

해상교량에 대한 선박충돌 위험도 평가 및 민감도 분석

배용귀* · 이성로**

Bae, Yong Gwi*, Lee, Seong Lo**

Ship Collision Risk Assessment and Sensitivity Analysis for Sea-crossing Bridges

ABSTRACT

In the design phase of sea-crossing bridge projects, ship collision problem is mostly participated in decision of substructure section and it would be performed by risk assessment and impact simulations. Ship collision risk is assessed by probability model which is similar to method II of Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridge(AASHTO, 2009). However, several factors used in the applicable code are limited to inland waterways or have many local characteristics. Accordingly, it should be needed judgement of engineer or referred to related criteria, research finding. In this study risk assessment for In-cheon bridge and review of existing substructure's impact risk and resistance capacity are performed using the 2010's ship passage data. And then consideration regarding to presumption and applied instance of factors needed for risk assessment and related research findings are performed on the basis of AASHTO Guide's Method. As a result of study, adequate variable region of factors needed for risk assessment is defined and sensitivity analysis for appropriate region is performed. Consequently, factors that should be applied carefully or needed for direct analysis of local data are confirmed. This research could be fundamental material to risk assessment related to design for sea-crossing bridge taken into account ship collision.

Key words : Ship collision, Design phase, Risk assessment, Sensitivity analysis

초 록

본 해상교량 프로젝트의 설계단계에서 선박충돌 문제는 주로 교량 하부구조의 단면 결정에 관여하게 되며, 위험도 평가와 충돌 시뮬레이션 등을 통해 설계를 수행하게 된다. 선박의 충돌위험은 다양한 확률모델에 의해 평가되며 대체로 AASHTO Guide(2009)의 Method II 와 유사하다. 그러나 해당기준에서 사용되는 일부 요소는 내륙수로에 국한되어 있거나 지역적인 요인이 강하여 설계자의 판단이 요구되므로 관련 기준이나 연구결과 등을 참고하여 결정해야 한다. 본 연구에서는 2010년 선박운행데이터를 사용하여 인천대교에 대한 위험도평가를 수행하고 기존 하부구조 및 방호구조물에 대한 위험도 및 내충돌 성능을 검토하였다. 그리고 AASHTO Guide의 Method II 를 기준으로 하여 위험도평가에 필요한 요소들의 추정 방법과 적용 사례, 관련 연구결과에 대한 고찰을 수행하였다. 이로부터 위험도평가에 필요한 요소들의 적절한 가변영역을 정의하고 해당 구간에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 설계단계에서 설계자가 주의하여 적용해야 하거나 지역적인 데이터의 직접 분석이 필요한 요소들이 확인되었다. 이번 연구는 해상교량에 대한 선박충돌을 고려한 설계시 위험도 분석과 관련하여 기본적인 참고자료가 될 것으로 판단된다.

검색어 : 선박충돌, 설계단계, 위험도평가, 민감도분석

* 정회원·교신저자·(주)유신 향만부 (Corresponding Author·Yooshin Engineering Corporation·ygbae@yooshin.co.kr)

** 정회원·목포대학교 토목공학과 교수 (sllee@mokpo.ac.kr)

Received March 22, 2013/ revised May 8, 2013/ accepted June 26, 2013

1. 서론

해상교량 설계시 교량 구조물에 대한 선박의 충돌 문제는 지진, 바람 등과 더불어 구조물의 단면을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 국내에서는 선박충돌과 관련하여 해외의 설계기준이나 기술에 의존하는 경우가 많았으나 최근에는 관련 연구(배용귀 등, 2008; 이계희 등, 2011; 이성로 등, 2006a; 이성로 등, 2006b; 조호현, 2009)가 많이 진행되었으며, 해상교량 건설이 활발해지면서 설계시 해당 연구결과들이 적용된 사례도 늘어나고 있다.

선박충돌 문제는 해상교량의 계획, 설계 및 유지관리 등의 각 단계에서 모두 중요하게 다루어져야 하는 요소이다. 설계 단계에서는 주로 교량 하부구조의 단면 결정에 관여하게 되며, 위험도 평가와 충돌 시뮬레이션 등을 통해 설계를 수행하게 된다. 기존의 국내 설계기준에는 선박충돌에 대하여 상세하게 규정하지 않았으나 최근 도로교설계기준에서 한계상태설계법(2012)을 채택하면서 선박충돌 하중에 대한 상세한 규정이 제시되었다. 한계상태설계법에서는 Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridge(2009, 이하 AASHTO Guide)의 세가지 설계 방법 중에서 Method II, 위험도 평가에 의한 설계방법을 채택하고 있는데, 최근 국내에서 설계된 해상교량들은 위험도 평가를 통하여 선박충돌에 대한 설계하중을 산정하거나 교량의 안전성 평가의 목적으로 수행된 사례가 비교적 많은 편이다.

Method II 에 의한 위험도평가 방법은 확률기반해석을 통하여 선박의 형태, 크기, 및 하중조건에 의해 분류된 수로를 이용하는 연간 선박의 수, 선박의 항로이탈확률, 항로를 이탈한 선박이 교각이나 상판과 충돌할 기하학적 확률, 항로를 이탈한 선박과 충돌할 때 교량이 파괴될 확률을 고려함으로써 교량의 선박충돌위험도를 평가하고 위험도평가 결과로부터 설계선박을 합리적으로 산정할 수 있는 방법이다(이성로 등, 2006a). 그러나 AASHTO Guide에서 사용되는 설계요소의 일부는 근사적 추정방법이거나 내륙수로가 발달한 미국 내의 통계자료로부터 추정된 것이므로 해상교량이 대부분인 국내의 상황을 고려하기 위해서는 세계적인 해상교량의 설계사례나 해상에 적용된 다른 연구결과에 대한 적극적인 분석과 검토가 필요하다.

본 연구에서는 AASHTO Guide의 Method II 를 기준으로 하여 인천대교에 대한 선박충돌 위험도 평가를 수행하였으며 이를 기준으로 하여 위험도 평가 요소들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 논문에서는 인천대교 설계보고서 및 구조계산서 상에 수록된 설계요소를 최대한 사용하였으나 정보가 제한적이거나 민감도 분석을 위하여 불가피하게 변경해야 하는 설계요소는 기준에서 제시되거나 공학적으로 타당한 접근방법을 도입하였다. 설계요소의 민감도 분석을 위한 가변영역은 AASHTO Guide를 비롯한 관련 설계기준

및 연구결과들의 추정방법과 적용사례에 근거하여 정의되었으며, 이로부터 설계단계에서 주의하여 적용해야 하거나 지역적인 데이터의 직접 분석 등이 필요한 요소들을 확인하였다.

