

# 충돌위험분배모델을 이용한 해상교량의 설계선박 선정

Design Vessel Selection of Maritime Bridges using Collision Risk Allocation Model

이 성 로\*      이 병 화\*\*      배 용 귀\*\*      신 호 상\*\*\*  
Lee, Seong-Lo    Lee, Byung Hwa    Bae, Yong-Gwi    Shin, Ho-Sang

## Abstract

In this study ship collision risk analysis is performed to determine the design vessel for collision impact analysis of the maritime bridge. Method II which is a probability based analysis procedure is used to select the design vessel for collision impact from the risk analysis results. The analysis procedure, an iterative process in which a computed annual frequency of collapse(AF) is compared to the acceptance criterion, includes allocation method of acceptance criterion of annual frequency of bridge component collapse. The AF allocation by weights seems to be more reasonable than the pylon concentration allocation method because this AF allocation takes the design parameter characteristics quantitatively into consideration although the pylon concentration allocation method brings more economical results when the overestimated design collision strength of piers compared to the strength of pylon is moderately modified. From the assessment of ship collision risk for each bridge pier exposed to ship collision, a representative design vessel for all bridge components is selected. The design vessel size varies much from each other in the same bridge structure depending upon the vessel traffic characteristics.

## 요 지

본 연구에서는 해상교량의 선박충돌 해석을 위한 설계선박을 결정하기 위한 선박충돌 위험도 분석을 수행하였다. 확률기반 해석과정을 포함하는 Method II를 이용하여 선박충돌 위험도 해석결과로부터 선박충돌에 대한 설계선박을 선정하였다. 계산연간과피빈도와 허용기준을 반복 비교하는 해석과정에서는 연간과피빈도 허용기준의 분배방법이 포함된다. 주탑집중 분배방법이 주탑에 비해 과대평가되는 교각의 설계 수평내하력을 적절히 수정할 경우에는 보다 경제적인 결과를 가져오지만, 교량부재의 중요도를 고려한 가중치에 의한 분배방법이 설계인자의 특성들을 정량적으로 고려하기 때문에 보다 합리적인 것으로 보인다. 선박충돌에 노출된 교각 각각에 대한 선박충돌위험도 평가로부터 교량의 대표 설계선박이 선정되었다. 설계선박은 같은 교량에서도 선박통행량 특성에 따라 많은 차이가 있다.

**Keywords :** Ship Collision, Annual Frequency of Collapse, Acceptance Criterion, Design Vessel

**핵심 용어 :** 선박충돌, 연간과피빈도, 허용기준, 설계 선박

\* 정회원, 목포대학교 건설공학부 교수

\*\* 학생회원, 목포대학교 대학원

\*\*\* 정회원, 다진에이스 연구소장

E-mail : sllee@mokpo.ac.kr 061-450-2470

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

도로교 설계기준(2003)에서는 충돌하중에 관하여 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하여야 한다고 명시되어 있다. 또한, 교량의 선박충돌 설계에 대해 상세하게 기술하고 있는 AASHTO (1991) 설계기준에서도 선박에 의한 충돌이 예상되는 항로상에 건설되는 교량 구조물은 세 가지의 설계방법 즉, Method I, Method II, Method III에 의하여 선박의 충돌하중에 견딜 수 있게 설계되거나, 방호물, 개선말뚝, 또는 다른 안전을 위한 시설에 의해서 적절히 보호되도록 하고 있다. 특히 AASHTO LRFD (2004)설계기준에서 적용하고 있는 Method II에 의한 설계는 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 방

법이다. 국내에서는 도로교표준시방서(1996) 부록의 하중저항계수 설계편에서 AASHTO 설계기준의 Method II에 의한 선박충돌 설계방법을 준용하도록 하고 있으나 이후 개정된 도로교 설계기준에서는 이에 대한 내용이 없어 현재로서는 선박충돌에 대한 설계는 AASHTO 설계기준 등 외국 설계기준을 준용하고 있는 실정이다. Fig. 1은 AASHTO 설계기준의 선박충돌에 대한 설계절차를 나타낸 것이다.

일반적으로 교량설계에서 선박의 충돌위험에 노출된 교각과 경간 구조부재들 간에 연간파괴빈도의 허용기준을 분배시키는 것은 설계자의 판단에 근거한다. 한 가지 방법은 모든 구조부재들 간의 허용위험도를 같게 분포시키는 것이다. 주요 경간부재들의 중요도와 상대적으로 비싼 교체비용을 고려할 수 없기 때문에 이 방법은 보통 바람직하지 않으며, 주된 해석영역에 위치한 구조물의 교체 비용에 근거하거나 구조부재의 예상 연간파괴빈도를 고려한 가중치에 근거하여 교각과 경간부재에 위험도를 배분하는 것이 바람직할 수 있다.

