석을 실시한다. 또한 대상 해역의 도선사로부터 어느 정도의 기상조건에서 승선할 수 없는지를 파악한다. 관측소로부터 유의파고 및 유의주기의 값, 파향성의 파랑조건을 분석하고, 평균풍속과 풍향을 조사한다.

시뮬레이션 케이스는 ① 대상선형, ② 풍향, 관측파형(유의파고, 유의주기) 등의 파랑조건, ③ 풍향, 풍속 등의 바람조건, ④ 대상선형의 침로, ⑤ 대상선형의 속력

등 여러 변수를 조합하여 결정한다. 시뮬레이션 시나리오는 관측된 파형 데이터 및 풍향 및 풍속(파랑조건에 대응한 조건)을 설정하고, 선박의 통항을 고려하여 침로 및 선속을 설정한다.

시뮬레이션 결과를 평가방법은 시뮬레이션에서 구한 선체동요량 취급시 우선 마스트 부분의 상하 변위를 구한다. 여기서는 상하 방향의 변위를 고려하기 때문에 heave, pitch 및 roll의 동요량을 대상으로 하고, sway, surge 및 yaw 등에 의한 수평방향의 동요는 평가하지 않는다.

시뮬레이션의 결과는 ① 파향의 영향, ② 침로의 영향, ③ 풍력의 영향, ④ 파형 데이터의 차이에 의한 마스트 상승량의 비교한다. 또한 장래 통항이 예상된 최대 선박의 마스트 높이와 여유 높이의 검토 및 파랑과 조류 등에 의한 마스트 높이의 변화를 여유 높이로서 설정할 필요가 있다. 즉, 교량하부높이는 마스트 높이와 여유 높이의 합이고, 여유높이는 트림 보정, 선체동요량, 심리적 여유량, 조석 오차, 기압에 의한 해면상승, 흘수 오차의 합이다.

3) 동요시뮬레이션 요약

선체 동요에 의한 마스트 높이의 변화는 바람, 파랑 등의 상세한 관측 데이터의 해석 결과로부터 필요에 응하여 동요 시뮬레이션을 실시하여 장래의 통항 최대 선박의 마스트 높이의 변화량을 파악한다. 즉, 최대 마스트 높이의 선박의 크기, 항