2. 위험도평가

2.1 AASHTO Guide Method II

일반적으로 선박의 충격에 의해 발생하는 최악의 경우에 대한 하중을 지탱할 수 있는 교량구조물을 설계하는 것은 불가능하다. 그러나 선박의 충격에 의해 교량 구조물에 작용하는 부가하중의 빈도를 추정하는 것은 가능하며, 부가하중의 빈도를 알고 있으면 어떤 수용기준을 만족하는 설계를 선택할 수 있다(Larsen, 1993). AASHTO Guide(2009)에서는 설계선박을 결정하기 위한 Method I, II, III의 세가지 방법을 제공하고 있으며 특히, Method II는 선박의 연간통행량, 항로이탈확률, 기하학적확률, 파괴확률, 방호 계수에 의해 연간파괴빈도(AF)를 산정하여 교량의 중요도에 따른 허용기준 이내가 되도록 설계선박을 산정하는 방법이다. 기준에서 AF의 허용기준은 중요교량에서 0.0001, 일반교량에서 0.001 이하가 되도록 규정하고 있다. 교량의 AF는 다음과 같이 계산되며, 전체 교량에 대한 AF는 모든 부재의 AF를 합하여 구한다.

$$AF=(N)(PA)(PG)(PC)(PF) \quad (1)$$

- 여기서, N : 수로를 이용하는 연간 선박의 수(Vessel frequency)
- PA : 항로이탈확률(Probability of aberrancy)
- PG : 기하학적 확률(Geometric probability)
- PC : 파괴확률(Probability of collapse)
- PF : 방호 계수(Protection factor)

2.2 교량 제원

인천대교는 인천국제공항과 송도국제도시를 연결하는 민간투자 사업으로 주경간교인 사장교는 수차례의 선박 항행 시뮬레이션을 거쳐 Fig. 1과 같이 주경간장 800m의 중간교각을 포함한 5경간 연속 사장교로 결정되었다. 주탑은 230m 높이의 역Y형 콘크리트 주탑이 적용되었으며 기초는 현장타설말뚝에 의한 다주식 기초로 직경 3.0m의 말뚝 24개로 구성되어 있다. 선박통과 구간은 항로폭 625.5m, 높이 74.0m를 확보하여 왕복운행이 가능하다(인천대교 설계보고서, 2009).

2.3 선박통행량

인천항의 선박통행량 데이터는 인천지방해양항만청의 Port Management Information System(이하 PORT-MIS)의 2010년

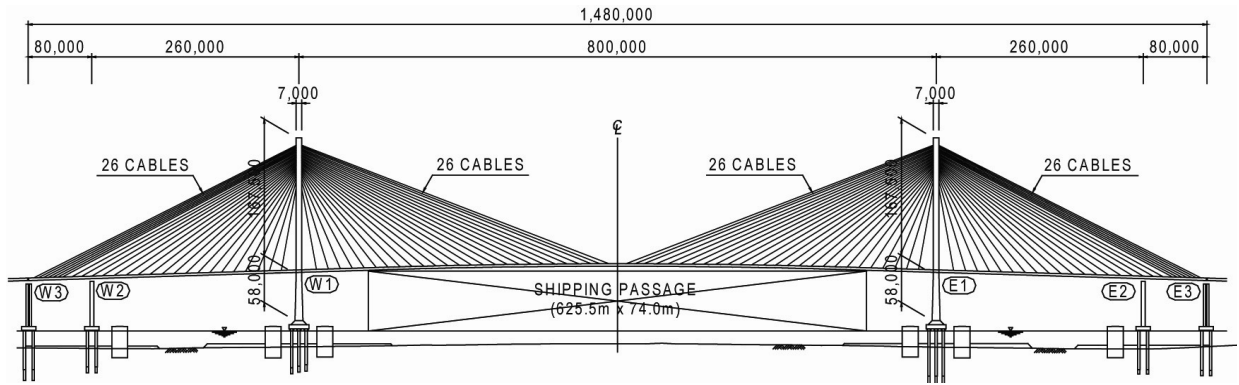


Fig. 1. General View of Cable Stayed Bridge

Table 1. Average Conversion Factor for GT and DWT

Tonnage	GT*→DWT**
More than 140,000GT	2.000
110,000 ~ 140,000 GT	1.887
80,000 ~ 110,000 GT	1.852
60,000 ~ 80,000 GT	1.818
40,000 ~ 60,000 GT	1.818
30,000 ~ 40,000 GT	1.695
20,000 ~ 30,000 GT	1.623
10,000 ~ 20,000 GT	1.524
Less than 10,000GT	1.333

*GT : Gross Tonnage

**DWT : Dead Weight Tonnage

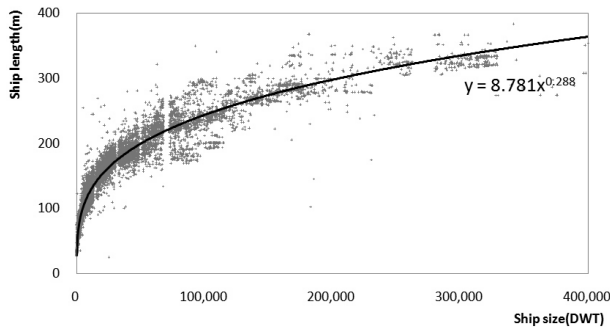


Fig. 2. Estimation of Ship Length

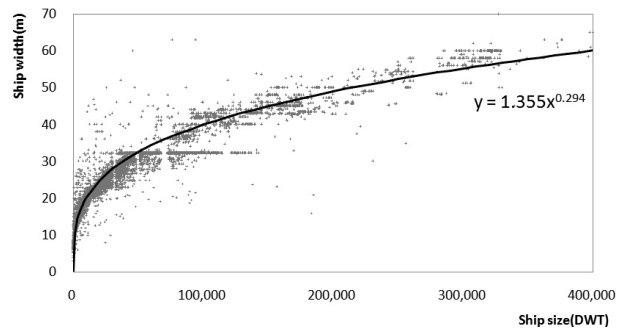


Fig. 3. Estimation of Ship Width

입출항 신고정보에 근거하여 톤급별 운항횟수를 산정하였다. 해당 시스템은 선박의 톤수를 용적톤수, GT로 집계하고 있으나 이는 세금 혹은 시설 사용료의 부과를 위한 톤수로 주로 사용되며, 선박충돌 설계에서는 하중을 산정하기 위한 것이므로 적재중량톤수, DWT로 전환할 필요가 있다. GT-DWT간 선박 전환은 Drewry Shipping Consultants Ltd.(해운산업연구원, 1996)의 선종 및 선형에 따른 환산계수를 톤급별로 Table 1과 같이 적용하였다. 선박의

제원은 AASHTO Guide, 항만및어항설계기준(2005) 등에서 제공하는 선종 및 톤급별 데이터를 이용하거나 운항되는 선박의 표본조사 혹은 전수조사로부터 추정할 수 있다. 본 연구에서는 인천항을 이용하는 선박의 길이와 폭에 대한 전수조사 및 회귀분석을 통하여 선박제원을 Figs. 2 and 3과 같이 추정하였다. 선박 톤수의 환산계수와 추정된 선박제원이 적용된 인천대교의 연간선박통행량은 Table 2와 같다.

