

방호공을 고려한 선박의 충돌하중

The vessel collision load on bridge with fender system

이계희*
Lee, GyeHee

고재용†
Ko, JaeYong

이성로‡
Lee, SeongLo

ABSTRACT

In this study, the impact load on bridge by vessel collision in consideration of fender system is evaluated by numerical method. The bow of object vessel(DWT5000) is standardized, and modeled by shell elements. The main body of objective vessel is modeled by beam elements that present mass distribution and stiffness of vessel. The buoyancy effect of vessel is considered as linear spring.

The two types of fender systems, such as steel and rubber are analyzed in this study. In steel fender system, the steel plates that absorb collision energy by its collapse are modeled by shell element with stiffener. The steel is material modeled elastic-plastic material. In the rubber fender system, the rubber material is modeled hyper-elastic material and the main body of fender is modeled by solid elements.

The global impact responses of vessel and fender system are evaluated by explicit dynamic scheme. The results show that the magnitude of vessel collision force are depended on the material behavior of fender system. Also the values of collision load are conservative compare to the those of design codes.

1. 서론

최근의 서해안권과 연안개발의 증가와 더불어 선박이 통항하는 항로를 가로질러 교량을 건설해야 하는 연육교나 연도교 등의 가설의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 통항선박에 대한 교량의 안전성 확

*목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수, 공학박사

†목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수, 공학박사

‡목포대학교 건축조경토목학부 교수, 공학박사

보문제가 중요해지고 있다. 현재 국내의 설계기준은 외국의 기준을 준용하고 있는 것이 현실이며 우리나라의 현실을 반영한 설계기준은 미미한 형편이다.^{1,2}

세계적으로는 선박충돌과 관련된 많은 연구는 주로 선박과 선박과의 충돌이나 선박의 좌초 등을 주요 연구대상으로 하고 있으며 선박과 교량구조물과의 충돌에 대해서는 상대적으로 연구가 적은 편이다. 1960년 이래 25년 이상 교량설계시 선박 충돌하중 미고려, 교량의 부적절한 선박통과 소요폭 등의 요인으로 선박충돌 사고가 많이 발생하였다⁶. 이러한 사고들로 인해 항로를 가로지르는 교량의 안전성 확보에 관심이 모아지게 되었고 여러 나라에서 기존 교량의 취약성 평가, 신설 교량에 대한 설계기준 정립, 선박충돌에 대한 규약의 제정에 노력하였고 이러한 노력을 바탕으로 미국의 연방고속도로국은 1988년 최초로 시방서에 이를 도입해야 한다는 결론을 내리고 1991년에 선박과 교량의 충돌에 대한 시방서를 제시하였다.⁷ 그러나 아직도 선박충돌하중에 대해서는 많은 논의가 그치지 않고 있으며 이 시방서의 개정을 위하여 실선박 충돌실험을 포함한 많은 추가적인 연구가 진행되고 있다.⁵

충돌방호공의 설계는 대부분 교량의 붕괴를 일으키는 대형충돌사고가 아니라 선박충돌시 교량의 안정성에는 문제가 없는 비교적 소형의 충돌사고에 대해서 설계가 이루어진다. 그러나 기존의 연구결과에서 제시하고 있는 충돌력들의 식은 대형의 선박충돌을 가정한 것이 대부분으로 고정된 벽에 충돌을 가정하거나 강제충돌을 가정하여 얻어진 식이 대부분이다. 이러한 조건에서 얻어진 충돌력은 선박의 운동에너지를 짧은 충돌시간과 변위에서 교량에 전달하기 때문에 보수적인 충돌력이 산정된다. 그러나 실제 소형 충돌사고에 있어서 충돌력은 방호공을 통하여 교량으로 전달되며 따라서 방호공의 강제벽에 대한 충돌에 비해 큰 충돌변위와 시간을 가짐으로 상대적으로 작은 충돌력을 보인다. 이런 점은 또한 방호공의 거동에 따라 다른 충돌력을 보일 수 있다는 점을 시사한다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 방호공을 고려한 선박의 충돌해석을 수행하므로써 작은 충돌사고에서 발생하는 선박과 교량의 충돌력을 분석하고 대상선박의 충돌시 방호공의 거동특성에 따른 충돌력의 특성을 평가하고자 한다.

