

工學碩士 學位論文

船舶 通航 橋梁의 運航 安全性 評價에 關한 研究

The Comparison Assessment of Navigation Safety for
a Ship Passing under the Sea Bridges

指導教授 孔 吉 永

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海上交通情報學科

曹 京 珉

本 論文을 曹京珉의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 金世源



委 長 地球環境科學博士 薛東一



委 員 工學博士 孔吉永



2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

Abstract	v
제1장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 방법 및 내용	2
제2장 선박 통항 교량의 건설지침 현황	4
2.1 진입 항로 및 부근 수역시설에 대한 항로설계 지침	4
2.1.1 항로의 배치	5
2.1.2 항로의 폭	7
2.2 교량 설계에 관한 연구	10
2.2.1 미국의 교량 설계에 관한 연구	10
2.2.2 일본의 교량 설계에 관한 연구	11
2.2.3 기타 교량 설계에 관한 연구	12
2.3 주요 해상교량	13
2.3.1 주요 해상교량의 수역시설	13
2.3.2 해상교량에 의한 선박의 충돌 사례	17
제3장 선박 통항 교량의 운항 안전성 평가를 위한 이론적 검토	19
3.1 운동방정식 및 시뮬레이션 데이터베이스 개발	19
3.1.1 선체 운동방정식의 개발	19
3.1.2 시뮬레이션 데이터베이스의 개발	22

3.2 시뮬레이션 평가 방법	23
3.2.1 선박의 근접도 평가	23
3.2.2 선박의 제어도 평가	24
3.2.3 조종자의 주관적 평가	25
제4장 선박조종시뮬레이션	26
4.1 선박조종시뮬레이터	26
4.1.1 선박조종시뮬레이터의 구성	26
4.1.2 선박조종시뮬레이션 과정	30
4.2 시뮬레이션 대상 선박	32
4.3 대상 해역 및 대교	34
4.3.1 목포대교	34
4.3.2 거가대교	35
4.3.3 마창대교	36
4.3.4 서해대교	38
4.3.5 보안-태안 연육교	39
4.3.6 광양대교	40
4.4 시나리오 설계	41
4.5 조종자의 구성	43
제 5장 시뮬레이션 결과에 대한 비교 분석	44
5.1 목포대교	44
5.1.1 근접도 평가	44
5.1.2 제어도 평가	51
5.1.3 주관적 평가	52

5.2 거가대교	54
5.2.1 근접도 평가	57
5.2.2 제어도 평가	57
5.2.3 주관적 평가	57
5.3 마창대교	58
5.3.1 근접도 평가	58
5.3.2 제어도 평가	61
5.3.3 주관적 평가	62
5.4 서해대교	63
5.4.1 근접도 평가	63
5.4.2 제어도 평가	64
5.4.3 주관적 평가	65
5.5 보령-태안 연육교	67
5.5.1 근접도 평가	67
5.5.2 제어도 평가	70
5.5.3 주관적 평가	70
5.6 광양대교	72
5.6.1 근접도 평가	72
5.6.2 제어도 평가	75
5.6.3 주관적 평가	76
5.7. 종합 평가	78
5.7.1 근접도 평가	78
5.7.2 제어도 평가	79
5.7.3 주관적 평가	80

5.8. 시뮬레이션을 이용한 통행안전성 평가 및 제안	81
5.8.1 목포대교	81
5.8.2 거가대교	81
5.8.3 마창대교	81
5.8.4 서해대교	82
5.8.5 보령~태안 연육교	82
5.8.6 광양대교	82
제 6장 결론	83
참고문헌	85

Abstract

Recently, there are many sea bridges which is under construction or planned to connect the island with the land in coastal sea. From the viewpoint of navigation safety, it would be the best to build the main span of bridges as wide as possible. But it may not be possible due to geographical or economic reasons.

To construct the bridge on the navigation route, consideration factors for navigation safety must be investigated and examined from the viewpoint of ship maneuverability preferentially.

In this study, the FMSS(Full Mission Ship handling Simulator) of the Korea Maritime University(KMU) was utilized as a tool of analyzing the data acquired from ship's maneuvering. It provides a unique opportunity to check the ship handler's subjective stress level and to collect detailed data including the ships' tracks of passing under the sea bridge. In addition, the assessment of the navigation safety for a ship passing under the sea bridges is evaluated from the proximity, control and subjectivity.

In the conning ship handling simulator, experienced masters and pilots conducted the modeled vessels along the designed channel and under the sea bridges.

This study aims to prepare safety assessment for approaching navigation and safety review in passing under the sea bridge according to the procedures. Examination factors such as environment, a ship type and the bridge with width

were arranged accordingly about 6 sea bridges and then analyzed with comparison and assessed synthetically as using the results of simulation.

Further researches on maneuvering ships in various condition will be necessary for making individual rules for each special case.

그림 목차

<Fig. 2-1> 일방 및 왕복 통행시 필요 항로의 폭	8
<Fig. 2-2> 선박의 위험수역	11
<Fig. 2-3> 주경간장	11
<Fig. 2-4> 교각 진입 필요 직선거리	12
<Fig. 2-5> 제한수역의 일방 통행	12
<Fig. 2-6> 제한수역의 왕복 통행	12
<Fig. 3-1> 좌표계	20
<Fig. 4-1> FMSS 외부 전경	27
<Fig. 4-2> FMSS 선교 내부	27
<Fig. 4-3> FMSS 구성도	29
<Fig. 4-4> 선박조종시물레이션 흐름도	31
<Fig. 4-5> 대상 선박의 모습	33
<Fig. 4-6> 선박조종시물레이션 수행 장면	43
<Fig. 5-1> 목포대교의 근접도 기준점	45
<Fig. 5-2> 목포대교의 침범확률	47
<Fig. 5-3> 목포대교의 제안 항로	49
<Fig. 5-4> 목포대교의 조종위험도와 조종곤란도 (기존 항로)	53
<Fig. 5-5> 목포대교의 조종위험도와 조종곤란도 (제안 항로)	53
<Fig. 5-6> 거가대교의 근접도 기준점	55
<Fig. 5-7> 거가대교의 조종위험도와 조종곤란도	58
<Fig. 5-8> 마창대교의 근접도 기준점	59
<Fig. 5-9> 마창대교의 침범확률	60
<Fig. 5-10> 서해대교의 근접도 기준점	63

<Fig. 5-11> 서해대교의 조종위험도와 조종곤란도	66
<Fig. 5-12> 보령-태안 연육교의 근접도 기준점	67
<Fig. 5-13> 보령-태안 연육교의 침범확률	69
<Fig. 5-14> 보령-태안 연육교의 조종위험도와 조종곤란도	71
<Fig. 5-15> 광양대교의 근접도 기준점	73
<Fig. 5-16> 광양대교의 시나리오별 타각사용량	75
<Fig. 5-17> 광양대교의 조종위험도와 조종곤란도	77
<Fig. 5-18> 제어도 평가 종합	79
<Fig. 5-19> 주관적 평가 종합	80

표 목 차

<Table 2-1> 일반항로의 폭	9
<Table 2-2> 국내 주요 해상교량의 주경간장	14
<Table 2-3> 주요 해상교량의 주경간장 및 교량통과 전후의 직선거리	15
<Table 2-4> 주요 항구의 방파제간 거리 및 진입항로 직선거리	16
<Table 2-5> 선박과 해상교량의 주요 충돌 사례	18
<Table 3-1> 주관적 평가 항목 및 Rating Scale	25
<Table 4-1> 대상 선박의 상세	32
<Table 4-2> 선박조종시물레이션 시나리오	42
<Table 5-1> 목포대교 통항 근접도 변수의 기술통계량	46
<Table 5-2> 목포대교 접근 항로에 추가로 필요한 항로 폭	48
<Table 5-3> 목포대교(제안항로) 통항 근접도 변수의 기술통계량	50
<Table 5-4> 목포대교 제어도 평가 요소의 기술통계량	52
<Table 5-5> 목포대교 주관적 평가 요소의 기술통계량	52
<Table 5-6> 거가대교 통항 근접도 변수의 기술통계량	56
<Table 5-7> 거가대교에 추가로 필요한 항로 폭	56
<Table 5-8> 거가대교 제어도 평가 요소의 기술통계량	57
<Table 5-9> 거가대교 주관적 평가 요소의 기술통계량	57
<Table 5-10> 마창대교 통항 근접도 변수의 기술통계량	60
<Table 5-11> 마창대교 접근 항로에 추가로 필요한 항로 폭	61
<Table 5-12> 마창대교 제어도 평가 요소의 기술통계량	62
<Table 5-13> 마창대교 주관적 평가 요소의 기술통계량	62
<Table 5-14> 서해대교 통항 근접도 변수의 기술통계량	64
<Table 5-15> 서해대교 제어도 평가 요소의 기술통계량	65

<Table 5-16> 서해대교 주관적 평가 요소의 기술통계량	65
<Table 5-17> 보령-태안 연육교 통항 근접도 변수의 기술통계량	68
<Table 5-18> 보령-태안 연육교 제어도 평가 요소의 기술통계량	70
<Table 5-19> 보령-태안 연육교 주관적 평가 요소의 기술통계량	71
<Table 5-20> 광양대교 통항 근접도 변수의 기술통계량	74
<Table 5-21> 광양대교 제어도 평가 요소의 기술통계량	75
<Table 5-22> 광양대교 주관적 평가 요소의 기술통계량	76
<Table 5-23> 해상교량별 침범확률	78

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 우리나라의 해상에서는 육상과 섬 또는 섬과 섬을 연결하는 해상교량이 건설 중이거나 건설 예정에 있다.^[1] 해상에서의 교량은 선박 운항 측면에 있어서는 위험 요소가 되는데 특히 연안 수역에 건설되는 해상교량은 조류, 바람 등의 외력에 비교적 약하여 선박과의 충돌 가능성에 상시 노출되어 있다. 선박과의 충돌시에는 교각의 붕괴와 더불어 많은 인명 피해를 초래하고, 육상과 해상에서의 물류를 차단하게 하는 요인이 되기도 한다.

하지만 해상교량 건설은 국가 및 지역 경제 발전을 위해 불가피하므로 해상교량의 안전성을 확보한 건설이 요구된다. 이를 위해 계획단계에서부터 치밀한 검토가 있어야 한다.^[2] 무엇보다도 선박이 통항하게 되는 교량에서는 조종자 측면에서 고려되어야 할 요소를 충분히 검토하고, 그 요소들의 안전성을 평가하는 것은 우선시 되어야 한다.

그러나 현재까지 건설된 국내 해상교량의 선박통항 안전성에 관한 평가는 설계시부터 반영되지 못하고 있는 실정이며, 이는 선박이 통항하는 항로에 건설되는 해상교량의 특수성에 대한 이해의 부족으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 일차적으로 선박조종자 측면에서의 안전성을 고려한 평가를 위해 현재까지 국내에서 건설되었거나 건설예정인 6개 해상교량에 대한 이론적인 고찰과 최신의 FMSS(Full Mission Ship Handling Simulator System)를 이용한 각각의 평가를 선박운항 측면에서 실시하여 이들을 비교 분석하고 종합적으로 평가함으로써 각 해상교량의 통항 안전성을 검토하고 추가조건 등을 제시하였다. 나아가 선박통항 교량의 적정 주경간장, 직선항로 등의 접근항로 항행

및 교량통항 안전성 검토 등과 같은 안전성 평가 방안을 마련하여 해상교량 건설에 있어서 국내 환경에 맞는 기준을 마련하고자 한다.

1.2 연구 방법 및 내용

1970년대 선박조종시뮬레이터가 개발된 이후, 선박조종시뮬레이터를 이용한 해상구조물, 항만이나 항로의 설계 및 건설에 관한 연구들은 선진국에서부터 활발하게 진행되었다.^{[3][4]} 현재 국내에서도 그 수리적 검토, 검증 기능의 다양성 때문에 널리 활용되고 있는데,^{[5]-[7]} 본 연구에서는 한국해양대학교가 보유하고 있는 FMSS(Full Mission Ship Handling Simulator System)를 이용하여 해상교량 통항 시뮬레이션을 실시하고 평가하였다.

선박의 해상교량 통항시 안전성 평가를 위하여 다음과 같은 선행적 업무가 요구된다.^{[8][9]}

- ① 해당 교량을 통항하는 대상 선박 모델개발 및 확인
- ② 해당 교량 및 항로, 교량에 대한 비주얼 이미지 개발 및 확인
- ③ 교량 설계 및 시뮬레이션 실시
- ④ 시뮬레이션 결과의 분석 및 각 교량의 비교 분석 평가

먼저 본 연구에서 채용한 대상 선박은 각 교량별 진입가능 최대선박으로, 이 선박들은 선체 주요요목, 타요목, 주기관, 전진, 좌우진동, 선회속도, 가속도 등을 변경하는 경우 성능변화 뿐만 아니라 바람, 조류 등의 외력의 변화에 대한 영향도 고려된다.

항로, 교량에 대한 비주얼은 각 해상교량의 경간장에 따라 설정된 항로를 채택하고, 선교에서 조종자가 실제와 같이 느낄 수 있는 거리감, 속도감, 시야 및 인식각도, 영상 변화속도 등이 고려된다. 통항 상의 환경조건으로서는 조류와 바람이 최악의 조건에서 동시에 작용하는 상태를 선택하였다.

시뮬레이션에 참가한 선박조종자는 선장 및 도선사로 각 교량통항 시나리오 별 5번 이상의 시뮬레이션을 원칙으로 실시하였다.

시뮬레이션이 끝난 후 조종자가 느끼는 주관적 위험감지도에 대하여는 조종 위험도 및 조종곤란도의 2개 항목에 대하여 각각의 Rating Scale을 -3에서 +3 까지 7등분하여 응답하도록 하고, 시뮬레이션 항적과 조종 제어량을 출력하여 근접도 및 제어도에 대하여 각각 평가하였다.

본 논문은 6장으로 구성되어 있다.

제1장은 서론으로서 본 연구의 배경과 목적, 연구의 방법 및 내용 등에 관하여 기술하였다.

제2장에서는 선박통항 교량의 건설지침 현황 및 교량 충돌사고 등의 문헌연구에 관하여 기술하였다.

제3장에서는 운동방정식 및 시뮬레이션 데이터베이스의 개발, 시뮬레이션 평가방법 등에 관하여 기술하였다.

제4장에서는 본 연구에서 사용한 시뮬레이터의 소개, 대상 선박의 제원과 특성, 대상 해역의 설정, 조종자의 구성 및 시나리오 설계에 관하여 기술하였다.

제5장에서는 6개의 해상교량에서 실시한 시뮬레이션 결과에 대하여 각각의 근접도, 제어도 및 주관적 평가를 실시하고, 나아가 이들의 상관관계를 정량적으로 분석하여 기술하였다.

제 6장은 결론으로서 이상의 연구 결과를 요약하여 기술하였다.

제 2 장 선박 통항 교량의 건설지침 현황

본 장에서는 진입항로 및 부근 수역 시설에 대한 항로설계와 교량설계 등에 대하여 선진 유럽, 미국, 일본과 국내의 지침이나 기준을 검토하고, 국내외 주요 해상교량 현황을 파악하기로 한다.

2.1 진입 항로 및 부근 수역시설에 대한 항로설계 지침

선박의 진입항로 및 수역시설에 대한 지침으로는 PIANC Rule(Permanent International Association of Navigation Congresses Rule)이 대표적이고, 미국과 일본의 경우는 자체의 항로설계 지침이 있으며, 국내의 지침은 선진국에 비해 미흡한 편이다.

PIANC Rule은 유럽지역을 중심으로 하여 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 항로설계 지침으로 주로 유럽지역의 항만 및 항로 설계 전문가, 선체운동 연구자 및 항해전문가들로 구성된 PIANC에 의해 1978년에 구성된 ICORELS의 제4연구 소위원회가 2년간의 연구를 거쳐 1980년도에 발표한 것으로서, 항로의 수심, 항로의 배치, 항로의 폭 그리고 선회수역의 크기 및 배치에 관한 설계 지침이 수록되어 있다.

미국의 경우 항로를 설계할 때 육군 공병대에서 1983년에 발표한 항로 설계를 위한 지침을 이용하고 있다. 이 항로설계 지침은 항로의 수심, 항로의 폭과 배치, 선회수역의 크기 및 수심에 관한 가이드라인을 제공하고 있다.

일본의 항로설계 지침은 크게 항로와 정박지 두 부분으로 나누어져 있다. 항로편에서는 항로 만곡부의 배치, 항로의 폭 및 수심을 다루고 있고, 정박지편에서는 정박지의 면적, 돌제와 돌제 사이의 박지의 폭, 선회수역의 크기, 정박지의 수심에 대하여 다루고 있다.

국내에서는 항만시설의 기술기준에 관한 규칙에서 수역시설, 항로, 선회장, 정박지 및 선류장, 외곽시설, 계류시설 및 안벽 등의 항행보조시설 및 임항교통시설에 대하여 규정하고 있다.

2.1.1 항로의 배치

(1) PIANC Rule

항로를 설계할 때에는 해당 해역의 바람, 조류, 파도 등을 고려한 선체운동역학, 육상의 항로표지 및 통항하는 선박에 탑재되어 있는 항해장비 등의 성능들을 고려하여 그 배치를 결정하여야 한다. 항로는 가급적 직선 항로가 되도록 설계하는 것이 바람직하나 만곡부 설계가 불가피한 경우에는 선회 중심점을 중심으로 방사형의 조선이 가능하도록 하여야 한다. 단, 항로의 만곡부는 그 반경이 최소한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 5배(5L)는 되어야 하며 가능하면 10배(10L) 이상이 좋다. 만곡부들 사이의 직선 통항로는 가능한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 10배(10L)를 갖도록 하여야 한다.

교량 등에 있어 항로가 좁아지는 부분의 경우에는 최소한 가장 큰 통항 선박의 선체 길이의 5배(5L)를 갖는 직선 통항로를 경계 부분 전후에 두어야 하며, 그 구간에는 특히 양질의 항로표지를 설치해 두어야 한다.

(2) 미국

초기 건설시 및 향후 관리시 준설을 최소화하기 위해서는 항로의 배치가 수로의 깊은 수심을 따라서 될 수 있도록 항로를 설계한다.

항로상의 만곡부의 수는 가능한 한 줄일 수 있도록 해야 하지만 직선 구간들 사이에 작은 만곡부를 두는 것은 Range marker를 적절히 세워 두면 위치 확인이 용이하게 될 수 있고 정확한 조종을 가능하게 해 줄 수 있기 때문에

허용될 수 있다. 그리고 만곡부 간의 직진 구간은 적어도 최대 선박의 선평의 5배(5B)는 되어야 한다. 방파제나 호안 또는 파도 흡수장치와 같은 구조물을 적절히 설치하여 항로의 배치 및 폭을 조절할 수 있다. 항로배치에 관한 결정은 선택 가능한 항로별로 항로를 건설하는데 소요되는 건설비와 유지비의 계산을 통해 이루어진다.

(3) 일본

항로를 계획할 때에는 안전한 항행, 조종의 용이함, 지형, 기상, 해상 조건, 및 관련 시설들과의 조화를 고려해서 계획하여야 하며, 다음과 같은 조건이 만족되었을 경우 양호하다고 할 수 있다.

- ① 만곡부가 있을 경우 만곡도가 적을 것
- ② 폭이 넓고, 수심이 충분할 것
- ③ 바람, 조류, 그리고 그 밖의 기상 및 해상 조건이 양호할 것
- ④ 항로표지 및 신호설비 등이 잘 정비되어 있을 것

만곡부에 있어서의 항로 중심선의 교각은 대체로 30° 를 넘지 않는 것이 바람직하다. 30° 를 초과하는 경우에는 항로 만곡부의 중심선의 곡률 반경이 대상 선박의 선체길이의 4배(4L) 이상이어야 하며, 동시에 항로 폭이 적정 이상 확보되어야 한다.

(4) 국내

항로 배치시 항로의 방향은 지형, 기상, 해상, 기타 자연조건을 고려하여 선박의 안전한 항행에 지장을 주지 않도록 시설되어야 한다.

2.1.2 항로의 폭

(1) PIANC Rule

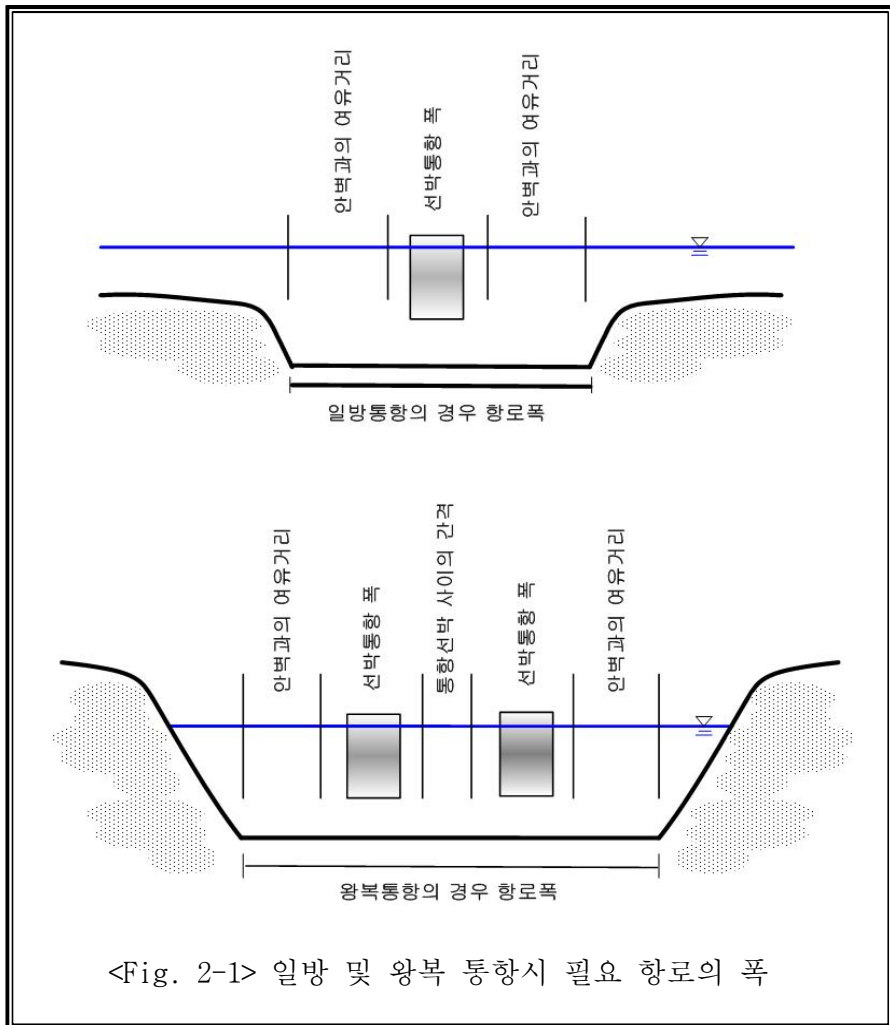
일방 항로의 항로 폭은 다음과 같은 요소에 의하여 결정된다.