Table 2. Ship Frequency Data

Tonnage	DWT	N	LOA*	B _M **
300,000~350,000	327,844	5	340.5	56.7
250,000~300,000	257,411	17	317.5	52.8
200,000~250,000	213,518	46	300.9	50.0
150,000~200,000	178,088	149	285.6	47.4
100,000~150,000	114,863	258	251.7	41.7
80,000~100,000	88,840	230	233.7	38.6
60,000~80,000	67,357	378	215.8	35.6
40,000~60,000	45,966	857	193.3	31.8
20,000~40,000	26,800	1,568	165.5	27.2
Less than 20,000	3,047	17,869	88.5	14.3

*LOA : Length Over All

**B_M : Width of ships

2.4 항로이탈확률

항로이탈확률, PA는 선박이 조종자의 실수나 기계고장, 비정상적인 기상조건으로 인하여 정해진 항로를 이탈하고 교량에 위험을 초래할 수 있는 확률이다. PA는 항로이탈의 기본율과 환경적인 요인에 따른 보정계수로부터 다음과 같이 정의되고 있다.

$$PA=(BR)(R_B)(R_C)(R_{XC})(R_D) \quad (2)$$

여기서, BR : 항로이탈의 기본율

R_B : 교량의 위치에 따른 보정계수

R_C : 선박의 통과경로에 평행한 유속에 대한 보정계수

R_{XC} : 선박의 통과경로의 직각방향 유속에 대한 보정계수

R_D : 통행선박의 밀도에 대한 보정계수

인천대교 설계보고서(2009)에서는 대상 교량이 위치한 수로를 21°정도의 회전 혹은 굽힘 영역으로 간주하였다. 유속에 대한 보정계수는 R_C에 대해서만 2.0knots로 가정하였으며, R_D는 고밀도로 분류하여 1.6을 적용하였다. 이로부터 계산된 인천대교가 놓인 수로의 PA 값은 1.69×10⁻⁴이다.

2.5 기하학적확률

기하학적 확률, PG는 항로를 이탈한 선박이 장애물이 있는 곳으로 향해될 확률로써 항로를 이탈한 선박의 항적분포는 해당선박의 길이를 표준편차로 하는 정규분포로 정의되며, PG는 전체 항적분포 영역에 대한 충돌코스 영역의 비율로 정의된다. 이때 평균의 위치는 항해 수로의 중심선이다. 인천대교 통과 선박의 PG값은 Table 3과 같다.

Table 3. Geometric Probability

DWT	x ₁ *	x ₂ *	F(x ₁)**	F(x ₂)**	PG
327,844	202.8	284.5	0.2243	0.2983	0.0740
257,411	204.7	282.5	0.2405	0.3132	0.0728
213,518	206.1	281.1	0.2533	0.3249	0.0716
178,088	207.4	279.8	0.2662	0.3364	0.0702
114,863	210.3	277.0	0.2983	0.3644	0.0662
88,840	211.8	275.4	0.3176	0.3807	0.0631
67,357	213.3	273.9	0.3386	0.3978	0.0593
45,966	215.2	272.0	0.3672	0.4203	0.0531
26,800	217.5	269.7	0.4056	0.4484	0.0428
3,047	224.0	263.3	0.4943	0.4985	0.0042

*x_n : Distance from collision area

**F(x_n) : Cumulative normal distribution function at x_n

2.6 파괴확률

파괴확률은 선박에 의한 충돌하중과 교량 부재의 수평강도의 비율로써 결정된다. 선박의 충돌하중은 선박의 크기와 속도를 변수로 하는 간단한 경험식에 의해 산정될 수 있으나, 해상교량에서 허부구조의 수평강도는 기본적으로 동역학적 에너지와 흡수성능의 관계일 뿐만 아니라 지반 및 유체의 영향을 고려한 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 배용귀 등(2012)은 인천대교의 허부구조에 적용된 케이싱 및 현장타설말뚝의 채원과 가상고정점(항만맞어항 설계기준, 2005)을 이용하여 비교적 간단한 방법으로 수평강도를 추정하였으며 이로부터 대상교량의 내충돌 성능과 연간파괴빈도를 개략적으로 추정하였다. 논문에서 현장타설말뚝 1본의 수평강도는 3.92MN이며, 주탑 기초부의 현장타설말뚝이 24본이므로 강제케이싱 및 철근콘크리트 말뚝에 의한 최대 수평강도 H_p는 94.08MN으로 추정되었다. 설계 과정에서는 충돌이 포함된 하중조합에 의한 영향을 고려한다면 비교적 정밀한 수평강도를 산출할 수 있을 것으로

Table 4. Probability of Collapse(H_p=94.08MN)

DWT	V	P _s	H _p /P _s	PC
327,844	4.698	322.81	0.291	0.0787
257,411	4.660	283.69	0.332	0.0743
213,518	4.627	256.58	0.367	0.0704
178,088	4.593	232.61	0.404	0.0662
114,863	4.500	183.00	0.514	0.0540
88,840	4.436	158.66	0.593	0.0452
67,357	4.358	135.73	0.693	0.0341
45,966	4.233	108.90	0.864	0.0151
26,800	4.009	78.77	1.194	0.0000
3,047	1.607	10.64	8.839	0.0000

Table 5. Probability of Collapse($H_p=195.22MN$)

DWT	V	P_s	H_p/P_s	PC
327,844	4.698	322.81	0.605	0.0439
257,411	4.660	283.69	0.688	0.0347
213,518	4.627	256.58	0.761	0.0266
178,088	4.593	232.61	0.839	0.0179
114,863	4.500	183.00	1.067	0.0000
88,840	4.436	158.66	1.230	0.0000
67,357	4.358	135.73	1.438	0.0000
45,966	4.233	108.90	1.793	0.0000
26,800	4.009	78.77	2.478	0.0000
3,047	1.607	10.64	18.340	0.0000

판단된다. 대상교량에 적용된 돌핀식 방호구조물은 100,000DWT 선박이 10knots 속도로 충돌하여도 견디도록 설계되어 있다. 해당 조건에서의 충돌하중 P_s 는 방호구조물에 의한 수평강도로 간주할 수 있으며, 195.22MN이다. 각각의 수평강도가 적용된 파괴확률은 Tables 4 and 5와 같다.

2.7 분배모델

연간파괴빈도의 허용기준은 교량 모든 부재의 AF를 합하여 적용하게 된다. 일반적으로 교량의 상부구조는 운항 혹은 운항이 예상되는 최대선박의 마스트높이를 적용하여 필요한 형상공간을 확보하고 있으며, 하부구조는 항로중심에서 설계선박의 3-LOA 이내의 부재에 할당하여 적용하게 된다. AASHTO Guide에서는 부재의 중요도와 교체비용을 고려하여 분배하도록 권장하고 있다. 부재의 중요도는 이성로 등(2006b)이 제안한 사전위험도평가를 통한 방법이 대표적이며, 교체비용은 설계과정에서 공사비산출자료에 근거하여 적용할 수 있다. 인천대교 주탑의 허용기준 분배율은 사전위험도평가에서 40%, 교체비용에 의해 25%로 산정되었으며, 본 연구에서는 위 결과를 산술평균하여 32.5%로 결정하였다. 따라서 인천대교 주탑의 허용 연간파괴빈도는 0.325×10^{-4} 이다.

