

선박충돌 문제에 대한 해상교량의 유지관리

배용귀^{1*}, 이성로²

Maintenance of the Sea-crossing Bridge for Ship Collision Problems

Yong-Gwi Bae^{1*}, Seong-Lo Lee²

Abstract: Damage of sea-crossing bridge by ship collision is related to estimate frequencies of overloading due to impact, and bridge accordingly must be designed to satisfy related acceptance criteria. Another important aspect is the management on increment of collision risk during the service period. In this study, related plan, main span length, air draft clearance and collision risk are analyzed for the interim assessment of Incheon Bridge focusing on the ship collision problem. In particular, for the increment of collision risk, the optimized navigation speed is proposed by reviewing the research findings and navigation guidelines etc. as a temporary expedient. Also basic procedure for reasonable prediction of target vessel and passage is established and probabilistic prediction method to embrace the uncertainty of the prediction is proposed as a fundamental solution. It is necessary to conduct further research on collision risk management and promptly carry out interim assessments of other marine bridges.

Keywords: Ship collision, Maintenance, Interim assessment, Navigation speed, Prediction method

1. 서론

해상교량 건설사업에서 교량 구조물에 대한 선박의 충돌 문제는 지진, 바람 등과 더불어 구조물의 단면을 결정짓는 매우 중요한 요소이며 교량의 계획, 설계 및 유지관리 등의 각 단계에서 모두 중요하게 다루어진다. 특히, 유지관리 단계에서는 선박의 항적과 변동성 등을 비롯하여 톤급별 예측 통행량에 대한 모니터링 및 정기적 중간점검을 수행하고 해당결과에 따라 필요한 대응 방안을 마련해야 한다.

해상교량에 대한 선박충돌 문제와 관련하여 국내에서는 충돌위험도평가(Lee and Bae, 2006), 충돌시물레이션(Lee and Hong, 2011) 등과 같은 연구가 활발하게 진행되었으며 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편(2015)에서는 충돌하중의 확률분포와 연간초과확률로부터 설계충돌하중을 결정하는 확률론적 결정방법이 제시되었다. 또한, 인천대교, 이순신대교, 목포대교 등과 같은 대형 해상교량 건설사업에서는 선박충돌 관련 문제가 상당히 적극적으로 고려되었다. 그러나 세계적으로도 선박충돌 문제는 바람이나 지진 문제에

비해서는 초기 단계이며 통행량 예측, 유지관리 등에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

최근에는 국내의 해상교량 건설이 거의 정점에 도달한 것으로 판단되며 설계적인 측면 보다는 기존 교량의 유지관리적인 측면이 부각되고 있다. 선박충돌 문제를 고려한 교량 설계시에는 대상선박 및 통행량을 예측하고 이로부터 교량에 작용하는 부가하중의 빈도를 추정하여 특정한 수용기준에 만족하도록 해야 하는데 이러한 예측은 변동성이 크고 실제와는 다른 경우가 많다. 따라서 유지관리시에는 공용기간동안 이러한 충돌위험의 증가분을 어떻게 관리해야 하는지가 관건이다.

본 논문에서는 인천대교를 대상으로 선박충돌 문제에 대한 중간점검을 위하여 관련계획을 검토하고 주경간장, 형하고 및 충돌위험도에 대하여 설계 당시와 현재의 조건을 비교·분석하였다. 특히, 충돌위험도의 증가분에 대하여 이를 감소시키기 위한 근시적인 해결방안과 예측의 불확실성을 수용할 수 있는 근본적인 해결방안을 각각 제시하였다.

2. 중간점검

선박충돌 문제와 관련하여 중간점검을 수행하기 위해서는 기본적으로 항만개발 관련계획과 대상선박 및 통행량의 추이를 조사해야 한다. 이로부터 선박의 대형화 및 통행량 증가여

¹정회원, (주)유신 과장, 교신저자

²정회원, 목포대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: dookiyg@nate.com

Yooshin Engineering Corporation, 8, 4Gil, Yeoksam-Ro, Gangnam-Gu, Seoul, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

부를 확인하여 해상교량의 선박통과에 필요한 시설한계인 주경장 및 형하고의 적정성을 확인해야 하며, 구조물의 건전성을 확보하기 위하여 선박충돌위험도가 허용기준을 만족하고 있는지 검토해야 한다.

2.1 관련계획 검토

최근에 수행된 제3차 항만기본계획(2011)에 따르면, 인천항은 2020년까지 최대 15만GT 규모의 국제여객/크루즈부두 10선석 및 3천TEU급 컨테이너부두 1선석이 개발될 예정이며 2020년 이후에는 인천신항 2단계 공사가 계획되어 있다. 15만GT급 크루즈는 교량에 대한 선박충돌 위험도가 매우 높은 초대형 선박이며, 마스트높이가 높은 편이므로 교량 통과 조건 또한 매우 까다로울 것으로 판단된다. 그러나 인천신항 2단계 부지는 인천대교 바깥쪽에 위치하여 왕복 항로가 인천대교를 통과하지 않으므로 인천대교의 선박충돌 문제에는 직접적인 영향이 없을 것으로 판단된다.

최근까지의 대상선박 및 통행량의 추이는 Fig. 1, 2와 같다. 전체 선박의 통행량은 2010년까지 꾸준히 증가하여 정점에 도달했으며, 2012년 이후부터는 일정 수준을 유지하고 있다. 그러나 대형선박의 통행량은 2010년 이후에도 꾸준한 증가세를 유지하고 있으므로 신규항만개발계획이 포함된 2022년 이후까지는 선박충돌 위험도에 대한 지속적인 유지관리가 필요할 것으로 판단된다.