설계 선박은 교량의 중요도 등급과 선박, 교량 및 항로의 특성에 의하여 결정되며, 교량의 각 교각과 경

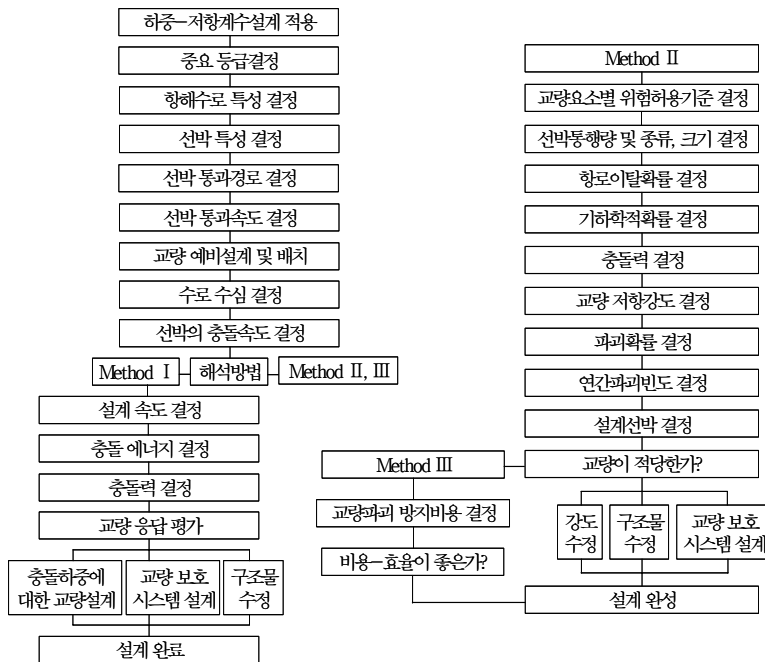


Fig. 1 설계절차에 대한 Flow Chart

간구조부재에 대해 선박충돌 위험도평가에 의하여 계산한 추정 연간파괴빈도가 그 구조부재의 허용기준을 만족하여야 한다. 적절한 형하고를 만족하게 되면 교량의 교각부재가 선박충돌에 대해 안전하도록 설계되어야 한다. 이러한 경우 설계선박이 결정되면 교량은 선박의 적재중량톤수, 충돌속도에 의해 계산되는 등가 정적선박충격하중으로부터 하부구조물과 기초의 전반적인 안정성을 만족하고 또한 모든 국부적인 충돌하중에 대해 하부구조물 부재들의 건전성이 확보되도록 설계하여야 한다. 따라서 항로상의 교량에 대한 설계 시 설계선박의 결정은 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 대형 선박이 통행하는 해상교량에 있어 선박충돌위험에 노출되어 있는 교량구조부재에 대한 설계선박을 선정하는 해석적 연구를 수행하였다. 연구내용으로는 연간파괴빈도 허용기준의 분배방법에 의한 영향과 선박통행량 및 교각의 배치 및 항로의 특성 등에 의한 영향 검토와 Method I과 Method II에 의한 설계선박 선정 및 비교를 들 수 있다.

## 2. 선박과 교량의 충돌 위험

### 2.1 선박충돌에 의한 교량부재의 연간파괴빈도

전 세계적으로 선박과 교량의 충돌에 대한 여러 가지 형태의 위험도 평가모델이 개발되었다. 실질적으로 이 연구들로부터 식 (1)과 같이 위험도를 평가하는데 (Fransen(1980), Larsen(1983)), 이는 어떤 특정한 교량 구조부재와 관련된 교량의 연간파괴빈도 AF를 계산하기 위한 것이다. 연간파괴빈도의 역수 1/AF는 연(years) 단위의 재현기간과 같다. 특정 구성부재에 대하여, 각 선박 등급별로 계산된 AF의 총합은 그 구성부재의 연간파괴빈도이다.

교량 부재의 연간 파괴빈도는 다음과 같이 산정하며, 전 교량에 대한 연간파괴빈도는 모든 부재의 AF를 합하여 구한다.

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

여기서, AF : 교량 부재파괴의 연간빈도

N : 수로를 이용하는 연간 선박의 수

PA : 선박의 항로이탈 혹은 교량확률

PG : 선박이 충돌할 기하학적 확률

PC : 선박과 충돌할 때 교량이 파괴될 확률

항로이탈확률 PA는 항로상에서 장애물을 피하는데 실패할 확률이다. 특히, AASHTO(1991)에서는 항로이탈확률의 크기를 수로굴곡부, 횡방향 흐름, 종방향 흐름, 교통밀도에 따라 수정인자로 조정하고 있으며 항로이탈확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서, BR : 항로이탈의 기본율

R<sub>B</sub> : 교량의 위치에 따른 보정계수

R<sub>C</sub> : 통과경로 평행방향의 유속 보정계수

R<sub>XC</sub> : 통과경로 직각방향의 유속 보정계수

R<sub>D</sub> : 통행선박의 밀도에 대한 보정계수

선박이 충돌 코스로 항해할 확률, 즉 기하학적 확률 PG는 일련의 환경들의 함수로 지역적인 조건에 따라 크게 달라진다. AASHTO에서는 역사적인 선박과 교량 충돌 데이터에 근거하여 교량 부근에서 사고 선박의 항해 항적을 모델링 할 때 정규분포를 사용하고 있으며, 분포의 표준편차 σ는 선박의 길이와 같고 평균 μ의 위치는 항해 수로의 중심선이라고 가정하였다. 즉 왕복항로의 경우에는 입항 항로와 출항 항로의 중심선은 각 수로의 절반이다.