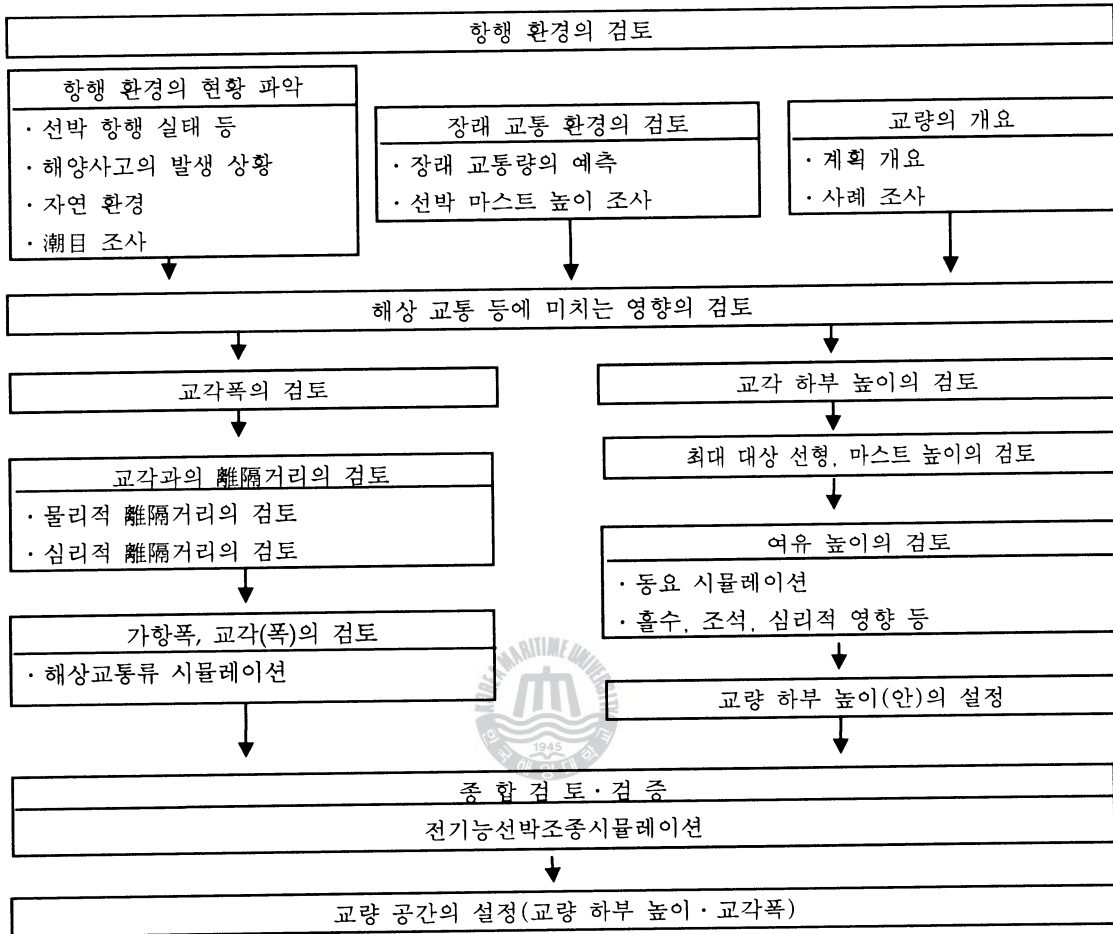


Fig. 1 The assessment flow on bridge design

행 속력, 침로 등의 대상 선박 데이터의 설정, 바람, 조류, 풍랑 등의 외력 설정, 시뮬레이션 케이스의 설정 및 실시, 마스트 높이 변화량의 파악을 행한다.

대상 선박의 통항시 조건과 조석에 의한 마스트 높이의 변화, 교량 하부를 통항하는 조선자의 심리적 부담 등을 고려한다. 즉, 트립 보정, 조석 오차, 기압에 의한 해면 상승, 흘수 오차, 심리적 영향 등을 고려한다.

여유 높이는 동요량, 트립 보정, 조석 오차, 기압의 영향, 흘수 오차, 심리적 영향 등을 고려한다.

교량 하부 높이는 장래 통항이 예상된 최대 선박의 마스트 높이에 여유 높이를 가산해 교량 하부 여유 높이를 결정한다.

2.4 교량공간의 검토

전기능선박조종시뮬레이터를 사용하여, 교량공간을 큰 화면에 영상화하여 해상교통량 시뮬레이션에서 발생한 선박의 교통상황 중 장래 통항 최대선형으로 실제로 조선하여 통행함으로써 교량계획이 항행선박에 미치는 영향을 검증한다. 또한 주야에 교각에 의한 사각의 영향과 조선 목표 등에 대하여 검토하여 항행안전대책을 검토해야 한다.

2.5 요약

해상교량의 안전성 평가 순서는 Fig. 1과 같다. 평가요소로서는 해상교통에 미치는 영향을 미치는 선박의 항행실태, 해양사고, 자연환경 등의

Table 1 The assessment parameter of bridge height

평가요소		비고	
마스트 높이		마스트 높이가 큰 선박, 장래 대상 해역을 항행할 가능성이 있는 선박	
		대상해역에서의 선체의 트림, 풍랑의 영향, 심리적 영향	
여유높이	트림보정치	공선 항해시의 트림	
	선체동요량	선체동요시물레이션에 의한 마스트 상승량의 최대치	
	기타	심리적 여유량	
		조석오차	조시의 20~30분이내의 조고오차
		기압에 의한 해면상승	기압에 의한 해면상승량
홀수오차		홀수의 읽음 또는 계산오차	
고려사항	홀수조정폭	황천시 발라스트수를 채워 선미홀수를 깊게 할 수 있다.	
	도선사 인수기준	도선사 인수기준의 풍속 및 파고 선체동요량에 사용한 데이터는 대상해역의 통항선박의 실적을 이용한다.	

항행환경을 파악하고, 장래 교통량 예측과 선박 마스트 높이 조사 등의 장래 교통환경을 검토하며, 교량의 개요와 사례조사 등을 조사해야 한다. 이와 같은 항행환경의 조사는 교각폭의 결정시 교각과의 물리적 이격거리를 평가할 때 수조실험과 해상교통류 시물레이션의 기초자료가 될 뿐만 아니라, 교각 하부 높이를 결정할 때 최대 선형의 마스트 높이와 동요시물레이션을 실시할 때 시나리오의 기초자료가 된다.