2.8 연간파괴빈도

Method II에 의한 위험도평가에서는 연간파괴빈도를 교량의 중요도에 따른 허용기준으로 적용하고, 교량의 수평강도를 미지수로 하여 허용기준을 만족하는 최소 수평강도를 시행착오법에 의해 산정한다. 이를 설계수평강도라 하며, 설계수평강도를 충격력으로 적용하고 교량 부재의 설계속도를 적용하여 역산하면 설계선박을 산정할 수 있다. 설계수평강도는 교각이나 기초의 설계 및 구조해석에 적용되며, 설계선박은 교량의 상세 해석 혹은 방호구조물 설계 등에 적용된다.

Table 6. AF of Pylon Collapse by Lateral Resistance of Bridge Foundation

DWT	N	$PA(\times 10^{-4})$	PG	PC	$AF(\times 10^{-4})$
327,844	5	1.690	0.0740	0.0787	0.0492
257,411	17	1.690	0.0728	0.0743	0.1552
213,518	46	1.690	0.0716	0.0704	0.3915
178,088	149	1.690	0.0702	0.0662	1.1700
114,863	258	1.690	0.0662	0.0540	1.5572
88,840	230	1.690	0.0631	0.0452	1.1085
67,357	378	1.690	0.0593	0.0341	1.2911
45,966	857	1.690	0.0531	0.0151	1.1627
26,800	1,568	1.690	0.0428	0.0000	0.0000
3,047	17,869	1.690	0.0042	0.0000	0.0000

$$\Sigma AF=6.8854 \times 10^{-4}$$

Table 7. AF of Pylon Collapse by Lateral Resistance of Bridge Protection

DWT	N	$PA(\times 10^{-4})$	PG	PC	$AF(\times 10^{-4})$
327,844	5	0.0740	0.0740	0.0439	0.0275
257,411	17	0.0728	0.0728	0.0347	0.0724
213,518	46	0.0716	0.0716	0.0266	0.1478
178,088	149	0.0702	0.0702	0.0179	0.3158
114,863	258	0.0662	0.0662	0.0000	0.0000
88,840	230	0.0631	0.0631	0.0000	0.0000
67,357	378	0.0593	0.0593	0.0000	0.0000
45,966	857	0.0531	0.0531	0.0000	0.0000
26,800	1,568	0.0428	0.0428	0.0000	0.0000
3,047	17,869	0.0042	0.0042	0.0000	0.0000

$$\Sigma AF=0.5635 \times 10^{-4}$$

본 연구에서는 대상교량의 설계수평강도 및 설계선박을 산정하고 기존 구조물인 주탑 기초와 방호구조물에 의한 수평강도로부터 대상교량의 내충돌 성능과 연간파괴빈도를 비교·분석하였다. Tables 6 and 7은 주탑기초 및 방호구조물의 수평강도에 의한 교량의 AF를, Table 8은 설계수평강도에 의한 교량의 AF를 나타낸 것이다. 각각의 하중조건에 따른 선박충돌 설계결과는 Table 9와 같다. 방호구조물이 없는 경우 대상교량은 23,225DWT 이하의 선박에 대해서만 견딜 수 있었으며, 부가 하중을 유발시키는 충돌 빈도는 방호구조물에 비하여 12.5배, 허용기준에 비하여 21.5배나 높았다. 방호구조물에 의한 수평강도는 2010년 통행량을 적용한 설계수평강도 215.28MN의 90.7% 수준으로 통행량 증가분이 소극적으로 반영되었던 것으로 판단된다.

Table 8. AF of Pylon Collapse by Design Lateral Resistance of Bridge

DWT	N	PA($\times 10^{-4}$)	PG	PC	AF($\times 10^{-4}$)
327,844	5	1.690	0.0740	0.0370	0.0231
257,411	17	1.690	0.0728	0.0268	0.0560
213,518	46	1.690	0.0716	0.0179	0.0995
178,088	149	1.690	0.0702	0.0083	0.1464
114,863	258	1.690	0.0662	0.0000	0.0000
88,840	230	1.690	0.0631	0.0000	0.0000
67,357	378	1.690	0.0593	0.0000	0.0000
45,966	857	1.690	0.0531	0.0000	0.0000
26,800	1,568	1.690	0.0428	0.0000	0.0000
3,047	17,869	1.690	0.0042	0.0000	0.0000

$$\Sigma AF = 0.3250 \times 10^{-4}$$

Table 9. Result of Ship Collision Design

Classification	Bridge foundation	Bridge protection	Design lateral resistance
Lateral resistance(MN)	94.08 (43.7%)	195.22 (90.7%)	215.28
AF($\times 10^{-4}$)	6.8854 ($\times 21.2$)	0.5635 ($\times 1.7$)	0.3250
Design Vessel (DWT)	23,225 (19.1%)	100,002 (82.2%)	121,610

3. 민감도 분석

세계적으로 선박충돌과 관련한 확률모델들이 개발되고 교량 건설 프로젝트에 적용된 바 있으나 대체로 유사하며 AASHTO Guide(2009)의 Method II와 같은 형태를 가진다. 따라서 해상교량의 선박충돌 설계시 해당 기준의 위험도 평가 방법을 적용하면 만족할만한 설계하중을 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 기준에서 위험도 평가를 위하여 정의된 요소들은 내륙수로에 국한되어 있거나 지역적인 요인이 강하여 설계자의 판단을 필요로 하는 경우가 있으므로 다른 설계기준이나 연구결과 혹은 다른 해상교량 프로젝트의 결과를 참조하여 결정해야 하는 경우가 있다. 본 연구에서는 AASHTO Guide의 Method II에서 제시된 요소들의 산정방법과 추정근거에 대한 고찰을 수행하였으며 다른 설계기준과 연구결과, 해상교량 프로젝트를 참조하여 설계 요소를 대상교량과 같이 넓은 바다에 놓인 교량에 보다 적합한 방법을 제안하였다. 또한, 대상교량에 적용 가능한 설계 요소의 가변영역을 정의하고 해당 요소들에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

Table 10. Design Result by Tonnage Spacing

Tonnage Spacing (DWT)	AF($\times 10^{-4}$)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	$H_p=94.08$ (MN)	$H_p=195.22$ (MN)		
10,000 tonnage	6.854 ($\times 1.0$)	0.576 ($\times 1.0$)	215.11 (99.9%)	121,418 (99.8%)
20,000 tonnage	6.878 ($\times 1.0$)	0.570 ($\times 1.0$)	214.99 (99.9%)	121,282 (99.7%)
AASHTO Guide	6.887	0.564	215.29	121,621

3.1 선박의 연간통행량

AASHTO Guide에서는 위험도평가를 위한 톤급 분류를 10만 톤 미만의 선박은 2만톤 이하로, 10만톤 이상의 선박은 5만톤 이하로 하도록 규정하고 있다. 그러나 대형선박의 비중이 갈수록 높아지고 있으며 허용기준을 만족하는 연간과파빈도가 주로 대형선박에 의해 대부분 결정되므로 10만톤 이상의 선박에 대한 톤급 분류 간격을 검토할 필요가 있다. Table 10은 선박의 톤급 분류 간격을 각각 1, 2만톤 단위로 하여 AASHTO Guide에 제시된 분류 방법과의 위험도분석 결과를 비교한 것이다. 각각의 분류방법에 따른 분석결과가 대체로 유사하여 톤급 분류 간격이 위험도 분석에 미치는 영향이 크지 않았는데, 이는 분류 간격별로 해당구간의 대표톤수를 평균톤수로 적용하였기 때문으로 판단된다. 그러므로 톤급별 평균톤수의 적용이 가능하다면 AASHTO Guide 방법을 적용하여도 문제가 없으나 평균톤수 정보가 가용하지 않다면 효율적인 부분을 고려하되, 세밀하게 분류할수록 오차가 적을 것으로 판단된다.