항로를 이탈한 선박이 교량에 충돌하여 교량이 파괴될 확률은 복합적인 것으로 선박의 크기, 종류, 형태, 속도, 방향, 질량 및 충돌특성에 따라 결정된다. 또한 충돌하중에 저항하는 교각과 상부구조의 강성과 내하력의 특성에도 좌우된다. 교량의 극한 수평 내하력은 교각기초의 지지조건과 소성힌지를 고려하여 계산한다.

교량파괴확률(PC)은 선박 충격력(P)에 대한 교각의 수평 내하력 (H<sub>p</sub>) 또는 경간의 수평 내하력 (H<sub>s</sub>) 비율에 따라 다음과 같이 결정되며, Fig. 2와 같은 분포형상을 가진다(AASHTO(1991)).

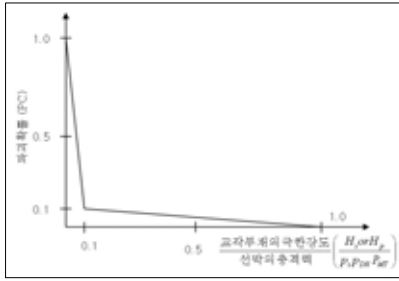


Fig. 2 파괴확률의 분포

- $0.0 \leq H/P < 0.1$ 이면,

$$PC = 0.1 + 9 \left( 0.1 - \frac{H}{P} \right) \quad (3)$$

- $0.1 \leq H/P < 1.0$ 이면,

$$PC = 0.111 \left( 1.0 - \frac{H}{P} \right) \quad (4)$$

- $\frac{H}{P} \geq 1.0$ 이면,

$$PC = 0.0 \quad (5)$$

여기서,  $P$  = 선박충격하중

$H$  = 교량 구조물의 횡저항 강도

## 2.2 연간파괴빈도 허용기준의 분배

항로상의 교량은 선박의 충돌에 대해 교각의 수평 내하력이 확보되도록 설계하여야 한다. 이 경우 교량의 연간 파괴빈도를 중요 교량에서는 0.0001, 보통 교량에서는 0.001을 목표로하여 충돌위험모델(Fransen (1980), Larsen(1983))에 의해 설계 선박에 대한 교각의 단면, 교각의 위치 등이 검토된다. 교량을 구성하는 교각과 경간부재에 대한 허용기준의 합은 교량의 연간파괴빈도를 만족하여야 하며 이 때 선박의 충돌위험에 노출된 교각과 경간 구조부재들 간에 연간파괴빈도(AF)의 허용기준을 분배시키는 것은 설계자의 판단에 근거한다. 한 가지 방법은 모든 구조부재들 간의 허용위험도를 같게 분포시키는 것이다. 주요 경간부재들의 중요도와 상대적으로 비싼 교체비용을 고려할 수 없기 때문에 이 방법은 보통 바람직하지 않다. 바람직한 방법은 주된 해석영역에 위치한 구조물의 교체 비용에 근거하거나 구조부재의 예상 연간파괴빈도

를 고려한 가중치에 근거하여 교각과 경간부재에 위험도를 배분하는 것이다. 장대교량의 선박충돌 설계에서 구조물의 교체비용에 근거하여 구조부재의 연간파괴빈도 허용기준을 결정할 경우 주탑의 연간파괴빈도 허용기준은 주탑의 중요도와 함께 교체비용을 고려하면 교량의 연간파괴빈도 허용기준의 상당 부분이 배분될 것으로 예상할 수 있다. 예를 들면, 중앙경간을 항로로 사용하는 경우에는 주탑의 허용기준 배분을 최대 50%까지 할 수도 있다. 그러나 수로특성과 교량의 교각배치 등 특성에 따라 주탑과 교각의 선박충돌확률과 충돌 시 붕괴확률이 다르기 때문에 예상되는 연간파괴빈도의 크기도 다르다. 따라서 주탑 및 교각의 예상 연간파괴빈도를 고려하는 가중치를 도입하여 안전성을 만족하면서 최적의 설계선박을 결정하는 연구를 수행한 바 있다(이성로 등(2004 a, 2004b, 2005)). 신뢰성이론에서는 시스템의 허용 연간파괴빈도는 요소의 허용 연간파괴빈도의 합이 되는 조건을 만족하는 분배 방법을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$AF_i^* = w_i AF_s^* \quad (6)$$

여기서,  $AF_s^*$  : 시스템의 허용 연간파괴빈도

$AF_i^*$  : 요소 i의 허용 연간파괴빈도

요소 i의 가중치  $w_i$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w_i = \frac{AF_i}{\sum AF_i} \quad (7)$$

여기서,  $AF_i = N \cdot PA \cdot PG \cdot PC$

## 2.3 설계선박 결정

Method I에서 설계선박은 “중요교량”에 대하여 선박통행량의 최대값으로부터 연간 50회 이상 통행한 선박과 전체 통행량의 5% 중 작은 값에 해당하는 톤급이고, “보통교량”에 대해서는 선박통행량의 최대값으로부터 연간 200회 이상 통행한 선박과 전체 통행량의 10% 중 작은 값에 해당하는 톤급이다.