최대선박은 2008년부터 300,000DWT 이상의 선박이 출현하고 있으며 설계선박은 년도에 따른 편차는 있으나 완만한 증가세를 유지하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 선종별 최대선박을 조사하여 주경간장, 형하고와 같은 통과조건을 확인해야 하며 특히, 크루즈선의 경우 선박별로 제원의 편차가 크므로 항로를 이용하는 실제 대상선박의 제원을 적용하여 통과조건을 면밀히 검토해야 한다.

2.2 주경간장 검토

해상교량의 주경간장은 항로를 이용하는 선박의 통행 안정

성에 근거하여 결정되며, 이를 평가하기 위한 방법은 선박운항 모의실험 결과에 근거하거나 혹은 실제 운항자료에 의한 통계학적인 접근법으로 분류할 수 있다. 선박운항 모의실험은 대상선박이 비교적 명확하거나 특정 선박으로 한정할 수 있는 경우 효율적이며 실제 통행 환경에 가장 근사하므로 정확도가 높은 편이다. 통계학적인 방법은 대상선박이 명확하지 않고 범주가 다양한 경우 효율적이며 목표 신뢰도에 따른 소요폭을 산정할 수 있으나 선박 관련 데이터의 변동성이 크며 오래된 데이터를 포함하고 있으므로 다소 안전측으로 평가된다.

인천대교 건설사업에서 주경간장은 선박운항모의실험 결과와 관련기관의 수차례 협의를 거쳐 800 m로 최종 결정되었다(해양수산동향, 2005). 중간점검과 같은 유지관리 단계에서는 통계학적인 접근법을 이용하여 주경간장의 적정성을 평가하고 해당 결과로부터 선박운항 모의실험의 필요 여부를 판단하는 절차에 따르는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 통계학적인 접근법이 적용된 배용귀(2016)의 연구결과에 근거하여 주경간장에 대한 중간점검을 수행하였다. 해당 연구에서는 선박점용이론과 항만맞어항설계기준(2014), Japanese Association for Preventing Marine Accidents(1985), USACE(2003) 등과 같은 국내의 설계기준 그리고 IMO, PIANC 등과 같은 국제기구의 지침을 반영하고 있으며 선박 통행량에 근거하여 소요폭을 확률론적으로 제안하고 있어 선박의 대형화 및 통행량 증가분을 고려하여 주경간장을 평가할 수 있다.

최근까지의 인천대교의 소요폭 산정결과는 Table 1과 같으며, 소요 가항폭과 인천대교의 순경간장(≒775 m)과 비교하여 주경간장의 적정성을 평가할 수 있다. 여기서, LOA는 선박 전체 길이이며 항로폭은 선박운항에 필요한 절대적인 소요폭, 가항폭은 항로폭에 여유치가 포함된 소요폭을 의미한다.

인천대교는 2012년까지는 소요 가항폭이 확보 되었으나 2013년부터는 소요 가항폭이 확보되지 않는 것으로 조사되었다. 그러나 설계 당시로부터 10년 이후이며, 소요폭의 초과치가 산술적으로는 3% 이내, 해당논문(Bae, 2016)에서 제시된

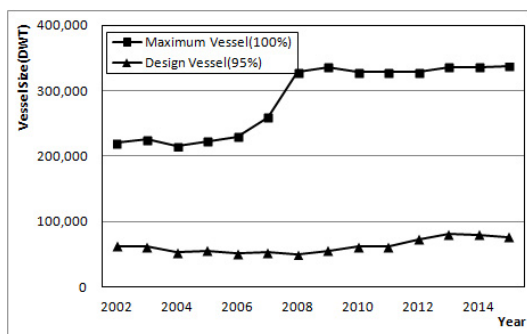


Fig. 1 Trends of maximum and design vessels

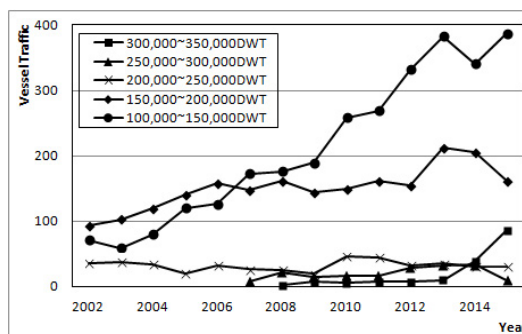


Fig. 2 Traffic trends of large vessels

Table 1 Net Span Length Review of Incheon Bridge

Review Items		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Maximum vessel (100%)	DWT	220,194	225,247	215,091	223,055	229,428	259,500	327,844	336,378	327,844	327,844	327,844	336,378	336,378	337,332
	LOA(m)	303.6	305.6	301.5	304.7	307.2	318.3	340.5	343.0	340.5	340.5	340.5	343.0	343.0	343.3
Design Vessel (95%)	DWT	62,059	61,014	52,147	55,507	51,107	52,534	48,638	55,014	60,820	61,566	73,018	80,896	79,618	76,382
	LOA(m)	210.8	209.8	200.5	204.1	199.3	200.9	196.5	203.6	209.6	210.3	220.9	227.5	226.5	223.8
One-way traffic	fairway width(m)	303.6	305.6	301.5	304.7	307.2	318.3	340.5	343.0	340.5	340.5	340.5	343.0	343.0	343.3
	navigable width(m)	607.2	611.2	603.0	609.4	614.4	636.6	681.0	686.0	681.0	681.0	681.0	686.0	686.0	686.6
Two-way traffic	fairway width(m)	527.0	524.5	501.3	510.3	498.3	502.3	491.3	509.0	524.0	525.8	552.3	568.8	566.3	559.5
	navigable width(m)	737.8	734.3	701.8	714.4	697.6	703.2	687.8	712.6	733.6	736.1	773.2	796.3	792.8	783.3
Recommended width	fairway width(m)	527.0	524.5	501.3	510.3	498.3	502.3	491.3	509.0	524.0	525.8	552.3	568.8	566.3	559.5
	navigable width(m)	737.8	734.3	701.8	714.4	697.6	703.2	687.8	712.6	733.6	736.1	773.2	796.3	792.8	783.3

목표확률의 98.5% 수준이므로 유지관리 단계에서는 대체로 만족할 만한 수준으로 판단되며 설계당시 관계기관과의 협의 및 의견수렴 등이 주효했음을 보여주고 있다. 그러나 2022년 이후까지는 대상선박 및 통행량이 증가세에 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하며, 경우에 따라서는 선박운항 모의실험의 필요 여부를 판단해야 한다.