3.2 항로이탈확률(Probability of Aberrancy)

PA는 인과확률(Causation probability)이라고도 하며, 주로 선박의 좌초와 관련하여 1970년대 초기부터 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Fujii et al.(1974)은 선박의 조정불가 상태를 교통량 관측에 기초한 사고 발생 횟수와 수로의 지형적인 조건에 따른 기하확률로 정량화하여 일본내 해협의 인과확률을 $0.6 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ 으로 결정하였다. MacDuff(1974)는 뷔풍의 바늘문제를 이용하여 수로 내의 모든 선박이 무작위로 분포된다는 가정 하에 사고에 대한 이론적 확률을 계산하고 좌초와 충돌사고 기록에 대한 관찰과의 비교를 통하여 상호간의 차이를 설명하기 위한 수정인자, 인과확률을 $1.0 \sim 5.0 \times 10^{-4}$ 으로 결정하였다. 인과확률과 관련된 대부분의 연구는 Fujii 또는 MacDuff의 접근법을 근거로 하거나 특정수역에서 사고의 통계자료에 의해 만들어진다(Larsen, 1993). 교량에 적용된 대표적인 인과확률은 Table 11과 같다.

Table 11. Lists of PA Value

Bridge	PA
Sunshine Skyway Bridge, U.S.A	1.3×10 ⁻⁴ (ship) 2.0×10 ⁻⁴ (barge)
Dames Point Bridge, U.S.A	1.3×10 ⁻⁴ (ship) 4.1×10 ⁻⁴ (barge)
Francis Scott Key Bridge, U.S.A	1.0×10 ⁻⁴ (ship) 2.0×10 ⁻⁴ (barge)
Chesapeake Bay Bridge and Tunnel, U.S.A	0.7×10 ⁻⁴
Vicksburg Bridge, U.S.A	5.4×10 ⁻⁴
Laviolette Bridge, Canada	0.5×10 ⁻⁴
Centennial Bridge, Canada	5.0×10 ⁻⁴
Tasman Bridge, Australia	0.6~1.0×10 ⁻⁴
Akashi Bridge, Japan	1.4×10 ⁻⁴
Great Belt Crossing Bridge, Denmark	1.1×10 ⁻⁴ (with pilot) 3.2×10 ⁻⁴ (without pilot)

Table 12. Design Result by PA Value

PA (×10 ⁻⁴)	AF(×10 ⁻⁴)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	H _p =94.08 (MN)	H _p =195.22 (MN)		
0.845	3.444 (×0.5)	0.282 (×0.5)	187.96 (87.3%)	92,702 (76.2%)
Incheon bridge	6.887	0.564	215.29	121,621
2.535	10.331 (×1.5)	0.845 (×1.5)	224.40 (104.2%)	132,131 (108.6%)

AASHTO Guide에서는 일반선박과 바지선에 대한 인과확률의 기본율을 각각 0.6×10⁻⁴, 1.2×10⁻⁴으로 정의하고 유속성분과 선박 운항 밀도에 따른 보정계수를 적용하고 있다. 이는 기본적인 인과확률을 0.6×10⁻⁴으로 보고 바지선의 조종성능을 일반선박의 50% 정도 낮게 평가한 것으로 판단된다. 본 논문에서는 대상교량의 위험도분석에 적용된 PA 값의 가변영역을 ±50% 정도로 하여 민감도 분석을 Table 12와 같이 수행하였다. 분석결과에 따르면, PA가 -50%까지 작아지는 경우 설계선박은 23.8% 감소되었으며, PA가 +50%까지 커지는 경우 설계선박은 8.6% 증가되었다. 인과확률은 지역적인 요인이 강하기 때문에 교량이 놓인 수로의 위치에 따라 매우 다양하게 적용되고 있으며 Table 11에 나온 바와 같이 변동성이 크고 단 1회의 사고에도 증감이 크게 나타난다. 따라서 기준에서 제시하는 인과확률보다는 해당 수로 혹은 수역의 사고이력을 분석하여 해당 값을 설계에 반영하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 13. Design Result by Location of Mean

Location of mean	AF(×10 ⁻⁴)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	H _p =94.08 (MN)	H _p =195.22 (MN)		
1/4 from center	4.661 (×0.7)	0.438 (×0.8)	207.55 (96.4%)	113,033 (92.9%)
AASHTO Guide	6.887	0.564	215.29	121,621
3/4 from center	9.208 (×1.3)	0.676 (×1.2)	219.72 (102.1%)	126,678 (104.2%)

Table 14. Design Result by Standard Deviation

Standard deviation	AF(×10 ⁻⁴)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	H _p =94.08 (MN)	H _p =195.22 (MN)		
σ=0.8LOA	6.441 (×0.9)	0.583 (×1.0)	216.29 (100.5%)	122,753 (100.9%)
AASHTO Guide	6.887	0.564	215.29	121,621
σ=1.2LOA	6.762 (×1.0)	0.521 (×0.9)	213.01 (98.9%)	119,059 (97.9%)

3.3 기하학적 확률(Geometric Probability)

AASHTO Guide에서는 선박충돌 사고이력에 근거하여 항로의 중심을 평균으로 하고 해당 선박의 길이를 표준편차로 하는 정규분포를 사용하고 있다. 그러나 해당기준은 사고 데이터가 적은 편이고 20년 이상된 자료이며 내륙수로의 바지선 충돌사고가 상당히 포함되어 있다는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 세계적으로 해상교량의 사고기록을 추가적으로 조사할 필요가 있겠으나 이는 평균의 위치와 표준편차의 증감으로 대변될 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 정규분포의 평균이 각각 수로의 1/4, 3/4 위치로 변화되는 경우와 표준편차가 대상선박의 0.8LOA, 1.2LOA로 변화되는 경우에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과에 따르면, Table 13과 같이 평균의 위치 변화에 따른 충돌위험은 ±0.3배, 설계선박은 ±7.1% 정도였으나, Table 14와 같이 표준편차의 변화에 따른 충돌위험과 설계선박은 각각 ±0.1배, ±2.1% 정도였다. 따라서 별도의 조사과정을 거치지 않고 AASHTO Guide의 규정을 사용하더라도 문제가 없을 것으로 판단되나 향후 교량을 통과하는 선박의 운항실태 조사 시에는 평균적인 선박의 위치와 조선자의 운항중심을 보다 중점적으로 분석할 필요가 있다.