Method II에서 설계선박은 선박충돌위험도를 고려한 확률기반 해석에 의해 결정된다. 설계자는 교량 구

조물의 수평내하력을 적절하게 가정하여 연간파괴빈도를 산정하게 되며, 이로부터 허용기준을 만족하는 최적의 수평내하력을 찾아낼 수 있다. 합리적인 설계 수평내하력이 결정되면, 그 결과로부터 설계선박을 선정할 수 있다. 선정방법은 해당부재의 설계 수평내하력을 충격력으로 가정하고, 해당부재의 설계속도를 적용하여 등가의 적재중량톤수(DWT)를 산정하는 것으로 선박충돌해석 등의 상해해석에 사용한다. 이로부터 항로상에 있는 해상교량 하부구조물과 기초의 전반적인 안정성과 모든 국부적인 충돌하중에 대한 하부구조물 부재들의 건전성을 검토하게 된다.

### 3. 선박 충돌 위험도 평가

#### 3.1 교량 제원

해석에 사용된 교량 구조부재는 3경간 연속 사장교로 선박충돌의 위험이 있는 주요해석영역은 선박이 통행할 만큼 충분한 수심이 확보되는 수로영역내의 부재로써 전체 교량구간에서 주경간교 1100m (300+700+300)를 포함하여 총 1780m의 구간으로 설정하였다. 항로폭은 양방향 통행이 가능하도록 550m로 설정하였으며 교량에 수직으로 통행하도록 설계되어 있다. 선박이 운항하면서 만날 가능성이 있는 항로에서는 대상선박의 길이(L)의 1.0L이상의 적절한 항로폭을 표준으로 한다. 다만 항로의 길이가 비교적 긴 경우는 1.5L, 대상선박들이 항로 향해 중 빈번히 만날 경우는 1.5L이고, 대상선박들이 항로 향해 중 빈번히 만나고 동시에 항로의 거리가 비교적 긴 경우는

2.0L를 표준으로 한다. 해석에 사용된 교량의 항로폭을 2.0L이상으로 적용하면 화물선을 기준으로 최대 130,000DWT의 선박통행이 가능한 교량으로 볼 수 있다. 수로를 향해하는 선박의 일반적인 평균속도는 6.17m/s, 수로의 연평균 유속은 0.15m/s로 하였다. 교량의 중요도 등급은 “중요”로 가정하였다.

하부구조의 형태는 수로의 흐름 등을 고려하여 직사각형 기초를 사용하였으며, 주탑의 경우 25m×40m, 교각의 경우 15m×20m로 가정하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 교량 구조부재의 단면도로 교각 부재별 위치를 번호로 구분하였다.

#### 3.2 분배모델을 이용한 연간파괴빈도

##### 3.2.1 연간파괴빈도

동일한 교량에 대하여 선박의 연간운행 횟수(N)와 항로이탈확률(PA)은 같은 값을 가지지만 선박충돌의 기하학적 확률(PG)과 파괴확률(PC)은 대상선박의 길이, 교량 중심으로부터 거리 등의 영향을 받기 때문에 교량구성부재는 각기 다른 연간파괴빈도 값을 가지게 된다. 먼저, 선박의 연간운행횟수는 100으로 가정하였으며 항로이탈확률은 도로교표준시방서(1996) 규정에 따라 다음과 같이 계산하였다.

$$PA = (BR)(R_B)(R_C)(R_{XC})(R_D) = 0.0001051$$

$$\text{여기서, } BR = 0.6 \times 10^{-4}, R_B = 1.0,$$

$$R_{XC} = 1.0, R_D = 1.6,$$

$$R_C = 1 + \frac{V_C}{19} = 1 + \frac{1.8}{19} = 1.095$$

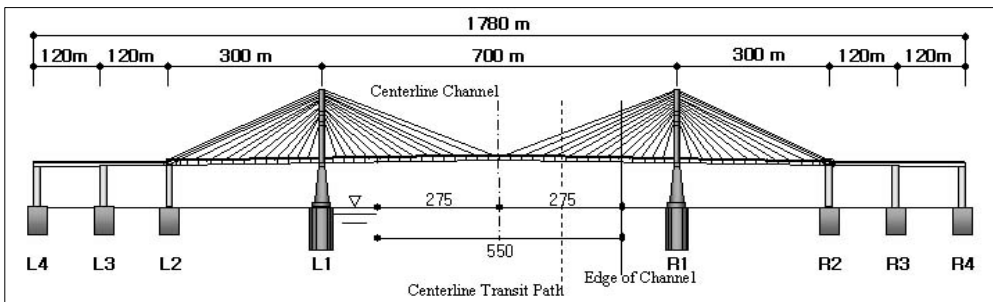


Fig. 3 교량 구조부재의 일반도

기하학적 확률은 선박의 전체길이와 폭 그리고 하부구조의 폭에 의해 결정되며, 하부구조의 폭은 해수면이 고조위시 주탑(혹은 교각)을, 저조위시 기초를 통과하므로 상대적으로 큰 값인 기초의 폭을 사용하여 Table 1과 같이 산정하였다.