2.3 형하고 검토

일반적으로 형하고는 최대 규모 선박의 경하상태에서의 마스트 높이로부터 결정되며 선박의 트림 및 파고에 의한 동요량, 교량의 처짐, 조선자의 심리적 영향 등을 고려하여 결정해야 한다. 특히, 선박의 마스트 높이는 변동성이 크고 다양하므로 반드시 선종별 최대선박을 각각 조사해야 하며, 선박의 대형화를 고려하여 출현 가능한 선박의 범주를 결정해야 한다.

Harbour Approach Channels Design Guidelines(PIANC, 2014)에서는 최신의 대형선박들에 대한 주요 제원을 제공하고 있으며, 상부 구조물이 있는 경우 수로의 종류에 따른 Air Draught Clearance를 규정하고 있다. 기준에서는 만재상태에서의 선박 높이와 흘수 그리고 흘수계수를 제공하고 이로부터 수면 위 선박높이를 산정하도록 하고 있다. 여기서, 흘수계수는 0.5~0.8로 제시되어 있으나 Bae(2016)는 AASHTO GUIDE(2009)의 선박제원으로부터 일반화물선, 유조선, 컨테이너선의 흘수계수를 0.5로 한정하였다. 선박의 동요량은 크게 파랑에 의한 영향과 트림으로 분류할 수 있으며, 트림은 정적상태에서 높이차에 의한 정적트림과 운항시 무게중심의 변경으로 인해 발생하는 동적트림으로 구분할 수 있다. Naval Facilities Engineering

Command Design Manual(1981)에서는 파랑에 의한 선박의 일반적인 상하 운동을 파고의 약 1/2 정도로 보고 있다. 그리고 선박의 정적 흘수와 관련하여 선박의 경사는 3°이며 정적 트림은 선박 길이를 기준으로 100피트(30.48 m)당 4인치(0.1016 m)를 고려하도록 하고 있다. 선박의 동적 트림은 선박의 운동과 무게중심의 변화에 따른 Trimming 모멘트를 산정하여 선박의 무게중심과 수선간 길이의 관계에 따른 흘수의 변화를 산정할 수 있다. 일반적으로 트림은 선박 수선간 길이의 1% 이내가 되도록 설계되는 것으로 알려져 있다. 구조물의 처짐량은 경간장에 따른 최대 허용변위를 적용하거나 사용하중 혹은 사용하중상태에서 최대 발생변위를 적용하는 것이 바람직하다. 그러나 지역적인 여건상 형하고를 확보하기 어렵거나 현수교와 같이 처짐량이 상당히 큰 경우에는 별도의 하중조합을 적용하여 현실적으로 발생 가능한 변위를 산정할 수 있다. 최대변위를 적용하지 않는 경우에는 처짐량에 대한 지속적인 모니터링이 필요하며 특히, 선박 통과시에는 각별한 주의가 요구된다. 조선자의 심리적 영향을 고려한 여유폭은 PIANC(2014), 항만및어항설계기준(2014) 등을 참조하면 2.0 m로 적용하는 것이 적절한 수준으로 판단된다.

인천대교 건설공사 프로젝트에서 통항 안정성과 관련된 사항은 Japan Marine Science Inc.에서 수행되었으며 인천대교 사업시행자보충요건(CSR, 2004)에 수록되어 있다. 보고서에서 계획형하고는 약최고고조위 기준으로 69.365 m로 결정되었으며 소요 형하고 산정을 위한 대상선박과 마스트높이는 Table 2와 같다. 보고서에서는 선박의 트림이나 파랑에 의한 영향을 고려한 여유공간을 2.0m로 적용하면 선박의 거의

99%를 수용할 수 있다고 보고하고 있다. Table 2에서 ()는 계획 형하고에서 해당 선박의 마스트높이를 뺀 여유치를 나타낸 것으로 해당 값이 2.0이상이면 조건을 충족한다. 형하고의 중간점검을 위하여 최근까지 운항중인 최대선박을 조사한 결과, LNG 선박과 유조선은 160,000GT급 정도이며, 화물선은 300,000DWT급, 컨테이너선은 150,000GT급, 크루즈선은 13만GT급 정도가 운행되고 있다. 여기서, LNG 선박은 Q-max size로 Air Draft가 34.7 m로 낮은 편이라 교량 통과에 문제없으며, 크루즈선은 2020년까지 15만GT급 국제여객/크루즈 부두가 개발될 예정이므로 해당선박에 대한 검토가 필요하다. Cargo Ship과 Oil Tanker는 Harbour Approach Channels Design Guidelines(PIANC, 2014)상의 제원을 적용하였으며, 컨테이너선과 크루즈선은 유사톤급인 Elly Maersk와 Queen Mary

II의 Wikipedia 상에 등록된 제원을 적용하였다. 파고의 영향은 선박 운항조건을 고려하여 시공중 조건과 동일하게 재현 주기 10년 빈도의 유의파고를 적용하였으며, 교량의 처짐은 사장교의 최대 허용처짐량(L/400)을 적용하였다. 이로부터 산정된 형하고는 Table 3과 같다. 인천대교 형하고 검토결과에 따르면, Cargo Ship과 Oil Tanker는 약최고조위(A.H.H.W.)에서도 운항이 가능하므로 특별한 제한 사항이 없으나 Container Ship과 Passenger Ship은 평균해수면(M.S.L) 상에서만 통과가 가능하므로 지속적인 운항관제 및 모니터링이 필요한 것으로 조사되었다. 특히, 크루즈선은 톤급별 선박높이에 대한 편차가 큰 편이므로 선박제원에 대한 정규 데이터를 입수하여 통과조건을 사전에 확인해야 한다.

