

현수교의 선박충돌 위험 및 설계선박하중

Ship Collision Risk of Suspension Bridge and Design Vessel Load

이성로* · 배용귀**

Lee, Seong Lo · Bae, Yong Gwi

Abstract

In this study ship collision risk analysis is performed to determine the design vessel for collision impact analysis of suspension bridge. Method II in AASHTO LRFD bridge design specifications which is a more complicated probability based analysis procedure is used to select the design vessel for collision impact. From the assessment of ship collision risk for each bridge pier exposed to ship collision, the design impact lateral strength of bridge pier is determined. The analysis procedure is an iterative process in which a trial impact resistance is selected for a bridge component and a computed annual frequency of collapse(AF) is compared to the acceptance criterion, and revisions to the analysis variables are made as necessary to achieve compliance. The acceptance criterion is allocated to each pier using allocation weights based on the previous predictions. This AF allocation method is compared to the pylon concentration allocation method to obtain safety and economy in results. This method seems to be more reasonable than the pylon concentration allocation method because AF allocation by weights 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. The design vessel for each pier corresponding with the design impact lateral strength obtained from the ship collision risk assessment is then selected. The design impact lateral strength can vary greatly among the components of the same bridge, depending upon the waterway geometry, available water depth, bridge geometry, and vessel traffic characteristics. Therefore more researches on the allocation model of AF and the selection of design vessel are required.

Keywords : suspension bridge, ship collision, design vessel, annual frequency of collapse, acceptance criterion

요 지

본 연구에서는 현수교의 선박충돌해석을 위한 설계선박을 결정하기 위하여 선박충돌위험도해석을 수행한다. 선박충돌에 대한 설계선박을 결정하기 위하여 AASHTO 설계기준에서 제시한 3개의 선박충돌 설계방법 중 확률기반 해석방법인 Method II를 사용한다. 선박충돌 위험에 노출된 각각의 교각에 대해 선박충돌위험도 평가를 하여 교각의 충돌설계수평강도를 결정한다. 해석과정은 반복적인 것으로 교량부재의 충돌저항강도를 가정하고 연간파괴빈도를 계산하여 허용기준이 만족하도록 설계 변수를 수정한다. 허용기준은 예상연간파괴빈도에 근거한 가중치를 이용하여 교각에 할당한다. 해석결과에서 안전성과 경제성을 얻기 위해 이 할당방법을 주탑집중 할당방법과 비교한다. 비록 주탑집중 할당방법이 주탑에 비해 과대평가되는 교각의 설계수평강도를 적절히 수정할 경우 보다 경제적인 결과를 가져오지만, 가중치에 의한 할당방법이 설계인자의 특성을 정량적으로 고려하기 때문에 더 합리적인 것으로 보인다. 그리고 선박충돌위험도 평가로부터 얻어지는 충돌설계수평강도에 상응하는 각각의 교각에 대한 설계선박이 결정된다. 같은 교량에 대해서도 충돌설계수평강도가 수로 및 교량의 특성과 선박통행량에 따라 상당히 변화한다. 따라서 허용기준의 할당과 설계선박 선정에 대한 많은 연구가 요구된다.

핵심용어 : 현수교, 선박충돌, 설계선박, 연간파괴빈도 허용기준

1. 서 론

도로교 설계기준(2003)에서는 충돌하중에 관하여 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하여야 한다고 명시되어 있다. 또한, 교량의 선박충돌설계에 대해 상세하게 기술하고 있는 AASHTO LRFD 설계기준에서도 세 가지의 설계방법 즉, Method I, Method II, Method III에 의하여

선박에 의한 충돌이 예상되는 항로상에 건설되는 교량 구조물은 선박에 의한 충돌하중에 견딜 수 있게 설계되거나, 방호물, 계선말뚝, 통로 또는 다른 안전을 위한 시설에 의해서 적절히 보호되도록 하고 있다. 특히 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 충돌

*정회원 · Mokpo대학교 건설공학부 토목공학전공 교수(E-mail: sllee@mokpo.ac.kr)

**Mokpo대학교 대학원 토목공학과 박사과정

할 기하학적 확률, 항로를 이탈한 선박과 충돌할 때 교량이 파괴될 확률을 고려함으로써 교량의 선박충돌위험도를 평가하고 위험도평가 결과로부터 설계선박을 합리적으로 선정할 수 있는 방법이다.

설계 선박은 교량의 중요도 등급과 선박, 교량 및 항로의 특성에 의하여 결정되며, 교량의 각 교각과 경간구조부재에 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 선박의 적재중량톤수, 충돌속도 등에 의해 등가 정적 선박충격하중을 계산하고 선박에 의한 충격으로부터 허부구조물과 기초의 전반적인 안정성을 만족하고 또한 모든 국부적인 충돌하중에 대해 허부구조물 부재들의 건전성이 확보되도록 설계하여야 한다. 따라서 항로상의 교량에 대한 설계 시 설계선박의 결정은 중요한 요소가 된다.

이성로 등(2004)은 선박충돌 위험에 노출되어 있는 해상교량의 위험도평가를 수행하고 이로부터 교각의 충돌위험 허용기준 분배방법을 연구하였으며 허용기준 분배방법에 따라 교각의 설계강도에 대한 변화가 있으며 이에 대한 영향을 고려할 필요가 있다고 보고하였다.

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.

본 연구에서는 대형 선박이 통행하는 해상교량에 있어 선박충돌위험에 노출되어 있는 교각부재에 대해 선박충돌위험도를 고려한 최적의 설계선박하중을 선정하는 일련의 해석적 연구를 수행하였으며, 연간파괴빈도 허용기준의 분배방법에 의한 영향과 교각의 배치 및 항로의 특성 등에 의한 영향을 검토하였다.