- ① 항로를 이용할 최대 선박의 폭
- ② 선박의 실제 위치와 특히 항로표지들을 이용하여 구한 선위와의 차 중 횡방향 성분의 크기
- ③ 항로로부터의 이탈을 확인한 후로부터의 원항로로 돌아가기 위한 수정 동작이 취해지기 시작한 시점까지 발생하는 추가적인 이탈 거리
- ④ 횡방향의 조류를 받으며 편각을 가지고 항해를 해야 할 경우 항로 폭에 $L/2 \sin\beta$ (L :선체의 길이, $\sin \beta = \text{조류속도의 횡방향 성분}/\text{선속}$)값 및 횡방향으로 부는 바람
- ⑤ 좌우현으로 선평의 1/2보다 작지 아니한 안전 여유 폭

현재의 기술 수준으로는 진입 수로의 폭을 결정하는데 영향을 미치는 상기의 여러 가지 요소들이 부분적으로 평가될 수 있을 뿐 이들의 영향에 대한 종합적이고 정확한 계산은 어렵다. 여러 가지 일방 항로에 대한 검토 결과, 지역적인 조건 및 환경의 차이에 따라 항로의 최소 폭은 가장 큰 출입 선박 폭의 4배(4B)에서 8배(8B), 크게는 10배(10B)에 까지 이를 수 있다는 것이 확인되었다. 현재의 기술 수준으로 할 수 있는 유일한 일반적 권고는 항로 폭이 가장 큰 선박 폭의 5배(5B)보다 작아서는 안된다는 것이다. 하지만 횡방향으로 조류가 흐르는 등 더 열악한 환경 하에서는 항로 폭이 이에 따라 더 넓어져야 한다. 만곡부에서의 항로의 폭은 선박의 길이에 따르는 항로의 여유폭 $L^2/8R$ (L : 선박의 길이, R : 만곡부의 반경), 조종 상의 어려움을 고려한 추가 여유폭에 따라 증가 되어야 한다.

왕복 통항 항로의 경우는 <Fig. 2-1>에서 알 수 있듯이 일방 통항과 비교

하여 통항선박 사이의 간격을 필요로 하고, 두 통항 선박 사이의 간격은 최소한 큰 선박 선폭의 2배(2B)가 되면 위험하지는 않지만 통과시의 조종성 제한도 고려해야 한다. 따라서 권고된 일방 항로의 항로 폭에 가장 큰 선박 최대선폭의 3배(3B) 내지 5배(5B)를 추가해 주어야 하며, 조류나 바람에 의한 drifting 효과에 의한 값(가장 큰 선박의 길이 $\times \sin$ 최대 편각 β)을 더해 주어야 한다. 이러한 조건이 충족되지 않는 곳에서는 대형선 2척이 동시에 통항하는 것이 허용되어서는 안된다.



<Fig. 2-1> 일방 및 왕복 통항시 필요 항로의 폭

(2) 미국

필요한 최소 항로 폭은 선박의 크기와 조종성능, 수로의 형태와 배치, 교통 밀도, 해당 해역의 바람, 파도, 조류 및 시정, 항로표지의 성능과 설치 간격, 그리고 일방 또는 왕복 통행 항로 여부에 따라 결정된다. 만곡부에서 요구되는 추가 항로 폭에 대한 정보는 매우 적으나 일반적인 항로의 만곡부는 최대통행 선박의 최대 선평의 5배의 반경(5B)을 가져야 하며 가능하면 10배(10B) 이상이 안전하다. 만곡부에서 항로의 폭을 증가시키면 기존 조류의 방향과 크기에 변화를 가져 올 수 있고 경우에 따라서는 항해를 더 어렵게 하는 결과를 가져올 수 있으므로 만곡부에서의 항로 폭 추가와 관련한 결정을 할 때에는 조류, 바람, 파도의 영향 및 선박이 항로 외측으로 밀리는 영향 등에 관해 각 사안별로 구체적인 연구 검토를 거쳐야만 한다.

(3) 일본

항로의 폭은 일반항로와 통항량이 현저하게 많은 항로로 나누어져 있으며, 일반항로는 항로의 길이 및 통항 상황에 따라 <Table 2-1>과 같이 정해진다. 통항량이 현저하게 많은 항로, 항로를 횡단하는 선박의 항행이 예상되는 항로, 초대형선을 대상으로 하는 항로 등에 있어서는 <Table 2-1>의 항로 폭에 이용 실태를 감안하여 여유를 더 주어야 한다.

<Table 2-1> 일반항로의 폭

항로의 길이	통항 상황	항로 폭
비교적 거리가 긴 항로	대상 선박들이 빈번하게 서로 만날 경우	2L
	상기 이외의 경우	1.5L
상기 이외의 항로	대상 선박들이 빈번하게 서로 만날 경우	1.5L
	상기 이외의 경우	L

(4) 국내

항로의 폭에 대해서는 항만시설의 기술기준에 관한 규칙 제4조에서 규정하고 있으며, 항로를 통항하는 대상 선박의 길이, 폭 및 통항량과 지형, 기상, 해상, 기타 자연조건을 고려하여 결정한다. 통항시 선박충돌의 위험이 있는 항로에 있어서는 대상 선박의 길이 이상으로 하고, 선박충돌의 위험이 없는 항로에 있어서는 대상 선박 길이의 2분의 1이상으로 한다고 규정하고 있다. 다만, 지형이 특수한 경우 또는 예인선의 사용 등 선박통항의 형태가 특수한 경우에는 선박 통항에 지장을 주지 아니하는 범위 안에서 해양수산부장관이 그 이하로 조정할 수 있으며, 각종 선박의 통항이 빈번한 항로는 선박의 통항 방향별 또는 선박의 크기별로 별개의 항로를 설치하여야 한다고 규정하고 있다.

2.2 교량 설계에 관한 연구

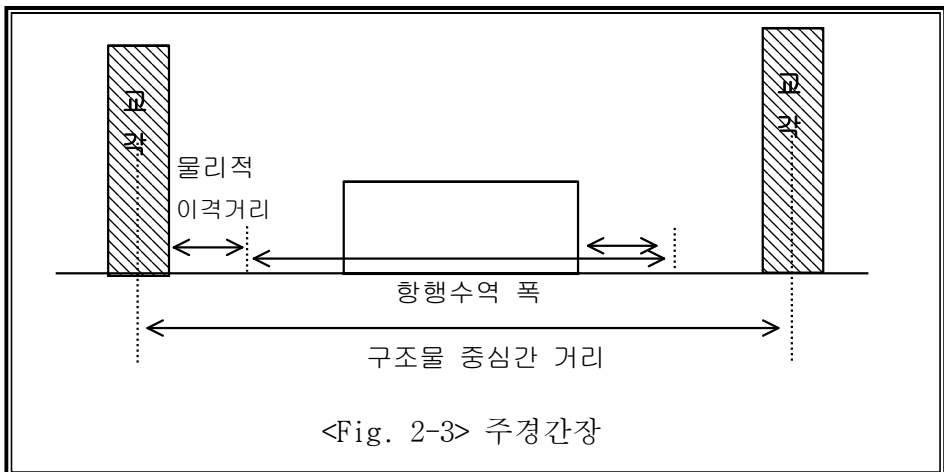
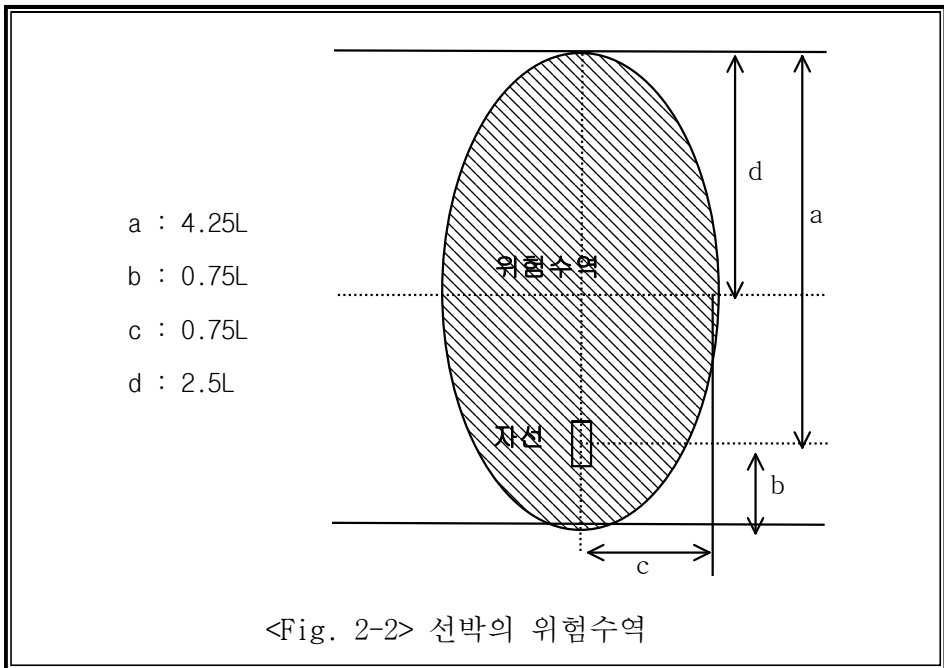
본 장에서는 선박통항 교량의 설계에 관하여는 일본의 건설성(建設省)과 미국의 ASTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) 및 IABSE(International Association for Bridge and Structural Engineering) 등의 기관에서 연구가 되고 있는 내용을 분석하기로 한다.

2.2.1 미국의 교량 설계에 관한 연구

미국의 ASTO에서 발간한 "Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges"의 Volume I Final Report Section 8에 주경간장은 대상 선박 길이의 2 ~ 3배(2~3L)보다 짧으면 선박에 의한 충돌이 생길 수도 있다고 기술하고 있다.

2.2.2 일본의 교량 설계에 관한 연구

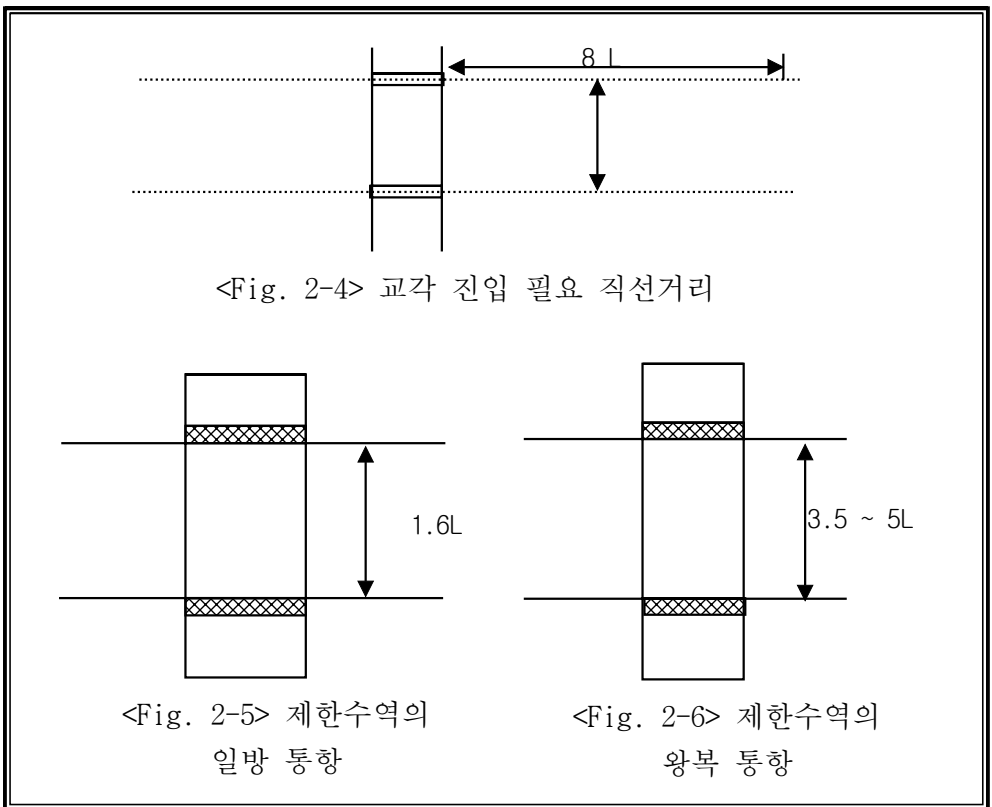
일본의 건설성에서는 교량 건설에 적정한 폭을 여러 가지 실험을 거쳐 항로의 폭 등에 관해 설명하고 있다. <Fig. 2-2>에서는 선박이 안전하게 운항을 하기 위해서는 4.25L 이상의 직선거리가 있어야 한다는 것을 보여주고 있다.



또한, 주경간장(구조물 중심간 거리)에 관하여는 <Fig. 2-3>과 같이 [(물리적 이격거리×2) + 항행수역 폭]으로 나타내고 있다.

2.2.3 기타 교량 설계에 관한 연구

IABSE(International Association for Bridge and Structural Engineering)와 타 기관이 공동으로 연구하여 발행한 “SHIP COLLISION WITH BRIDGES”를 살펴보면 교각 진입 필요 직선거리는 <Fig. 2-4>와 같이 $8L$ 이상을 권고하고 있으며 제한수역에서의 일방 통행시 주경간장은 <Fig. 2-5>과 같이 $1.6L$ 이상, 왕복 통행시에는 <Fig. 2-6>과 같이 $3.5\sim 5L$ 을 권고하고 있다.



2.3 주요 해상교량

본 장에서는 주요 해상교량의 주경간장, 교량통과 전후의 직선거리 등의 수역시설 현황과 해상 교량과의 선박 충돌사례를 살펴보기로 한다.

2.3.1 주요 해상교량의 수역시설

국내 주요 해상교량의 주경간장, 최대통항선박 및 교량통과 전후의 직선거리는 <Table 2-2>와 같다. 광안대교~나로도 연도교는 선박이 통항하는 교량이 아니므로 선박통항 해상교량(목포대교~광양대교) 중에서 분석하기로 한다.

최대선박 전장에 대한 직선거리 전후 비율이 좋은 곳은 거가대교 > 보령-태안 연육교 > 서해대교, 광양대교 > 마창대교 > 목포대교 순이다. 통항 최대선박 전장 대비 경간장의 비율이 좋은 곳은 광양대교, 목포대교 > 서해대교 > 보령-태안 연육교 > 마창대교, 거가대교 순이며, 모두 1.6L 이상을 나타내고 있다. 또한, 최대선박 선폭 대비 경간장의 비율은 광양대교 > 목포대교 > 서해대교 > 마창대교 > 보령-태안 연육교 > 거가대교 순으로 나타났으며, 이는 PIANC Rules에서 권고하는 일방 통항시의 최소 항로 폭(10B) 이상은 모두 만족하는 것으로 나타났으나, 이는 교량에 대한 위험은 고려되지 않은 것임을 감안해야 한다.

국내 주요 해상교량의 수역시설을 비교해 본 결과, 교량통과 전후의 직선거리 비율과 주경간장의 비율은 대체로 반비례 경향을 나타내고 있다. 이는 상호 보완을 위한 조치로 분석된다.

<Table 2-2> 국내 주요 해상교량의 주경간장

대상 해역		대상 선박		직선 거리/L (전)	직선 거리/L (후)	경간장 /L	경간장 /B
해상교량 명	경간장(m)	전장(m)	선폭(m)				
목포대교	550	218	32.3	2.8	2.3	2.5	17.0
거가대교	475	288	43.4	20.5	22.9	1.6	10.9
마창대교	380	234	32.3	7.5	7.2	1.6	11.8
서해대교	470	215	32.0	12.4	6.3	2.2	14.7
보령-태안 연육교	500	270	43.0	12.2	13.7	1.9	11.6
광양대교	1200	398	55.0	10.7	8.3	2.5	21.8
광안대교	500	-	-	-	-	-	-
북항대교	480	-	-	-	-	-	-
제2진도교	344	-	-	-	-	-	-
영종대교	300	-	-	-	-	-	-
영흥대교	240	-	-	-	-	-	-
삼천포대교	230	-	-	-	-	-	-
나로도 연도교	160	-	-	-	-	-	-

국외 주요 해상교량의 주경간장, 최대통항선박 및 교량통과 전후의 직선거리에 대해 <Table 2-3>에 나타내었다. 통과 전 직선향로는 23개 해상교량 중에서 3개 교량이, 통과 후 직선거리는 6개 해상교량이 기준에 미치지 못하고 평균적으로는 통과 전 직선거리는 22.54L을, 통과 후 직선거리는 12.0L을 나타내고 있다. 해상교량의 주경간장은 최대통항선박의 크기와 반드시 비례하지 않고 있으며, 이는 해상교량의 건설이 지형적인 영향을 많이 받는다는 것을 반증하고 있다고 할 수 있다.^[10]

<Table 2-3> 주요 해상교량의 주경간장 및 교량통과 전후의 직선거리

주요 해상교량			해상교량 통항구역 및 선박		통과 전 직선거리		통과 후 직선거리	
해상교량 명	경간장 (m)	국가 명	최대항구	LOA(m) :(a)	거리 :(b)	(b) /(a)	거리 :(c)	(c) /(a)
Great belt east	1,624.0	Denmark	Korsor	225	3,055.8	13.6	2,963.2	13.2
Hoga kusten	1,210.0	Sweden	Sundsvall	190	2,592.8	13.6	2,592.8	13.6
Humber	1,410.0	UK	Keadby	100	-	-	-	-
Fatih sultan mehmet	1,090.0	Turkey	Istanbul	300	1,018.6	3.4	889.0	3.0
Bosphorus	1,074.0	Turkey	Istanbul	300	3,704.0	12.3	926.0	3.1
25 de abril	1,012.9	Portugal	Lisbon	280	7,037.6	25.1	2,778.0	9.9
Verrazano narrows	1,298.0	USA	New York	300	7,408.0	24.7	4,630.0	15.4
Golden gate	1,280.0	USA	San francisco	300	14,816.0	49.4	3,333.6	11.1
Mackinac straits	1,158.2	USA	Chicago	225	9,260.0	41.2	18,520.0	82.3
George washington	1,066.8	USA	New York	-	-	-	-	-
San francisco -oakland bay	704.1	USA	Oakland	300	3,889.2	13.0	926.0	3.1
Akashi kaikyo	1,991.0	Japan	Osaka	250	2,963.2	11.9	1,481.6	5.9
Minami bisan-seto	1,100.0	Japan	Sakaide	275	3,333.6	12.1	3,889.2	14.1
3rd Kurushima kaikyo	1,030.0	Japan	Mategata	300	926.0	3.1	1,666.8	5.6
2nd Kurushima kaikyo	1,020.0	Japan	Mategata	300	370.4	1.2	1,740.9	5.8
Kita bisan-seto	990.0	Japan	Mizushima	340	3,333.6	9.8	3,889.2	11.4
Shimotsui-seto	940.0	Japan	Mizushima	340	3,333.6	9.8	3,889.2	11.4
Innoshima	770.0	Japan	Itozaka	180	6,667.2	37.0	4,074.4	22.6
Akinada	750.0	Japan	Hiroshima	-	-	-	-	-
Hakucho	720.0	Japan	Muroran	313	3,241.0	10.4	833.4	2.7
Kanmon	712.0	Japan	Tobata	270	2,778.0	10.3	370.4	1.4
Jing yin yangtze river	1,385.0	China	Jiang yin	100	17,594.0	175.9	4,074.4	40.7
Tsing ma	1,377.0	China	-	305	12,408.4	40.7	500.0	1.6
평균	1,117.9					22.54L		12.0L

<Table 2-4>는 국내외 주요 항구의 방파제간 거리 및 진입항로의 직선거리를 나타낸 것이다. 평균 1.73L의 방파제간 거리와 10L 이상의 진입항로 직선거리를 보유하고 있음을 알 수 있다.

<Table 2-4> 주요 항구의 방파제간 거리 및 진입항로 직선거리

항구 명	국가 명	최대선박 전장(m)	방파제간 거리	진입항로 직선거리
온산	한국	250.0	1.48L	7.4L
포항	한국	350.0	1.59L	10L 이상
동해	한국	270.0	1.92L	10L 이상
부산	한국	330.0	1.74L	10L 이상
삼천포	한국	270.0	1.64L	10L 이상
여수	한국	150.0	2.47L	10L 이상
WAKAYAMA	일본	200.0	1.67L	10L 이상
HAMDA	일본	190.0	0.68L	10L 이상
KOBE	일본	260.0	1.78L	10L 이상
OSAKA	일본	250.0	1.70L	10L 이상
KASHIMA	일본	340.0	2.18L	6.5L
HLIALIEN	대만	160.0	1.97L	10L 이상
TAICHUNG	대만	295.0	1.57L	10L 이상
SUAO	대만	260.0	1.07L	10L 이상
KAOSHIUNG	대만	290.0	1.47L	10L 이상
YANTAI	중국	108.9	1.87L	10L 이상
QINHLIANGDAO	중국	200.0	3.98L	10L 이상
KHOLMSK	러시아	105.0	1.59L	10L 이상
평균			1.73L	10L 이상

2.3.2 해상교량에 의한 선박의 충돌 사례

국내에서 발생한 선박의 해상교량과의 충돌 사례는 인천해난심판원 재결서 제1996-048호에 기록된 바와 같이 유선 올림픽1호 교각 접촉사건이 유일하다.

이 접촉사건은 한강 잠수교의 좁은 교각 사이를 진입하면서 선장의 조종 부주의로 인하여 선체가 강한 물살에 압류되어 발생한 것으로서 소형여객선이 바다가 아닌 강에서 교각에 충돌한 사례이다. 이는 지금까지는 국내에 해상교량이 설치된 곳에 대형선박이 통항을 하지 않고 있기 때문에 교량에 충돌하는 사례가 없었던 것으로 판단된다.

국외의 경우는 해상교량과 선박의 대형 충돌 사고가 종종 있었으며,^[11] 그 사례는 <Table 2-5>와 같다. 이 표에서도 알 수 있듯이 대부분의 교각 폭이 2L 이내인 경우에 발생하였으나, 미국의 Newport Bridge의 경우 2.85L에서도 사고가 발생한 사례가 있었다. 이것은 교각 폭이 최대통항선박의 3L이상 되어야 함을 의미한다고 볼 수 있다. 해상 횡단 교량 주변에서의 직선 항행로와 관련된 해양사고는 대부분 직선 항행로가 8L이내인 경우에 발생하였다. 이것은 또한 교량 전후의 직선 항행로가 최대 통항선박의 8L이상 확보되어야 함을 의미한다고 할 수 있다.