Table 1 선박충돌의 기하학적확률

교각	R1	R2	R3	R4
PG	0.1170	0.0256	0.0104	0.0035

선박이 교각과 충돌하여 파괴될 확률은 교각의 수평저항력 ( $H_p$ )과 선박의 규모 및 속도에 따른 충격력 ( $P_s$ )의 비율에 의해 결정된다. 충격력은 교각위치별 충돌속도로부터 식 (8)과 같이 계산되며, 충돌속도는 Fig. 4와 같이 산정할 수 있다. 여기서  $V_T$ 는 6.17m/s (=12knot),  $V_{min}$ 은 0.15m/s (=0.3knot) 로 가정하였다. 하부구조물의 수평내하력은 부재의 중요도를 고려하여 주탑 50MN, 교각 25MN으로 가정하여 Table 2와 같이 계산하였다.

$$P = 1.2 \times 10^5 \sqrt{DWT} \quad (8)$$

여기서,  $P_s$ =등가정적선박충돌하중(N)

$DWT$ =선박의 적재중량톤수(미터톤)

$V$ =선박의 충돌속도(m/s)

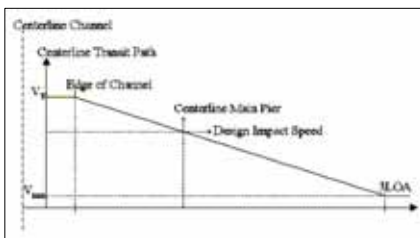


Fig. 4 설계속도의 분포

Table 2 선박충돌 시 파괴확률

교각	R1	R2	R3	R4
V(m/s)	5.51	2.89	1.84	0.78
Ps(MN)	209.21	109.53	69.66	29.78
Hp/Ps	0.24	0.23	0.36	0.84
PC	0.0846	0.0858	0.0712	0.0178

위와 같은 절차에 따라 연간파괴빈도(AF)를 구할 수 있으며, Table 3은 교량의 하부구조부재에 따른 연간파괴빈도의 산정 결과를 나타낸 것으로, 전체 부재에 대한 부재별 연간파괴빈도의 가중치를 백분율로 환산하여 주요해석영역에 따른 허용기준을 표현한 것이다.

Table 3 연간파괴빈도의 분배

교각	R1	R2	R3	R4
$AF_{calculate}$	0.0000977	0.000022	0.0000073	0.0000006
백분율	38.35	8.52	2.88	0.24
$AF_{allocate}$	0.0000384	0.0000085	0.0000029	0.0000002

### 3.2.2 연간파괴빈도 허용기준 분배

해석예와 같이 설계자는 선박충돌의 위험이 있는 주요해석영역에 대하여 선박과 교량 및 수로 특성 등을 고려한 합리적인 분배모델을 만들어 낼 수 있다. 그러나 대상선박의 크기나 교량과 수로가 이루는 각도 혹은 하부구조물의 수평내하력이 달라지는 경우 연간파괴빈도는 부재별로 다르게 산정되며 분배모델 또한 달라진다.

Fig. 5는 대상선박에 따른 AF 분배모델을 백분율로 나타낸 것으로 설계선박의 규모(DWT)가 커질수록 교량전체구간에 대한 영향도가 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 기하학적 확률과 파괴확률 산정 시 DWT가 커짐에 따라 설계속도의 분포 및 정규분포가 각각 3LOA와 LOA(선박전체길이)만큼 확대되기 때문이다. Fig. 6은 교량과 수로가 이루는 각도에 따른 변화를 나타낸 것으로 각이 커짐에 따라 교량의 유효길이가  $\cos \theta$ 배로 감소하므로 교량전체 구간에 대한 영향이 커지게 된다. Fig. 7에서는 일정한 비율로 수평내하력이 커지면 주탑의 수평내하력 크기보다 교각의 수평내하력 크기가 파괴빈도 분배에 미치는 영향이 더 크게 되는데, 이는 교각의 수평내하력이 커지면 선박충격력보다 큰 수평내하력을 가진 교각부재가 많아지면서 분배율의 주탑에 대한 집중도가 커지는 것을 나타낸다. Fig. 8에서는 주탑의 수평내하력이 커지면서 파괴확률이 낮아지고, 이로 인해 교량전체구간에 대한 영향이 커지는 것을 알 수 있다.