2. 대상구조물의 모델링

2.1 선박의 모델링

선박의 충돌시 발생하는 운동에너지는 선수의 압괴, 부력에 대한 위치에너지의 변화 및 방호공의 변형 등으로 전환된다. 본 연구에서는 이러한 에너지의 변환과정을 원활하게 모사하기 위하여 선박의 각 부분을 적절히 모델링 하였다. 본 연구에서 다룬 선박의 크기는 DWT5000으로 크기로 개략적인 크기는 선체길이 100m, 선폭14m, 높이 8m정도의 크기이다.

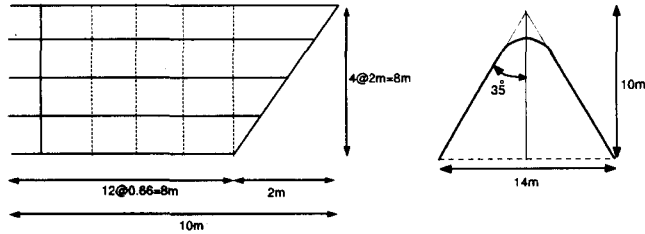


그림 1: 해석에 사용된 표준선수 형상

2.1.1 선수의 모델링

실제 선박의 선수부는 운항시 유체의 저항력을 최소로 하고 그 하중을 견디도록 설계되기 때문에 유선형의 부드러운 곡선으로 설계되며 충분한 보강재로 보강되어 있다. 이러한 선수의 정확한 형상은 선박의 특성에 따라 다양한 형상을 가지고 있다. 이러한 점에서 일반적인 선박의 선수를 나타내는 표준적인 선수모델의 사용이 요구된다. 본 연구에서는 일본에서 제안된³ 선수모델을 이러한 표준적인 선수모델의 하나로 사용하였다. 이 모델에서는 선박의 종류와 크기에 따라 선수의 형상과 보강재의 간격 외 판의 두께등의 제원을 제시한다. 이러한 표준선수의 형상은 그림 1에 나타내었다. 이와 같은 표준 선수 모델은 shell요소로 모델링되었으며 재료는 소성재료로 가정하였다.

2.1.2 선박본체의 모델링

충돌시 선박의 변형에 의한 운동에너지의 흡수는 선수부분에 집중되므로 선박의 본체부분은 이러한 변형이 발생하지 않는 것으로 가정하여 선박의 질량특성을 나타낼 수 있도록 탄성재료를 갖는 보요소로 간략히 모델링하였다.

선박의 방호공에 충돌한 경우 선체하중의 일부가 방호공에 의해서 지지되며 이에 따라 선체의 부력이 변화하게 된다. 이러한 부력의 변화에 의한 위치에너지의 변화도 충돌에 의한 운동에너지의 일부분을 흡수하므로 선체본체에 부력을 나타내는 스프링요소를 부착하여 이러한 위치에너지의 변화를 알수 있게 하였다. 부력을 나타내는 스프링요소는 다음과 같은 방법으로 산정하였다.(그림 2)