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 연구들은 식 (1)과 유사한 모양에 근거하는데, 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: 선박 충돌에 의한 교량 부재파괴의 연간빈도

N : 형태, 크기, 및 하중조건에 의해 분류된 수로를 이용하는 연간 선박의 수

PA : 선박의 항로이탈확률

PG : 항로를 이탈한 선박이 교각이나 상판과 충돌할 기하학적 확률

PC : 항로를 이탈한 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_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

선박이 충돌 코스로 항해할 확률, 즉 기하학적 확률 PG는 일련의 환경들의 함수로 지역적인 조건에 따라 달라진다. 과거의 사고기록에 의하면 선박의 충돌시나리오는 다음의 네 가지로 분류할 수 있다. a) 통항하는 동안 정상적인 항해 절차에 따르다가 조종자의 실수 또는 기술적인 결함으로 인해 교량 부근에서 위험에 처한 선박, b) 교량 부근에서 연속되는 마주치는 상황 때문에 충돌 회피 동작을 취하는 선박, c) 교량에 근접한 항로의 굴곡부에서 변침을 실패한 선박, d) 정상적인 항로를 따르지 않은 선박, 묘박 또는 계류의 실패, 추진력 상실, 항해장비의 고장, 유빙에 갇힌 상황 등에 의해 교량 쪽으로 표류하는 선박. 시나리오 a)에 대한 기하학적 확률은 교량 통과전의 선박의 항적 분포와 충돌영역 폭의 함수로 정의된다. 많은 교량의 경우 시나리오 a)만을 고려하여도 충분하다. AASHTO(1991)에서는 역사적인 선박과 교량 충돌 데이터에 근거하여 교량 부근에서 사고 선박의 항해 항적을 모델링 할 때 정규분포를 사용하고 있으며, 분포의 표준편차는 선박의 길이와 같고 평균의 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 충돌충격하중에 저항하는 교각과 상부구조의 강성과 내하력의 특성에도 좌우된다. AASHTO(1991)에서는 Fujii(1978)의 연구결과를 이용하여 그림 1과 같은 교량파괴확률(PC)을 사용하고 있다. 교량의 극한 횡저항은 교각기초의 지지조건과 소성힌지를 고려하여 계산한다. 교량파괴확률(PC)은 선박의 충격하중(P)에 대한 교각의 횡방향 내하력(H_p)과 경간의 횡방향 내하력(H_s)의 비율에 따라 다음과 같이 결정되며, 그림 1과 같은 분포

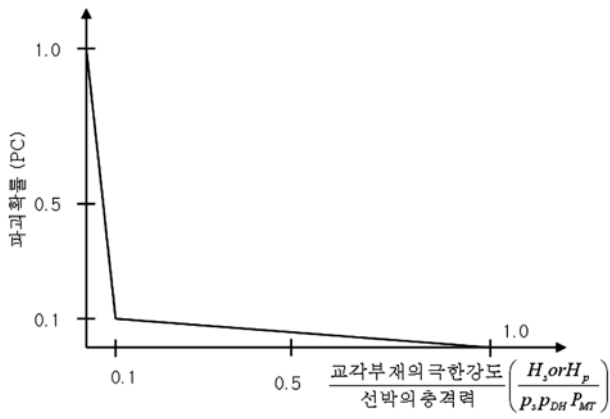


그림 1. 파괴확률의 분포

형상을 가진다.

$$\bullet 0.0 \leq H/P < 0.1 \text{ 이면, } PC = 0.1 + 9 \left(0.1 - \frac{H}{P} \right) \quad (3)$$

$$\bullet 0.0 \leq H/P < 0.1 \text{ 이면, } PC = 0.111 \left(1.0 - \frac{H}{P} \right) \quad (4)$$

$$\bullet \frac{H}{P} \geq 1.0 \text{ 이면, } PC = 0.0 \quad (5)$$

여기서, P : 선박충격하중

H : 수평하중에 대한 교량 구조물의 횡저항 강도 or

2.2 연간파괴빈도 허용기준의 분배

항로상의 교량은 선박의 충돌에 대해 교각의 횡방향 내하력이 확보되도록 설계하여야 한다. 이 경우 교량의 연간 파괴빈도를 중요 교량에서는 0.0001, 보통 교량에서는 0.001을 목표로 하여 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 연간 파괴빈도(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 연간파괴빈도를 고려한 가중치에 근거하여 교각과 경간부재에 위험도를 배분하는 것이다. 장대교량의 선박충돌 설계에서 구조물의 교체비용에 근거하여 구조부재의 연간파

괴빈도 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 2주탑 장대교에서는 주탑의 허용기준 배분을 최대 50%까지 할 수도 있다. 그러나 수로특성과 교량의 교각배치 등 특성에 따라 주탑과 교각의 선박충돌확률과 충돌시 붕괴확률이 다르기 때문에 예상되는 연간파괴빈도의 크기도 다르다. 따라서 주탑 및 교각의 예상 연간파괴빈도를 고려하는 가중치를 도입할 필요가 있다. 신뢰성이론에서는 시스템의 허용 연간파괴빈도는 요소의 허용 연간파괴빈도의 합이 되는 조건을 만족하는 분배방법을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$AF_i^* = \omega_i AF_S^* \quad (6)$$

여기서, AF_S^* : 시스템의 허용 연간파괴빈도

AF_i^* : 요소 i 의 허용 연간파괴빈도

요소 i 의 가중치 w_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

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

3. 선박 충돌 위험도 평가

3.1 교량 제원

해석에 사용된 교량은 3경간 연속 타정식 현수교로 총 연장 1,620 m, 주경간교의 연장 900 m(200+500+200)의 강바닥판 트러스교이다. 기준 선박은 50,000톤으로 가정하였고 충돌위험 해석 대상인 각 교각은 선박이 좌초하지 않을 만큼 충분한 수심을 확보하는 것으로 가정하였다. 수로의 폭은 250 m이고 양방향 통행의 각 항로 폭은 125 m이며 교량에 수직으로 통행하도록 설계되어 있다. 교량의 중요도 등급은 “중요”로 가정하였다.

하부구조의 형태는 우물통 기초위에 주탑이나 교각이 위치하며, 우물통 기초는 해석상의 편리를 위하여 주탑부의 경우 지름 20 m, 교각부의 경우 지름 14 m로 가정하였다. 그림 2는 해석에 사용된 교량 단면도로 교각 부재별 위치를 번호로 구분하였다.