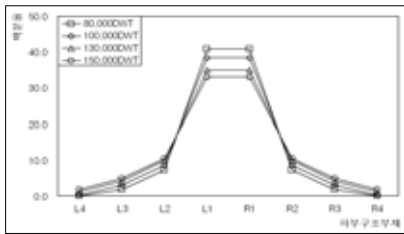


Fig. 5 대상선박에 따른 AF 분배

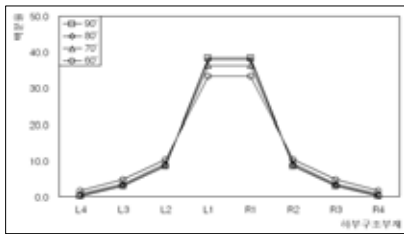


Fig. 6 수로각도에 따른 AF 분배

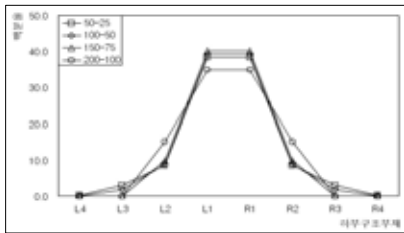


Fig. 7 주탑-교각  $H_p$  비율에 따른 AF 분배

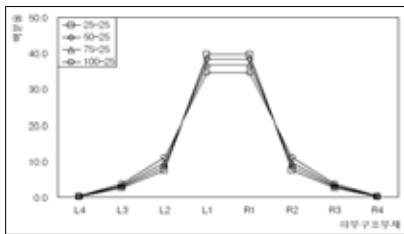


Fig. 8 주탑  $H_p$ 의 변화에 따른 AF 분배

연간과피빈도 허용기준 분배모델의 선택은 설계자의 판단에 근거한다. 한가지 방법은 설계 수평내하력을 보수적으로 산정하는 AF분배모델, 그리고 교각의 설계 수평내하력을 적절히 감소시킴으로서 주탑 설계 수평내하력을 경제적으로 산정할 수 있는 주탑집중 분배 모델 중에서 적절히 선택하는 것이다(이성로, 2004

b). 기존의 연구에서 케이블교를 해석으로 하는 수치 해석 결과에 의하면 연간과피빈도 허용기준 분배는 교량의 구조부재별 수평저항력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배모델을 만들 수 있다. 또한 동일한 교량에 대해 주탑집중 분배모델을 적용할 때 주탑의 수평 설계내하력이 AF분배모델을 적용할 경우보다 작게 평가되지만 교각의 수평 설계내하력이 오히려 주탑보다 더 높게 나타나는데 이는 실제 교량 모델과는 상당한 차이가 있으며 교각의 수평 설계강도는 충격력비를 고려하여 적절히 감소시키는 것이 합리적이다.

### 3.3 분배모델을 적용한 통행량에 따른 설계 선박 선정

#### 3.3.1 선박통행량 분류

기존의 연구(이성로, 2005)에 의하면 선박크기가 작은 등급의 선박통행량이 선박충돌위험도 평가에 영향을 주지 않기 때문에 본 연구에서는 국내 항만운항 정보시스템에서 제공하는 인천항(2003년)의 선박톤수에 따른 통행량의 평균톤수에 대한 등급 간격을 크게 설정하고 선박통행량에 따른 분배모델을 이용하여 설계선박을 선정하였다. Table 4는 인천항의 톤급별 선박통행량에 대한 기본 자료이고 이것을 각 톤급별로 대표하는 톤에 대해 분류하여 Table 5에 정리하였다.

Table 4 항만운항정보시스템의 기존 데이터(2003년)

톤급별(DWT)	척	총 톤 수
10,000 - 15,000	1,018	12,704,428
15,000 - 20,000	855	14,481,356
20,000 - 25,000	286	6,454,062
25,000 - 30,000	609	16,246,761
30,000 - 50,000	456	18,169,892
50,000 - 60,000	139	7,474,656
60,000 - 75,000	4	268,055
75,000 - 100,000	83	7,760,445
100,000 톤 이상	60	6,588,001
합계	3,510	90,147,656

Table 5 선박통행량 분류

등급별(DWT)	척
14,000	1,873
30,000	1,351
53,000	139
67,000	4
93,000	83
109,000	60
합계	3,510

### 3.3.2 설계선박 선정

설계선박은 교량의 중요도 등급과 선박, 교량 및 항로의 특성에 의하여 결정되며, 교량의 각 교각과 경간 구조부재에 대해 선박충돌 위험도평가에 의하여 계산한 추정 연간파괴빈도가 그 구조부재의 허용기준을 만족하여야 한다.

설계수평내하력이 결정되면, 그 결과로부터 설계선박을 선정할 수 있다. 선정방법은 해당부재의 설계수평내하력을 충격력으로 가정하고, 설계속도를 적용하여 등가의 DWT를 산정하는 것이다. 선박충돌해석 등의 상세해석에 사용하는 설계선박은 각각의 부재에 대하여 설계속도를 변수로 하기 때문에 동일한 수평내하력을 사용하는 경우 부재별로 다른 DWT를 가지게 된다. 그러나 해석에 사용된 교량에서는 L1, L2의 설계수평내하력 산정 시 충격력 비를 적용하였으므로 같은 설계속도의 변수를 가지게 되며, 설계 선박의 크기 또한 거의 같다. 다음 Fig. 9와 Table 6~8은 DWT별 통행량에 따른 연간파괴빈도의 분배와  $AF_{allocate}$ 를 기준으로 하여  $AF_{allocate}$ 와  $AF_{calculate}$ 의 차를 백분율로 산정하여 동일중분에 대한 민감도를 나타낸 것이고 Table 9는 수평내하력 및 설계선박을 결정한 것이다.