AASHTO Guide를 비롯하여 선박의 운항과 관련된 연구결과에서 선박의 항해 항적은 대부분 정규분포로 정의된다. Olsen 등 (1993)은 비교적 넓은 해역인 일본의 Bisan seto 수로와 Great

Table 15. Design Result by Relative Findings

Relative findings	AF($\times 10^4$)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	$H_p=94.08$ (MN)	$H_p=195.22$ (MN)		
Olsen etc.	5.391 ($\times 0.8$)	0.447 ($\times 0.8$)	208.25 (96.7%)	113,797 (93.6%)
Inoue etc.	5.080 ($\times 0.7$)	0.422 ($\times 0.7$)	206.14 (95.7%)	111,503 (91.7%)
AASHTO Guide	6.887	0.564	215.29	121,621

belt에서의 관측결과로부터 항적분포를 정규분포로 모델링하였다. 표준편차는 일반적인 대형선박 전장의 두배($2 \times LOA$)로 가정하고, 일반적인 대형 선박은 선박 크기 분포의 95%로 정의하였다. Inoue (1977)와 Kuroda et al.(1983)은 항해 수로에서 왕복통항에 대한 선박의 항적분포를 경험적으로 다음과 같은 평균값과 표준편차를 가지는 정규분포로 근사할 수 있다고 가정하였다.

$$\mu = a \cdot W \tag{3}$$

$$\sigma = 1.105 \cdot W(\text{근사값}) \tag{4}$$

여기서, W : 항해 수로의 폭

- a : 0.2 ; 수로 중앙에 분리 표식이 있을 경우
- 0.1 ; 수로 중앙에 분리 표식이 없을 경우

Table 15는 해당 연구결과를 대상교량에 적용하여 위험도분석을 수행한 결과로 AASHTO Guide는 다른 연구결과에 비하여 충돌위험과 설계선박이 다소 높게 평가되는 것으로 조사되었다. 따라서 표준편차의 적용방법이나 항해항적 모델링시 평균의 위치에 대한 추가적인 자료조사가 필요할 것으로 판단된다.

3.4 파괴확률(Probability of Collapse)

파괴확률, PC는 선박의 충돌에 의해 구조물이 파괴될 확률이다. 항로를 이탈한 선박은 교량의 하부구조에 충돌할 가능성이 매우 높으며, 이러한 충돌의 일부는 교량에 심각한 손상을 초래할 수 있다. AASHTO Guide에서는 Cowiconsult(1987)에서 개발된 확률밀도함수를 적용하여 선박의 충돌하중과 교량 하부구조의 저항력의 관계에 따라 PC를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$0 \leq H_p/P_s \leq 0.1, PC = 0.1 + 9(0.1 - H_p/P_s) \tag{5}$$

$$0.1 \leq H_p/P_s \leq 1, PC = (1.0 - H_p/P_s)/9 \tag{6}$$

$$H_p/P_s \leq 1, PC = 1.0 \tag{7}$$

여기서, P_s : 선박충돌력

H_p : 구조물의 저항력

AASHTO Guide에서 선박충돌력 P_s 는 Woisin(1976)의 물리 모델 실험 결과에 근거하고 있으며, 해당 연구에서는 전체 충돌하중 분포의 70%분위수를 사용한 평균 충돌하중을 사용하고 있다. 이에 반해 EUROCODE(2001)에서는 Great Belt Bridge Project에서 Pedersen et al.(1993)의 수치자료를 근거로 한 최대 충돌하중을 사용하고 있다. 위험도분석시 EUROCODE에서 제안된 충돌하중을 사용하면 충돌하중을 보수적으로 평가하는 결과가 되지만 설계 선박은 서로 같다. 이는 설계선박이 충돌하중 경험식으로부터 역산하여 산정되기 때문이다. 구조물의 저항력 H_p 는 AASHTO Guide에서 위험도평가의 최종 목표이며, 미지수가 되는 값으로 초기 가정후 위험도가 허용기준을 벗어나면 해당값의 증감을 통하여 시행착오법으로 필요한 구조물의 저항력 즉, 설계수평강도를 결정할 수 있다. 대상 교량은 설계수평강도의 크기에 따라 하부구조의 자체 강성이나 돌핀 혹은 인공섬과 같은 방호구조물에 의존하여 선박충돌력에 견딜수 있도록 설계된다.

AASHTO Guide에서 파괴확률은 교량을 매우 큰 선박으로 가정하고 대상 선박의 충돌에 의한 상대적인 손상비율로 정의하고 있어 비교적 합리적이며 적용성이 좋게 개발되었으나 충돌 위치나 충돌체 및 피충돌체의 특성 등은 고려되지 않고 있다. 조호현(2009)은 충돌하중의 확률모델과 주탑의 전단저항 취약도를 평가하여 파괴확률을 산정하였으나 충돌대상과 파괴거동이 한정되어 있으며 상당히 보수적인 결과를 보이고 있었다. Consolazio, G. R.(2010) 등은 바지선의 충돌에 대한 충돌위치 및 교량 하부구조의 구조형식에 따른 충돌시뮬레이션 결과로부터 파괴확률을 비교적 정확하게 추정하였으나 대상선박이 다양한 경우에는 시간 소비적인 측면이 있어 일반적인 해상교량의 설계 단계에서 바로 적용하기에는 어려울 것으로 판단된다. 향후 공용중인 해상교량에 대한 모니터링과 발생 사고에 대한 충돌 및 운항시뮬레이션 등을 활용하여 AASHTO Guide 기반의 파괴확률을 평가하고 이를 개선하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 방호계수(Protection Factor)

방호계수는 AASHTO Guide 2009년판에 새롭게 추가된 요소로써 하부구조에 작용하는 충돌력이 장애물에 의해 보호되는 정도를 고려하기 위한 것이다. 예를 들어 특정 교각, 기초가 암초나 섬에 의해 완전히 보호된다면 PF는 0이 되며, 수심이 낮아 일부선박만 접근 가능하거나 장애물 등에 의해 보호되고 있다면 보호 정도를

고려하여 적정 계수를 사용하게 된다. 그러나 보호되는 정도에 대한 정량적인 지표는 수립되어 있지 않았다. 국내에서도 방호계수와 유사한 개념의 위험도 분배모델이 제안되었다. 이성로 등(2010)은 충돌위험을 수로 영역에 관계없이 수로 중심으로부터 3×LOA 범위에 있는 모든 부재에 할당하고, 이로부터 수로영역에 있는 부재의 위험도평가를 수행해야 하며 이때, 교량 구성부재의 AF의 합은 교량 전체의 허용 AF보다 작게 평가될 수도 있다고 보고하였다. 본 논문의 대상교량은 특별한 장애물이 없는 해상에 위치하고 있으므로 방호계수는 1.0 혹은 적용할 필요가 없으므로 사용된 기준의 변경 사항에 대한 영향을 받지 않는다.