3.2 충돌위험도

3.2.1 연간파괴빈도

동일한 교량에 대하여 선박의 연간운행 횟수(N)와 선박의

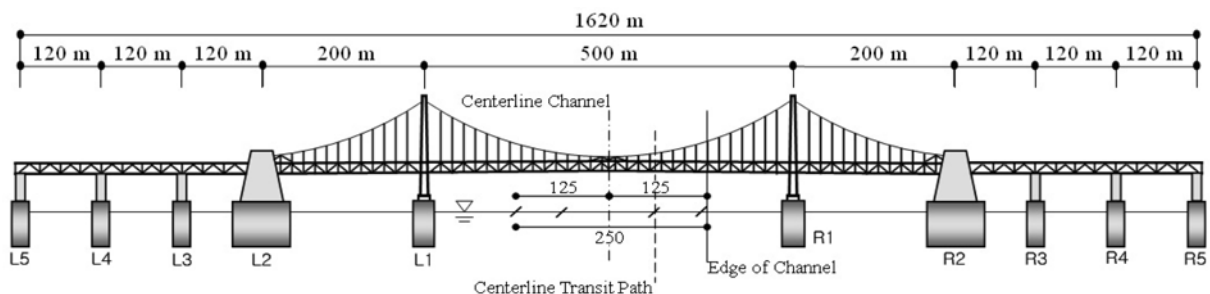


그림 2. 교량 일반도

표 1. 선박충돌의 기하학적확률

| 교각 | L5 | L4 | L3 | L2 | L1 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PG | 0.0005 | 0.0027 | 0.0106 | 0.0313 | 0.1070 | 0.1070 | 0.0313 | 0.0106 | 0.0027 | 0.0005 |

표 2. 선박충돌시 파괴확률

| 교각 | L5 | L4 | L3 | L2 | L1 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| V(m/s) | 0.50 | 1.10 | 2.99 | 4.88 | 8.03 | 8.03 | 4.88 | 2.99 | 1.10 | 0.50 |
| P(MN) | 13.42 | 29.55 | 80.26 | 130.98 | 215.50 | 215.50 | 130.98 | 80.26 | 29.55 | 13.42 |
| H/P | 1.86 | 0.85 | 0.31 | 0.19 | 0.23 | 0.23 | 0.19 | 0.31 | 0.85 | 1.86 |
| PC | 0.0000 | 0.0171 | 0.0765 | 0.0899 | 0.0853 | 0.0853 | 0.0899 | 0.0765 | 0.0171 | 0.0000 |

표 3. 연간파괴빈도의 분배

| 교각 | L5 | L4 | L3 | L2 | L1 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
|------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| $AF_{calculate}$ | 0 | 4.9E-7 | 8.6E-6 | 3.0E-5 | 9.6E-5 | 9.6E-5 | 3.0E-5 | 8.6E-6 | 4.9E-7 | 0 |
| 백분율 | 0.00 | 0.18 | 3.18 | 11.00 | 35.64 | 35.64 | 11.00 | 3.18 | 0.18 | 0.00 |
| $AF_{allocate}$ | 0 | 1.8E-7 | 3.2E-6 | 1.1E-5 | 3.6E-5 | 3.6E-5 | 1.1E-5 | 3.2E-6 | 1.8E-7 | 0 |

항로이탈확률(PA)은 같은 값을 가지지만 선박충돌의 기하학적 확률(PG)은 교량 중심으로부터 선박의 전체길이를 표준편차로 한 표준 정규분포를 이용하며, 파괴확률(PC)은 교량 중심으로부터 거리와 교각의 강도에 따라 다르게 되므로 각각의 부재는 서로 상이한 연간파괴빈도를 가지게 된다. 먼저, 선박의 연간운행횟수는 100으로 가정하였으며 항로이탈확률은 도로교표준시방서(1996) 하중-저항계수설계편 규정에 따라 다음과 같이 계산하였다.

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

여기서, $B_R=0.6 \times 10^{-4}$, $R_B=1.0$, $R_{XC}=1.0$

$$R_C = 1 + \frac{V_C}{19} = 1 + \frac{1.8}{19} = 1.095, R_D = 1.6$$

기하학적 확률은 전체길이 222 m, 폭 32.6 m의 50,000DWT 선박을 대상선박으로 하였으며, 하부구조의 폭은 해수면이 고조위시 주탑(혹은 교각)을, 저조위시 우물통을 통과하므로 상대적으로 큰 값인 우물통 기초의 폭을 사용하여 표 1과 같이 산정하였다.

선박이 교각과 충돌하여 파괴될 확률은 교각의 수평저항력(H_p)과 선박의 규모 및 속도에 따른 충격력(P_s)의 비율에 의해 결정된다. 선박은 50,000DWT급으로 설계속도(V_T)는 10 m/s, V_{min} 은 0.5 m/s로 가정하였으며, 항로의 중심으로부터의 거리에 따라 각각의 교각위치에서의 설계속도를 산정하였다. 하부구조물의 수평저항력은 주탑 50MN, 교각 25MN으로 가정하여 표 2와 같이 계산하였다.

위와 같은 절차에 따라 연간파괴빈도(AF)를 구할 수 있으며, 표 3은 교량의 각 하부구조물에 대한 연간파괴빈도의 결과치와 그 값을 백분율로 환산한 값이다.

3.2.2 부재별 연간파괴빈도 허용기준

위의 예제에서 선박충돌에 대한 위협도를 교각의 위치별로 각각 계산하였다. 그러나 설계선박의 크기가 달라지거나 교량과 수로가 이루는 각도, 주탑 혹은 교각의 수평저항력이 달라지는 경우 AF의 크기가 다르게 되며 또한 AF의 분배

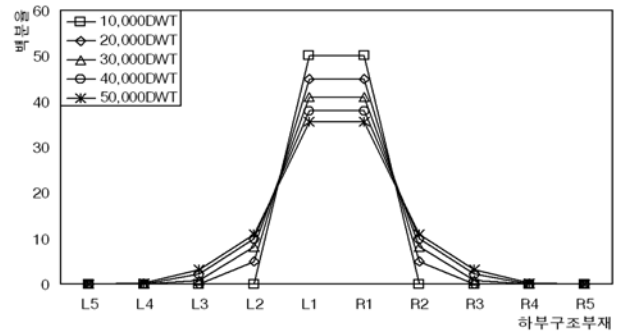


그림 3. 설계선박의 변화에 따른 AF의 분배양상

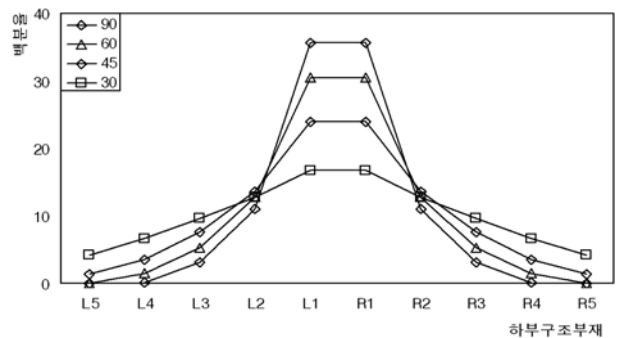


그림 4. 교량과 수로의 각도에 따른 AF의 분배양상

도 다르게 된다.