Table 2 Air Draft Clearance Review of Incheon Bridge(CSR, 2004)

Covered Range	Tanker 120,000 DWT	General cargo 50,000 DWT	Bulk Carrier 100,00 DWT	Container 70,000 GT	Passenger 142,200 GT
Average Value	48.81 (20.555)	41.22 (28.145)	43.03 (26.335)	51.60 (17.765)	64.42 (4.945)
90.0% Range	55.38 (13.985)	46.54 (22.825)	48.40 (20.965)	58.23 (11.135)	66.20 (3.165)
99.0% Range	61.39 (7.975)	52.00 (17.365)	53.27 (16.095)	64.26 (5.105)	67.68 (1.685)
99.9% Range	66.26 (3.105)	56.46 (12.905)	57.20 (12.165)	69.14 (0.225)	68.81 (0.555)
Maximum Value	68.23 (1.135)	50.91 (18.455)	67.94 (1.425)	58.20 (11.165)	65.80 (5.145)

Table 3 Air Draft Clearance Review of Incheon Bridge as Interim Assesment

Review Items	Cargo Ship 300,000 DWT	Container Ship 150,000 GT	Oil Tanker 300,000 DWT	Passenger Ship 150,000 GT
Total Height	63.1	-	69.6	72.0
Mast Draft	23.7	-	24.0	10.1
Height (m)	Draft Factor 0.5	-	0.5	0.5
	Height above Sea level 51.25	66.0	57.6	66.95
Trim of vessel(m)	1.29	1.30	1.11	1.13
Wave Effect(m)	0.93	0.93	0.93	0.93
Margin(m)	2.0	2.0	2.0	2.0
Deflection of Bridge(m)	2.0	2.0	2.0	2.0
Air Draft(m)	57.47	72.23	63.64	73.01
Sea Level for Passage	AHHW	MSL	AHHW	MSL

2.4 충돌위험도

위험이란 원하지 않는 사고결과와 잠재적인 실현으로 정의될 수 있으며, 사고의 발생 확률과 결과의 크기를 포함한다(Larsen, 1993). AASHTO GUIDE(2009)에서는 충돌위험도 평가를 위하여 Method I, II, III의 세 가지 방법을 제공하고 있으며 특히, Method II는 선박의 연간통행량, 항로이탈확률, 기하학적확률, 파괴확률, 방호계수에 의해 연간파괴빈도(AF)를 산정하여 교량의 중요도에 따른 허용기준 이내가 되도록 설계선박을 산정하는 방법이다. 기준에서 AF의 허용기준은 Critical/ Essential 교량에서 0.0001, Typical 교량에서 0.001 이하가 되도록 규정하고 있다. 교량의 AF는 식(1)과 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

PA : 항로이탈확률(Probability of aberrancy)

PG : 기하학적 확률(Geometric probability)

PC : 파괴확률(Probability of collapse)

PF : 방호 계수(Protection factor)

설계 단계에서는 산정된 AF가 허용기준을 넘지 않는지 확인해야 하며, PC에서 교량의 수평강도를 미지수로 하고 시행착오법에 의한 설계수평강도를 산정하여 이를 충격력으로 가정하면 식(2)의 관계로부터 설계선박을 추정할 수 있다.

$$P_s=1.2 \times 10^5 \sqrt{DWT} \quad (2)$$

여기서, P_s : 선박의 충격력

DWT : 선박의 적재중량톤수

Table 4 Collision Risk Assessment Trends of Incheon Bridge

Review Items	Bridge Plan	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Horizontal Strength (MN)	195.2	193.8 (0.99)*	197.2 (1.01)*	198.9 (1.02)*	198.5 (1.02)*	205.6 (1.05)*	203.9 (1.04)*	211.60 (1.08)*	209.0 (1.07)*	215.30 (1.10)*	216.5 (1.11)*	217.4 (1.11)*	221.0 (1.13)*	228.5 (1.17)*	244.4 (1.25)*
Design Vessel (DWT)	100,000	98,553 (0.99)*	102,041 (1.02)*	103,808 (1.04)*	103,391 (1.03)*	110,919 (1.11)*	109,093 (1.09)*	117,488 (1.17)*	114,618 (1.15)*	121,632 (1.22)*	122,992 (1.23)*	124,017 (1.24)*	128,158 (1.28)*	137,004 (1.37)*	157,000 (1.57)*

(*) The Ratio of Review Result to Bridge Plan

Fig. 2의 통행량 추이는 설계당시인 2002년 이후부터 현재 까지 인천항을 이용하는 선박의 실제 입출항 기록에 Drewry Shipping Consultants Ltd.(1996)의 선종 및 선형에 따른 GT-DWT 간 전환계수를 적용하고 이를 AASHTO Guide(2009)에서 제시된 톤급 분류방법을 적용하여 통계 처리된 통행량을 나타낸 것이다. 해당 통행량을 적용하여 AASHTO Guide(2009) Method II에 근거한 주탑의 충돌위험도 평가를 수행한 결과는 Table 4와 같다. 평가결과에 따르면, 선박충돌 설계당시인 2002년에는 설계선박이 100,000DWT 이하로 계획된 설계조건에 만족하였으나 2003년부터는 계획된 설계선박을 초과하기 시작하여 2006년부터는 설계선박이 10% 이상 초과하였다. 이는 선박충돌에 따른 연간파괴빈도가 허용기준을 초과하는 것을 의미한다. 이러한 초과분에 대하여 Bac(2016)는 충돌위험도 평가 요소의 민감도 분석을 통해 유지관리 단계에서는 5~10% 미만으로 초과하는 것은 수용 가능한 것으로 적용해도 무리가 없다고 보고하였다. 인천대교의 경우에는 2015년 기준으로 57%까지 초과하고 있으므로 구조물의 건전성을 확보하기 위한 별도의 유지관리 방안이 필요할 것으로 판단된다.