3.6 선박의 충돌속도

선박이 항내에 진입하거나 수로의 만곡부 혹은 교량과 같은 위험물 근처를 지날때 즉, 운항시 각별한 주의를 요하는 상황에서는 감속 운항이나 필요한 제반조치를 취해야 한다. 그러나 접안시와 같이 1노트 내외로 운항할 수는 없으며, 속도가 낮다고 해서 조종성능이 무조건 좋다고 할수는 없다. 이는 선박의 운항에 영향을 미치는 요소가 선종이나 도선사의 경험 및 지역적인 특성이 매우 강하므로 일괄적으로 결정될 수 있는 사항이 아니며, 조종성능은 이론적인 계산 결과와도 많은 차이가 있기 때문이다(도선사협회). 그러나 항계 내에서 선박의 운항속도는 약 15노트 이하의 비교적 적은 범위의 구간 내에 있으며, 추정 방법이 어렵고 복잡하여 보수적으로 산정되더라도 교량에 대한 선박충돌 설계시에는 매우 유용할 것으로 판단된다. 이는 선박의 충돌력과 충돌에너지 산정시 속도의 영향이 매우 크기 때문이다.

Pedersen은 선박의 운항속도로 항내속도와 사용속도를 각각 6~8노트, 10~15노트로 정의하였으며, Great Belt Bridge Project에서 선박의 운항속도를 10노트로 하여 선박충돌 설계에 적용하였다. 국내에서는 지방해양항만청의 고시로 특정 구간에 대한 제한속도를 규정하고 있는데, 인천항 선박통항규칙 개정고시안(2010)에서는 영종대교와 인천대교를 포함하는 구역의 최대속도를 12노트 이하로 규정하고 있으나, 교량 부근에서는 총톤수 5만톤 이상의 선박은 10노트 이하, 10만톤 이상의 선박은 7노트 이하로 제한하고 있다. 평양항은 해상교통관제운영규정에서 타 선박의 통항 안전저해와 항로상 적체현상 방지를 위한 최저속도를 6노트로 규정하고 있다. 부산항 항법 등에 관한 규칙(2012)에서는 남항대교와 영도대교, 부산대교, 북항대교 인근에서 총톤수 500톤 이하의 일부 여객선을 제외한 모든 선박의 최고항행속력을 8노트 이하로 제한하고 있다. 평택당진항은 항계내 항행선박 최고속력제한에 관한 고시(2012)에서 서해대교가 포함된 해역의 최고속력을 8노트 이하로 제한하고 있다. 여수항은 해상교통관제운영규정(2010)에서 광양대교가 포함된 해역을 운항하는 선박의 최대속력을 12노트(단,

Table 16. Design Result by Navigating Speed

V _T (knots)	AF(×10 ⁻⁴)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	H _P =94.08 (MN)	H _P =195.22 (MN)		
6.0	1.623 (×0.2)	0.000 (×0.0)	130.81 (60.8%)	44,900 (36.9%)
8.0	3.958 (×0.6)	0.083 (×0.1)	173.05 (80.4%)	78,579 (64.6%)
Incheon bridge	6.887	0.564	215.29	121,621

위험화물운반선은 10노트 이하)로 규정하고 있으며, 최소속력을 6노트로 규정하고 있다. 목포항은 항만시설운영세칙(2012)에서 목포대교가 포함된 해역의 최고속도를 12노트 이하로 규정하고 있으며, 목포대교 부근과 같이 선박통항이 밀집하는 수역에서는 안전운항에 필요한 관제를 받도록 조치하고 있다.

교량에 대한 선박충돌은 설계선박의 충돌력을 교량 혹은 방호구조물이 견딜수 있는지가 관건이기 때문에 일반적인 대형선박이 비교적 양호한 운항성능을 발휘하는 범위 내에서의 최저속도가 관심의 대상이 된다. 국내 주요 항의 일반적인 운항제한 최대속도는 8~12노트 범위에서 각각 결정되었으나 최소 속도는 대부분 6노트로 규정하고 있었다. 본 논문에서는 인천대교에 적용된 10노트를 각각 8노트, 6노트로 제한하는 경우에 대한 민감도 분석을 Table 16과 같이 수행하였다. 운항속도 제한에 따라 충돌위험은 최소 1/5~3/5 감소되었으며, 설계선박은 36.9~64.6%까지 감소되었다. 선박의 운항속도 변화에 따른 민감도가 매우 크기 때문에 이를 활용한 경제적인 설계가 가능하겠으나 선박의 양호한 주행을 확보할 수 있도록 8노트 이상을 적용하는 것을 권장하며, 향후 교량의 유지관리를 위하여 부득이한 경우에는 일부 대형선박에 대해서는 8노트 이하로 적용하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

3.7 분배모델

선박충돌을 규정하고 있는 주요 기준에서 연간파괴빈도의 허용기준은 교량 구조물 전체에 대해 정의하고 있으며 해당 허용치를 교량 부속구조물에 분배하는 것은 설계자의 판단에 따른다. AASHTO Guide에서는 부재의 중요도와 교체비용을 고려하여 분배하도록 권장하고 있으며, 이성로 등(2006b)은 사전위험도평가를 통한 허

Table 17. Available Risk Distribution Model

Risk distribution model	Pylon	Pier
Preliminary risk assessment	40%	10%
Replacement cost	25%	25%
Arithmetic mean	32.5%	17.5%

Table 18. Design Result by Risk Distribution Model

Risk distribution model	AF($\times 10^{-4}$)		Design lateral resistance (MN)	Design vessel (DWT)
	H _F =94.08 (MN)	H _F =195.22 (MN)		
Replacement cost	6.885 ($\times 1.0$)	0.563 ($\times 1.0$)	221.59 (102.9%)	128,843 (105.9%)
Arithmetic mean	6.887	0.564	215.29	121,621
Preliminary risk assessment	6.885 ($\times 1.0$)	0.563 ($\times 1.0$)	208.98 (97.1%)	114,596 (94.2%)

용기준 분배모델을 제안하였다. 본 논문에서는 교체비용과 사전 위험도평가를 통한 방법 그리고 두 가지 방법을 산술평균한 경우에 대한 위험도 분석을 수행하였다. Table 17은 논문에 적용된 분배모델이며, Table 18은 분배모델에 따른 위험도분석 결과는 나타난 것이다. 분배모델의 변화율이 15% 정도인 것에 비하여 다른 위험도 분석 결과는 설계선박이 6.0% 정도로 조사되어 교체비용이나 사전 위험도평가 등과 같이 공학적으로 타당한 방법이 사용된다면 지배적인 영향을 미치는 요소는 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 2010년 선박운항데이터를 사용하여 인천대교의 설계수평강도 및 설계선박을 산정하고 방호구조물 설치 전·후의 내충돌 성능과 연간과피빈도를 비교분석하였다. 또한, AASHTO Guide(2009)의 Method II에서 제시된 설계 요소들의 산정방법과 추정근거 및 관련 연구결과에 대한 고찰을 수행하여 설계단계에서 주의하여 적용해야 하거나 지역적인 데이터의 직접 분석 등이 필요한 요소들을 확인하여 가변영역을 정의하고 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

인천대교의 선박충돌 위험도는 방호구조물 설치로 인하여 6.88×10^{-4} 에서 0.56×10^{-4} 으로 감소되었으나 설계선박은 10노트 기준으로 121,610DWT로 산정되어 설계당시의 대상선박 100,000DWT에 비하여 높게 산정되었다. 이는 설계시 통행량 증가분이 소극적으로 반영된 것으로 판단되나 실제로는 인천대교 부근의 운항속도가 선박 규모에 따라 7.0노트까지 제한되고 있으므로 운영에는 대체로 문제가 없을 것으로 보인다. 단, 선박 통행량 증가분 및 운항조건 등의 모니터링을 비롯하여 대상교량의 선박충돌 대한 유지관리 및 별도의 분석과 검사가 필요할 것으로 판단된다.