그림 3은 설계선박의 변화에 따른 AF의 분배양상을 백분율로 나타낸 것이며, 그림 4는 교량과 수로의 각도에 따른 변화를, 그림 5, 6은 교각주탑간 횡방향 저항력의 변화와 교각의 횡방향 저항력을 25MN, 50MN으로 했을 때 교각-주탑간 횡방향 저항력의 비율에 따른 AF분배의 변화를 나타낸 것이다.

그림 3에서 설계선박의 크기가 커질수록 교량전체구간에 대한 영향도가 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 기하학적 확률과 파괴확률이 선박의 규모(DWT)에 대한 함수로 나타나 DWT가 커짐에 따라 설계속도의 분포 및 정규분포가

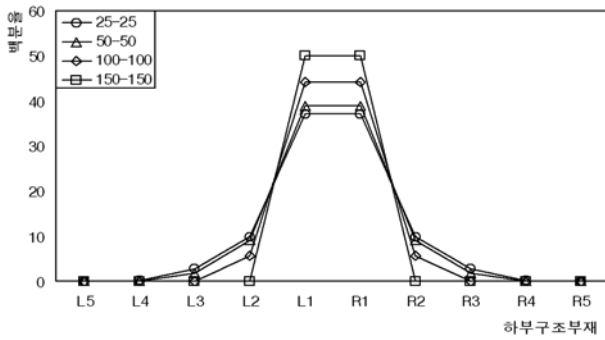


그림 5. 교각-주탑의 에 따른 AF의 분배양상

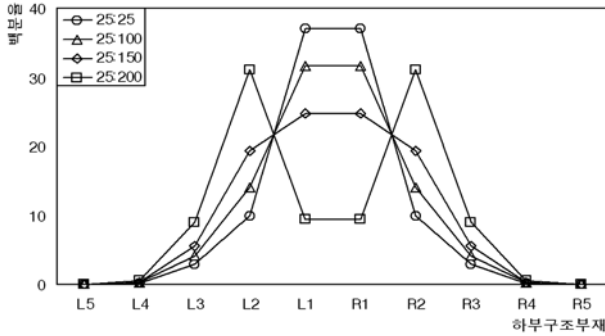


그림 6. 교각-주탑의 비율에 따른 AF의 분배양상

각각 3LOA와 LOA만큼 확대되기 때문이다. 또한 주탑부에서의 변화율이 일정하지 않은 것은 LOA의 감소율의 변화와 AF가 0이 되는 부재들로 인해 주탑의 분배율이 상대적으로 높아지기 때문이다. 그림 4에서는 교량과 수로의 각도가 변함에 따라 50000DWT 선박이 통행할 때의 AF가 분배되는 양상을 보여주는 것으로 설계속도의 분포 및 정규분포가 동일한 반면, 수로가 각을 가지면서 선박의 유효길이 $\cos\theta$ 배로 감소하므로 교량전체 구간에 대한 영향이 늘어나게 된다. 수로각이 커지면서 변화율도 함께 커지는 것은 $\cos\theta$ 자체의 변화율과 AF가 0이 되는 부재들의 영향 때문이다.

그림 5에서 교각과 주탑의 H_p 가 커질수록 주탑에 대한 집중도가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 교각의 H_p 가 P_s 보다 크거나 혹은 거의 근접한 값을 가지기 때문에 발생하는 현상으로, 주탑의 AF는 동일한 변화량을 가지지만 교각의 AF변화와 AF가 0이 되는 부재들로 인해 분배율의 변화가 생기게 된다. 그림 6에서는 교각과 주탑의 H_p 비율이 커질수록 주탑에 대한 집중도가 적어지며 교각과 주탑의 비율이 25:200인 경우 교각에 비하여 오히려 적은 AF분배율을 가지는데 이는 주탑의 H_p 가 P_s 보다 크거나 혹은 거의 근접한 값을 가지기 때문에 발생하는 현상이다. 이 경우 교각의 AF는 변하지 않지만 주탑의 AF변화로 인해 분배율이 달라지며, 이로 인해 변화율도 달라진다.

3.3 주탑 및 교각의 설계수평강도 산정

앞의 예제에서와 같이 설계자는 교량의 형상이나 위치 등에 따라서 목적에 부합하는 AF분배모델을 만들어 낼 수 있다. 그러나 이러한 과정을 거치지 않고 케이블 교량의 특수성을 감안하여 주탑에만 전체 허용기준을 분배하는 모델을 사용할 수도 있는데, 이 경우 부재의 연간과피빈도 및 극한

내하력의 크기는 조금씩 달라지게 된다.

본 연구에서는 위의 두가지 경우에 대하여 교량의 길이변화와 그에 따른 부재의 위치 및 수로 폭의 변화에 의한 영향을 네가지로 구분·검토하였다. 먼저 CaseI은 수로의 폭, 보조경간장은 변하지 않고 주경간장만 늘어나는 경우이며 CaseII는 수로의 폭은 변하지 않고, 주경간장이 변함에 따라 보조경간장이 주경간장의 1/2.5로 늘어나는 경우를, CaseIII은 보조경간장은 변하지 않고, 주경간장이 변함에 따라 수로의 폭이 주경간장의 1/2로 늘어나는 경우를, CaseIV는 주경간장이 길어짐에 따라 보조경간장 및 수로의 폭이 CaseII, CaseIII과 같은 형태로 늘어나는 경우를 표현하였다. 또한, 예제모델에서 L1~L5, R1~R5 부재는 좌·우 대칭으로 역학적 성질이 거의 동일하며, 좌·우 주탑과 교각들은 각각 동일한 단면으로 구성되어 있다. 따라서 설계수평강도의 산정은 전체 구간에 대하여 실시하였으나 표에서는 주탑(L1, R1)과 최대 충격력을 받는 교각(L2, R2)에 대해서만 정리하였다.