3. 해결방안

3.1 근시적 해결방안

연간파괴빈도를 허용기준에 부합하도록 하기 위해서는 먼저 위험도평가 항목을 상세 검토하여 유지관리적인 측면에서 충돌위험을 감소시킬 수 있는지 판단해야 하며, 불가피한 경우에는 충돌방호공의 성능을 증가시켜야 한다.

3.1.1 충돌 위험도 상세 검토

위험도평가는 대상교량의 선박충돌에 대한 연간파괴빈도를 산정하여 허용기준을 만족하는 수평강도를 산정하고 이에 상응하는 대상선박을 선정하여 설계 및 상세해석을 수행하게 된다. 일반적인 설계 단계에서 연간파괴빈도의 산정은 AASHTO

GUIDE(2009)의 절차에 따르더라도 특별한 문제는 없으나 일부 요소는 지역적인 특성이 강하고, 내륙수로의 데이터가 다수 포함되어 있으며 오래된 데이터에 의존하고 있다는 한계가 있다. 따라서 유지관리 단계에서는 지역적인 특성이 반영된 다양한 데이터의 수집 및 분석을 통한 연간파괴빈도의 산정이 필요하다.

항로이탈확률은 설계 당시의 자료와 공용기간동안 축적된 자료를 추가로 수집·분석하여 해당 수역 또는 항로의 지역적 특성이 반영된 항로이탈확률을 산정하여 적용할 수 있다. 그러나 AASHTO GUIDE(2009)에서 제시하는 항로이탈확률은 다른 기준이나 설계사례에 비하여 비교적 낮은 편이므로 신중한 접근이 필요하다. 기하학적확률은 AASHTO GUIDE(2009)에서 왕복항로를 기준으로 입항 또는 출항 항로의 중심을 평균으로 하고 사고선박 데이터에 근거하여 해당선박 길이를 표준편차로 하고 있다. 그러나 선박의 운항은 도로처럼 차선으로 분류되어 있는 것이 아니기 때문에 해당수역에 대한 항적 자료의 수집·분석 그리고 공용기간 동안 해당 수역의 사고 사례 혹은 최신의 해상교량 사례로부터 지역적인 특성이 반영된 기하학적확률의 적용이 가능하다. 파괴확률에서 설계속도는 충돌에너지와 자승에 비례하는 관계에 있으므로 민감도가 큰 것은 자명한 일이다. 그러나 선박의 운항에 영향을 미치는 요소는 선종이나 도선사의 경험 및 지역적인 특성이 매우 강하므로 일괄적으로 결정될 수 있는 사항이 아니며, 조종성능은 이론적인 계산 결과와도 많은 차이가 있으므로 신중하게 결정되어야 한다(Yoon and Yun, 2007). 그리고 지역 항만 관리청에서 고시된 통항규칙이나 경험적인 적정 운항속도, 교량통과구간의 속도 분포 등을 적절히 판단하여 적용해야 한다. 분배모델은 교량의 중요도나 교체비용을 고려하여 산정할 수 있으나 현수교나 사장교와 같은 직렬시스템에서는 중요도와 교체비용의 분배율 차이가 비교적 큰 것으로 조사되었다. 따라서 분배모델은 사고 이력이나 항적 분포, 실제 선박의 운항속도 분포 등을 면밀히 검토하여 적용할 필요가 있다.

3.1.2 방호공 성능 개선

운항속도의 제한이나 위험도 평가 요소의 재평가를 통한 유지관리 방안이 없다면 충돌방호공의 성능개선 방안을 마련해야 하며, 충돌조건에 따른 부재의 구성과 거동특성 뿐만 아니라 경제성 및 시공성과 같은 문제도 함께 고려해야 한다.

펜더는 고성능의 펜더로 교체하거나 혹은 기존 펜더의 성능에 문제가 없고 추가적인 펜더베이스의 확보가 가능하다면 펜더를 추가 시공함으로써 성능개선이 가능하다. 그러나 기존의 펜더 설계는 에너지 흡수성능에 따른 작용반력이 구조물에 재하되는 방식이므로 반드시 이를 고려한 해석적인 검토까지 병행되어야 할 것으로 판단된다. 파일지지시스템은 개별파일인 경우에는 상부 거더를 추가하여 일부 또는 전체를 파일그룹으로 구성해야 하며, 파일 그룹인 경우에는 성능개선에 필요한 파일의 제원과 개수를 결정하여 기존 구조물에 최대한 근접하여 시공하고 일체로 거동할 수 있도록 상부 거더로 연결시켜주어야 한다. 돌핀의 보강은 충돌방향으로 연속된 2개의 원형셀을 구성하거나 돌핀의 직경을 확대하는 방법 등이 필요하다. 시트파일과 채움재 등이 추가로 시공되어야 하므로 성능개선에 필요한 단면과 형식을 합리적으로 결정해야 한다. 인공섬은 토사 및 사석, 피복석 등이 신규로 시공되어야 하므로 보강에 따른 비용이 큰 편이다. 따라서 변경된 충돌조건에 대한 방호공 및 교량 본구조물의 안전성 평가를 재수행해야 하며 보강방법은 경제성 및 시공성을 고려하여 신중하게 결정되어야 한다. 부유식 구조물에서 부이는 보강이 현실적으로 어렵기 때문에 변경된 충돌조건에 대한 부이의 용량과 설계수준을 신중히 검토해야 하며 필요한 경우에는 이를 교체해야 한다. 체인과 앵커는 신규로 추가 시공하여 변경된 충돌조건에 대한 성능 개선이 가능하다.