<Table 2-5> 선박과 해상교량의 주요 충돌 사례

해상교량 명	사고선박 명	주경간	진입직선	전장	S/L	R/L	사고 일시
		장(m) :S	거리(m) :R	(m) :L			
Sørund Bridge (Norway)	Privodino	100	450	108	0.93	4.17	1963. 9.27
Sidney Lanier Bridge(U.S.A)	African Neptune	75	3,550	174	0.43	20.40	1972. 11.7
Fraser Bridge (Canada)	Swiftsure	117	1,000 370	200	0.59	5.00 1.85	1975. 12.26
Benjamin Harrison Memorial Bridge (U.S.A)	Marine Floridan	72	1,000 450	187	0.39	5.35 2.41	1977 2.24
Troms Ø Bridge (Norway)	-	80	740 320	41	1.95	18.05 7.80	1977. 7
Drammen Bridge (Norway)	Tundraland	50	500 250	118	0.42	4.24 2.12	1978
Second Narrows Railway Bridge (Canada)	Japan Erica	152	1,350 350	175	0.87	7.71 2.00	1979. 10.12
Sunshine Skyway Bridge (U.S.A)	-	263	1,300	165	1.59	7.88	1980. 2.6
Sunshine Skyway Bridge (U.S.A)	Summit Venture	263	1,300	186	1.41	6.99	1980. 5.9
Newport Bridge (U.S.A)	Gerd Mærsk	488	1,000	171	2.85	5.85	1981. 2.19
Sidney Lanier Bridge (U.S.A)	Ziemia Bialostocka	75	400	185	0.41	2.16	1988. 5.3

제 3 장 선박 통항 교량의 운항 안전성 평가를 위한 이론적 검토

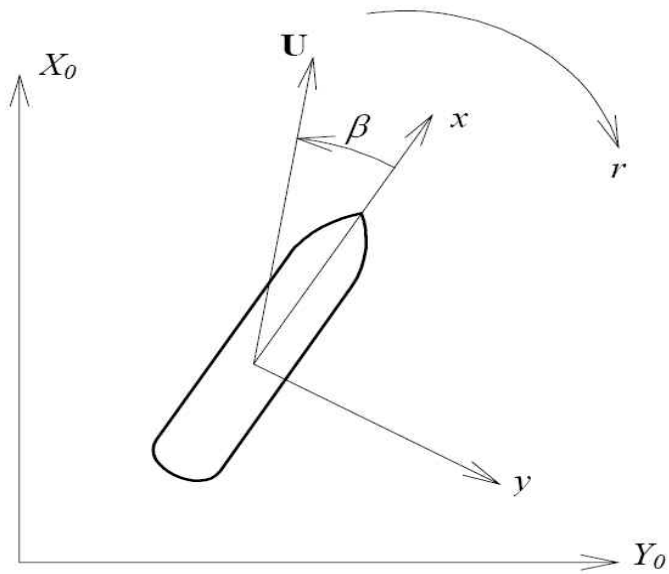
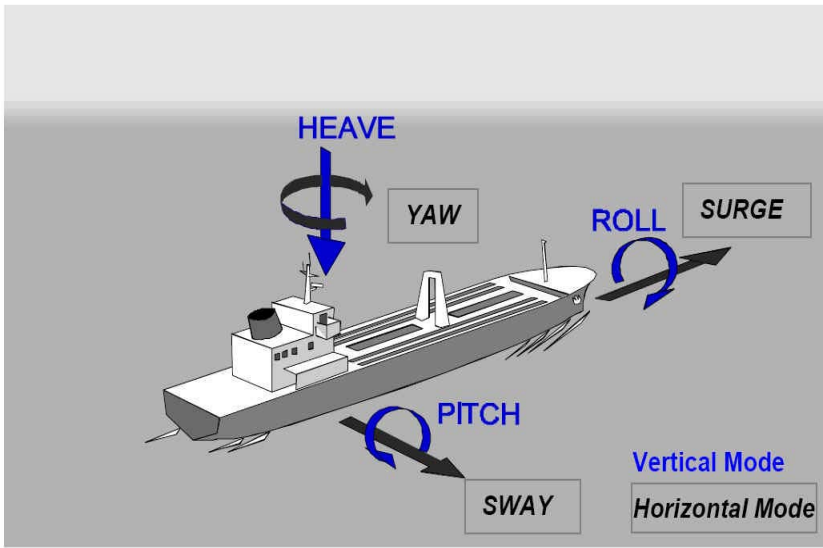
해상교량에서의 선박통항 안전성을 검토하기 위해서는 숙달된 조종자가 실제의 선박을 조종하여 수로를 통과하는 실험적인 방법을 반복하여 결정하는 것이 가장 이상적이지만 이러한 일은 실행에 옮기기 곤란하다. 그러므로 선박조종시물레이터를 이용하여 숙달된 조종자가 실제의 조종 환경조건과 같은 상태 하에서 선박조종을 반복 실시한 다음 조종 선박의 운동궤적을 분석 검토하여 조종의 안전성을 평가하는 것이 일반적이다. 이 장에서는 본 연구의 실험 항로 폭에 사용된 모델식을 설명하고 시물레이션 데이터베이스 및 선박통항의 안전성 평가에 관한 이론을 구체적으로 검토하기로 한다.

3.1 운동방정식 및 시물레이션 데이터베이스 개발

3.1.1 선체 운동방정식의 개발

교량을 통과하게 될 선박들 중 각 교량별로 통과할 규모가 가장 큰 선박을 모델로 정하여 선박에 대한 선체운동방정식을 개발한 후 이를 시물레이터에 입력하였다. 선체운동방정식에 사용한 수학 모델은 Heuristic Type Mathematical Model로 유체동력학적인 도함수를 사용한 모델과는 달리 선체운동 시스템을 블랙박스로 가정하여 도출한 간단한 방정식을 이용하여 선체의 동작을 표현하는 것이다. 이 모델은 변환이 간단하고 거의 자동적인 방법으로 새로운 모델 혹은 수정된 모델을 만드는 것이 가능하므로 널리 이용되고 있다.^[12]

(1) 좌표계



<Fig 3-1> 좌표계

본 시뮬레이션에 사용한 선체운동방정식의 좌표계는 <Fig. 3-1>과 같다. 선체의 중앙지점 0으로부터 선수쪽 방향을 X축, 우현쪽을 Y축, 선저쪽 방향을 Z축의 양(+의 방향으로 하는 고정된 직각 좌표를 사용하여 Surge, Sway 속도 및 Yaw(각속도)를 표현한다. Surge 속도는 u(m/s)로 나타내고, Sway 속도는 v(m/s)로, Yaw(각속도)는 r(rad/s)로 나타낸다.

(2) 선체 운동방정식

선체운동방정식은 기본 선체운동방정식 d_1, d_2, d_3 에 바람과 조류의 영향, 예선의 영향을 가산하여 구성된다. 즉, Surge 속도 $d(1)$, Sway 속도 $d(2)$, Yaw rate $d(3)$ 는 식 (3-1)과 같이 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} d(1) &= \int_0^t \left(d_1 + \frac{UW}{K_{(23)}} + \frac{UC}{K_{(16)}} + \frac{T_{xt}}{K_{(36)}} \right) dt \\ d(2) &= \int_0^t \left(d_2 + \frac{VW}{K_{(24)}} + \frac{VC}{K_{(17)}} + \frac{T_{yt}}{K_{(37)}} \right) dt \\ d(3) &= \int_0^t \left(d_3 + \frac{RW}{K_{(25)}} + \frac{RC}{K_{(18)}} + T_{mt} \right) dt \end{aligned} \right\} \text{---- 식 (3-1)}$$

단,

d_1, d_2, d_3 : 기본방정식으로 구한 선박의 종방향가속도, 횡방향가속도, 선수각가속도
 UW, VW, RW : 바람의 영향에 의한 선박의 종방향가속도, 횡방향가속도, 선수각가속도
 UC, VC, RC : 조류에 의한 선박의 종방향가속도, 횡방향가속도, 선수각가속도
 T_{xt}, T_{yt}, T_{mt} : 예선에 의한 선박의 종방향가속도, 횡방향가속도, 회두모멘트임

여기서 식 (3-1)을 적분하면 선수 이동거리, 횡방향 이동거리, 회두각을 구할 수 있어 선박의 위치와 선수 방위를 계산할 수 있다.

3.1.2 시뮬레이션 데이터베이스의 개발

시뮬레이션을 위한 데이터베이스는 영상 데이터베이스, 레이더 데이터베이스, 수심 데이터베이스 및 조류 데이터베이스의 4가지로 이루어진다. 이들 데이터베이스를 국립 해양조사원이 발행한 해도와 조류도, 교량건설도면, 관련 사진 등을 기초로 하여 다음과 같이 구축하였다.

(1) 영상 데이터베이스

영상 데이터베이스는 대상 선박에서 보는 교량 진입항로 및 그 인근 해역의 전경이 표현되고 항만의 구조물 및 건물이 표현되도록 하였으며, 현장의 사진을 근접 촬영하여 정확한 영상 표현이 가능하도록 하였다.^{[13][14]}

(2) 레이더 데이터베이스

레이더 데이터베이스는 영상 데이터베이스를 기초로 하여 구축하였다. 실제의 레이더 영상과 동일하게 표현되도록 맹목구간, 그늘구간, 페이딩 현상들을 가미하였다.

(3) 수심 데이터베이스

수심은 최신판 해도의 수심을 기초로 하되, 준설 해역은 준설 후의 수심을 기준으로 데이터베이스를 구축하였다.

(4) 조류 데이터베이스

조류 데이터베이스는 조류도 자료를 기준으로 하여 구축하였으며, 최강 창조류와 최강 낙조류에 대해 각각의 데이터베이스를 따로 구축하였다.

3.2 시뮬레이션 평가 방법

시뮬레이션 결과를 평가하는 방법에는 선박의 근접도 평가, 제어도 평가 및 조종자의 주관적 평가가 있다. 시뮬레이션 횟수, 대상 해역 및 선박의 특성 등에 따라 세 가지 방법 모두를 이용하여 평가하기도 하고 두 가지 평가 방법만을 이용하여 평가하기도 하나 본 연구에서는 세 가지 모두를 이용하여 평가한다.

3.2.1 선박의 근접도 평가

선박의 근접도 평가는 접근시 위험이 예상되는 기준점 또는 기준선을 설정하고, 이의 최근접거리를 측정하여 구한다.

기준점 또는 기준선 설정시, 접이안 안전성 평가의 경우는 선회장 외곽선이 위험 기준선이 될 수 있으며, 항로상의 출입안전성을 평가할 때는 항로외곽선 또는 특정 부표가 기준선 또는 기준점이 된다. 교량의 경우는 교각면을 기준점으로 하고, 이들 거리에 대한 확률분포를 구하여 평가대상지점을 벗어날 확률을 구한다. 이때, 침범확률은 선박이 한번 지날 때 항로경계를 벗어날 확률로 정의한다.^{[15][16]} 그리고 최근접거리는 선박이 어떤 기준점 또는 기준선을 지날 때 선박의 끝과 기준점 또는 기준선과 가장 가까운 거리로 정의한다.

최근접거리의 확률분포를 정규분포라 가정하고 식 (3-2)를 이용하여 정규분포함수의 확률변수에서 기준에 해당하는 값 ξ 를 구한다.

$$\xi = \frac{\mu}{\sigma} \text{-----} \text{식 (3-2)}$$

여기에서 μ 는 선박의 끝과 기준선과의 최근접거리의 평균, σ 는 선박과 기준선과의 최근접거리의 표준편차를 말한다.

식 (3-2)로 ξ 값을 구하면 기준을 침범할 확률 P 는 식 (3-3)으로 구할 수 있다.

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-x^2}}{2} dx \quad \text{----- 식 (3-3)}$$

본 연구에서는 교량에 관한 근접도 평가시 방파제 입구에서의 0.0001을 기준으로 안전성 여부를 평가한다. 그리고 액화선박의 경우, 이 침범확률이 항로경계에서는 0.001, 항만내 또는 방파제 입구에서는 0.0001보다 작을 때 안전하다고 평가한다.^[17]

또 이 기준에 따라 주경간장 적정 항로 폭을 산출하기 위하여 항로 경계에서는 침범확률 0.0001이 되는 기준값을 $\xi_{0.0001}$ 로 하고 원래의 수역 폭을 cw_0 로 하면 변경되는 수역 폭 cw 는 식 (3-4)와 같다.

$$cw = cw_0 + \sigma \xi_{0.0001} - \mu \quad \text{----- 식 (3-4)}$$

3.2.2 선박의 제어도 평가

선박의 제어도에 대한 평가는 특정수역에서의 대상 선박의 조종량의 평가로서 선박 조종 상의 어려움이 예상되는 수역을 대상으로 한다. 평가 내용은 선수방위변동량, Yaw rate, 타각사용량, 기관사용량, 선박의 속력 및 선박의 편위량 등이 있다.

일반적으로 타각을 빈번히 사용한 것은 선박을 제어하기가 곤란하다고 판단할 수 있기 때문에 본 연구에서는 타각사용량으로 제어도를 계측한다.

3.2.3 조종자의 주관적 평가

조종자는 선박조종 종합시스템의 최종 실행자이다. 이 시스템 속에서 선박조종자는 지형, 항로표지, 조류, 바람 및 선박의 운동특성 등을 종합적으로 인식하고 이를 기초로 한 판단을 거쳐 적절한 선박 제어 방법을 도출한다. 이 종합 인식 및 판단은 조종자의 지각과정, 중추신경 전달 과정을 거치며 피로도와 의욕도에 따라 그 결과가 달라질 수 있는 복합적인 과정이다. 즉, 선박은 인간인 조종자가 제어시스템의 내부에 포함되며, 조종자가 판단하고 제어한다는 측면에서 계량화되지 않는 부분이지만 조종자의 주관적 평가를 동시에 고려하여야만 한다. 이 평가의 주요 내용은 조류 및 바람 등의 외력 조건 하에서 특정 해역, 특정 부두에의 접이안 및 입출항 조종과 관련하여 선박의 특성에 따라 개개의 조종자가 느끼는 심적 부담도, 조종의 난이도 등이 된다.

이 연구에서는 선장 경험이 있는 조종자에게 시뮬레이션을 실시한 후 <Table 3-1>의 Rating Scale을 이용하여 검토하였다.

<Table 3-1> 주관적 평가 항목 및 Rating Scale

	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
조종위험도	아주 안전하다	안전하다	약간 안전하다	위험/안전 판단곤란	약간 위험하다	위험하다	아주 위험하다
조종곤란도	아주 쉽다	쉽다	약간 쉽다	난이도 판단곤란	약간 어렵다	어렵다	아주 어렵다

제 4 장 선박조종시뮬레이션

본 장에서는 각 교량 교각과의 근접도, 제어도 및 주관적 평가를 정량화하기 위해 실시한 시뮬레이션에 대하여 기술한다. 시뮬레이션에 이용된 실험대상 선박은 각 교량 입출항 최대선박이며, 해당 지역 도선사 및 선장 경력자가 참가하여 최근 3년간 시뮬레이션을 실시하였다.

환경조건은 조류와 바람을 최악의 상태로 설정하였으며, 시뮬레이션 항행시간은 주간으로 하고 선박의 속력은 조타가능 속력을 유지하도록 하였다.

4.1 선박조종시뮬레이터

4.1.1 선박조종시뮬레이터의 구성

선박조종시뮬레이터는 선박의 조종을 모의로 실험하여 봄으로써 선박운항의 안전성을 검증할 수 있고, 선박조종의 적정성을 알아보는 타 장비에 비해 인간과 기계가 함께 하는 선박의 특성을 가장 만족하는 시스템으로 알려져 있다. 기존의 다른 장비는 인간의 심리적 특성을 제외한 기계적인 계산값에 의존하는 장비인데 반해 이 FMSS(Full Mission Ship Handling Simulator)는 한 차원 업그레이드된 장비로서 실제 선박과 동일하게 선박 조종에 필요한 모든 장치를 갖추고 있고, 이들 장치들의 기능과 조작 방법들도 실제 장치들과 같다. 또한, 선박 조종자에게 실제 상황에서와 같은 느낌과 판단 자료를 주기 위해 3차원 영상 정보가 제공된다.

본 연구에서는 한국해양대학교에서 운영하는 FMSS를 이용하여 교량의 통항 안전성을 검토하기로 한다.

FMSS 외부 전경과 선교 내부는 <Fig. 4-1>과 <Fig. 4-2>와 같다.



<Fig. 4-1> FMSS 외부 전경



<Fig. 4-2> FMSS 선교 내부

FMSS의 구성장비는 다음과 같이 콘트롤 콘솔, 조종상황지시기, 영상시스템, Printer, Plotter 및 Digitizer로 구성되어 있으며, <Fig. 4-3>에 상세한 구성도를 나타내었다.

(1) 콘트롤 콘솔

Engine Telegraph 2기, 선수미 Thruster 조정 버튼 1기, Auto Pilot 기능 조타기 1기, Steering Gear 및 Gyro 선택 버튼 2기, 망원경 1기, 알파/레이더 2기, CID(Conning Information Display), 전자해도 시스템

(2) 조종상황지시기

선속 지시기, 풍향 및 풍속 지시기, 기관상태 지시기, 타각 지시기, 선회율 지시기, 수심 지시기, 횡 이동상황 지시기, 예선의 사용지시기 각 1기

(3) 영상시스템

3-Dimension 수평시야 270°, 수직시야 30°, 전방위 확장 가능

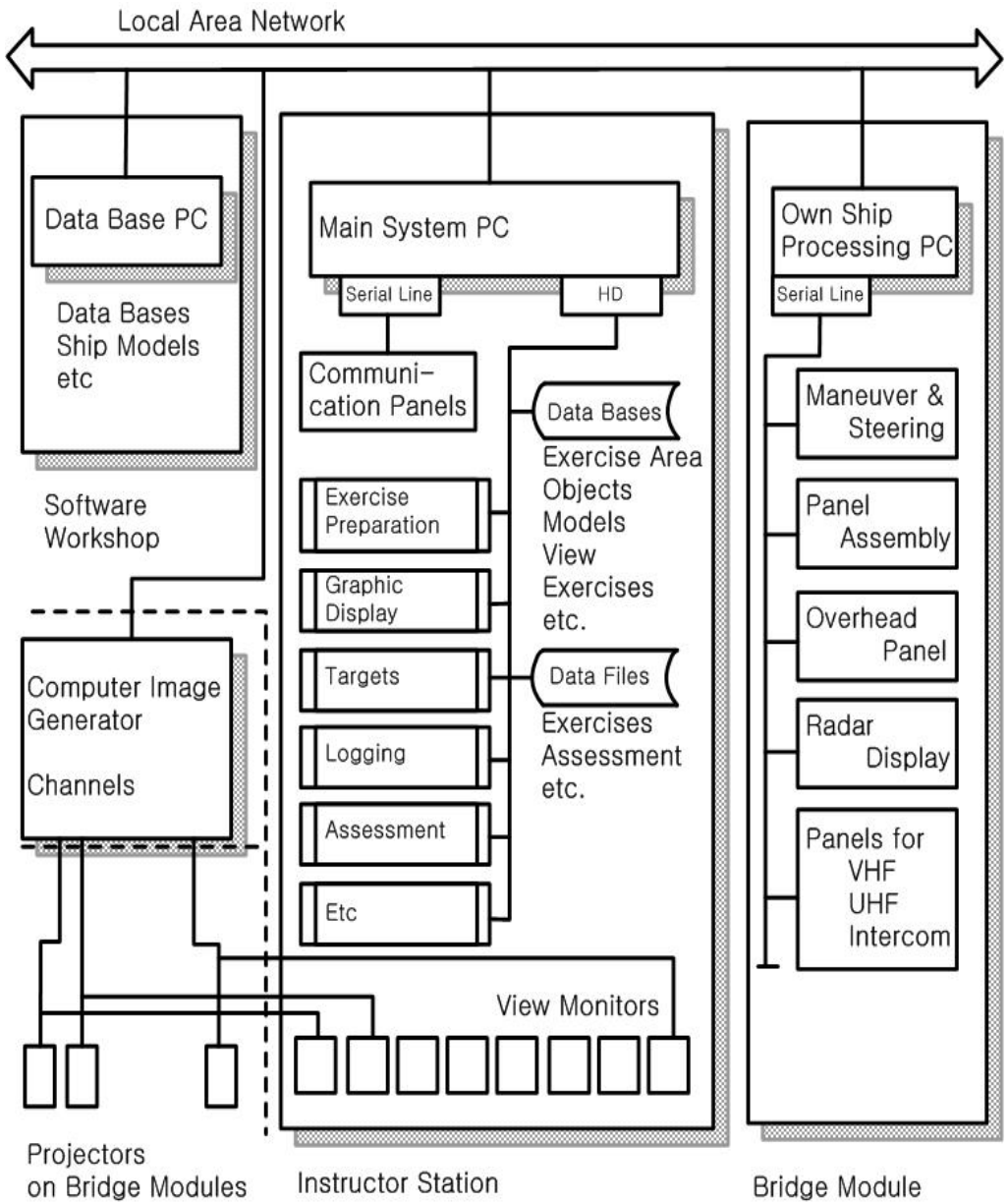
(4) 수학 모델

Hydro Dynamic Force Model로서 천수효과, 뱅크 이펙트(bank effect), 가변 조류, 선박상호간섭, 닻 장력, 예선의 영향, 계류삭, 선수미 Thruster의 효과 처리

(5) Printer 1기

(6) Plotter 1기

(7) Digitizer 1기



<Fig. 4-3> FMSS 구성도

4.1.2 선박조종시물레이션 과정

선박조종시물레이션은 다음의 순서에 따라 수행하였다.

(1) 데이터베이스 개발

대상 해역에서 선박의 조종에 영향을 주는 지형, 건물 및 안벽 등의 인공구조물, 항로표지, 수심, 조류, 바람 등의 자료를 토대로 실제와 같은 상황 재현이 가능하도록 관련 데이터베이스를 구축한다.

(2) 대상 선박의 수학적모델 개발

각 교량을 통과하는 최대 선형을 대상 선박으로 정한 후 앞 절에서 언급한 Hydro Dynamic Force Model로 선박조종 성능을 분석하여 선박운동모델을 구축한다. 그리고 제작된 모델을 시뮬레이터에 입력한 후, 승선 경험이 많은 선장 및 도선사들로 하여금 시뮬레이터 상에서 대상 선박을 조종하게 하여 실제 선박과 조종 특성이 같은지를 비교한다. 실험 결과 실제 선박과 조종 특성에 차이가 발견되면 이를 수정하여 최종적인 모델을 구축한다.

(3) 표준 조종모델

시물레이션 시험을 실시하기 전에 먼저 대상 선박을 목표 지점까지 이동시키는데 필요한 표준적인 조종모델을 설정한다. 이 표준 조종모델은 조류, 바람의 상태, 대상 선박의 조종특성 등에 따라 다르며 승선 경험이 많은 선장 또는 도선사의 의견을 참고하여 설정한다.