3.3.1 AF분배모델에 의한 설계수평강도 산정

교량에서 주탑과 교각은 서로 다른 가중치를 가지게 되는데 설계자는 설계수평강도를 가정할 때 주탑과 교각의 적절한 비율을 결정해야 한다. 한가지 방법은 각 부재에 발생하는 충격력의 비율에 의해서 수평강도의 비율을 결정하는 것으로, 산정방법은 충격력으로부터 5MN씩 감소시켜 해를 찾는 시행착오법으로 하였으며, $AF_{allocate}$ 를 기준으로 하여 $AF_{allocate}$ 와 $AF_{calculate}$ 의 차를 백분율로 산정하여 동일증분에 대한 민감도를 표현하였다. 표 4~6은 50,000DWT 선박이 CaseI에 대하여 주경간장이 500 m, 550 m, 600 m인 경우 설계수평강도를 산정하는 과정을 나타낸 것이며, 표 7~9는 동일한 선박에 대하여 주경간장의 변화에 따른 설계수평강도의 변화를 Case별로 나타낸 값이다. 또한, 그림 7, 8은 교량의 길이변화 CaseI~IV에 대한 주탑과 교각의 설계수평

표 4. Case I의 설계수평강도 산정과정(500m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 155 | 0.0000387 | 0.0000351 | 9.3 |
| | L2 | 94.21 | 0.0000113 | 0.0000103 | 9.3 |
| 2 | L1 | 150 | 0.0000387 | 0.0000380 | 1.8 |
| | L2 | 91.17 | 0.0000113 | 0.0000111 | 1.8 |
| 3 | L1 | 148.81 | 0.0000387 | 0.0000387 | 0 |
| | L2 | 90.44 | 0.0000113 | 0.0000113 | 0 |

표 5. Case I의 설계수평강도 산정과정(550m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 140 | 0.0000395 | 0.0000358 | 9.4 |
| | L2 | 82.26 | 0.0000105 | 0.0000095 | 9.4 |
| 2 | L1 | 135 | 0.0000395 | 0.0000386 | 2.4 |
| | L2 | 79.32 | 0.0000105 | 0.0000105 | 2.4 |
| 3 | L1 | 133.27 | 0.0000395 | 0.0000395 | 0 |
| | L2 | 78.30 | 0.0000105 | 0.0000105 | 0 |

표 6. Case I의 설계수평강도 산정과정(600m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 125 | 0.0000403 | 0.0000360 | 10.7 |
| | L2 | 94.12 | 0.0000097 | 0.0000086 | 10.7 |
| 2 | L1 | 120 | 0.0000403 | 0.0000386 | 4.2 |
| | L2 | 67.82 | 0.0000097 | 0.0000093 | 4.2 |
| 3 | L1 | 116.72 | 0.0000403 | 0.0000403 | 0 |
| | L2 | 65.96 | 0.0000097 | 0.0000097 | 0 |

표 7. Case II의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 충격력비 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 148.81 | 90.44 | 1.65:1 |
| 550 m | 130.85 | 71.49 | 1.83:1 |
| 600 m | 111.81 | 53.46 | 2.09:1 |

표 8. Case III의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 충격력비 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 148.81 | 90.44 | 1.65:1 |
| 550 m | 138.59 | 82.12 | 1.69:1 |
| 600 m | 127.60 | 73.50 | 1.74:1 |

표 9. Case IV의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 충격력비 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 148.81 | 90.44 | 1.65:1 |
| 550 m | 136.17 | 75.14 | 1.81:1 |
| 600 m | 122.71 | 60.28 | 2.04:1 |

강도의 변화를 보여주고 있다.

표 4~6의 결과로부터 Case I의 경우 경간장이 길어짐에 따라 주탑의 분배율이 높아지므로 연간과피빈도의 허용치가 커지고, 이로인해 설계수평강도는 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 표 8~10의 다른 Case에서도 비슷하게 나타나는데, 이는 선박충돌에 대한 위험도 평가에서 경간장이 커짐에 따라 충돌위험이 작아지기 때문이다.

표 7~9에서 동일한 주경간장의 변화에 대하여 Case III의 변화율이 Case I보다 더 작게 나타난다. 따라서 선박의 통과 소요폭을 충분히 고려하여 수로의 폭을 결정하고 그 값을 고정시키는 것이 더 유리하다는 것을 알 수 있다. Case II의 경우에는 변화율이 Case I과 Case IV보다 더 크게 나타나므로 주경간장이 늘어나는 경우 보조경간장을 일정비율로 조정하는 것이 더 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7, 8로부터 주탑의 변화율보다 교각의 감소율이 약간 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3.2 주탑집중 분배모델에 의한 설계수평강도 산정

교량에서 주탑과 교각의 서로 다른 가중치를 고려할 수 있는 다른 방법은 주탑의 중요도를 매우 큰 것으로 보고 좌·우 주탑에 전체허용기준의 50%씩 분배시키는 것이다. 이때, 주탑의 허용치는 0.00005가 되어 AF분배모델의 0.0000356보다 다소 큰 값을 가지게 된다. 허용치가 커지면 소요강도가 작아지므로 주탑은 상대적으로 적은 H_p 가 설계

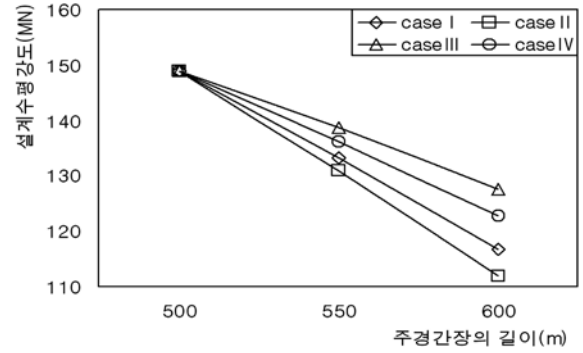


그림 7. 주탑의 설계수평강도 변화

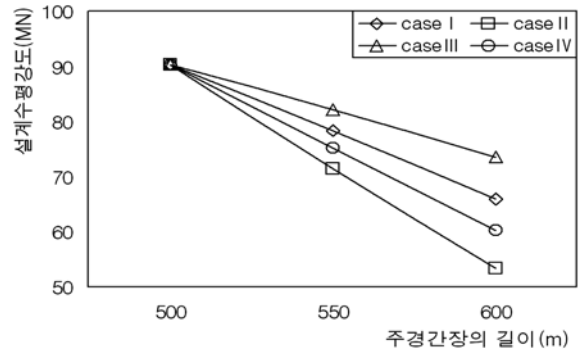


그림 8. 교각의 설계수평강도 변화

표 10. Case I의 설계수평강도 산정과정(500m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 140 | 0.00005 | 0.0000438 | 12.4 |
| | L2 | 130.98 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | L1 | 135 | 0.00005 | 0.0000467 | 6.6 |
| | L2 | 130.98 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | L1 | 129.29 | 0.00005 | 0.00005 | 0 |
| | L2 | 130.98 | 0 | 0 | 0 |