Table 5 Collision Risk Assessment at 7knots($H_p=172.3MN$)

DWT	N	PA($\times 10^{-4}$)	PG	PC	AF($\times 10^{-4}$)
323,754	87	1.6896	0.07398	0.02638	0.28689
259,597	9	1.6896	0.07277	0.01583	0.01752
213,798	31	1.6896	0.07158	0.00542	0.02031
175,473	161	1.6896	0.07012	0.00000	0.00000

$$\sum AF \leq 0.325 \times 10^{-4}$$

Table 6 Collision Risk Assessment at 8knots($H_p=196.4MN$)

DWT	N	PA($\times 10^{-4}$)	PG	PC	AF($\times 10^{-4}$)
323,754	87	1.6896	0.07398	0.02637	0.28676
259,597	9	1.6896	0.07277	0.01579	0.01748
213,798	31	1.6896	0.07158	0.00535	0.02006
175,473	161	1.6896	0.07012	0.00000	0.00000

$$\sum AF \leq 0.325 \times 10^{-4}$$

3.1.3 인천대교의 근시적 해결방안

인천항 선박통항규칙 개정고시안(2010, 이하 인천항선박통항규칙)에서는 영종대교와 인천대교를 포함하는 구역의 최대속도를 12노트 이하로 규정하고 있으나, 교량 부근에서는 총톤수 5만톤 이상의 선박은 10노트 이하, 10만톤 이상의 선박은 7노트 이하로 제한하고 있으므로 해당조건을 적용한 충돌위험도 및 방호공의 성능 평가가 필요하다. 2015년 실제통행량에 대하여 선박운항 속도를 7노트로 적용한 연간파괴빈도 산정결과는 Table 5와 같다. 여기서, 연간파괴빈도의 허용기준을 만족하는 수평강도는 172.3MN이며, 설계선박은 78,000DWT로 산정되었다. 이는 인천대교 실시설계 설계선박에 비하여 22% 정도의 여유가 있으므로 유지관리 단계에서 인천대교의 선박충돌 문제는 운항속도의 제한을 통하여 충돌위험을 감소시키는 방법이 적용되고 있다고 판단할 수 있다. 그러나 설계 당시의 운항속도에 비하여 제한 폭이 30%로 비교적 큰 폭이며, 운항속도는 선박의 조종성능을 비롯한 경험 및 지역적인 특성이 강하므로 보다 합리적인 접근이 필요할 것으로 판단된다.

Great Belt Bridge Project에서 Pedersen은 선박의 운항속도로 항내속도와 사용속도를 각각 6~8노트, 10~15노트로 정의하였으며, 교량을 통과하는 선박의 운항속도를 10노트로 하여 선박충돌 설계에 적용하였다. 국내에서는 지방해양항만청의 고시로 특정 구간에 대한 제한속도를 규정하고 있는데, 주요 항만의 일반적인 운항제한 최대속도는 8~12노트 범위에서 각각 결정되었으나 일부는 최소 속도를 6노트 이상으로 규정하고 있었다. Yoon and Yun(2007)은 선속을 무리하게 제한하는 규정이 있으면 선박의 조종성이 나빠지므로 합리적인 속도범위를 결정해야 하며 통상적인 선박 속도의 제한은 8~9노트 이하로 하는 것이 현실적이라고 보고하고 있다. 이러한 설계사례와 지침, 연구결과를 종합해보면 유지관리 단계에서 충돌위험을 감소시키기 위하여 운항속도를 제한하더라도 불가피한 사유가 아니라면 최소한 8노트 이상을 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

상기의 검토결과에 따라 인천대교의 2015년 실제통행량에 대하여 설계속도를 8노트로 적용한 연간파괴빈도 산정결과는 Table 6과 같다. 여기서, 연간파괴빈도의 허용기준을 만족하는 수평강도는 196.4MN이며, 설계선박은 10,100DWT로 산정되었다. 이는 인천대교 실시설계 설계선박과 거의 유사하여 유지관리 측면에서는 만족할 만한 수준이므로 운항속도의 제한치를 8노트까지 상향 조정하더라도 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 통행량은 2020년 이후까지 증가세가 유지될 것이므로 지속적인 모니터링에 의한 정기적 중간점검이 필수적이다. 또한, 운항속도의 제한치에 대해서는 관련기관과 항해사 및 도선사의 다양한 의견수렴이 필요하며, 대형선

박의 통행량이 지속적인 증가세를 유지한다면 대표적인 선박의 종류와 운항상황을 가정하여 선박운항 모의실험을 통한 적절한 운항속도의 제한치를 확인할 필요가 있다.

3.2 근본적 해결방안

선박의 대형화 및 통행량 증가에 따른 선박충돌 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 대상선박 및 통행량에 대한 합리적인 예측방법이 필요하다. 그러나 이러한 사례나 연구는 많이 부족하며 지역적인 특성이 강한 편이므로 이와 관련된 지속적인 연구가 필요하다.

3.2.1 관련연구 및 설계사례

Ship Collision with Bridge(1993)에서는 선박충돌과 관련하여 교량의 계획과 설계에 대한 다양한 내용을 포함하고 있다. 통행량 예측에 대해서는 선박 교통량의 증가를 교량의 내구년수에 걸쳐 예측해야 하지만 이러한 예측은 한계가 있으므로 특정한 년수, 예를 들면 10~20년을 선택하여 해당 기간 동안의 교통량을 예측하고 교량설계에 사용할 수 있으며 해상교통량 예측을 위해 다음과 같은 사항을 고려할 수 있다고 기술하고 있다.

- 국제시장 및 국내시장의 추이
- 교통량에 영향을 미치는 지역 환경
- 수송설비의 기술발전
- 조선기술의 발달

그러나 보고서에서는 가용한 사항을 고려하더라도 실제적인 해운환경의 발전은 예측과는 매우 달랐음을 지적하고 있으며, 이상적인 방법은 예측의 범위가 경제발전과 기술발전이 서로 다른 별개의 가능한 경향으로 허용되도록 고려해야 한다고 기술하고 있다.