(4) 예비 시물레이션

설정된 표준 조종모델의 타당성을 검증하고 필요에 따라 모델을 수정하기 위해 예비 시물레이션을 실시하고, 이를 토대로 하여 표준 조종모델을 수정한다.

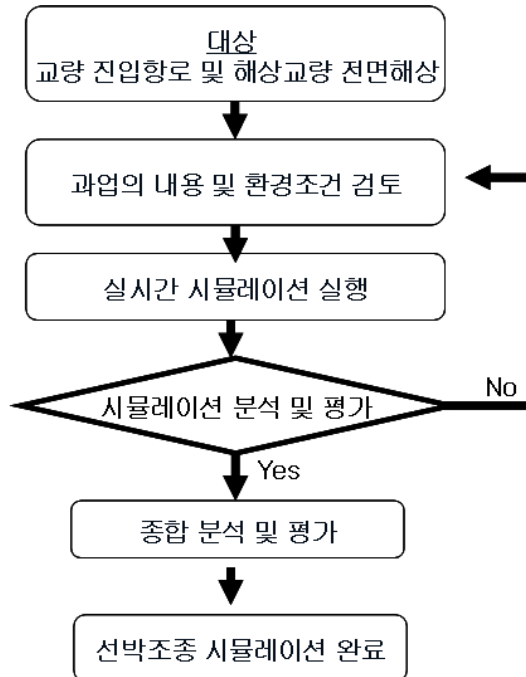
(5) 시뮬레이션의 실행

선박운항에 소요되는 실시간 차원에서 시뮬레이터를 이용하여 선박조종시뮬레이션을 실시하며 모델선박의 궤적을 출력하여 근접도와 제어도를 파악하고 조종자의 심적 부담도, 조종의 난이도 등 조종자의 주관적 평가도 파악하여 기록한다.

(6) 평가

위의 시뮬레이션 결과 수집된 각종 자료들을 바탕으로 선박 운항 안전성을 주관적 및 통계적 방법을 이용하여 분석 및 평가한다.

이를 도식화하면 <Fig. 4-4>와 같이 나타낼 수 있다.



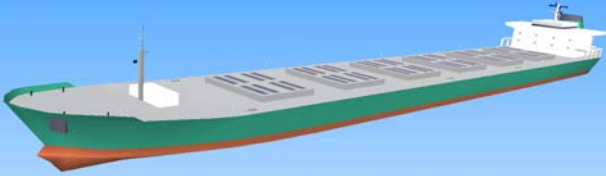
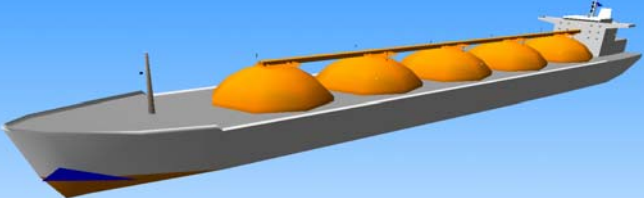
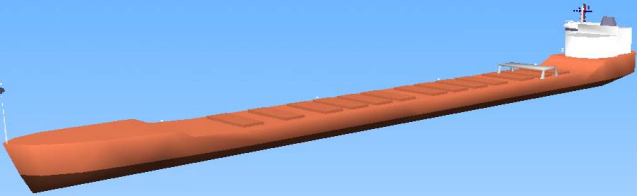

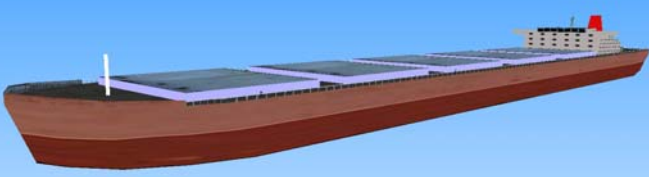
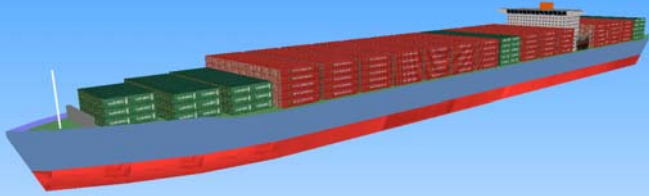
<Fig. 4-4> 선박조종시뮬레이션 흐름도

4.3 시뮬레이션 대상 선박

이 연구에서 사용된 대상 선박은 대상 해역을 통과할 수 있는 최대선박으로 선정하였으며, 그 상세는 <Table 4-1>와 같고 대상 선박의 모습은 <Fig. 4-5>와 같다. 최대선박의 전장 및 선폭의 크기는 광양대교 > 거가대교 > 보령-태안 연육교 > 목포대교 > 서해대교 순이며, 대상 해역의 주경간장은 광양대교 > 목포대교 > 보령-태안 연육교 > 거가대교 > 서해대교 > 마창대교 순이다.

<Table 4-1> 대상 선박의 상세

대상 해역		대상 선박의 상세			
해상교량 명	경간장(m)	선박 종류	전장 (m)	선폭 (m)	흘수(m)
목포대교	550	55,000DWT급 일반화물선	218	32.3	12.9
거가대교	475	100,000G/T급 LNG선	288	43.4	11.5
마창대교	380	60,000DWT급 일반화물선	234	32.3	12.8
서해대교	470	50,000DWT급 일반화물선	215	32.0	11.5
보령-태안 연육교	500	150,000DWT급 화물선	270	43.0	14.5
광양대교	1000 1100 1200	12,000TEU급 컨테이너선	398	55.0	15.0

	<p>목포대교 대상 선박 (55,000DWT급 일반화물선)</p>
	<p>거가대교 대상 선박 (100,000G/T급 LNG선)</p>
	<p>마창대교 대상 선박 (60,000DWT급 일반화물선)</p>
	<p>서해대교 대상 선박 (50,000DWT급 일반화물선)</p>
	<p>보령-태안 연육교 대상 선박 (150,000DWT급 화물선)</p>
	<p>광양대교 대상 선박 (12,000TEU급 컨테이너선)</p>

<Table 4-5> 대상 선박의 모습

4.3 대상 해역 및 대교

대상 해역은 건설 중이거나 건설 예정인 교량의 항만으로 목포항 부근, 거제도-가덕도 부근, 마산-창원 부근, 서해대교, 보령-태안 부근, 광양대교 부근이다.

조류와 바람을 독립변수로 두고, 통항 안전성 검토의 강도를 높이기 위해 실제보다 약간 강한 조류와 바람을 선택하여 어려운 환경 조건을 선택하여 수행하였다.

4.3.1 목포대교

(1) 지형 분석

목포항은 목포구에서 상류로 약 11km, 무안반도의 돌단에 있으며 영산강의 하구항이다. 배후에는 높이 227m의 유달산이 있어 북풍을 막아주고, 전면에는 영암반도와 고하도가 있어 남쪽의 풍파를 줄여주고 있다. 항내는 수심이 깊고 약 50,000톤급 선박의 입항이 가능하고 항구가 좁다는 점과 진입수로가 매우 굴곡되어 있다는 두 가지 점으로 보아 대형선의 입항에는 어려움이 많다.

(2) 기상 분석

1973년~2002년까지의 자료를 분석한 결과에 따르면 동계에는 NW계열, 하계에는 S계열의 추세로 변화됨을 보이고 있다. 그리고 전체적인 풍향은 NNW계열이 탁월하게 나타나고 있다. 시뮬레이션 수행시 최대 풍속으로 26kts를 사용하였으며, 이는 풍속이 14m/s(약 26kts) 이상이면 도선사용 소형 선박의 출입이 제한되어 도선사가 선박에 승하선하기 어렵기 때문이다.

(3) 해상 분석

목포항의 창조류는 NE류 및 SE류하고, 낙조류는 SW류 및 NW류하며 창낙조류의 유속은 매우 미약하여 불규칙하게 나타난다. 창조류는 목포항 저조 후 0.5시경에 전류하여 고조 후 1.0시경까지 약 6.5시간 지속되며 최강 창조류는 고조 전 4.0~5.0시경에 연간 평균대조기 최강유속이 0.1~0.8kts로 나타난다. 낙조류는 고조 후 1시경에 전류하여 저조 후 0.5시경까지 약 5.5시간 지속되며 최강 낙조류는 저조 전 1.0~2.5시경에 연간 평균대조기 최강유속이 0.1~0.4kts에 이른다.

본 연구에서는 바람의 경우는 육지 쪽으로 선박이 밀릴 가능성을 고려한 020°-26kts를 설정하였다. 조류는 국립해양조사원에서 2001년 11월에 간행한 조류도를 참조하여 목포항 전면해상 및 목포대교 부근에서의 최강 창조류(080°, 1.1kts)와 최강 낙조류(330°, 1.1kts)를 구하였으나 실제 시뮬레이션에서는 실제 조류보다 약간 강한 조류인 창조류 080°- 1.5kts와 낙조류 330°- 1.5kts로 하였다.

4.3.2 거가대교

(1) 지형 분석

가덕도 지방은 우리나라 동남측의 해안에 위치하여 바다와 접하고 북측에는 산악지가 있어 여름철에는 내륙지방보다 기온이 비교적 낮으며 겨울철에는 기온이 비교적 높아서 연간 기온의 차이가 적다.

(2) 기상 분석

부산지방에 주로 부는 바람은 지형적 특성에 의하여 하절기에는 SW풍, 동절기에는 NW풍이다.

계절별 풍향은 동계에는 NW, 춘계에는 NNE, 추계에는 NNE, NE풍이 우세하고 하계에는 SSW방향의 풍향이 우세한 것으로 나타났다.

(3) 해상 분석

국립해양 조사원 발행 조류도에 나타난 가덕도 주변 해역의 창낙조시 최강 유속은 0.1~1.1m/sec 정도이고, 부산(가덕)신항만 개발 기본계획 용역(해양수산부, 1996. 12)시 현지 3개소 연속 조류관측을 수행한 결과는 평균대조시에 0.2~0.74m/sec 로 나타났다.

신항 방파제 실시설계 용역(해양수산부, 1997. 7)시에 시행된 관측치와 해수유동 수치모형실험 결과로, 창조시는 E에서 W방향으로 흐르고 가덕도 서측에서는 마산, 진해만으로 향하는 NW방향류가 주류를 이루며, 낙조시 흐름은 창조시와 대체로 반대방향의 흐름패턴을 보였다.

거가대교 가설 부근의 최강 창조류는 대략 NW-2.5kts이고, 최강 낙조류는 SE-2.1kts이며, 현행 가덕수도의 조류는 최강 창조류가 NW-1.4kts, 최강 낙조류는 SSW-1.6kts이다.

본 연구에서는 바람의 경우는 거제도 및 저도 쪽으로 선박이 밀릴 가능성을 고려한 090°-26kts를 그리고 조류는 실제보다 약간 강한 창조류 350°-1.5kts, 낙조류 170°-1.3kts로 각각 구분하여 설정하였다.

4.3.3 마창대교

(1) 지형 분석

마산항은 1889년 마산포로 개장된 이래 어항을 겸한 개항장이며 무역항이다. 이 항은 부두수로의 깊숙한 곳에 있는 소모도에서 북쪽으로 만입한 길이 9.3km, 폭 1.1~3.2km의 좁고 길다란 만으로서 마산항과 창원공업항으로 되어

있다. 배후에는 무학산(높이 763m)를 비롯한 대곡산(높이 516m), 청산(높이 323m), 입용산(높이 310m) 등이 있어 항은 하나의 커다란 호수와 같은 경관을 이룬다. 이 만은 남쪽으로 열려 있을 뿐, 삼면은 산으로 둘러싸여 있으며, 입구의 폭은 920m에 불과하나 위험물은 없다. 항내 수심은 5~14m, 저질은 갯벌로서 묘박수역이 좋으며, 연중 어느 때나 평온하고 어느 바람도 막을 수 있는 천연적으로 좋은 항이다

(2) 기상 분석

마산지역의 풍향별 최대풍속의 경우, 강풍은 S풍이며 N~W 방향의 출현율은 28.2%로 S~W방향의 출현율 20.4%보다 높지만 풍속은 N~W 방향보다 약하다. 풍향별 출현율은 N방향이 10.2%로 가장 높고 그 다음은 NNW방향 9.7%, NNE방향 8.2%의 순위를 나타내고 있으며 특히, N방향의 출현율은 높지만 풍속은 약하다. 연평균 풍속은 1.7m/sec이고 월별 최대풍속은 25.3m/sec(풍향 : S)이며 월별 순간최대풍속은 38.0m/sec(풍향 : SE)이다.

(3) 해상 분석

진해만 북단에 있는 마산만은 폭이 좁고 길며 또 폐쇄수역으로 되어 있어 항내 조류속도는 느리다. 마산항의 조류는 대부분 수로를 따라 흐르며 그 유향은 구간에 따라 달라져 창조류시 마산에서 잠도까지는 마산항쪽으로, 잠도에서 고현까지는 견내량 해협쪽으로 흐르고 그 유속은 잠도 부근에서 가장 강하여 1.6kts이다. 마산만은 항내가 북측으로 만입되어 있고 남측은 거제도 로 둘러싸여 있어서 하절기 태풍에 의한 심해파의 영향을 거의 받지 않고 있다. 단지, 만내에서 바람의 취송거리에 의한 천해파의 영향을 받고 있다.

본 연구에서는 바람의 경우는 육지쪽으로 선박이 밀릴 가능성을 고려한 020°, 그리고 소형선 제한 풍속인 26kts를, 조류는 실제보다 약간 강한 창조

류 307° - 0.5kts, 낙조류 143° - 0.5kts로 각각 구분하여 설정하였다.

4.3.4 서해대교

(1) 지형 분석

아산만은 충청남도 아산시, 당진군과 경기도 평택시와의 사이에 있는 만으로, 아산만을 포함하는 경기 앞바다는 북서쪽으로부터 시계방향으로 거의 남남동쪽에 이르기까지 육지로 둘러싸인 만의 형태를 이룬 해역으로 남서쪽을 축으로 많이 열려 있다. 원해와 취주거리가 길게 이어지는 지형상의 특성으로 이 방향에서 유입되는 바람, 파랑 등 제반 기상 및 해상에 큰 영향을 받는다.

(2) 기상 분석

기상청의 기상연보에 따르면, 연간 탁월풍이 NW방향으로 연평균풍속 3.4m/sec, 최대풍속은 25.7m/sec(WSW), 순간최대풍속은 40.0m/sec(SSW)로 보고 있다.

(3) 해상 분석

평택(아산)항 일대 조석의 특징은 일조부등은 작은 반일주조형 조석으로서 매일 1일 2회조로 나타나며 대조평균 고조위는 863.8cm, 평균해면은 468.8cm를 나타낸다. 조류는 반일주조형으로 창조류는 E-SE, 유속은 0.92-1.31m/sec이고, 낙조류는 NW, 유속은 0.86-0.98m/sec를 나타내고 있다.

본 연구에서는 바람의 경우 가장 좋지 않은 조건인 조종 한계풍속 25kts를, 풍향은 교각쪽으로 밀려 충돌 가능성이 있는 NE를 설정하였다. 조류의 경우는 남측호안이 철거된 후의 상태를 예상하여 수치실험을 통해 얻은 최강

유속인 약 1.4kts로 설정하여 입항의 경우에는 창조류 방향인 150°, 출항의 경우에는 낙조류 방향인 330°로 설정하였다.

4.3.5 보령-태안 연육교

(1) 지형 조건

대천항 북서방 약 8.5km에 있는 이 항은 보령화력발전소 전용부두로서 항만시설은 돌핀식 잔교로 41선석은 길이 231m, 42선석은 길이 241m, 43선석은 길이 190m의 물양장이 축조되어 있다.

보령시는 충청남도 남서에 위치하고 있으며 해안에 형성된 분지이다. 북쪽으로 홍성군을 경계로 하고 동쪽으로 청양군, 서쪽으로는 서해 해상이 위치하며 남쪽으로는 서천군과 부여군을 경계로 하고 있다. 보령시는 동쪽으로 차령산맥의 지선인 성주산이 남서로 뻗쳐 있으며 서쪽에는 서해 중부 해상으로 리아스식 해안과 안면도, 원산도 등 여러 섬들이 산재해 있다.

(2) 기상 조건

보령항의 경우 탁월풍은 SSW, SW의 순으로 나타났으며, 풍속 13.9m/s 이상의 폭풍일수는 연평균 1.4일 정도이다. 겨울철에는 W풍계열, 여름철에는 SE풍계열의 바람이 주로 분다. 보령기상대의 과거 5년간 관측한 기록에 의하면 평균풍속은 1.9m/sec이다.

(3) 해상 조건

“서해안 산업관광도로(태안-안면-보령) 타당성 및 기본 계획 종합보고서” 및 조류도(격렬비도 부근)를 참조하여 보면 천수만 내부가 남북으로 형성되어 조류는 지세에 따라 흐르고 있으며 유속은 만 내로 창조류가 1.2kts,

낙조류가 1.9kts로 낙조류가 우세하고 만 입구는 수도 폭이 좁아 유속이 강하다. 창조류는 3.6kts, 낙조류는 3.1kts로 창조류가 약간 우세한 편이며 대천항 전면 해역에서의 최강 창조류는 3.9kts-3.0kts, 최강낙조류는 2.3kts-3.0kts에 달한다.

본 연구에서는 바람의 경우 좋지 않은 조건인 조종 한계풍속 25kts를, 풍향은 교각 쪽으로 밀려 충돌 가능성이 있는 입항시 NW계열, 출항시 SE계열을 설정하였다. 조류는 국립해양조사원의 조류도를 인용하여 최강 창조류는 020°-3.9kts와 최강 낙조류는 190°-3.3kts를 설정하였다.

4.3.6 광양대교

(1) 지형 조건

광양항만은 광양만 중앙에 있는 묘도를 중심으로 북으로 동광양시와 남으로 여천시에 위치하는 무역항이다. 이 항의 북측은 1984년부터 개발하여 영호도 남측을 매립, 접안할 수 있는 시설을 축조하여 CTS부두, 제품부두, 일반부두 등이 있으며, 항의 남측전면 해안을 1969년부터 매립하여 여천화학공업단지를 조성하였다. 광양항은 삼면이 육지로 둘러싸여 천연적으로 양항의 조건을 갖춘 항만으로 동광양시 서측은 승주군, 남측은 여수반도와 동측의 여수해만을 사이에 두고 남해도와 접하고 있다.

(2) 기상 조건

광양만 지역의 탁월풍향은 겨울철에 NW, 여름철에 SW를 나타내고 있다. 최대풍속은 주로 태풍에 의하여 발생되나 만 주변이 산으로 차단되어 있기 때문에 광양만내는 비교적 정온하다. 1972년~2001년까지의 자료를 분석한 결과에 따르면 동계에는 NW풍, 춘계에는 NE풍, 추계에는 NE풍, 하계에는 SW풍 추세로 변화됨을

보이고 있다. 그리고 전체적인 풍향은 N계열이 탁월하게 나타나고 있다.

(3) 해상 조건

광양항 해역은 창조시 ENE, 낙조시 SW방향이 주를 이루고, 뚜렷한 반일주조의 조석주기가 나타나며, 보름 정도의 주기를 갖고 낙조류보다 창조류가 우세하다. 광양항의 조류 형태는 반일주조가 우세한 혼합형으로 1일 2회의 창낙조류가 규칙적으로 일어난다. 일조부등은 달의 적위가 최대인 날로부터 약 1일 전에 나타나며, 대조기는 하동절의 삭망에, 소조기에는 춘추절의 양현에 출현한다. 최강 낙조류는 여수해만 항로에서 고조 전 1.9~4.0시경에 평균 대조기 최강 유속이 1.2~1.7km, 최강 낙조류는 묘도남측 항로에서 저조 전 2.4~4.1시경에 평균 대조기 최강 유속이 0.5~2.2km로 조사되었다.

본 연구에서는 바람의 경우 조종 한계풍속인 26kts를, 풍향은 선체가 교각 쪽으로 압류되어 충돌 가능성이 있는 N & S 계열을 설정하였다. 그리고 국립해양조사원의 조류도를 인용하여 최강 창조류는 240°-1.4kts, 최강 낙조류는 060°-1.4kts를 설정하였다.

4.4 시나리오 설계

각 대상 선박에 대하여 입출항의 경우 창조류, 낙조류시의 각 5회의 시뮬레이션을 실시하였다. 이 연구를 위한 시나리오는 <Table 4-2>와 같다.

<Table 4-2> 선박조종시물레이션 시나리오

대상 해역	번호	방식	대상 선박	조류	바람	기타
목포 대교	S-1	입항	55,000DWT	창조류 080° - 1.5kts	NNE 26kts	
	S-2	출항	55,000DWT	창조류 080° - 1.5kts	NNE 26kts	
	S-3	입항	55,000DWT	낙조류 330° - 1.5kts	NNE 26kts	
	S-4	출항	55,000DWT	낙조류 330° - 1.5kts	NNE 26kts	
거가 대교	S-1	입항	100,000G/T	창조류 350° - 1.5kts	E 26kts	
	S-2	출항	100,000G/T	창조류 350° - 1.5kts	E 26kts	
	S-3	입항	100,000G/T	낙조류 170° - 1.3kts	E 26kts	
	S-4	출항	100,000G/T	낙조류 170° - 1.3kts	E 26kts	
마창 대교	S-1	입항	60,000DWT	창조류 307° - 0.5kts	NE 26kts	
	S-2	출항	60,000DWT	창조류 307° - 0.5kts	NE 26kts	
	S-3	입항	60,000DWT	낙조류 143° - 0.5kts	NE 26kts	
	S-4	출항	60,000DWT	낙조류 143° - 0.5kts	NE 26kts	
서해 대교	S-1	입항	50,000DWT	창조류 150° - 1.4kts	NE 25kts	
	S-2	출항	50,000DWT	낙조류 330° - 1.4kts	NE 25kts	
보령 태안 연 육 교	S-1	입항	150,000DWT	창조류 020° - 3.9kts	NW 25kts	
	S-2	출항	150,000DWT	창조류 020° - 3.9kts	SE 25kts	
	S-3	입항	150,000DWT	창조류 020° - 3.9kts	NW 25kts	동일선종 교항
	S-4	출항	150,000DWT	창조류 020° - 3.9kts	SE 25kts	동일선종 교항
	S-5	입항	150,000DWT	낙조류 190° - 3.3kts	NW 25kts	동일선종 교항
광양 대교	S-1	입항	12,000TEU	창조류 240° - 1.4kts	N 26kts	주경간장 1,000m
	S-2	출항	12,000TEU	낙조류 060° - 1.4kts	S 26kts	
	S-3	입항	12,000TEU	창조류 240° - 1.4kts	N 26kts	주경간장 1,100m
	S-4	출항	12,000TEU	낙조류 060° - 1.4kts	S 26kts	
	S-5	입항	12,000TEU	창조류 240° - 1.4kts	N 26kts	주경간장 1,200m
	S-6	출항	12,000TEU	낙조류 060° - 1.4kts	S 26kts	

4.5 조종자의 구성

본 연구를 위하여 각각의 상황에 대하여 시나리오를 작성한 후 승무경험이 충분한 해당 항만의 도선사 및 선장 경력자가 선박조종시뮬레이션 조종을 수행하였다. 시뮬레이션 수행 장면은 <Fig. 4-6>와 같다.