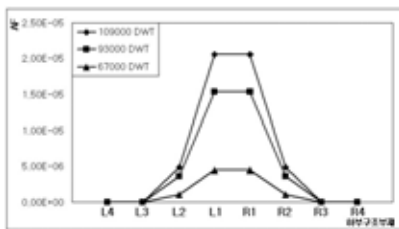


Fig. 9 통행량에 따른 분배 모델

Table 6 109000DWT선박의 연간파괴빈도의 분배

교각	R1	R2	R3	R4
$AF_{calculate}$	0.0000206	0.0000049	0	0
백분율	1.97	1.97	0	0
$AF_{allocate}$	0.0000405	0.0000095	0	0

Table 7 93000DWT선박의 연간파괴빈도의 분배

교각	L1	L2	L3	L4
$AF_{calculate}$	0.0000154	0.0000036	0	0
백분율	2.63	2.63	0	0
$AF_{allocate}$	0.0000405	0.0000095	0	0

Table 8 67000DWT선박의 연간파괴빈도의 분배

교각	L1	L2	L3	L4
$AF_{calculate}$	0.0000045	0.0000011	0	0
백분율	9.01	9.01	0	0
$AF_{allocate}$	0.0000404	0.0000096	0	0

본 연구에서는 주탑-교각에 충격력비를 고려하여 분배모델을 생성하였다. 기존연구자료(이성로, 2004 a, 2004 b)에서 각각의 다른 주탑-교각의 수평저항력을 적용시킬 수 있지만 수평저항력의 변화로 인해 붕괴확률(PC)이 달라지게 되어 그에 적합한 새로운 허용기준을 만들어내기 때문에 주탑보다는 교각에 분배율이 커지게 된다. 그러므로 부재별 수평내하력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배모델을 만들 수 있으며, 이로부터 주탑-교각의 적절한 수평저항력 및 설계선박을 산정할 수 있다.

Table 9 수평내하력 및 설계선박 결정

분류	주탑(L1, R1)	교각(L2, R2)
$H_p$ (MN)	160	86
$AF_{allocate}$	0.0000405	0.0000095
$AF_{calculate}$	0.0000405	0.0000095
설계선박	58000 DWT	57800 DWT
충격력비	1.85:1	

### 3.3.3 설계선박 충격력 검토

이상에서 가중치에 의해 각각의 교각에 연간파괴빈도 허용기준을 분배한 후 선정된 설계선박은 주탑과 교각이 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 예제로 사용된 해석교량에 대해서 설계선박은 58,000



DWT을 대표값으로 하고 수로영역에 위치하는 주탑과 모든 교각에 대한 검토를 수행할 수 있다. 이 때 충격력은 교량 각 부재 위치에서의 설계속도에 따라 계산하고 각 부재의 실제 수평내하력의 크기와 비교하여 하부구조 재배치 또는 방호공 설치 등을 검토한다.

### 3.4 선박통행량 분류에 따른 설계선박 비교

위의 예제에서 선박충돌에 대한 위험도를 교각의 위치별로 각각 산정하였으며 수평내하력을 이용한 설계선박을 산정하였다. 하지만 Method II에 의한 확률기반해석에서는 Method I에 의하여 가정된 초기설계선박(설계선박 I)을 가지고 시행착오법을 통하여 최종설계선박(설계선박 II)을 산정하는 것이다.

본 연구에서는 선박통행량 분류에 따라 중형 선박이 많은 경우와 대형선박이 많은 경우에 대해 충돌위험분배모델을 이용한 설계선박 II의 결과를 설계선박 I 과 비교 검토하였다. 먼저 Table 10과 Fig. 10, 11은 중형 선박의 통행량 변화에 따른 설계선박을 선정하였으며, 케이스별로 Method I에 의한 설계선박 I은 각각 60000DWT이며 통행량은 총 1000대로 가정하였다. Case I은 선박통행량이 중형선박의 통행이 주를 이루며, Case II와 Case III는 중형선박에서도 대형선박의 통행량이 많은 경우이며, Case IV는 전체적인 중대형선박의 통행량이 많은 경우이다. Fig. 11처럼 각각의 경우에 대해 Method II에 의한 설계선박 II가 선정되었으며 대형톤급의 선박통행량의 유무에 의해 설계선박 I 과의 차이는 크게 나타남을 알 수 있었다.

Table 10 중형 선박통행량이 많은 경우

구분(DWT)	Case I	Case II	Case III	Case IV
10000	500	500	500	500
20000	300	300	300	300
30000	70	60	50	40
60000	110	100	105	115
90000	20	30	20	15
120000	0	10	15	15
150000	0	0	10	15
설계선박 II	32000	37000	41000	44000
설계선박 II / 설계선박 I	0.53	0.62	0.68	0.73

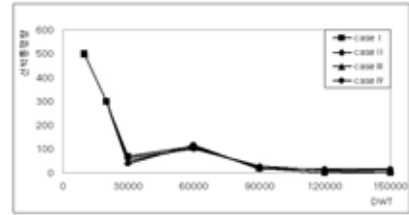


Fig. 10 중형 선박의 통행량 변화

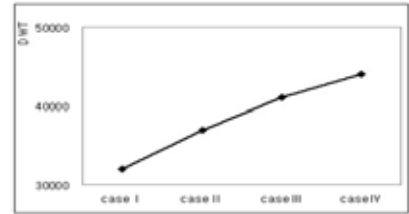


Fig. 11 중형 선박통행이 많은 경우 설계선박

또한 Table 11과 Fig. 12, 13에서 대형선박의 통행량 변화에 따른 설계선박 II를 선정하였다. 네가지 경우에 대해 설계선박 I은 120000DWT이며, 선박통행량은 중대형선박과 동일하게 1000대로 가정하였다. 결과에 의하면 Table 11의 내용처럼 대형톤급의 선박통행량의 대소에 의해 설계선박 I 과의 차이는 크게 나타남을 알 수 있었다.