항만공단 해상교량 건설시 기준 및 절차 수립에 관한 연구용역(2007)에서는 해상 교통량의 예측에 대한 별도의 언급은 없었으나 대상선박 선정시 해상교량이 무역항의 입구나 무역항을 이용하기 위해서 통항하는 경우 또는 해상교량 통과 후에 주요 항만시설이 존재할 경우에는 향후 10년 이후에 출현 가능한 선박을, 연안항인 경우에는 향후 5년 이후에 출현 가능한 선박을 대상으로 설정하도록 제시하고 있다. 그리고 항만기본계획을 기초로 한국조선공업협회 등의 최근 대형 선박의 건조 추세, 전문가의 의견 수렴 등을 참조하도록 기술하고 있다.

선박충돌 문제가 비교적 합리적으로 고려된 국내의 대표적인 해상교량 프로젝트로는 인천대교, 이순신대교, 목포대교 등이 있다. 그러나 상기 프로젝트에서도 통행량 예측 결과는

실제와 상당한 격차가 있었다. 대부분의 설계사례에서 메트릭 톤급이 적용되지 않았으며, 대형선박의 톤급분류가 적절하지 않았다. 특히, 혼잡도 분석 혹은 물동량 예측을 위한 통행량 예측방법이 적용되어 전체적인 선박의 연간 운항횟수나 평균적인 톤수의 증가는 유사한데 비하여 선박의 대형화 및 대형선박의 증가분은 합리적으로 고려되지 않았다.

3.2.2 예측 절차 및 방법

선박의 대형화 및 대형선박의 증가분을 합리적으로 고려하기 위해서는 계획 및 설계 단계에서 통행량 예측시 Fig. 3의 절차에 따라야 한다.

해상 교통 통행량은 각지역 해양수산청의 Port-MIS 시스템에서 가용한 정보를 얻을 수 있다. 해당 시스템에서는 톤급별 연간 통행량을 제공하고 있으나 톤급 분류가 GT로 되어 있고 100,000GT이상의 톤급을 분류하고 있지 않으므로 반드시 입출항 원시데이터에 대한 별도의 통계처리를 수행해야 한다. 톤급 분류 시에는 메트릭 톤급을 적용해야 하는데, 이는 선박충돌하중이 선박의 질량과 관계되기 때문이다. GT(Gross Tonnage)는 중세 영국의 해상운송 무역에서 세금을 부과하기 위해 생겨난 것으로 100 ft³을 1톤으로 적용하고 있으므로 선박의 질량과 관계가 없다. Port-MIS 시스템에서는 기본적인 선박톤급으로 GT를 적용하고 있으므로 이에 대한 변환이 필요하며, 전체선박을 일일이 조사하기는 어려우므로 통계적인 방법으로 제시된 GT와 DWT의 전환계수를 적용하는 것이 권

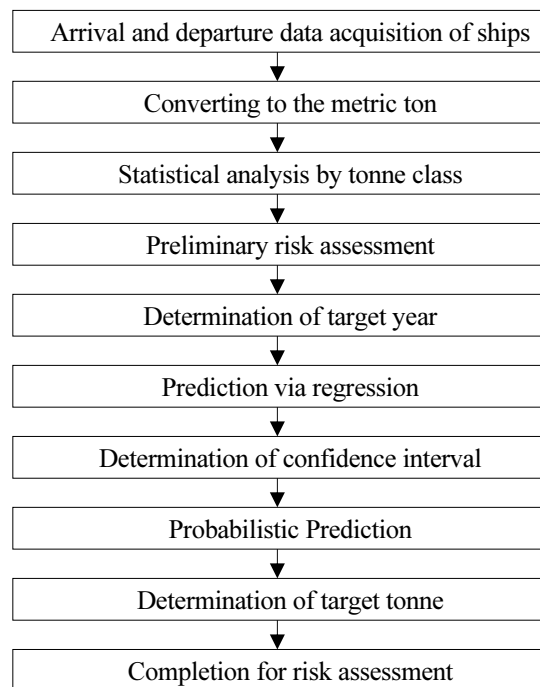


Fig. 3 Procedure for traffic

장된다. 선박의 등급분류는 AASHTO GUIDE(2009)에 따라 10만톤 이하의 선박은 2만톤 단위로, 10만톤 이상의 선박은 5만톤 단위로 분류해야 한다.

상기의 제시된 방법에 따라 적절한 통행량 데이터가 확보되면 설계시점을 기준으로 사전 위험도평가를 통해 예측이 필요한 대상등급을 선별해야 한다. 일반적인 선박의 통행량은 부분적으로 감소될 수는 있으나 장기적으로는 증가되는 추세를 가진다. 따라서 설계 당시의 통행량으로 연간과피빈도를 수행하여 영향이 없는 중소형 등급은 통행량 예측에서 제외시키고 영향이 있는 대형 등급을 선택하여 적절한 예측이 수행되도록 집중하는 것이 합리적인 판단이다.

예측대상은 통행량뿐만 아니라 주경간장이나 형하고와 관련된 대상선박까지 예측해야 하므로 예측 항목에 따라 목표 연도가 달라질 수 있다. 또한, 각각의 항목에 대하여 예측 방법이나 적용이론에 따라서도 달라질 수 있으므로 신중하게 결정되어야 한다.

대상선박 및 통행량의 예측은 대부분의 사례에서 회귀분석에 기초하고 있었다. 회귀분석의 적용은 문제가 없으나 기본적으로 평균으로의 회귀를 의미하므로 신뢰구간을 결정하여 확률론적으로 접근해야만 설계단계에서 통행량의 예측치와 실제값 사이의 변동성을 수용할 수 있다.