<Fig. 4-6> 선박조종시뮬레이션 수행 장면

제 5 장 시뮬레이션 결과에 대한 비교 분석

본 장에서는 각 대상 해역에서 선박조종시뮬레이션을 실시한 결과를 근접도, 제어도 및 주관적 평가로 나누어 분석한 후, 종합적으로 비교 평가한다.

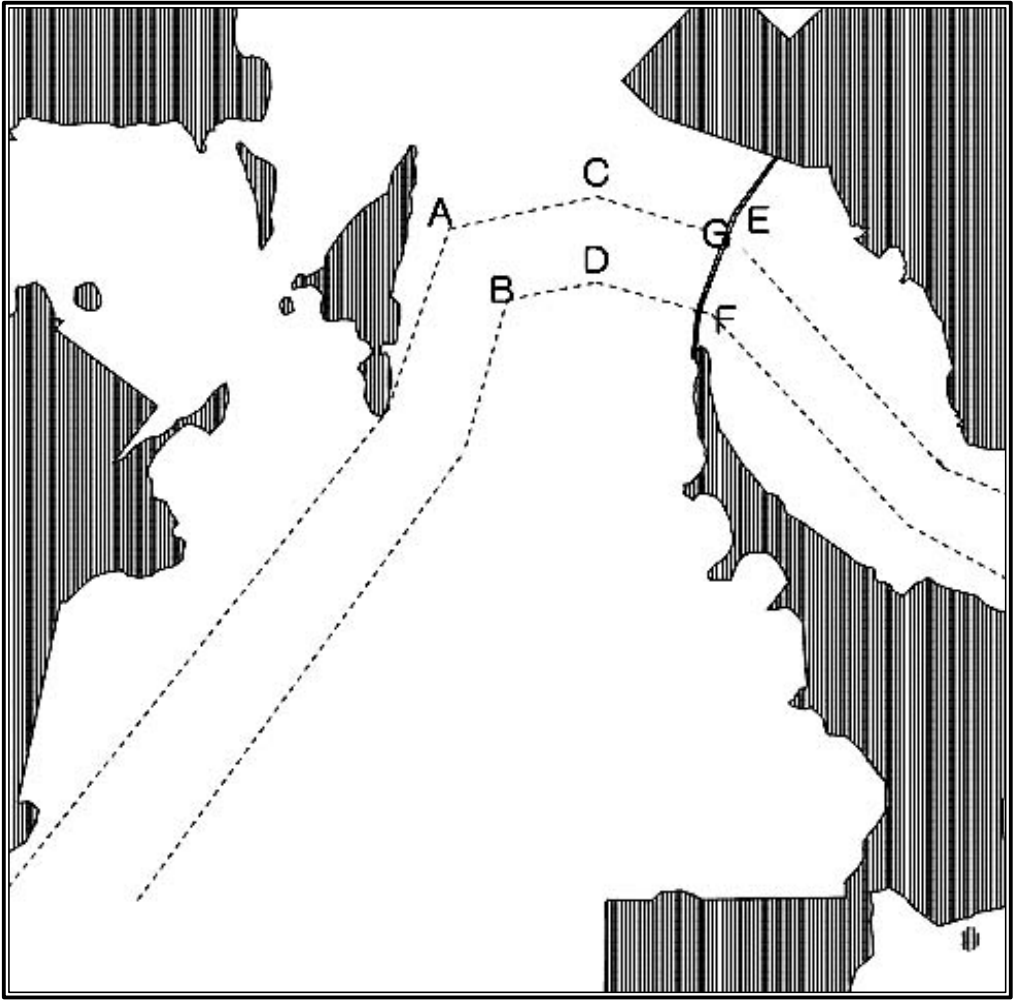
5.1 목포대교

5.1.1 근접도 평가

55,000DWT급 일반화물선이 목포대교를 통과할 경우 근접도 계측을 위한 기준점은 <Fig. 5-1>과 같이 항로 경계선인 점 A, 점 B, 점 C, 점 D, 점 G 및 교각 끝단인 점 E, 점 F이다. 단, 점 E-F 사이의 거리는 550m로 설정한다.

본 선박조종시뮬레이션은 단독 통항을 원칙으로 실시하고 근접도 평가는 이들 기준점에서 대상 선박까지의 최근접거리를 구하며 이들 거리에 대한 확률분포를 구하여 평가대상지점을 벗어날 확률을 구한다.

대상 선박이 목포대교를 통항하기 위한 항로 및 해상교량의 교각에 대한 근접도 변수의 기술통계량은 <Table 5-1>과 같고, 교각 통항시의 각 기준점에 대한 침범확률을 시뮬레이션 시나리오별로 정리하여 <Fig. 5-2>와 같이 나타내었다.

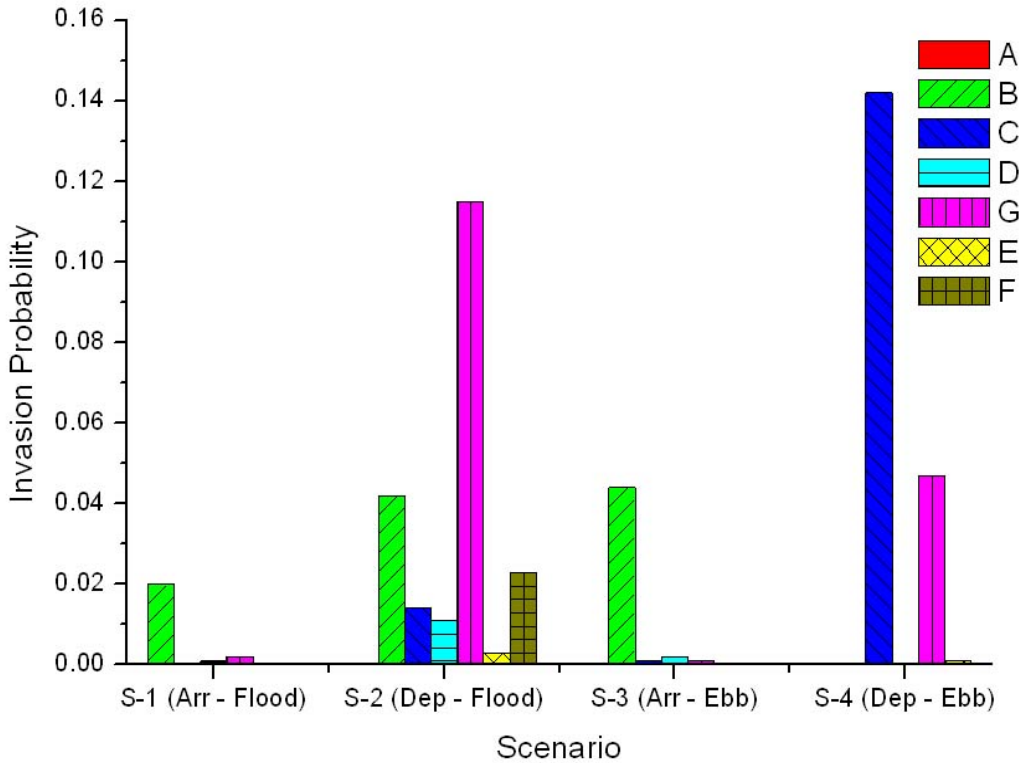


<Fig. 5-1> 목포대교의 근접도 기준점

<Table 5-1> 목포대교 통행 근접도 변수의 기술통계량

기준점	S-1에서의 (입항/창조류)			S-2에서의 최근접거리 (출항/창조류)		
	평균(m)	표준편차	침범확률	평균(m)	표준편차	침범확률
점 A	383.3	61.28	0.0000	347.4	75.99	0.0000
점 B	52.2	25.40	0.0200	74.2	42.83	0.0420
점 C	227.8	67.29	0.0000	212.9	96.98	0.0140
점 D	155.6	50.58	0.0010	198.4	86.15	0.0110
점 G	163.3	56.21	0.0020	94.9	79.04	0.1150
점 E (교각)	235.6	60.20	0.0000	255.9	89.89	0.0030
점 F (교각)	183.3	47.38	0.0000	211.4	105.45	0.0230
기준점	S-3에서의 최근접거리 (입항/낙조류)			S-4에서의 최근접거리 (출항/낙조류)		
	평균(m)	표준편차	침범확률	평균(m)	표준편차	침범확률
점 A	377.8	47.84	0.0000	218.9	38.72	0.000
점 B	53.4	31.15	0.0440	183.4	45.91	0.000
점 C	238.2	76.81	0.0010	73.6	68.35	0.142
점 D	170.2	59.75	0.0020	283.6	72.36	0.000
점 G	190.9	60.10	0.0010	100.6	60.21	0.047
점 E (교각)	280.6	39.88	0.0000	220.4	69.40	0.001
점 F (교각)	153.0	41.21	0.0000	236.2	69.06	0.000

<Table 5-1>, <Fig. 5-2>에 나타난 목포대교 통행 시나리오 S-1, S-2, S-3, S-4에 대한 대상 선박의 통행 근접도 변수의 기술통계량과 침범확률을 항로접근시(점 A-G)와 교각통항시(점 E, F)로 나누어 분석한다.



<Fig. 5-2> 목포대교의 침범확률

항로접근시의 각 기준점에 대한 최근접평균거리와 침범확률에 대하여 접근항로시(점 A~G) ① 입항(S-1, S-3)의 경우를 살펴보면, 최근접거리상 약간의 차이는 있지만 점(G)를 제외하고는 낙조류시(S-3)가 항로의 침범이 많은 것으로 나타났다. 특히, 점(B)가 가장 높은 침범확률을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 이는 어떤 물표를 기준으로 선박 조종을 할 경우 선박조종자는 기준점을 가깝게 하고 반대편에 충분한 거리를 두고 조종하는 것이 일반적이기 때문에 입항시 점 A보다 점 B에 가까워지는 경향을 나타내고 있다. ② 출항(S-2, S-4)의 경우에는 입항과 거의 반대의 결과로 점 C와 G를 제외하고는 창조류시(S-2)가 낙조류시(S-4)보다 침범확률이 높은 것으로 나타났다. 항로접근시 침범확률이 0.000인 값을 제외하면 전체적으로 출항의 경우가 입항의 경우보다 높은 것

으로 나타났다.

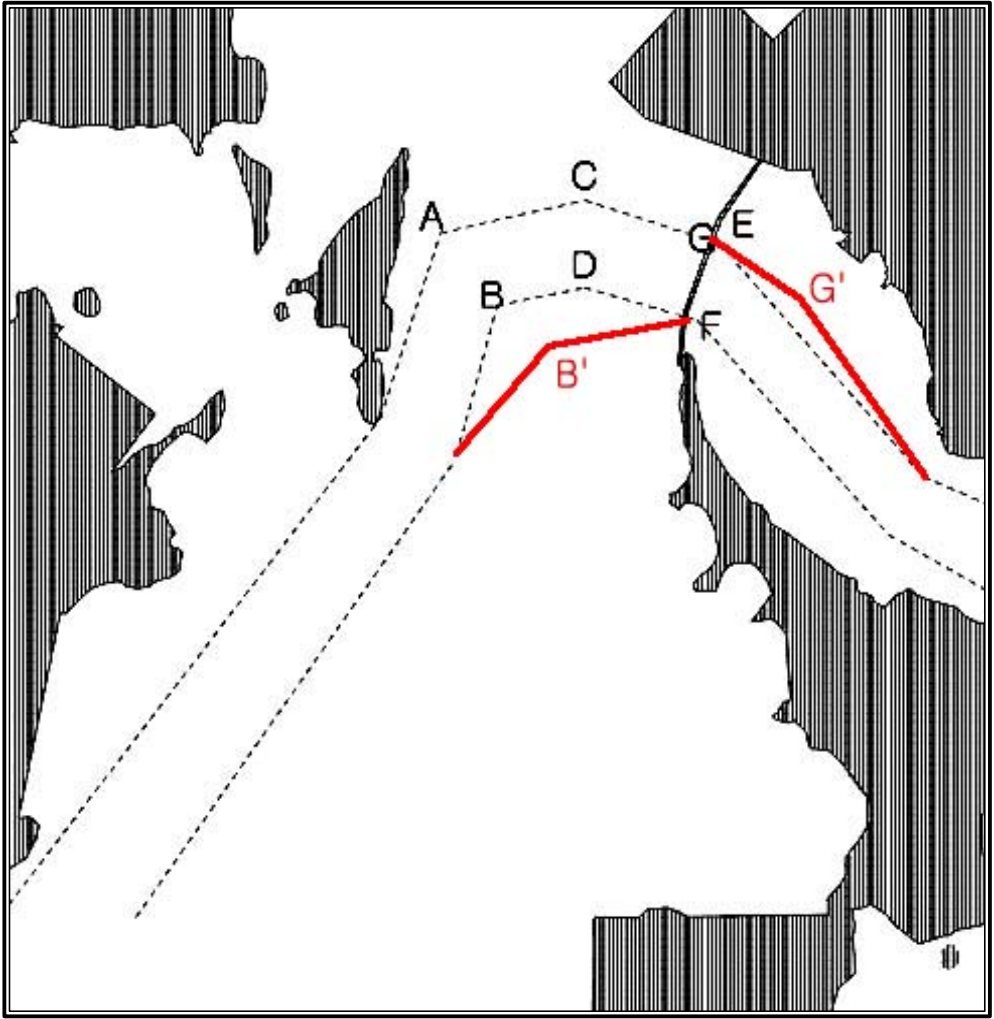
교량 통행의 경우도 각 기준점(점 E, F)에 대한 침범확률에 대하여는 입항시 (S-1, S-3)에는 창조류와 낙조류시 모두 침범확률이 없고, 출항시(S-2, S-4) 창조류(S-2)의 경우가 가장 침범확률이 높은 것으로 나타났다.

이상의 4가지 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과에서 알 수 있는 바와 같이 주경간장을 550m로 유지하고 55,000DWT급 일반화물선의 침범확률을 고려하여 볼 때, 접근항로 폭을 넓혀서 통행 안전성을 확보해야 하는 것으로 판단된다. 넓혀야 할 항로의 폭은 선박조종시뮬레이션을 통한 결과와 식 (3-4)를 이용하여 <Table 5-2>와 같이 나타났다. 이 결과는 총 4가지 시나리오 중 기준점에 가장 근접한 값을 이용하여 얻은 결과이며, 이 방식에 의한 항로 폭 및 교각 폭은 접근항로 A,B 부근에서 138m, C,D 부근에서 43m, F,G 부근에서 86m 증가시켜야 하는 것으로 나타났다.

<Table 5-2> 목포대교 접근 항로에 추가로 필요한 항로 폭

	적정 항로 폭	추가로 필요한 항로 폭
접근항로	점 (A, B) 부근 : 558m 점 (C, D) 부근 : 453m 점 (F, G) 부근 : 476m	약 138m 증가시킴 약 43m 증가시킴 약 86m 증가시킴

<Table 5-2>에 제시된 결과를 바탕으로 교각의 주경간장을 550m를 유지하면서 교량 통행 안전성을 유지하기 위해 <Fig. 5-3>와 같은 항로를 제안한다.



<Fig. 5-3> 목포대교의 제안항로

<Fig. 5-3>에 제안된 새로운 항로에 대하여 선박조종시물레이션을 재실시하고, 대상 선박의 통항 근접도를 재계측하고 근접도 변수의 기술통계량을 구하여 <Table 5-3>에서와 같이 나타내었다.

<Table 5-3> 목포대교(제안항로) 통항 근접도 변수의 기술통계량

기준점	S-1에서의 최근접거리 (입항/창조류)			S-2에서의 최근접거리 (출항/창조류)		
	평균(m)	표준편차	침범확률	평균(m)	표준편차	침범확률
점 (A)	566.0	117.41	0.0000	576.0	63.83	0.0000
점 (B)	150.6	102.77	0.0720	140.0	55.77	0.0060
점 (C)	470.2	146.60	0.0010	286.0	63.98	0.0000
점 (D)	300.0	44.27	0.0000	164.4	82.35	0.1590
점 (G)	154.4	57.18	0.0030	140.0	6.51	0.0000
점 (E : 교각)	174.4	26.64	0.0000	67.0	1.02	0.0540
점 (F : 교각)	152.0	29.43	0.0000	261.4	90.13	0.0020
기준점	S-3에서의 최근접거리 (입항/낙조류)			S-4에서의 최근접거리 (출항/낙조류)		
	평균(m)	표준편차	침범확률	평균(m)	표준편차	침범확률
점 (A)	474.0	64.37	0.0000	360.8	85.74	0.0000
점 (B)	208.0	60.46	0.0000	287.0	71.87	0.0000
점 (C)	340.0	60.66	0.0000	77.0	73.59	0.1470
점 (D)	293.6	58.14	0.0000	177.0	27.3	0.0000
점 (G)	337.6	62.92	0.0000	251.4	21.02	0.0000
점 (E : 교각)	206.0	37.74	0.0000	121.4	85.12	0.0760
점 (F : 교각)	206.0	37.74	0.0000	229.0	54.5	0.0000

대상 선박이 목포대교의 새로운 제안항로를 통항하는 시나리오 S-1 ~ S-4에 대한 통항 근접도 변수의 기술통계량을 기존 방법과 동일하게 항로접근시와 교량각통항시로 나누어 분석하면 다음과 같다.

우선 접근항로시의 경우를 살펴보면, 입항(S-1, S-3)의 경우는 침범 확률이 0.0000인 값을 제외하면 낙조류(S-3)일 때는 침범확률이 없으며, 기존의 항로에서와는 반대로 창조류(S-1)시가 항로의 침범이 많은 것으로 나타났다. 출항(S-2, S-4)의 경우는 입항과 유사하게 점 C를 제외하고는 창조류(S-2)시가 낙조류(S-4)시보다 침범확률이 높은 것으로 나타났다. 또한, 침범 확률이 0.0000인 값을 제외하면 출항(S-2, S-4)의 경우가 입항(S-1, S-3)의 경우보다 높은 것으로 나타나 기존항로에서와 유사한 경향을 나타낸다.

교량 통항의 경우, 입항시(S-1, S-3)에는 창조류와 낙조류시 모두 침범확률이 없고 출항시(S-2, S-4) 교각 E에 대하여 침범확률이 가장 높은 것으로 나타났다.

목포대교 건설시 기존 항로를 유지한 채 주경간의 교량을 통과할 때는 총 28개의 기준점에 침범확률이 있는 곳은 14개로 약 60%의 침범 가능성이 있다고 추정되었다. 이에 반해 본 연구에서 제안한 새로운 항로에 대한 선박조종시물레이션 결과는 총 28개 기준점에 침범확률이 있는 곳은 7개로 약 25%의 침범 가능성이 있는 것으로 나타났다.

즉, 기존의 항로를 변경하여 교량을 가설할 경우가 기존의 항로를 유지하면서 교량을 가설하는 것보다는 안전한 것으로 분석었다. 단, 이는 교각 폭을 550m로 유지한다는 가정 하에 분석된 것으로 적정 교각 폭에 대한 평가는 제외된 것이다.

5.1.2 제어도 평가

제어도 계측에서는 큰 차이를 발견할 수 없으나 다만, 입항시 창조류(S-1)와 출항시 낙조류(S-4)에서 상대적으로 제어하기 어려운 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 제어도 평가요소의 기술통계량은 <Table 5-4>와 같다.

<Table 5-4> 목포대교 제어도 평가요소의 기술통계량

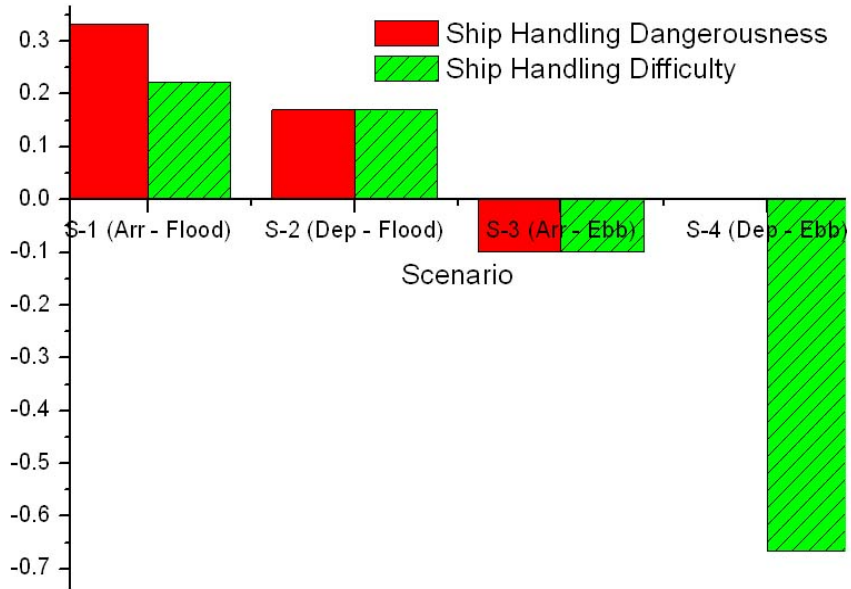
		S-1 (입항/창조류)	S-2 (출항/창조류)	S-3 (입항/낙조류)	S-4 (출항/낙조류)
		타각사용량	평균	25.5	10.3
	편차	10.1	9.4	9.5	12.3

5.1.3 주관적 평가

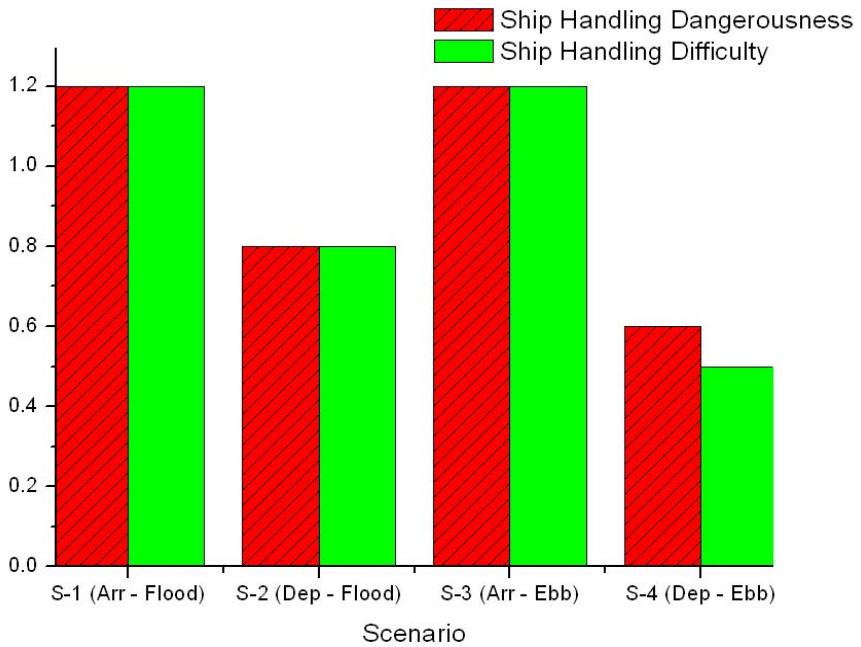
기존 항로에 주경간장을 550m로 하였을 경우와 제안항로에 550m로 했을 경우 두 가지로 검토하였으며, 주관적 평가 요소의 기술통계량 결과는 <Table 5-5>에, 기존항로 및 제안항로에서의 조종위험도와 조종곤란도는 <Fig. 5-4>, <Fig. 5-5>에 각각 나타내었다.