위험도평가에 필요한 요소들의 민감도 분석에서는 설계속도의 영향이 가장 큰 것으로 조사되었다. 본 논문에서는 주요 항구별 제한속도를 참조하여 가이드라인을 제시하였으나 선박의 종류나

크기에 따른 운항속도와 주행성능의 관계가 정립된다면 보다 정확하고 효율적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 항로이탈확률은 지역적인 특성이 뚜렷한 대표적인 설계 요소로 가변 영역이 넓고 변동성이 크며 위험도 분석에도 비교적 큰 영향을 미치므로 AASHTO Guide 보다는 해당 수역의 사고자료 및 지역적인 데이터를 직접 분석하는 것이 보다 정확한 설계가 될 것으로 판단된다. 기하학적 확률은 평균의 위치와 표준편차의 크기 변화에 따른 분석결과의 변화율이 $\pm 10\%$ 이내로 AASHTO Guide의 기준을 준용하여도 문제가 없을 것으로 판단되나 추가적인 연구가 수행된다면 평균적인 선박의 위치와 조선자의 운항중심을 보다 중점적으로 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

교량에 대한 선박충돌 위험도분석은 해당구간을 통과하는 다양한 선박들 중에서 설계에 적용할 선박의 수준과 충돌하중을 확률적으로 결정하는 매우 중요한 과정으로 설계의 타당성과 구조물의 경제성을 판단하는 근거가 된다. 이번 연구를 통하여 위험도분석에 필요한 설계 요소들의 접근방법과 특히 주안점을 두어야 하는 설계요소를 확인하였으며 이로부터 실무에서 해상교량에 대한 위험도 평가 및 특정 요소의 심층적인 분석을 위한 기초 자료로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

AASHTO (2009). *Guide specification and commentary for vessel collision design of highway bridges*.

Bae, Y. G. and Lee, S. L. (2008). "Analysis of ship collision behavior of pile supported structure." *Journal of KSCE, KSCE*, Vol. 28, No. 3A, pp. 323-330 (in Korean).

Bae, Y. G. and Lee, S. L. (2012). "Determination of channel width and span length for offshore bridges considering the ship collision problem." *Yooshin Technical Proceedings*, Yooshin Engineering Corporation, No. 19, pp. 73-87 (in Korean).

Bae, Y. G. and Lee, S. L. (2012). "Ship impact risk assessment of incheon bridge." *Proceedings of KSCE Annual Conference*, KSCE, Vol. A, pp.1506-1509 (in Korean).

Busan Regional Maritime Affairs and Port Office (2012). *Internal notification or guideline regarding to port operation or ship navigation* (in Korean).

CHO, H. H. (2009). *Probability analysis of ship-bridge collision using ship maneuvering simulation*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea (in Korean).

Consolazio, G. R., Davidson, M. T. and Getter, D. J. (2010). *Vessel crushing and structural collapse relationships for bridge design*, University of Florida Civil and Coastal Engineering.

Cowiconsult (1987). *General principles for risk evaluation of ship collisions, strandings, and contact incidents*, Technical Note dated January (unpublished).

EUROCODE 1 (2001). *Basic of design and actions on structures*,

- European Standard.
- Fujii, Y., Yamanouchi, H. and Mizuki, N. (1974). "Some factors affecting the frequency of accidents in marine traffic." *Journal of Navigation*, Vol. 27.
- Harbor and Fishery Design Criteria (2005). Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (in Korean).
- Incheon Bridge Corporation (2009). *Incheon bridge project design report*.
- Incheon Regional Maritime Affairs and Port Office (2012). *Internal notification or guideline regarding to port operation or ship navigation* (in Korean).
- Inoue K. (1977). "On the separation of traffic at straight waterway by distribution model of ship paths." *Journal of Nautical Society of Japan*. No. 56.
- Kuroda K. and Kita. H. (1983). *Probabilistic modelling of ship collision with bridge piers*, IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Copenhagen.
- Larsen O. D. (1993). *Ship collision with bridge*, IABSE.
- Lee G. H. and Hong, G. Y. (2011). "A study for the evaluation of ship collision forces for the design of bridge pier." *Journal of KSCE, KSCE*, Vol. 31, No. 3A, pp. 199-206 (in Korean).
- Lee, S. L. and Bae, Y. G. (2006a). "Ship collision risk assessment for bridges." *Journal of KSCE, KSCE*, Vol. 26, No. 1A, pp. 1-9 (in Korean).
- Lee, S. L. and Bae, Y. G. (2006b). "Ship collision risk of suspension bridge and design vessel load." *Journal of KSCE, KSCE*, Vol. 26, No. 1A, pp. 11-19 (in Korean).
- Lee, S. L. and Bae, Y. G. (2010). "Application of ship collision risk distribution model depending on bridge and channel layout." *Proceedings of KSMI Spring Conference*, KSMI, Vol. 14, No. 1, pp. 132-135 (in Korean).
- MacDuff, T. (1974). *The probability of vessel collisions*, Ocean Industry.
- Mokpo Regional Maritime Affairs and Port Office (2012). *Internal notification or guideline regarding to port operation or ship navigation* (in Korean).
- Olsen. D. F., Drejfeldt S. R. and Olsen N. H. (1993). *Theoretical modelling and application of a ship collision risk model to bridges crossing navigable waters*.
- Pedersen P. T., Valsgard S., Oisen D. and Spangenberg S. (1993). "Ship impacts: Bow Collisions." *International J. of Impact Engineering*. Vol. 13, pp. 163-57.
- Pyeongtaek Regional Maritime Affairs and Port Office (2012). *Internal notification or guideline regarding to port operation or ship navigation* (in Korean).
- Shipping Statistics Handbook (1996). Korea maritime institute (in Korean).
- The Korean Highway Bridge Standard Specifications (2012). (*Limit State Design*), Korea Road & Transportation Association (in Korean).
- Woisin, G. (1976). *The collision tests of the GKSS*, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Vol. 70, Berlin.
- Yeosu Regional Maritime Affairs and Port Office (2012). *Internal notification or guideline regarding to port operation or ship navigation* (in Korean).