등급별 대상톤수는 사전 위험도평가나 유지관리 단계에서의 위험도평가와 같이 선박의 대형화를 고려하지 않는 경우에는 등급별 평균톤수를 각각 산정하여 적용해야 한다. 그러나 설계 단계에서는 선박의 대형화를 고려해야 하므로 대상톤수를 적절히 상향조치 하여야 하며, 상향 폭은 이를 적용할 대상 등급의 범위나 통행량 예측방법에 따라 달라질 수 있다.

대상선박 및 통행량 예측을 위한 예측기법과 신뢰구간 그리고 선박의 대형화를 고려한 대상 톤수의 선정과 관련된 문제는 설계사례나 연구결과가 많이 부족한 편이므로 다양한 방법론적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 인천대교를 대상으로 하여 선박충돌 문제에 대한 중간점검을 수행하고 직면한 문제에 대한 해결방안을 제시하였다.

관련계획 검토 결과 인천대교의 통행량은 2020년 이후까지는 증가세에 있을 것으로 판단된다. 주경간장은 2013년부터 소요폭이 주경간장을 넘어서고 있으나 초과치가 적은 편이기 때문에 지속적인 모니터링과 유지관리가 수행된다는 조건 하에서는 대체로 만족한다고 판단할 수 있다. 형하고는 일부 대형선박들이 조수간만의 차이에 따라 통과조건을 부분적

으로 만족하고 있으므로 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 충돌위험도는 연간과피빈도가 허용기준을 만족하는 설계선박이 57% 초과하고 있으므로 이에 대한 해결방안을 마련해야 한다.

선박의 대형화 및 통행량 증가에 따른 연간과피빈도의 초과치에 대하여 근시적인 해결방안으로 설계사례와 지침, 연구결과 등을 검토하여 최적화된 운항속도를 8노트로 제시하였으며, 근본적인 해결방안으로는 설계 단계에서 대상선박 및 통행량의 합리적인 예측을 위한 기본절차를 수립하였으며 예측의 불확실성을 수용하기 위하여 통행량의 회귀분석을 통한 확률론적 예측과 선박의 대형화를 고려한 대상톤수의 선정을 제안하였다.

향후 지역적인 여건을 고려한 운항속도의 제한치에 대하여 다양한 의견수렴 및 합리적인 결정과정이 필요하며, 통행량의 예측값과 실제값의 격차를 줄일 수 있는 다양한 방법론적인 연구도 필요할 것으로 판단된다. 특히, 공용중인 다른 해상교량에 대해서는 선박충돌에 대한 즉각적인 중간점검을 수행하여 필요한 유지관리 방안을 마련해야 한다.

References

Lee, S. L., and Bae, Y. G. (2006), Ship Collision Risk Assessment for Bridges, *KSCE Journal of Civil Engineering, Korean Society of Civil Engineers*, 26(1A), 1-9.

Lee, G. H., and Hong, G. Y. (2011), A Study for the Evaluation of Ship Collision Forces for the Design of Bridge Pier, *KSCE Journal of Civil Engineering, Korean Society of Civil Engineers*, 31(3A), 199-206.

Korean Highway Bridge Design Code (LRFD) for Cable Supported Bridges. (2015), KIBSE and KBRC.

The 3rd National Trade Port Master Plan Report (2011), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

Bae, Y. G. (2016), Plan, Design and Maintenance of the Sea-Crossing Bridge Considering the Ship Collision Problem, Ph.D. Dissertation, Mokpo National University.

PIANC (2014), Harbour Approach Channels Design Guidelines.

AASHTO (2009), Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, 2nd Edition.

NAVFAC (1981), Naval Facilities Engineering Command Design Manual.

Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities (2014), Ministry of Oceans and Fisheries.

Incheon Bridge Concessionaire Supplementary Requirement (2004), KODA.

Shipping Statistics Handbook (1996), Korea Maritime Institute.

Guideline for Incheon Port Vessel Traffic regulation (2010), Incheon Regional Office of Oceans and Fisheries.

Yoon, B. W., and Yun, J. D. (2007), A Study on Avoiding Collision between a Ship and Bridge and Minimizing Damages if Unavoidable,

Proceedings of KINPR Annual Fall Conference, Korea Institute of Navigation and Port Research, 31(2), 376-382.
Larsen, O. D. (1993), Ship Collision with Bridge, IABSE.
Research services relating to standards and establishing procedures when Maritime Bridge Construction across the Harbor (2007), Ministry of Oceans and Fisheries.
The White Paper of Incheon Free Economic Zone (2005), Incheon Metropolitan City.
Japanese Association for Preventing Marine Accidents (1985), Illustrated

on Marine Safety Law, Tokyo.
USACE (2006), Hydraulic Design of Deep-draft Navigation Project. Engineer Manual 1110-2-1613, Washington DC.

Received : 07/26/2016

Revised : 09/07/2016

Accepted : 09/27/2016

요 지 : 해상교량의 선박충돌 문제는 기본적으로 선박의 충격력에 의한 부가 하중의 빈도를 추정하는 것이므로 특정한 수용 기준을 만족하도록 설계하는 것도 중요하지만 공용기간동안 이러한 충돌 위험의 증가분을 어떻게 유지관리 해야 하는지도 매우 중요하다. 본 논문에서는 인천대교를 대상으로 선박충돌 문제에 대한 중간점검을 위하여 관련 계획, 주경간장, 형하고 및 충돌 위험도를 검토하였다. 특히, 충돌 위험의 증가분에 대하여 근시적인 해결방안으로 관련 연구결과 및 운항관련 지침 등을 검토하여 최적화된 운항 속도를 8노트로 제시하였으며, 근본적인 해결방안으로 설계 단계에서 대상선박 및 통행량의 합리적인 예측을 위한 기본 절차를 수립하고 예측의 불확실성을 수용할 수 있는 확률론적 예측 기법을 제안하였다. 향후 선박충돌 관련 유지관리에 대한 추가적인 연구와 공용중인 다른 해상교량의 즉각적인 중간점검이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 선박충돌, 유지관리, 중간점검, 운항속도, 예측기법