<Table 5-5> 목포대교 주관적 평가 요소의 기술통계량

기존 항로		입항		출항	
		S-1 (창조류)	S-3 (낙조류)	S-2 (창조류)	S-4 (낙조류)
조종위험도	평균	0.333	-0.1	0.17	0.000
	편차	0.943	0.471	0.497	0.471
조종곤란도	평균	0.222	-0.1	0.17	-0.667
	편차	1.030	0.416	0.497	0.000
제안 항로		입항		출항	
		S-1 (창조류)	S-3 (낙조류)	S-2 (창조류)	S-4 (낙조류)
조종위험도	평균	1.2	1.2	0.8	0.6
	편차	0.75	0.98	1.17	1.36
조종곤란도	평균	1.2	1.2	0.8	0.5
	편차	0.75	0.98	1.17	1.36



<<Fig. 5-4> 목포대교의 조종위험도와 조종곤란도 (기준 항로)



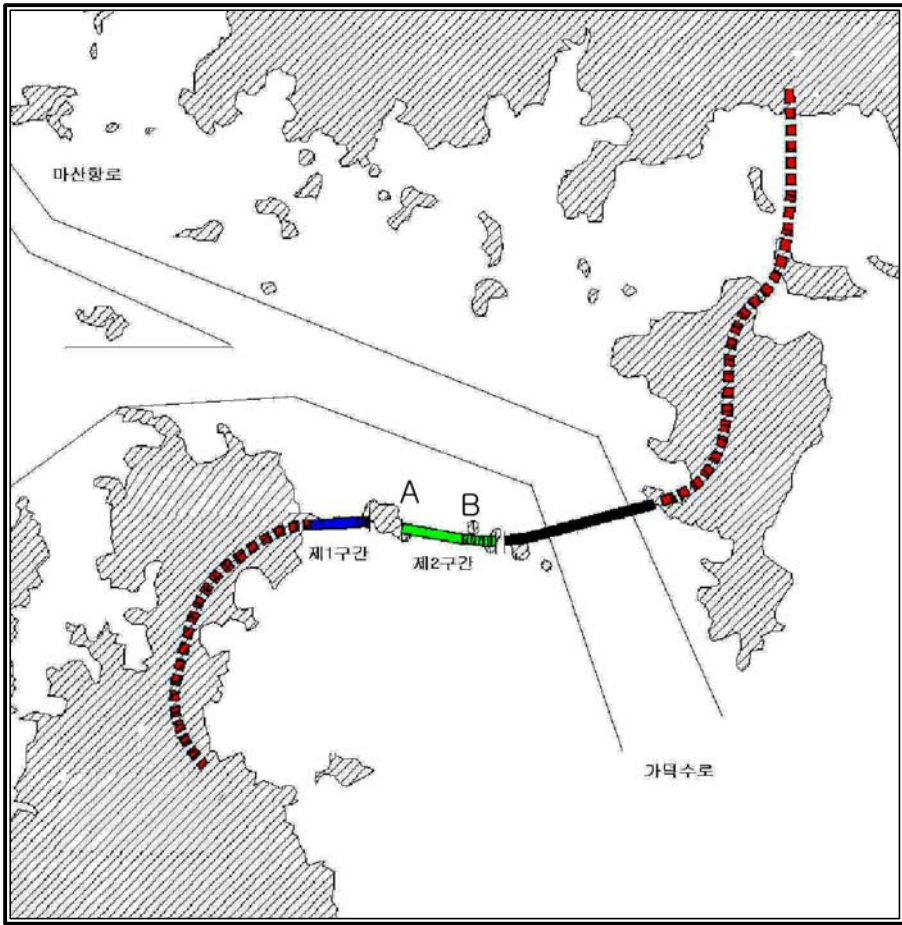
<<Fig. 5-5> 목포대교의 조종위험도와 조종곤란도 (제안 항로)

주관적 평가는 조종위험도 및 조종곤란도로서 평가하여 보면 기존항로에서 조종위험도는 입항시 낙조류(S-3)에서, 조종곤란도는 출항시 낙조류(S-4)에서 어려운 것으로 나타났고, 제안항로에서는 출항시 낙조류(S-4)에서 조종위험도와 조종곤란도가 어려운 것으로 나타났다. 즉, 주관적 평가에서는 창조류시 보다는 낙조류시 더 곤란한 것으로 나타났다. 그리고 기존 항로의 위험도와 곤란도가 제안항로의 곤란도와 위험도보다 어렵다는 결과가 나왔다.

5.2 거가대교

5.2.1 근접도 평가

100,000G/T LNG선이 가설 계획인 거가대교를 통과할 경우 근접도 계측을 위한 기준점은 <Fig. 5-6>과 같이 교각끝단인 점 A, 점 B이다. 단, 기준점 A, B 사이의 거리는 475m로 설정하였다. 이 구간(제 2구간)은 주항로가 해양사고 등으로 폐쇄되었을 경우 이용되는 보조항로의 역할을 한다.



<Fig. 5-6> 거가대교의 근접도 기준점

거가대교 가설 위치에는 항로가 개설되어 있지 않으므로 거가대교의 교각에 대한 근접도 계측만을 실시하여 <Table 5-6>과 같은 기술통계량을 구하였다.

<Table 5-6> 거가대교 통행 근접도 변수의 기술통계량

기준점	S-1에서의 최근접거리 (입항/창조류)			S-2에서의 최근접거리 (출항/창조류)		
	평균	표준편차	침범확률	평균	표준편차	침범확률
점 A	169.7	35.39	0.0000	200.5	12.00	0.0000
점 B	213.3	36.74	0.0000	189.3	15.94	0.0000
기준점	S-3에서의 최근접거리 (입항/낙조류)			S-4에서의 최근접거리 (출항/낙조류)		
	평균	표준편차	침범확률	평균	표준편차	침범확률
점 A	220.0	36.51	0.0000	226.7	21.54	0.0000
점 B	165.0	31.36	0.0000	141.3	37.82	0.0000

<Table 5-6>에서 보는 바와 같이 모든 시나리오에서 교각 끝단에 대한 침범 확률은 나타나지 않았다. 또한 입항 혹은 출항 그리고 창조류 혹은 낙조류에 대한 유의적인 차이는 없다.

거가대교 접근항로에 대한 선박조종시뮬레이션을 통한 결과를 이용하여 <Table 5-7>과 같은 적정 항로 폭을 도출하였으며, 이 결과는 총 4가지 시나리오 중 기준점에 가장 근접한 값 하나를 이용하여 얻은 것이다. 필요한 항로 폭은 312~450m로 이는 475m 경간장을 만족하는 항로 폭으로 분석된다.

<Table 5-7> 거가대교에 추가로 필요한 항로 폭

	항로 폭 요구분	필요 항로 폭
교각 (475m)	점 (A, B) 부근	312 ~ 450m

5.2.2 제어도 평가

근접도 계측에 의하면 입항과 출항 그리고 창조류와 낙조류에 대해서는 유의적인 차이는 없으나 <Table 5-8>에서와 같이 낙조류 입항시가 상대적으로 제어하기 어려움을 알 수 있다.

<Table 5-8> 거가대교 제어도 평가 요소의 기술통계량

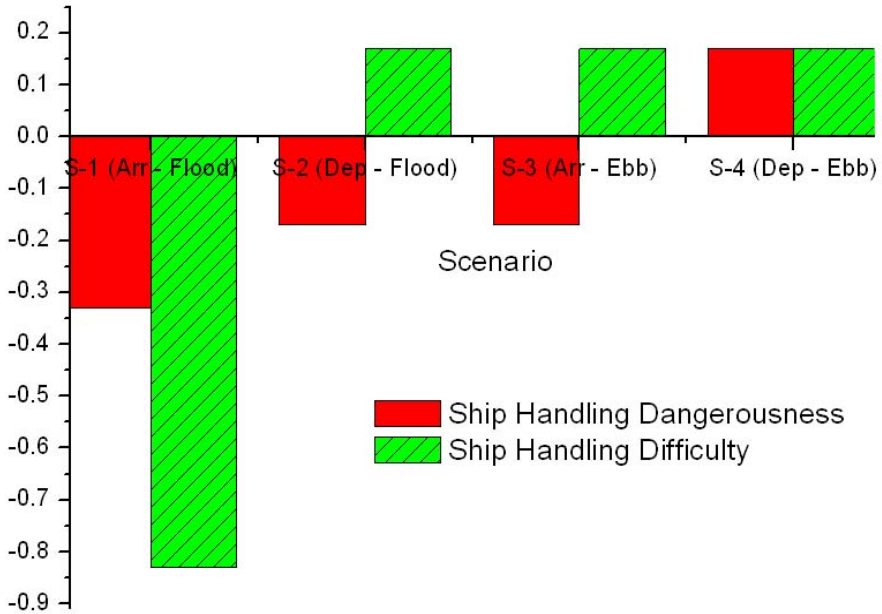
		시나리오			
		S-1 (입항/창조류)	S-2 (출항/창조류)	S-3 (입항/낙조류)	S-4 (출항/낙조류)
타각사용량	평균	10.31	7.86	13.49	10.08
	편차	11.75	10.05	13.40	11.21

5.2.3 주관적 평가

제2구간인 주경간 475m를 검토하여 <Table 5-9>와 같은 조종위험도와 조종근란도에 대한 기술통계량을 구하고, <Fig. 5-7>로 나타내었다.

<Table 5-9> 거가대교 주관적 평가 요소의 기술통계량

		시나리오			
		S-1 (입항/창조)	S-2 (출항/창조)	S-3 (입항/낙조)	S-4 (출항/낙조)
조종 위험도	평균	-0.33	-0.17	-0.17	0.17
	편차	0.47	0.37	0.37	0.37
조종 근란도	평균	-0.83	0.17	0.17	0.17
	편차	0.69	0.37	0.37	0.69



<Fig. 5-7> 거가대교의 조종위험도와 조종곤란도

<Table 5-9>와 <Fig. 5-7>에서 보는 바와 같이, 조종위험도 및 조종곤란도는 창조류시의 입항(S-1)이 가장 위험하고 곤란한 것으로 나타났다. 반면 낙조류시 출항(S-4)는 상대적으로 쉬운 것으로 나타났다.

주관적인 평가만으로 볼 때는 출항시(S-2, S-4)보다는 입항시(S-1, S-3)가, 낙조류시(S-3, S-4)보다는 창조류시(S-1, S-2)가 더 어려운 것으로 분석된다.

5.3 마창대교

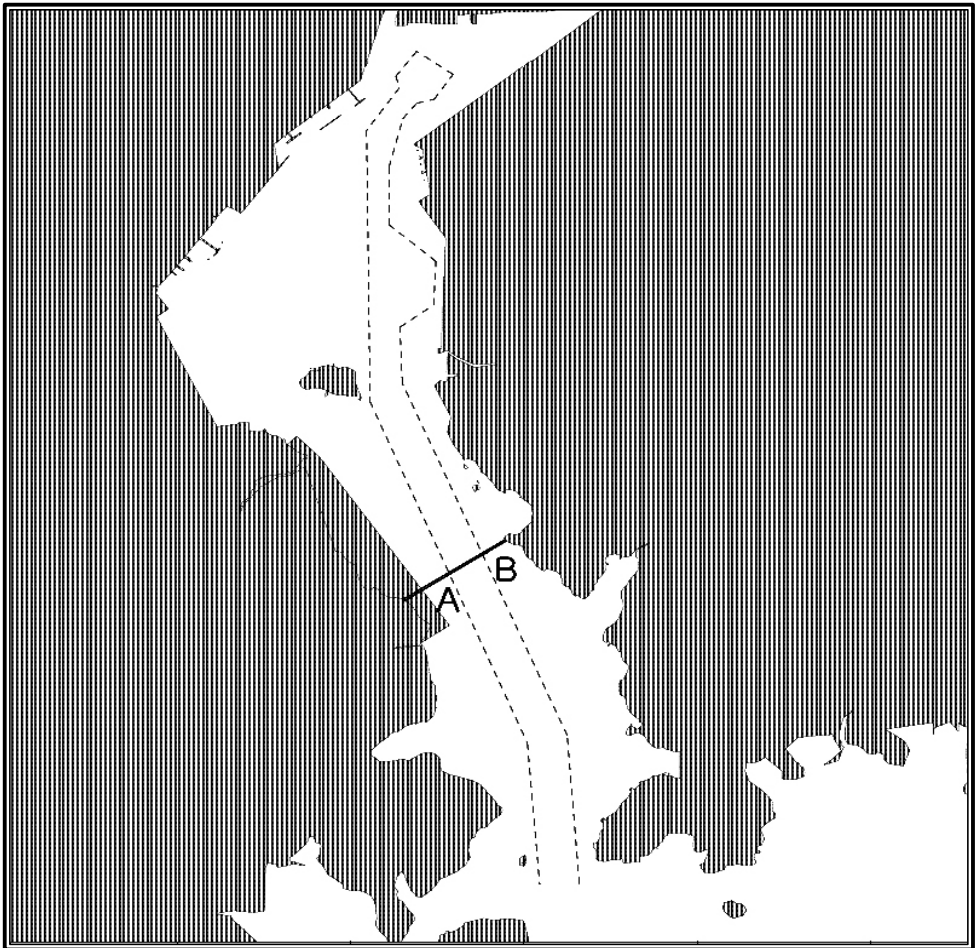
5.3.1 근접도 평가

60,000DWT급 일반화물선이 가설 계획인 마창대교를 통과할 경우 근접도 계측을 위한 기준점은 <Fig. 5-8>과 같이 교각 끝단인 점 A, 점 B이다. 단, 점 A,

B 사이의 간격은 380m로 설정한다.

선박조종시뮬레이션은 단독 통항을 원칙으로 실시하고 근접도 평가는 이들 기준점에서 대상 선박까지의 최근접거리를 구하고, 이들 거리에 대한 확률분포를 구하여 평가대상지점을 벗어날 확률을 구한다.

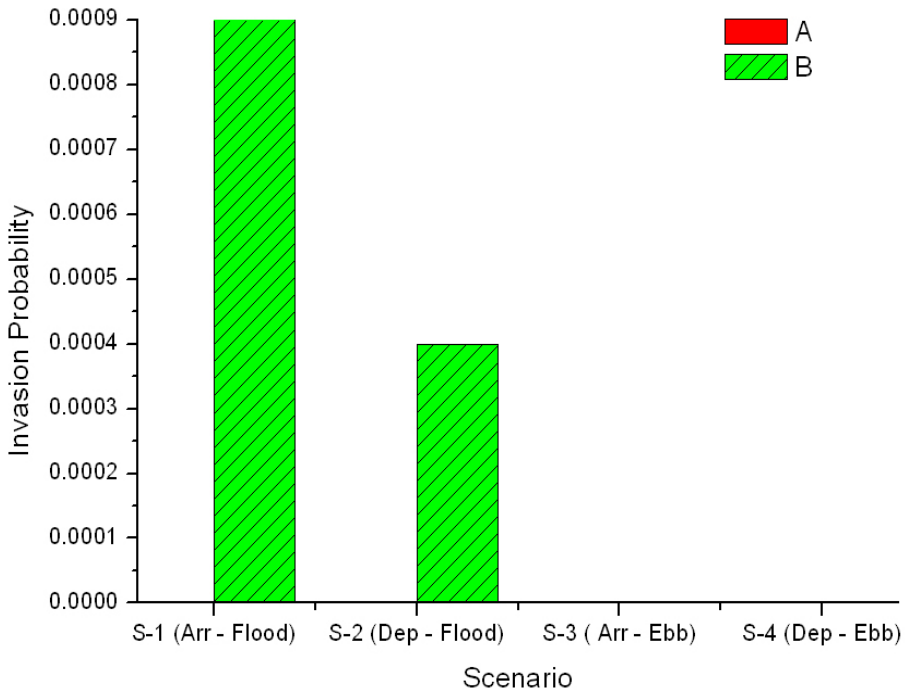
마창대교를 통항하기 위한 항로 및 대교의 교각에 대한 근접도 변수의 기술통계량은 <Table 5-10>과 같고, 교각 통항시의 각 기준점에 대한 침범확률을 시뮬레이션 시나리오별로 정리하여 그림으로 나타내면 <Fig. 5-9>와 같다.



<Fig. 5-8> 마창대교의 근접도 기준점

<Table 5-10> 마창대교 통항 근접도 변수의 기술통계량

기준점	S-1에서의 최근접거리 (입항/창조류)			S-2에서의 최근접거리 (출항/창조류)		
	평균(m)	표준편차	침범확률	평균(m)	표준편차	침범확률
점 (A)	215.8	43.34	0.0000	202.2	45.14	0.0000
점 (B)	159.2	50.86	0.0009	164.2	48.43	0.0004
기준점	S-3에서의 최근접거리 (입항/낙조류)			S-4에서의 최근접거리 (출항/낙조류)		
	평균(m)	표준편차	침범확률	평균(m)	표준편차	침범확률
점 (A)	170.8	27.60	0.0000	187.2	10.17	0.0000
점 (B)	194.2	26.84	0.0000	173.8	16.44	0.0000



<Fig. 5-9> 마창대교의 침범확률

상기의 <Table 5-10>, <Fig. 5-9>에서 알 수 있듯이 각 기준점에 대한 최근접평균 거리와 침범확률에 대하여는 입출항시 모두 창조류시(S-1, S-2)가 높은 것으로 나타났다.

마창대교에 대한 선박조종시물레이션을 통한 결과를 이용하여 <Table 5-11>과 같은 적정 항로 폭을 도출하였다. 이 결과는 총 4가지 시나리오 중 기준점에 가장 근접한 값 하나를 이용하여 얻은 결과이다. 이 방식에 의한 마창대교의 교각 폭은 만족하는 것으로 분석된다.

<Table 5-11> 마창대교 접근 항로에 추가로 필요한 항로 폭

	항로 폭 요구분	추가로 필요한 항로 폭
교각 (380m)	점 (A, B) 부근 : 350 m	- 82m

이를 살펴 볼 때, 60,000DWT급 일반화물선의 기존 항로 및 교각 통항에는 별 문제가 없는 것으로 본다. 따라서 시물레이션 결과에 따르면 접근항로 및 교량의 항로 폭은 적절한 것으로 본다.

5.3.2 제어도 평가

근접도 계측에 의하면 입항보다는 출항이, 낙조류보다는 창조류가 더 어렵다는 것을 알 수 있다. 제어도 계측에서는 <Table 5-12>의 기술통계량에서와 같이 그다지 큰 차이는 아니지만 입항(S-1, S-3) 보다는 출항(S-2, S-4)이 다소 어려운 경향을 보이고 있다.

<Table 5-12> 마창대교 제어도 평가 요소의 기술통계량

		시나리오			
		S-1 (입항/창조류)	S-2 (출항/창조류)	S-3 (입항/낙조류)	S-4 (출항/낙조류)
타각사용량	평균	5.22	8.27	6.86	7.88
	편차	6.20	10.02	7.24	9.52

5.3.3 주관적 평가

기존 항로에 주경간장을 380m로 하였을 경우로 검토한 결과는 <Table 5-13>과 같다.

<Table 5-13> 마창대교 주관적 평가 요소의 기술통계량

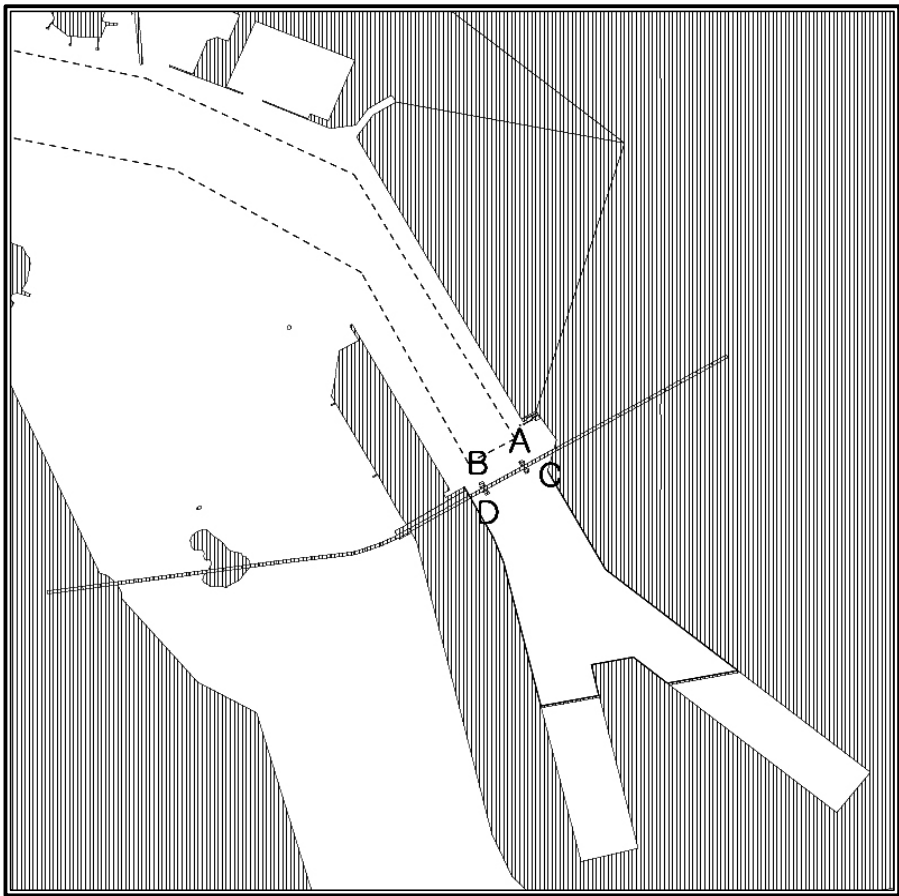
		시나리오			
		S-1 (입항/창조류)	S-2 (출항/창조류)	S-3 (입항/낙조류)	S-4 (출항/낙조류)
조종 위험도	평균	1.0	1.0	1.0	1.0
	편차	0.82	0.82	0.82	0.82
조종 곤란도	평균	1.0	1.0	1.0	1.0
	편차	0.82	0.82	0.82	0.82

조종자의 주관적인 평가의 결과는 시나리오에 관계없이 모두 “약간 안전하다” 그리고 “약간 쉽다” 라고 답변하였다. 즉, 창조류와 낙조류 그리고 입항과 출항에 유의적인 차이가 없음을 알 수 있다.