이상의 내용에서 보면 선박통행량의 대소 뿐만 아니라 대형톤급 통행량의 유무에 의해서도 설계선박 I 과 설계선박 II의 차이는 크게 나고 있으며 항상 설계선박 I 이 설계선박 II에 비해 과대평가하고 있음을 알 수 있다.

Table 11 대형 선박통행량이 많은 경우

구분(DWT)	Case I	Case II	Case III	Case IV
10000	400	400	400	400
20000	200	200	200	200
30000	100	100	100	100
60000	100	90	80	70
90000	100	90	80	70
120000	90	100	110	120
150000	10	20	30	40
설계선박 II	63000	78000	82000	86000
설계선박 II / 설계선박 I	0.53	0.65	0.68	0.72

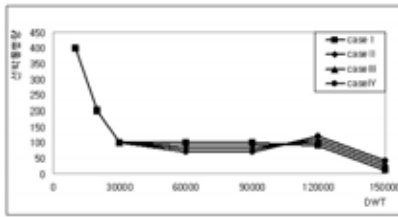


Fig. 12 대형 선박의 통행량 변화

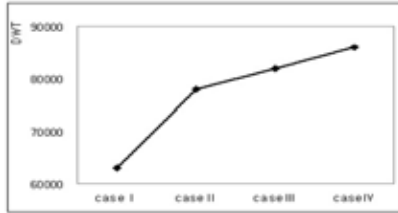


Fig. 13 대형 선박통행이 많은 경우 설계선박

#### 4. 결론

해상교량의 설계선박 선정은 교량의 중요도 등급과 선박, 교량 및 항로의 특성에 의하여 결정되며, 교량의 각 교각과 경간구조부재에 대해 선박충돌 위험도평가에 의하여 계산한 추정 연간과피빈도가 그 구조부재의 허용기준을 만족하여야 하며 선박에 의한 충격 및 모든 국부적인 충돌하중에 대해 하부구조물 부재들의 건전성이 확보되도록 설계하여야 한다.

본 연구에서는 충돌위험분배모델을 확률기반 해석과정을 통하여 선박통행량을 고려한 해상교량의 설계선박을 선정하였다. 연구 결과에 의하면 연간과피빈도 허용기준 분배는 교량의 구조부재별 수평저항력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배 모델을 만들 수 있다. 이로부터 충돌위험에 노출된 교각 각각에 대한 선박충돌위험도 평가를 수행하고 교량의 대표 설계선박을 선정할 수 있었다. 교량의 대표 설계선박을 이용하여 수로영역에 위치하는 주탑과 모든 교각에 대한 선박충돌 검토를 수행할 수 있다. 이때 충격력은 교량 각 부재 위치에서의 설계속도에 따라 계산하고 각 부재의 실제 수평내하력의 크기와 비교하여 하부구조 재배치 또는 방호공 설치 등을 검토할 수 있다. 또한, 중형선박과 대형선박 통행량의 변

화에 의한 설계선박 I 과 설계선박 II 의 결과를 비교 검토하였다. 결과에 의하면 Method II 에 의한 설계선박은 선박통행량의 대소 뿐만 아니라 대형등급의 선박통행량의 유무에 의해 설계선박 I 과의 차이는 크게 나고 있으며, 항상 설계선박 I 이 설계선박 II 에 비해 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 동일한 교량이라 할지라도 선박통행량의 유형에 따라서 각각 다른 설계선박을 가질 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-00 0-10144-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003.
3. 이성로,배용귀, "교량의 선박충돌 위험 및 교각의 설계강도", 대한토목학회 정기 학술대회, Vol.4C, 강구조학회세미나, 대한토목학회, 2004(a), pp.79-88.
4. 이성로,이병화,강성수, "선박통행량에 따른 교량의 선박충돌위험", 대한토목학회 정기 학술대회, (CD), 대한토목학회, 2004(b), pp.2014-2017.
5. 이병화,배용귀,이성로,이계희, "해상교량의 설계선박 선정", 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 제18권, 제1집, 한국전산구조공학회, 2005, pp.607-615.
6. AASHTO, "Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges", 1991.
7. AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", 2004.
8. Frandsen, A.G. and Langsoe, H., Ship Collision Problems: I.Great Belt Bridge and II. International Enquiry, IABSE Periodica No.2, 1980.
9. Larsen, O. Damgaard, "Ship Collision Risk Assessment for Bridges" IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Copenhagen, 1983.

(접수일자 : 2005년 5월 19일)