표 11. Case I의 설계수평강도 산정과정(550m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 125 | 0.00005 | 0.0000441 | 11.8 |
| | L2 | 114.30 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | L1 | 120 | 0.00005 | 0.0000469 | 6.3 |
| | L2 | 114.30 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | L1 | 114.30 | 0.00005 | 0.00005 | 0 |
| | L2 | 120.41 | 0 | 0 | 0 |

수평강도가 된다. 교각의 경우 허용기준의 분배가 없으므로 $H_p \geq P_s$ 를 만족하도록 해야 하며, 이때 연간과피빈도에서 과피확률은 0이 된다. 산정방법은 주탑의 경우 충격력으로부터 5MN씩 감소시켜 해를 찾는 시행착오법으로 하여 $AF_{calculate}$ 와 $AF_{allocate}$ 의 값이 일치되는 H_p 를 설계수평강도로 결정하였으며, 교각의 경우 P_s 를 설계수평강도로 사용하였다. 표 10~12는 50,000DWT 선박이 Case I에 대하여 주경간장이 500 m, 550 m, 600 m인 경우 설계수평강도를 산정하는 과정을 나타낸 것이며, 표 13~15는 동일한 선박에 대하여 주

표 12. Case I의 설계수평강도 산정과정(600m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 105 | 0.00005 | 0.0000464 | 7.1 |
| | L2 | 109.85 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | L1 | 100 | 0.00005 | 0.0000490 | 1.9 |
| | L2 | 109.85 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | L1 | 98.13 | 0.00005 | 0.00005 | 0 |
| | L2 | 109.85 | 0 | 0 | 0 |

표 13. Case II의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 비율 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 129.29 | 130.98 | 1:1.01 |
| 550 m | 114.30 | 111.96 | 1.02:1 |
| 600 m | 98.13 | 92.94 | 1.06:1 |

표 14. Case III의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 비율 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 129.29 | 130.98 | 1:1.01 |
| 550 m | 119.30 | 124.20 | 1:1.04 |
| 600 m | 108.47 | 117.28 | 1:1.08 |

표 15. Case IV의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 비율 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 129.29 | 130.98 | 1:1.01 |
| 550 m | 119.30 | 115.66 | 1.03:1 |
| 600 m | 108.47 | 100.02 | 1.08:1 |

표 16. Case I의 설계수평강도 산정과정(500m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 140 | 0.00005 | 0.0000438 | 12.4 |
| | L2 | 85.09 | - | 0.0000113 | - |
| 2 | L1 | 135 | 0.00005 | 0.0000467 | 6.6 |
| | L2 | 82.05 | - | 0.0000137 | - |
| 3 | L1 | 129.29 | 0.00005 | 0.00005 | 0 |
| | L2 | 78.58 | - | 0.0000146 | - |

표 17. Case I의 설계수평강도 산정과정(550m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 125 | 0.00005 | 0.0000441 | 11.8 |
| | L2 | 73.44 | - | 0.0000117 | - |
| 2 | L1 | 120 | 0.00005 | 0.0000469 | 6.3 |
| | L2 | 70.51 | - | 0.0000124 | - |
| 3 | L1 | 114.30 | 0.00005 | 0.00005 | 0 |
| | L2 | 67.16 | - | 0.0000132 | - |

경간장의 변화에 따른 설계수평강도의 변화를 Case별로 나타낸 값이다.

대부분의 결과치에서 교각의 설계수평강도가 오히려 주탑보다 더 높게 나타나는데, 이는 실제 교량 모델과는 상당한

표 18. Case I의 설계수평강도 산정과정(600m)

| 반복 횟수 | 부재 번호 | 수평 강도 | $AF_{allocate}$ | $AF_{calculate}$ | 차이 (%) |
|-------|-------|-------|-----------------|------------------|--------|
| 1 | L1 | 105 | 0.00005 | 0.0000464 | 7.1 |
| | L2 | 59.34 | - | 0.0000111 | - |
| 2 | L1 | 100 | 0.00005 | 0.0000490 | 1.9 |
| | L2 | 56.51 | - | 0.0000117 | - |
| 3 | L1 | 98.13 | 0.00005 | 0.00005 | 0 |
| | L2 | 55.46 | - | 0.0000120 | - |

표 19. Case II의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 충격력비 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 129.29 | 78.58 | 1.65:1 |
| 550 m | 114.30 | 62.44 | 1.83:1 |
| 600 m | 98.13 | 46.29 | 2.09:1 |

표 20. Case III의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 충격력비 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 129.29 | 78.58 | 1.65:1 |
| 550 m | 119.30 | 70.69 | 1.69:1 |
| 600 m | 108.47 | 62.48 | 1.74:1 |

표 21. Case IV의 설계수평강도 변화

| | 주탑(MN) | 교각(MN) | 충격력비 |
|-------|--------|--------|--------|
| 500 m | 129.29 | 78.58 | 1.65:1 |
| 550 m | 119.30 | 65.83 | 1.81:1 |
| 600 m | 108.47 | 53.29 | 2.04:1 |

차이가 있으며 교각의 설계수평강도는 과다설계로 볼 수 있다. 따라서 주탑과 교각의 합리적인 설계수평강도 산정을 위해 3.3.1절의 충격력비를 사용하여 경간장의 변화에 따른 설계수평강도의 변화를 재검토하였다. 산정방법은 주탑의 경우 위와 동일한 방법으로 하였으며, 교각의 경우 충격력비에 의한 감소율을 적용하여 설계수평강도를 산정하였다. 표 16~18은 주탑-교각의 충격력 비를 사용하여 설계수평강도를 산정하는 과정을 나타낸 것이며, 표 19~21은 주경간장의 변화에 따른 설계수평강도의 변화를 Case별로 나타낸 값이다. 또한, 그림 9, 10은 교량의 길이변화 CaseI~IV에 대한 주탑과 교각의 설계수평강도의 변화를 보여주고 있다.