교각 폭은 교각과의 물리적, 심리적 이격거리를 검토한다. 교각과의 이격거리는 교각 주변에서의 난류의 범위와 난류로 인한 주변 선박에 대한 영향 및 교각에 의한 간섭영향 등의 요소를 검토한다. 난류의 범위 및 주변선박에 미치는 영향은 수조실험을 실시하여 평가한다. 또한 교각 주변의 바람 변화로 인한 선박에 미치는 영향은 풍동실험으로 평가하며, 교각에 의한 간섭력이 주변 선박에 미치는 영향은 교각 형상과 수심/홀수비를 고려하여 수치계산으로 평가한다. 교각 폭은 교각 폭의 설정 조건에 맞추어 장래의 선박교통량을 예상한 해상교통류 시물레이션을 실시하여, 선박조종자의 관점에서 평가한다.

교량 하부 높이는 Table 1과 같이 마스트의 높이, 트림 보정치, 선체 동요량, 심리적 여유량, 조석오차, 기압에 의한 해면상승 및 홀수오차 등의

여유높이 및 홀수조정폭과 도선사 인수 기준 등의 고평가요소를 검토해야 한다.

평가방법으로서는 마스트 높이의 경우 장래 대상해역을 통할 가능성이 있는 최대선형의 마스트 높이를 조사하고, 선체동요시물레이션을 실시하여 마스트의 최대 상승량을 구한다. 또한 트림보정치, 심리적 여유량, 조석오차, 기압에 의한 해면상승 및 홀수오차를 산출한다.

선박조종시물레이션을 실시하여 교각 전후의 항로의 직선길이를 검토할 필요가 있다. 선박이 교각을 통항하기 위해서는 교각을 진입하기 전에 일정한 침로로 정침할 필요가 있기 때문이다. 이는 교각의 진입전에 대각도 변침을 해야하는 경우에는 그 길이를 길게할 필요가 있다. 그리고 조선자는 교각에 의해 교각후방 구역에서 시야에 사각이 발생하기 때문에 그 영향을 조사해야 한다. 특히 야간에 현등이 보일 수 있는 시야를 확보가 가능한지를 평가해야 한다. 또한 교각에 의한 레이더의 차폐구간을 확인해야 한다.

3. 결 론

해상교량의 안전성 평가요소는 첫째, 해상교통에 미치는 영향을 미치는 항행환경은 현행 항행환경, 장래 교통환경, 교량의 개요를 조사해야 한다.

둘째, 교각 폭은 교각 주변에서의 난류의 범위, 난류로 인한 주변 선박에 대한 영향 및 교각에 의한 간섭영향 등이다.

셋째, 교량 하부 높이의 평가요소는 마스트의 높이, 트림 보정치, 선체 동요량, 심리적 여유량, 조석오차, 기압에 의한 해면상승 및 홀수오차 등의 여유높이 및 홀수조정폭과 도선사 승선 기준 등이다.

교각 폭의 평가방법은 난류의 범위 및 주변선박에 미치는 영향은 수조실험, 교각 주변의 바람 변화로 인한 선박에 미치는 영향은 풍동실험을 실시하여 평가한다. 그리고 교각에 의한 간섭력이 주변 선박에 미치는 영향은 교각 형상과 수심/홀수비를 고려하여 수치계산으로 평가한다. 또한 교각 폭의 설정 조건에 맞추어 장래의 선박교통량을 예상한 해상교통류 시뮬레이션을 실시하여, 선박조종자의 관점에서 평가한다.

교각 하부 높이의 평가방법은 마스트 높이는 장래 대상해역을 통할 가능성이 있는 최대선형의 마

스트 높이의 조사, 마스트의 최대 상승량은 선체 동요시뮬레이션을 실시하여 구한다. 또한 트림보정치, 심리적 여유량, 조석오차, 기압에 의한 해면상승 및 홀수오차를 산출하여 평가한다.

마지막 단계로서 해상교통류 시뮬레이션을 통한 교각 폭 및 가항폭과 교량 하부 높이를 바탕으로 전기능선박조종시뮬레이션을 실시하여 교량의 폭과 하부높이, 교량 전후항로의 직선거리, 교각에 의한 시야의 사각 및 레이더의 차폐구역 등을 검증한다.

참고문헌

- [1] 한국항만협회(2000), 해양수산부제정 항만 및 어항설계기준(상권), 제6편 수역설비, pp. 638 ~ 639
- [2] 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(2001), 인천국제공항제2연륙교 선박운항 안전성평가