5.4 서해대교

5.4.1 근접도 평가

50,000DWT급 화물선이 서해대교를 통과할 경우 근접도 계측을 위한 기준점은 <Fig. 5-10>와 같이 교각을 보호하는 충돌방지공 끝단인 점 A, 점 B, 점 C, 점 D를 기준점으로 한다. 단, 서해대교 하부에서의 주경간장을 470m, 항로 폭을 400m로 설정하여 단독 통항을 원칙으로 선박조종시뮬레이션을 실시하였다.



<Fig. 5-10> 서해대교의 근접도 기준점

서해대교를 통항하기 위한 항로 및 대교의 교각에 대한 근접도 변수의 기술통계량은 <Table 5-14>와 같다.

<Table 5-14> 서해대교 통항 근접도 변수의 기술통계량

기준점	S-1에서의 최근접거리 (입항/창조류)			S-2에서의 최근접거리 (출항/낙조류)		
	평균	표준편차	침범확률	평균	표준편차	침범확률
점 A	212.0	51.92	0.0000	181.8	25.72	0.0000
점 B	154.6	48.19	0.0007	191.6	19.70	0.0000
점 C	220.6	55.27	0.0000	186.0	15.22	0.0000
점 D	116.0	22.67	0.0000	179.0	23.96	0.0000

점 B에서 창조류 입항시(S-1)에만 침범확률이 있는 것으로 나타났으나 이는 교량 통과 후 곧바로 우측부두에 접안을 하기 위해 근접한 값이므로 침범확률에 의한 근접도 평가에는 적용하지 않기로 한다. 따라서 모든 부분에서 침범확률이 거의 없는 것으로 분석된다.

5.4.2 제어도 평가

이 연구에서의 대상 선박은 입항이 출항보다 제어곤란도가 큰 것으로 나타났으나 유의적인 차이는 아니다. 그리고 타각사용량의 평균이 35°를 넘는 것은 본 연구에 사용된 선박 모델의 타각이 최대 70°까지 전타가 가능한 선박 모델이기 때문이다. 제어도 평가요소의 기술통계량은 <Table 5-15>와 같다.

<Table 5-15> 서해대교 제어도 평가 요소의 기술통계량

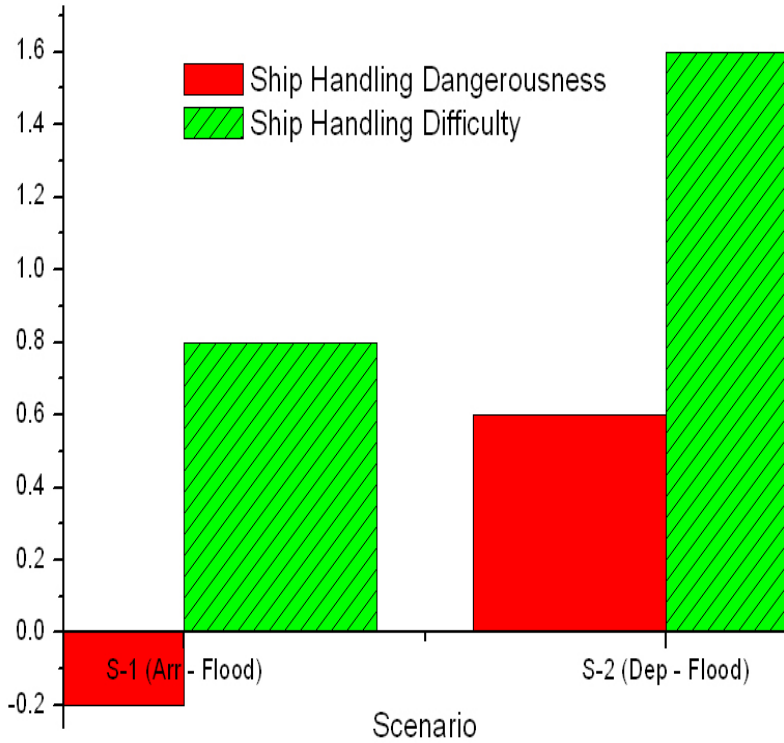
		시나리오	
		S-1 (입항/창조)	S-2 (출항/낙조)
타각사용량	평균	59.7	56.9
	편차	2.0	2.5

5.4.3 주관적 평가

기존 항로에 서해대교의 주경간장을 470m로 설정하였을 경우에 대하여 검토하였으며, 주관적 평가 요소의 기술통계량은 <Table 5-16>에, 조종위험도와 조종곤란도 그래프는 <Fig. 5-11>과 같다.

<Table 5-16> 서해대교 주관적 평가 요소의 기술통계량

		시나리오	
		S-1 (입항/창조류)	S-2 (출항/낙조류)
조종위험도	평균	-0.2	0.6
	편차	0.75	1.02
조종곤란도	평균	0.8	1.6
	편차	1.17	0.49



<Fig. 5-11> 서해대교의 조종위험도와 조종곤란도

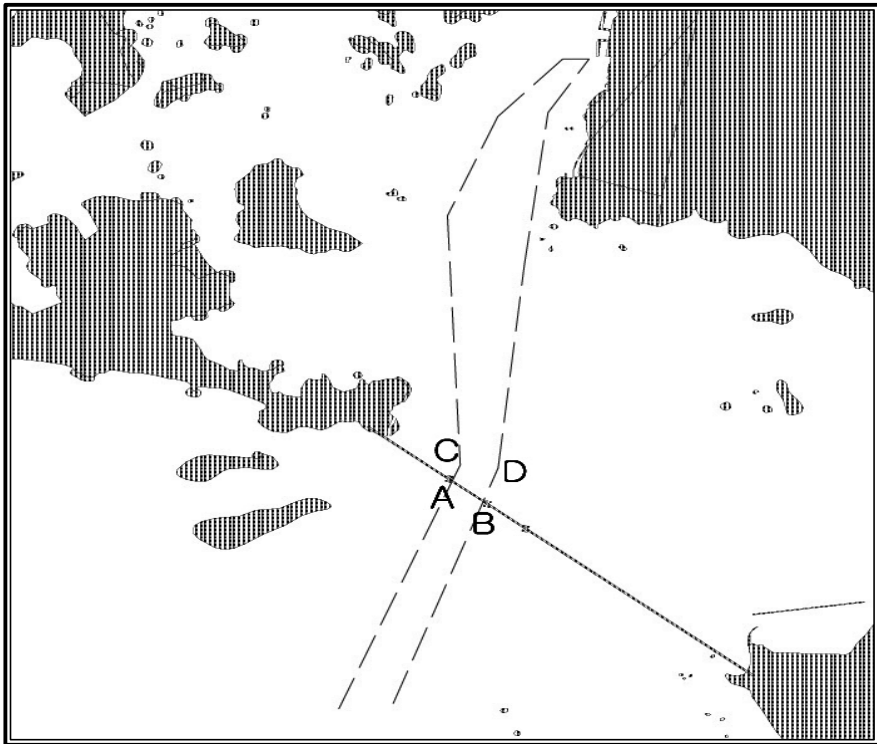
조종자의 주관적인 평가 결과는 조종위험도는 입항시 창조류(S-1)에서 “위험/안전 판단 곤란”, 출항시 낙조류(S-2)에서 “약간 안전”으로, 조종곤란도는 입항시 창조류(S-1)에서 “약간 쉽다”, 출항시 낙조류(S-2)에서 “안전하다”는 경향으로 답변하였다. 즉, 입항이 출항보다 선박조종이 어렵고 곤란한 것으로 나타났으며, 선박 제어의 곤란도보다는 조종의 위험도가 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 제어의 경우에는 예선을 이용하여 충분히 안전하게 접이안이 가능하였으나 위험도에 있어서는 해상교량이라는 구조물이 부두 전방에 존재하고 있어 심리적으로 위험감을 느끼는 것으로 판단된다.

5.5 보령-태안 연육교

5.5.1 근접도 평가

150,000DWT급 화물선이 가설 계획인 보령-태안간 해상교량을 통과할 경우 근접도 계측을 위한 기준점은 <Fig. 5-12>와 같이 교각의 끝단인 점 A, 점 B 그리고 굴곡 항로경계인 점 C, 점 D이다. 단, A, B 사이의 거리는 보령-태안간 해상교량 가설 계획에 따라서 주경간장을 500m로 설정하여 단독 통항을 원칙으로 선박조종시뮬레이션을 실시하였다.

그리고 입항시는 우현교각(점 B), 출항시는 좌현교각(점 A)에 접근하여 조종하므로 S-4(출항)는 좌현교각과 No.19 등부표(Buoy)를 기준점으로, S-3(입항)는 우현교각과 No.20 등부표(Buoy)를 기준점으로 정하여 평가하였다.

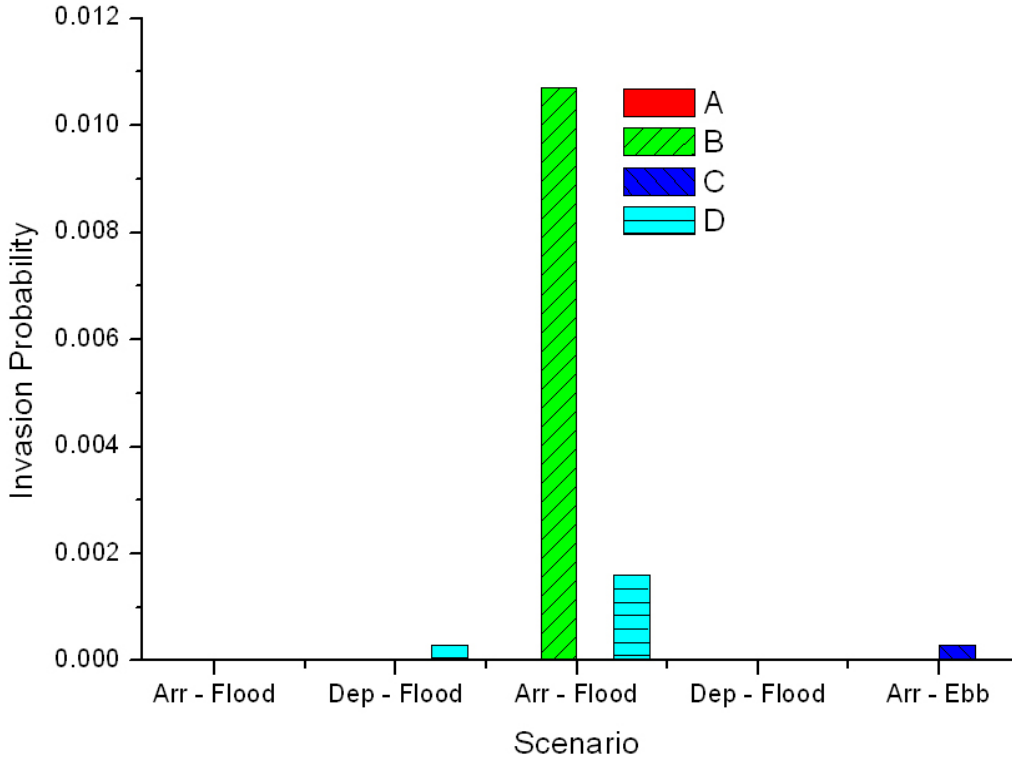


<Fig. 5-12> 보령-태안 연육교 근접도 기준점

보령-태안간 해상대교를 통항하기 위한 항로 및 대교의 교각에 대한 근접도 변수의 기술통계량은 <Table 5-17>과 같고, 각 기준점에 대한 침범확률들은 <Fig. 5-13>에 그림으로 나타내었다.

<Table 5-17> 보령-태안 연육교 근접도 변수의 기술통계량

기준점 (단독 통항시)	S-1에서의 최근접거리 (입항/창조류)			S-2에서의 최근접거리 (출항/창조류)					
	평균(m)	표준 편차	침범 확률	평균(m)	표준 편차	침범 확률			
점 A	193.6	33.52	0.0000	177.0	33.85	0.0000			
점 B	226.0	32.16	0.0000	240.6	33.99	0.0000			
점C Buoy (No.19)	164.6	30.70	0.0000	188.2	24.72	0.0000			
점 D Buoy (No.20)	197.0	27.13	0.0000	174.2	50.01	0.0003			
기준점 (상호 통항시)	S-3에서의 최근접거리 (입항/창조류/상호교항)			S-4에서의 최근접거리 (출항/창조류/상호교항)			S-5에서의 최근접거리 (출항/낙조류/상호교항)		
	평균 (m)	표준 편차	침범 확률	평균 (m)	표준 편차	침범 확률	평균 (m)	표준 편차	침범 확률
점 A	-	-	-	105.2	18.62	0.0000	129.75	19.32	0.0000
점 B	111.0	48.31	0.0107	-	-	-	-	-	-
점C Buoy (No.19)	-	-	-	101.0	21.77	0.0000	49.25	14.38	0.0003
점 D Buoy (No.20)	120.0	40.62	0.0016	-	-	-	-	-	-
선박 외측간	124.0	20.83	0.0000	145.8	18.38	0.0000	116.25	19.80	0.0000



<Fig. 5-13> 보령-태안 연육교의 침범확률

그 결과를 살펴보면, 단독 통항(S-1, S-2)의 경우 입항(S-1)은 침범확률이 없는 것으로 나타났고 출항(S-2)의 경우에는 No. 20 등부표(Buoy)에서만 침범확률이 나타났지만 항로의 경우 0.001보다 작으므로 침범확률은 없는 것으로 분석된다. 그러나 상대적으로 상호교항(S-3, S-4, S-5)의 경우에는 출항시(S-4)를 제외한 거의 모든 경우에서 침범확률이 있는 것으로 나타났으며 단독 통항보다는 상호 통항이 더 어려운 것으로 분석된다.

각 시나리오 중 가장 침범확률이 높은 경우는 상호교항 입항시(S-3) 점 B이다.

5.5.2 제어도 평가

제어도 계측에서는 단독 통항 입항시(S-1)가 출항시(S-2)보다 상호교항 출항시(S-4, S-5)가 입항시(S-3)보다 선박을 제어하기가 어려운 경향을 보이고 있다. 제어도 평가요소의 기술통계량은 <Table 5-18>와 같다.

<Table 5-18> 제어도 평가 요소의 기술통계량

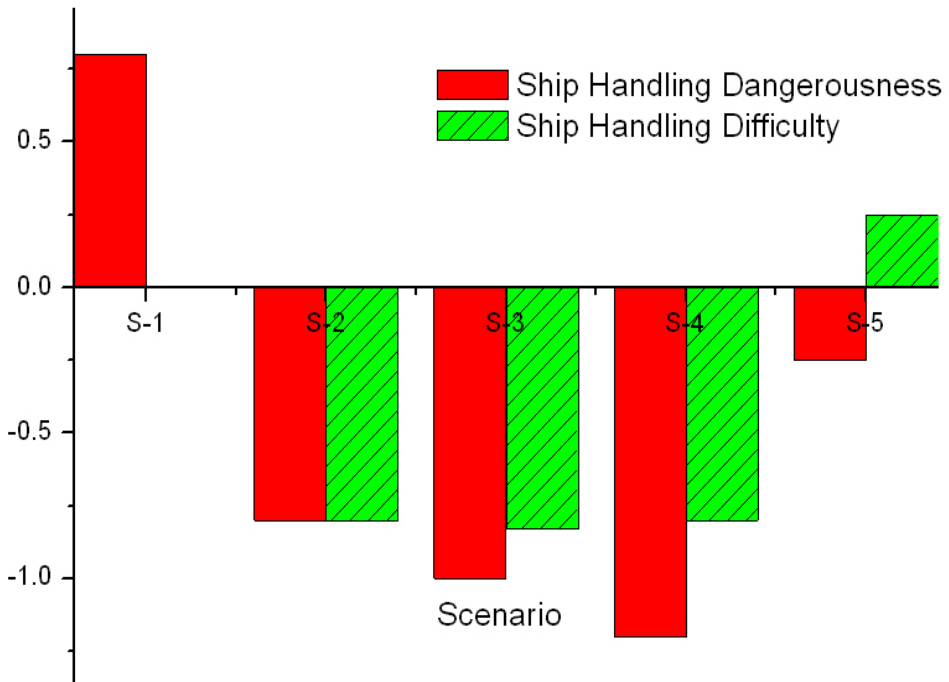
		단독 통항		상호 교항		
		S-1 (입항/창조)	S-2 (출항/창조)	S-3 (입항/창조)	S-4 (출항/창조)	S-5 (출항/낙조)
타각 사용량	평균	10.85	6.39	4.48	13.24	9.38
	편차	9.60	7.09	5.66	8.10	6.69

5.5.3 주관적 평가

주관적 평가는 기존 항로에 주경간장을 500m로 하였을 경우로 검토하였으며, <Table 5-19>에 주관적 평가 요소의 기술통계량을, <Fig. 5-14>에 조종위험도와 조종곤란도를 나타내었다.

<Table 5-19> 보령-태안 연육교 주관적 평가 요소의 기술통계량

단독 통항		단독 통항		상호 통항		
		S-1 (입항/창조류)	S-2 (출항/창조류)	S-3 (입항/창조류)	S-4 (출항/창조류)	S-5 (출항/낙조류)
조종 위험도	평균	0.8	-0.8	-1.0	-1.2	-0.25
	편차	1.17	1.47	1.63	0.75	0.83
조종 곤란도	평균	0.0	-0.8	-0.83	-0.8	0.25
	편차	0.89	1.47	1.21	1.17	0.83



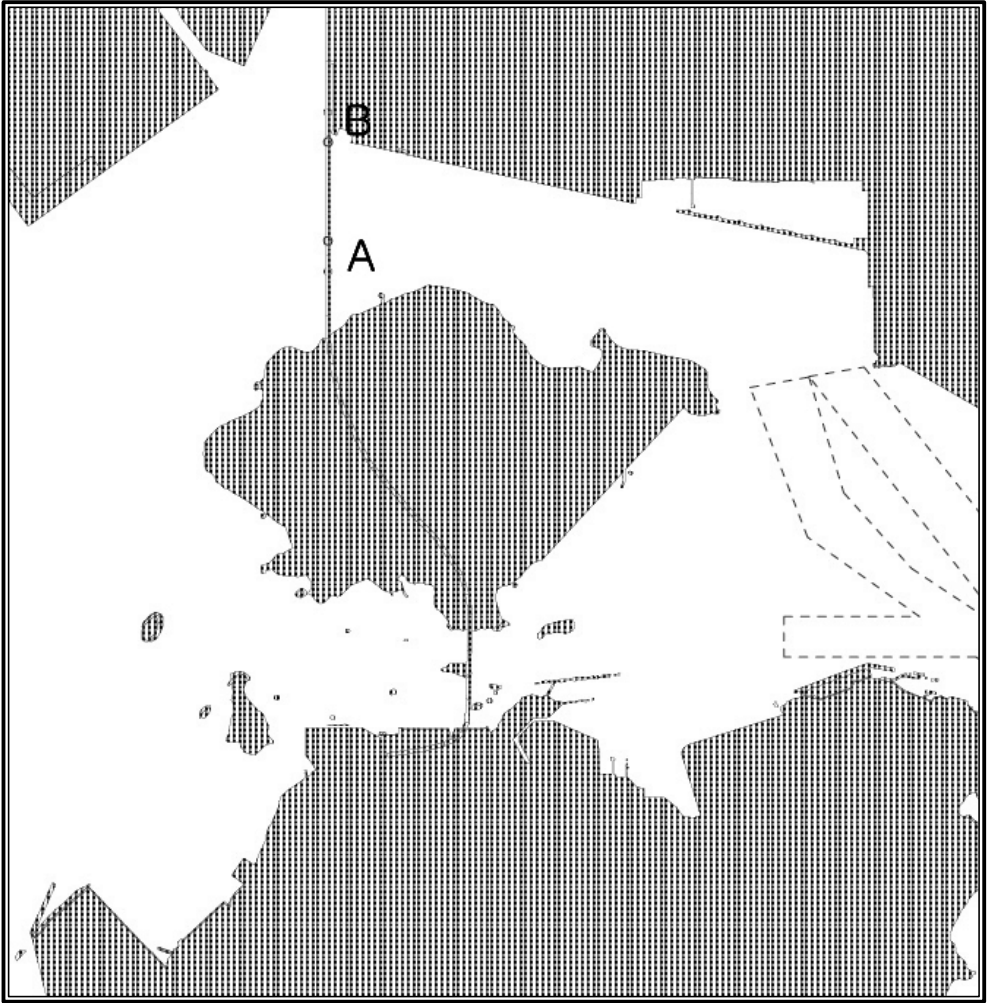
<Fig. 5-14> 보령-태안 연육교의 조종위험도와 조종곤란도

음(-)의 값일수록 조종의 위험도 및 곤란도가 높는데 총 5개의 시나리오 중 S-2, S-3, S-4에서 가장 위험도와 곤란도가 높음을 알 수 있다. 즉, 단독 통항 보다는 상호교항에서 조종이 위험하고 곤란함을 나타내고 있으며, 이는 동급의 선박이 상호교항을 함으로써 교각에 근접함으로 인한 심리적 위험도가 높아진 것으로 판단된다.

5.6 광양대교

5.6.1 근접도 평가

12,000TEU급 컨테이너선이 건설 예정인 광양대교 하부를 통과할 경우 근접도 계측을 위한 기준점은 <Fig. 5-15>와 같이 주교각의 끝단인 점 A, 점 B이다. 광양대교에서의 선박조종시물레이션은 상호교항을 원칙으로 하였기 때문에 한 쪽 교각에 의한 근접도 계측만 유효하여 입항통항의 경우는 점 B, 출항통항의 경우는 점 A에 대한 근접도 계측을 실시하였다.



<Fig. 5-15> 광양대교의 근접도 기준점

광양대교 하부를 통항하기 위한 항로 및 대교의 교각에 대한 근접도 변수의 기술통계량은 <Table 5-20>과 같다.