위의 결과와 같이 주탑집중 분배모델에서 설계수평강도는

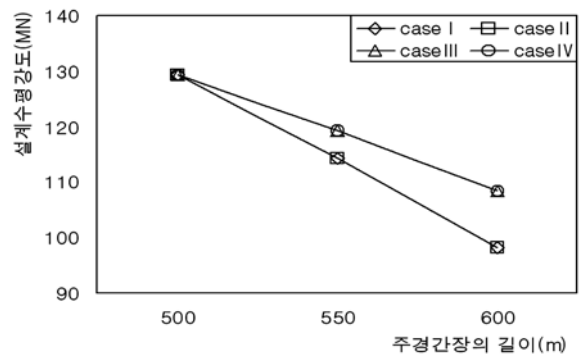


그림 9. 주탑의 설계수평강도 변화

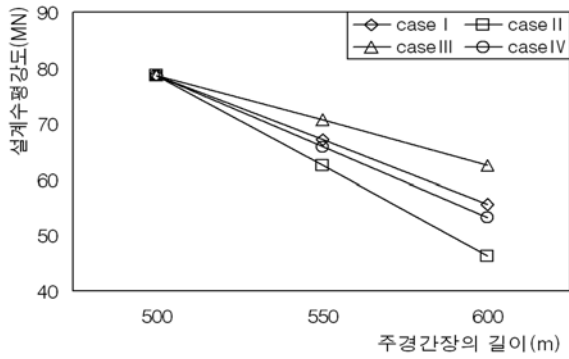


그림 10. 교각의 설계수평강도 변화

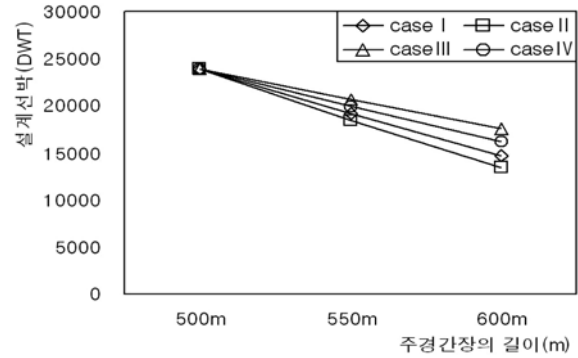


그림 11. AF분배모델의 설계선박 변화

주탑의 허용치가 0.00005가 되는 H_p 를 설계수평강도로 결정하였으며 AF분배모델과 동일하게 주경간이 길어짐에 따라 설계수평강도가 감소되는 것을 알 수 있다.

주탑집중 분배모델에서는 보조경간장에 대한 영향을 고려할 수 없으므로 CaseI과 CaseII, CaseIII와 CaseIV에서 각각 주탑의 설계수평강도가 동일하며 교각의 경우 충격력비의 변화로 인해 다른 값을 가지게 된다. 따라서 주탑집중 분배모델에서는 수로의 폭에 대한 영향만을 생각할 수 있는데, AF분배모델과 동일하게 수로의 폭을 일정수준에서 고정하는 것이 더 유리한 것으로 나타났다. 교각은 충격력비에 의한 감소율을 적용하는 경우 CaseII에서 가장 유리한 것으로 나타났다.

다음의 표 22는 주경간장의 길이변화에 따른 주탑의 설계수평강도의 변화와 분배모델에 따른 감소율을 나타낸 것이다. 설계수평강도의 차이는 허용과괴빈도의 차이에 의해 결정되며 해석예의 경우 주탑집중 분배모델이 AF분배모델의 86.9%정도의 값을 가진다. 주탑집중 분배모델에서 교각의 설계수평강도는 과다설계가 되지 않도록 한다면 전체적으로 AF모델에 비해 경제적인 설계를 할 수 있다.

3.4 주탑 및 교각의 설계선박 선정

합리적인 설계수평강도가 결정되면, 그 결과로부터 설계선

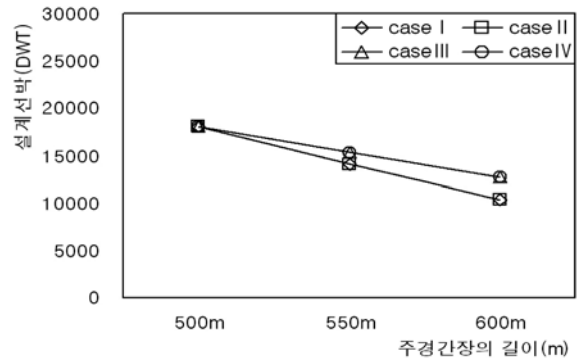


그림 12. 주탑집중 분배모델의 설계선박 변화

박을 선정할 수 있다. 설계선박은 해당부재의 설계수평강도를 충격력으로 가정하고, 설계속도를 적용하여 구하는 등가의 선박을 DWT로 나타낸 것으로 선박충돌해석 등의 상세해석에서 설계하중으로 사용한다. 교각 각각의 부재에 대하여 설계속도를 변수로 하기 때문에 동일한 설계수평강도를 사용하는 경우 부재별로 다른 DWT를 가지게 된다. 그러나 해석예로 사용된 교각에서는 L1, L2의 설계수평강도 산정시 충격력 비를 적용하였으므로 같은 설계속도의 변수를 가지게 되며, 설계선박의 크기 또한 거의 같다.

다음의 표 23은 주경간장의 길이변화에 따른 설계선박의

표 22. 주경간장의 변화에 따른 주탑의 설계수평강도 변화

| 분배모델 | 주경간장(m) | CaseI(MN) | CaseII(MN) | CaseIII(MN) | CaseIV(MN) |
|-----------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| AF분배모델 | 500 | 148.81 | 148.81 | 148.81 | 148.81 |
| | 550 | 133.27(89.6%) | 130.85(87.9%) | 138.59(93.1%) | 136.17(91.5%) |
| | 600 | 116.72(78.4%) | 111.81(75.1%) | 127.60(85.8%) | 122.71(82.5%) |
| 주탑집중 분배모델 | 500 | 129.29 | 129.29 | 129.29 | 129.29 |
| | 550 | 114.30(88.4%) | 114.30(88.4%) | 119.30(92.3%) | 119.30(92.3%) |
| | 600 | 98.13(72.6%) | 98.13(72.6%) | 108.47(83.9%) | 108.47(83.9%) |

표 23. 주경간장의 변화에 따른 설계선박의 변화

| 분배모델 | 주경간장(m) | CaseI(DWT) | CaseII(DWT) | CaseIII(DWT) | CaseIV(DWT) |
|-----------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| AF분배모델 | 500 | 23850 | 23850 | 23850 | 23850 |
| | 550 | 21130(88.6%) | 20400(85.4%) | 21860(91.7%) | 21110(88.5%) |
| | 600 | 18060(75.7%) | 16570(69.5%) | 19640(82.3%) | 18150(76.1%) |
| 주탑집중 분배모델 | 500 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 |
| | 550 | 15550(86.4%) | 15550(86.4%) | 16200(90.0%) | 16200(90.0%) |
| | 600 | 12760(70.9%) | 12760(70.9%) | 14180(78.8%) | 14180(78.8%) |

변화를 나타낸 것으로 설계선박의 차이는 주탑집중 분배모델이 AF분배모델의 75.5% 정도의 값을 가지며 각각의 분배모델에 대하여 수로의 폭을 고정하는 것이 일정비율로 늘어나는 것보다 유리하고, 보조경간장을 일정비율로 조정하는 것이 고정하는 것보다 유리하다는 것을 알 수 있다. 그림 11, 12는 분배모델에 따른 설계선박의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 교량 각 부재들의 연간 파괴빈도를 고려한 가중치를 이용하여 연간파괴빈도 허용기준을 분배할 때 여러 요인들이 미치는 영향을 검토하였다. 선박의 톤수가 커지면 교량전체 및 교각의 분배율은 커지는 반면 주탑에 대한 분배율은 적어지는 것을 알 수 있다. 한편, 수로가 교축방향과 직각에 접근할수록 주탑에 대한 분배율이 증가하는데 이는 기하학적 확률과 파괴확률이 선박 전체길이에 대한 함수로 나타나기 때문이다. 또한 교각과 주탑의 수평내하력이 클수록 주탑의 분배율이 커지는 것은 교각의 수평내하력이 교각의 선박충격력보다 크거나 거의 근접한 값을 가지기 때문에 발생하는 현상이며, 교각-주탑의 수평내하력 비율에 따라 서로 주탑의 연간파괴빈도 분배율이 크게 달라지고 있다.

선박충돌에 대한 교각의 설계수평강도는 선박충돌 위험도 평가로부터 예측된 연파괴빈도가 분배모델에 의해 결정된 허용기준을 만족하도록 비교하는 확률기반 해석과정을 통해 결정된다. 연간파괴빈도 허용기준 분배모델의 선택은 설계자의 판단에 근거한다. 한가지 방법은 선박충돌 설계강도를 보수적으로 산정하는 가중치를 고려한 AF분배모델, 그리고 교각의 설계강도를 선박충격력을 고려하여 합리적으로 산정할 경우 주탑 설계강도를 경제적으로 산정할 수 있는 주탑집중 분배모델 중에서 적절히 선택하는 것이다. 즉, 교량위치의 수심, 자연 혹은 인공의 방호물 등에 의해서 선박충돌의 위험이 있는 부재의 범위를 선택하고 해당 구조계에 의한 적절한 모델을 사용하는 것이다. 현수교를 해석으로 하는 수치해석 결과에 의하면 연간파괴빈도 허용기준 분배는 교량의 구조부재별 수평저항력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배모델을 만들 수 있다. 그리고 동일한 교량에 대해 주탑집중 분배모델을 적용할 때 주탑의 수평내하력이 AF분배모델을 적용할 경우보다 작게 평가되지만 교각의 수평내하력은 선박충격력에 의해 결정하는 것이 합리적이다.

분배모델에 의해 합리적인 설계수평강도를 구하고 설계선박 하중을 결정함으로써 교량의 선박충돌해석과 방호공 설치여부의 결정 등 선박충돌설계를 수행할 수 있다. 설계선박은 해당부재의 설계수평강도를 충격력으로 가정하고, 설계속도를 적용하여 구하는 등가의 선박이다. 해석 예제에서 교량

의 주경간장이 길어짐에 따라 구성부재의 설계수평강도 및 설계선박의 크기가 감소되며, 계 보조경간장의 폭은 일정비율로 조정하고, 수로의 폭은 고정시키는 경우 그렇지 않은 경우보다 감소폭이 더 크게 나타나고 있다. 또한, 선박통행량, 수로의 기하형상, 수심, 교각의 배치 등 설계선박의 결정에 영향을 주는 인자가 많으므로 이에 대한 추가의 연구도 필요하다.

이상에서 본 논문은 교각의 선박충돌 위험도를 고려하여 연간파괴빈도 허용기준 분배 방법을 제시하였고 각 교각의 선박충격력비를 수평저항력의 비율로 사용함으로써 교량의 연간파괴빈도 허용기준을 만족하는 최소의 선박 톤수를 결정하는 방안을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10144-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 도로교설계기준(2003) 건설교통부.
- 도로교표준시방서(1996)(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부.
- 이성로, 배용귀(2004) 교량의 선박충돌 위험 및 교각의 설계강도, 대한토목학회 정기 학술대회, Vol.4C, 강구조학회세미나, 대한토목학회, pp.79-88.
- 이성로,이병화,강성수(2004) 선박통행량에 따른 교량의 선박충돌 위험, 대한토목학회 정기 학술대회, (CD), 대한토목학회, pp.2014-2017.
- Nordic Committee for Structural Design (1987) Recommendations for Loading and Safety Regulations for Structural Design, NBK-Report No.55.
- Frandsen, A.G. and Langsoe, H. (1980) Ship Collision Problems: I. Great Belt Bridge and II. International Enquiry, *IABSE Periodica*, No.2.
- Larsen, O. Damgaard (1983) Ship Collision Risk Assessment for Bridges, *IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures*, Copenhagen.
- Fujii, Y. and Shiobara, R. (1978) The Estimation of Losses Resulting from Marine Accidents, *Journal of Navigation*, Vol.31.
- AASHTO (1991) *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, February.
- Knott, M.A. and Larsen O. Damgaard (1990) *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publ. No. FHWA-RD-91-006.
- Frandsen, A.G., Olsen, D., Fujii, Y. and Spangenberg, S. (1991) Ship Collision Studies for the Great Belt East Bridge, *IABSE Symposium on Bridges-Interaction between Construction Technology and Design*, Leningrad, Denmark.

(접수일:2004.11.11/심사일:2005.10.31/심사완료일:2005.10.31)