<Table 5-20> 광양대교 통항 근접도 변수의 기술통계량

기준점 (주경간장 1,000m)	S-1 (입항/창조류)			S-2 (출항/낙조류)		
	평균	표준편차	침범확률	평균	표준편차	침범확률
점 (A) 교각	-	-	-	168.6	35.5	0.0000
점 (B) 교각	370.8	114.8	0.0006	-	-	-
기준점 (주경간장 1,100m)	S-3 (입항/창조류)			S-4 (출항/낙조류)		
	평균	표준편차	침범확률	평균	표준편차	침범확률
점 (A) 교각	-	-	-	212.5	34.2	0.0000
점 (B) 교각	402.5	101.6	0.0000	-	-	-
기준점 (주경간장 1,200m)	S-5 (입항/창조류)			S-6 (출항/낙조류)		
	평균	표준편차	침범확률	평균	표준편차	침범확률
점 (A) 교각	-	-	-	230.0	39.05	0.0000
점 (B) 교각	406.7	73.1	0.0000	-	-	-

위의 시나리오별로 침범확률을 구한 결과는 표에서도 알 수 있는 바와 같이 주경간장 1,000m에서 입항일 경우를 제외하고는 모든 경우에서 침범확률이 없는 것으로 나타났다.

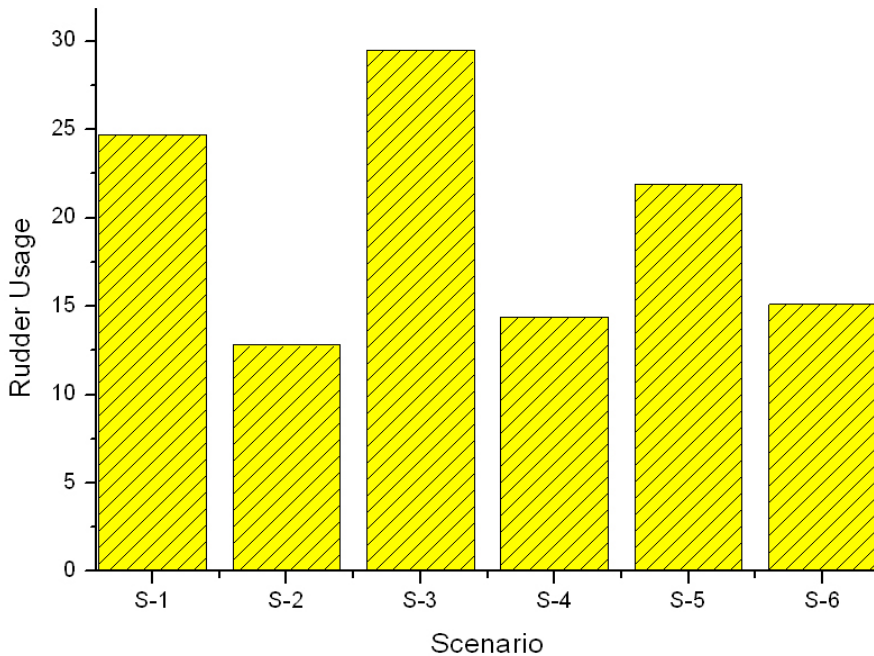
즉, 침범확률 및 근접거리에 의한 검토결과는 주경간장이 넓을수록 타 경간장에 비하여 안전한 것으로 나타났으며, 1,200m의 주경간장의 경우가 가장 좋은 것으로 분석되었다.

5.6.2 제어도 평가

제어도 평가요소의 각 항목별 기술통계량을 <Table 5-21>에 시나리오별로 나타내고 이를 <Fig. 5-16>에 그래프로 나타내었다.

<Table 5-21> 제어도 평가 요소의 기술통계량

		주경간장 1,000m		주경간장 1,100m		주경간장 1,200m	
		S-1 (입항 /창조류)	S-2 (출항 /낙조류)	S-3 (입항 /창조류)	S-4 (출항 /낙조류)	S-5 (입항 /창조류)	S-6 (출항 /낙조류)
타각 사용량	평균	24.7	12.8	29.5	14.4	21.9	15.1
	편차	12.9	10.6	11.5	12.5	12.4	11.7



<Fig. 5-16> 광양대교 시나리오별 타각사용량

상기 표와 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제어도 계측 결과 출항의 경우는 주경간장의 길이에 따른 유의적인 결과는 나타나지 않았다. 그러나 입항의 경우는 주경간장이 1,200m일 경우가 나머지일 경우보다 제어도 항목에서 안전한 결과를 보이고 있다. 이는 경간장이 넓을수록 심리적으로 안정이 되어 타각 사용량이 적은 것으로 판단된다.

5.6.3 주관적 평가

각 주경간장을 1,000m, 1,100m 그리고 1,200m에서 상호교항을 원칙으로 시뮬레이션을 실시한 조종위험도와 조종곤란도의 기술통계량은 <Table 5-22>와 같다. 이를 그래프로 나타내면 <Fig. 5-17>와 같다.

<Table 5-22> 광양대교 주관적 평가 요소의 기술통계량

		주경간장 1,000m		주경간장 1,100m		주경간장 1,200m	
		S-1 (입항 /창조류)	S-2 (출항 /낙조류)	S-3 (입항 /창조류)	S-4 (출항 /낙조류)	S-5 (입항 /창조류)	S-6 (출항 /낙조류)
조종 위험도	평균	-2.2	-1.0	-1.5	-0.8	-1.0	-0.4
	편차	0.4	1.1	1.0	1.0	0.6	0.8
조종 곤란도	평균	-2.2	-1.3	-1.7	-1.4	-1.2	-0.4
	편차	0.4	0.7	0.7	1.2	1.2	0.8



<Fig. 5-17> 광양대교 조종위험도와 조종곤란도

주관적 평가 결과는 조종위험도와 조종곤란도는 입출항시 주경간장이 넓어질수록 “위험하다” 에서 “약간 위험하다” 로 답변하는 경향을 보인다. 즉, 주경간장이 길어질수록 조종자의 심리적 부담감은 낮아지고, 입항통과가 출항통과에서 보다 심리적 부담감이 높은 것으로 나타났다. 이는 12,000TEU급 초대형 컨테이너선박의 경우 조종성과 선회율을 좋게 하기 위해서는 타효 속도를 유지하여야 하는데 입항통과시에는 부두접근에 의해 감속해야 하고, 출항통과시에는 증속이 가능하기 때문에 선회조종이 수월해지므로 출항통과시의 심리적 부담이 적은 것으로 판단된다. 또한, 조종곤란도와 조종위험도는 대체로 같은 경향임을 보이고 있다.

5.7 종합 평가

5.7.1 근접도 평가

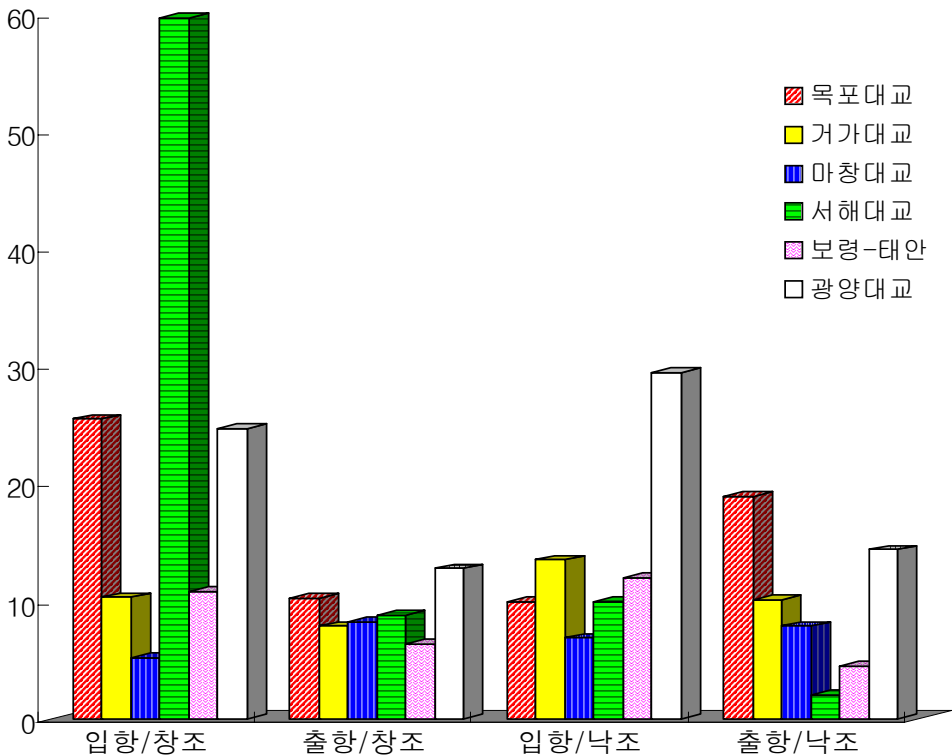
본 연구에서 수행한 6개의 해상교량 통항안전성 검토에서 거가대교의 침범확률이 어느 곳에서도 발생하지 않아 가장 안전한 것으로 분석되고, 목포대교의 경우는 점 A를 제외한 6곳에서 침범확률이 나타나서 위험한 것으로 판단된다. 따라서 항로의 폭 및 해상교량 전후의 직선거리 항로 등을 조정하여 안전이 확보되는 해상교량이 되도록 하여야 한다. <Table 5-23>에 6개 해상교량별 침범확률을 나타내었다.

<Table 5-23> 해상교량별 침범확률

해상교량 명	경간장(m)	침범확률
목포대교	550	점 A(교각)를 제외한 곳, 6곳
거가대교	475	-
마창대교	380	창조류 입출항시 점 B 교각
서해대교	470	창조류 입항시 점 B 교각
보령-태안 연육교	500	창조류 입항시를 제외한 곳, 점 A, B, C, D (교각 충돌방지공)
광양대교	1,000 1,100 1200	창조류 입항시 점 B 교각

5.7.2 제어도 평가

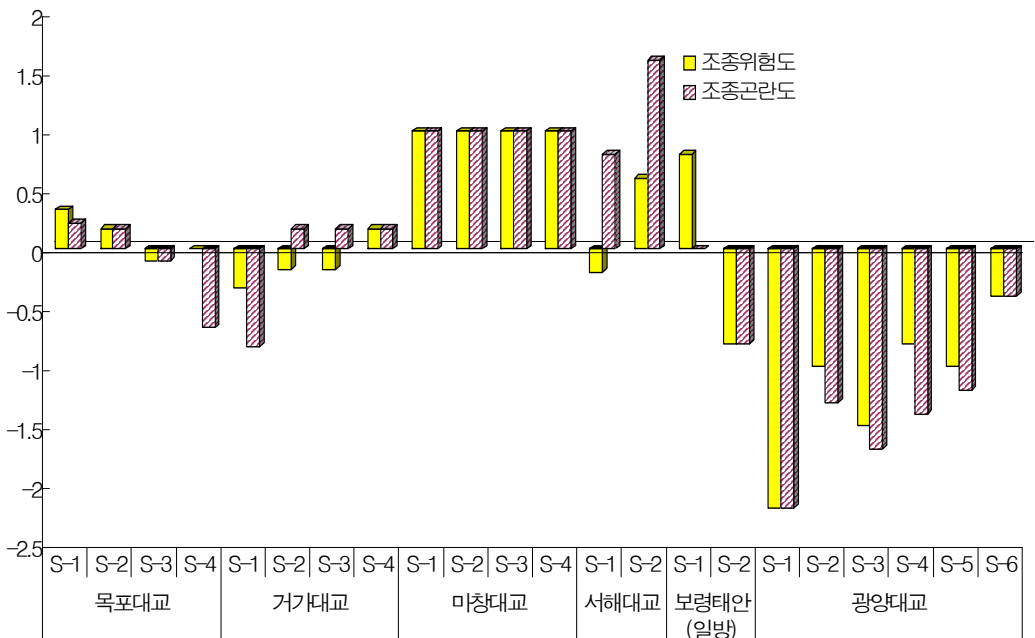
선박조종시뮬레이션 결과 입항시가 출항시보다는 선박의 제어가 어려움을 알 수가 있다. 특히, 서해대교 입항의 경우에 제어 곤란이 높게 나타나는데, 그 이유는 시뮬레이션 시나리오가 교량통과 후 곧바로 우현 접안을 하는 시나리오를 사용하기 때문에 우측 교량 쪽으로 접근하는 경향을 보이게 된다. 하지만, 교량접근 전에 충분한 예선을 사용하여 접안조종을 하는 상황이므로 본 연구의 평가에서는 무시하도록 한다. <Fig. 5-18>에 6개 해상교량의 제어도 계측치를 나타내었다.



<Fig. 5-18> 제어도 평가 종합

5.7.3 주관적 평가

각 해상교량의 통항안전성에 관한 주관적 평가에서는 목포대교는 교량 전후의 직선항로 및 항로 폭이 짧은 편이며, 거가대교의 경우는 시뮬레이션 상에서는 모두 통과 가능한 것으로 평가되어졌다. 마창대교는 이론상 주경간장이 불충족하였으나 근접도 상으로는 적정한 것으로 평가되고, 서해대교의 근접도 평가에는 문제가 있음을 확인 할 수 있었다. 즉, 마창대교와 서해대교는 주관적 위험도 및 곤란도가 적은 것으로 평가된다. 보령-태안 연육교에서는 단독 통항 시 시뮬레이션상 통과 가능하였다. 광양대교에서의 주관적 위험도 및 곤란도는 어려운 것으로 평가되었으며, 이는 12,000TEU급 초대형 컨테이너 선박에 대한 조종의 어려움과 곤란함을 나타내는 경향을 보인다고 평가될 수 있다. 그리고 광양대교의 주경간장은 1,200m가 적절함을 알 수 있다. <Fig. 5-19>에 6개 해상교량의 조종위험도와 조종곤란도를 종합적으로 나타내었다.



<Fig. 5-19> 주관적 평가 종합

5.8. 시뮬레이션을 이용한 통항 안전성 평가 결과 및 제안

5.8.1 목포대교

목포대교 접근항로의 경우 이론적 검토 및 시뮬레이션 결과를 종합하면 기존 항로는 교량 전후의 직선항로가 짧다고 판단된다. 그러므로 일부 구역의 항로 폭을 넓혀야 하는 것으로 판단되고, 선박 통항 안전성 확보를 위해 일부 추가 조건이 제시되어야 한다. 즉, 교량 하부에의 선박간 교항은 시차를 두고 통항 하도록 관제하고, 좋지 않은 기상 및 해상 상태에서는 항행을 제한하도록 하며 야간에는 교량에 적절한 항로표지와 교량표지를 설치하여야 한다.

5.8.2 거가대교

거가대교의 경우 각각의 대상선박에 대해 주경간장을 475m (제2구간)과 230m(제1구간)으로 구분하여 근접도 평가 및 주관적 평가를 검토한 결과 시뮬레이션 상에서는 모두 통과 가능한 것으로 나타났다.

5.8.3 마창대교

이론적 검토에서는 교량 전후의 직선항로는 거의 만족하는 것으로 판단되나 주경간장은 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 선박조종시뮬레이션을 이용한 근접도 평가의 분석에 의하면 항로 폭은 적정한 것으로 판단된다. 근접도 평가 및 주관적 평가에서 모두 시뮬레이션 상에서는 통과 가능한 것으로 나타났으나, 교각 내 상호 통항, 추월 그리고 병렬 항해는 제한하는 것이 바람직하다는 추가 조건이 제시되어야 한다.

5.8.4 서해대교

서해대교에서는 입항 통과시는 다목적부두의 접안선을 제외하고는 모든 기준점에서 침범확률이 있는 것으로 나타났고, 출항 통과시 경우에는 기준점 점 C를 제외하고는 침범확률이 없는 것으로 나타났다. 이는 해상교량과 접안부두까지의 거리가 너무 짧아서 나타난 원인으로 교량 통과 전에 충분한 예선 사용으로 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

제어도 평가 및 주관적 평가에서도 대상 선박의 입출항시의 서해대교 통과에 있어서 문제가 없는 것으로 판단된다.

5.8.5 보령-태안 연육교

보령-태안 연육교의 경우에는 근접도 평가 및 주관적 평가에서 모두 시물레이션 상에서는 별다른 문제가 없는 것으로 나타났다. 단, 시계가 1,000m이내일 경우에는 운항을 제한하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5.8.6 광양대교

광양대교에서 1,000m, 1,100m, 1,200m의 주경간장에 대하여 상호 교항은 곤란할 것으로 판단된다. 1,200m의 주경간장이 근접도, 제어도, 주관적 평가 모두에서 타 주경간장에 비해 안전하게 나타난다.

제 6 장 결론

본 연구에서는 선박조종시뮬레이터를 이용하여 국내 선박 통항 교량의 운항 안전성에 대하여 비교 분석하여 이의 문제점을 파악하고 이에 따른 개선 방안을 제안하고자 하였다.

국내 주요 6개 선박통항 교량에서 최신의 FMSS(Full Mission Ship Handling Simulator System)를 이용하여 교량 통항 선박조종시뮬레이션을 실시하여 근접도, 제어도 및 주관적 평가를 선박운항 측면에서 실시하고, 이들을 분석하고 종합적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 해상교량을 통항시 해당 해역의 기준점에 대한 근접도와 선박의 제어량 및 조종자가 느끼는 조종위험도와 조종곤란도를 정량적 수치로 나타낼 수 있으며 이들의 수치를 상호 비교할 수 있다.

(2) 근접도 및 주관적 평가에서 목포대교, 보령-태안 연육교, 광양대교에서의 통항이 마창대교, 서해대교, 거가대교에서보다 상대적으로 침범확률도 높고, 조종자가 느끼는 조종곤란도와 위험도가 높음을 알 수 있다. 즉, 일부 국내 해상교량의 선박통항 측면에서의 안전성은 다소 높지 않음을 알 수 있다. 제어도 평가에서는 각 시나리오별 유의적인 차이는 없으나 입항시가 출항시보다 어렵다는 것을 알 수 있다.

(3) 선박통항이 가능한 해상교량 건설시 선박의 통항안전성을 확보하기 위해서는 교량 설계 초기 단계에서부터 선박조종시뮬레이션을 통한 기술적 검토를 거쳐 선박조종자의 의견이 적극 반영될 수 있도록 법적, 제도적 장치가 마련되어야 할 것이다.

(4) 국내의 선박통항 교량의 안전성을 선박조종자 측면에서 정량적으로 평가하여 비교한 본 연구의 내용은 차후 건설될 국내 해상교량에 유효하게 적용시킬 수 있을 것이다.

본 연구의 결과를 바탕으로 향후 계속되어야 할 연구 과제로는 다양한 선종, 외력조건 등의 무수한 변수들에 대한 이론 정립과 이의 평가에 관한 연구가 필요하다. 아울러 해상교량의 주경간장, 직선항로 등에 관한 우리나라의 독자적인 지침 마련을 위한 연구도 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 海洋水産部 : “전국무역항 항만기본계획” , 2001

- [2] 박영수 等 : “해상교량 건설을 위한 선박통항 안전성 검토요소에 관한 연구 (I)” , 韓國航海港灣學會, 2005

- [3] John M. O'Hara et al : "An Investigation of the Relative Safety of Alternative Navigational System Designs for the New Sunshine Skyway Bridge", CAORF 26-8232-04, pp. 19~87, 1985

- [4] Jane A. Conway : "An Evaluation of The Effect of a Bridge-Tunnel Configuration on Channel Navigability", Proceedings of Sixth CAORF Symposium, pp. B3-1~B3-12, 1985

- [5] 韓國海洋大學校 Marine Simulation Center : “부산신항 남컨테이너부두 (2-3단계) 민간투자사업 설계 용역중 선박조종 시뮬레이션 검토” , 2003

- [6] 韓國海洋水産研修院 外 : “제 2연육교의 선박통항 안전성 확보 및 인천항 항만기증 유기방안 연구 최종보고서” , 2004

- [7] 김세원 等 : 선박조종시뮬레이터를 이용한 평택항 통항 안전성 평가” , 韓國航海港灣學會, 2005

- [8] CAORF(Computer Aids Operations Research Facility) : “Research Methodology”, Task-K-0216-12, 1987
- [9] 이동섭 : "A Study on the Correlation between Shiphandler's Subjective Evaluation and Transit Risk in Narrow Channel “, 1995
- [10] Larsen, Ole Damgaard : “Ship Collision with Bridges” , International Association for Bridge and Structural Engineering, pp. 13-14, 1993
- [11] Shoji, Kuniaki : “교량에 대한 선박 충돌 사고와 신소재 교각 방호 시설” , 일본선장협회, 제116호, pp52-68, 1999
- [12] Joseph J.Puglisi et al. : “The Development and Validation of hydrodynamic models”, Proceedings of sixth caorf symposium, pp A4-1~A4-18, 1985
- [13] Myriam W.Smith et al. : "AIDS to navigation and the visual environment", Proceedings of MARSIM '87, pp. 226~233, 1987
- [14] Jan van der Vlugt et al. : “New Technologies for preparation and visualization of environments for marine simulation purpose” , Proceedings of MARSIM '90, pp.117~124, 1990

- [15] Witt F. G : "Analysis of Simulated Maneuvers", Proceedings of MARSIM '81, pp. A-12. 1-17, 1981
- [16] Inoue Kinzo : "Evaluation Method of Ship Handling Difficulty for Navigation in Restricted and Congested Waterways" , The Royal Institute of Navigation, Volume 53, Number 1, pp. 167-180, 2000
- [17] Th. Elzinga & M.P. Bogaerts : "A Simulator Study for LNG Transport by Gas Carriers to Eemshaven, the Netherlands" MARSIM 84, P.254, 1984

감사의 글

대학 졸업하고 다시 시작한 학문의 길에서 방향을 할 때에 바른 길로 이끌어 주시고, 삶의 목표를 바르게 잡아 주신 공길영 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 부족함이 많은 논문의 심사위원장을 맡아 지도와 격려를 아끼지 않으신 김세원 교수님과 바쁘신 가운데서도 심사를 맡아주신 설동일 교수님께 깊은 감사를 드리며, 존재만으로도 든든한 김순갑 총장님께도 감사를 드립니다.

연구에 있어서 물심양면으로 성원해주신 오아시스 연구실 선후배님께도 감사를 드립니다. 연구 수행과정에서 많은 도움과 조언을 아끼지 않으신 이윤석 교수님, 이상민 박사님, 연구의 열정을 보여주신 김병진 선배님께 감사를 드립니다. 논문의 마무리 때에 도움을 주신 김영두 후배님, 김대해 후배님께도 심심한 감사를 드립니다.

또한, 오늘이 있기까지 마음으로 애써주고 배려해준 나의 소중한 친구들과 언니, 동생들에게도 머리 숙여 감사를 전합니다.

항상 여식의 잘됨과 행복을 바라시며 기도하시는 어머니, 적지 않은 연세에 추운 겨울도 마다하지 않으시며 일하시는 아버지께 사랑과 존경을 전합니다. 그리고 함께여서 부러울 것이 없는 두 언니들, 씩씩한 남동생 정환, 듩직한 형부, 사랑스런 조카 서현이와 곧 태어날 둘째 조카와도 이 기쁨을 같이 하고자 합니다.

끝으로 학문과 접하게 된 인연에 감사드리며, 평생 공부하는 자세로 인생을 살고자 다짐 합니다.

2006년 1월 1일