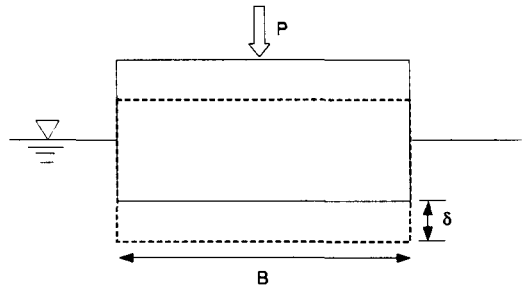


그림 2: 부력스프링의 산정

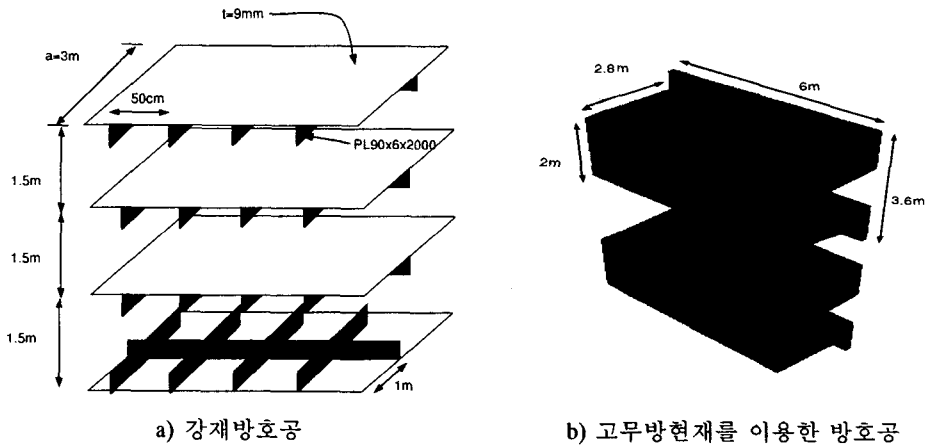


그림 3: 해석에 사용된 방호공의 개요

$$k_b = \frac{P}{\delta} = \gamma_w B \quad (1)$$

여기서 k_b 는 부력스프링, γ_w 는 해수의 단위중량이다. 본 연구에서 사용된 선박의 모델에 있어서 이러한 부력스프링의 탄성값은 14.42Ton/m^2 으로 계산되었다.

이때 스프링요소의 지점을 고정점으로하면 선박의 진행이 따른 스프링의 변형이 부력스프링의 응답에 영향을 미치지므로 상하자유도는 고정되고 선박의 진행방향으로는 선박의 본체와 동일한 자유도를 가진 추가절점에 스프링을 고정시켜 모델링 하였다.

2.2 방호공의 모델링

본 연구에서 고려한 방호공은 수평판의 좌굴에 의해 에너지를 흡수하는 강재방호공과 고무방현재를 이용한 고무재 방호공이다. 다음 절에서 두 방호공의 개요를 소개하였다.

2.2.1 강재방호공

이 방호공은 수평판의 좌굴에 의하여 선박의 충돌에너지를 흡수하도록 되어 있다.(그림 3a)) 이 방호공은 흡수할 수 있는 충돌에너지가 수평판의 수에 의하여 조절될수 있고 비교적 큰 충돌에너지를 흡수할 수 있다.

해석에 있어서 이 방호공의 평판부분은 쉘요소로 모델링되었으며 종방향보강재 역시 동일하게 셀

요소로 모델링되었다. 재료모델은 탄소성으로 가정하였다. 방호공과 교각이 만나는 부분은 고정지점으로 경계조건을 부여했다.

2.2.2 고무방현재를 이용한 방호공

고무 방현재는 원래 선박의 접안시 안벽과의 접촉이나 마찰에 의한 파손을 줄이기위해 장치이다. 현재 대규모 선박의 충돌을 고려할 필요가 없는 교량의 방호공으로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 시판되는 제품중 에너지 흡수능력이 가장 큰 제품을 선택하여 해석을 수행하였다. 고무방현재의 모델링은 고체요소를 이용해 모델링하였으며(그림 3b)) 고무재료의 거동은 초탄성재료를 가정하였다.

3. 방호공을 고려한 선박의 충돌해석

3.1 비선형 충돌해석

전장에서 작성된 해석모델을 이용하여 선박의 충돌해석을 수행하였다. 선박은 선수부로 직각 충돌을 한다고 가정하였다. 이 때 방호공과 선박사이의 마찰계수는 강제방호공의 경우 0.15, 고무방호공의 경우 0.9의 마찰계수를 가정하였다. 선박의 충돌속도는 1.32m/sec(= 2.6 knots)로 가정하였다.

충돌해석의 경우 각 부재는 소성변형을 포함한 대변형을 일으키며 운동체의 운동에너지를 정지물체와의 접촉의 의해 전달한다. 따라서 이렇게 비선형성이 큰 동적문제의 해석에 적합한 explicit 프로그램을 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 ABAQUS⁴를 이용하여 이러한 구조해석을 수행하였다.

3.2 충돌력의 산정

3.2.1 기존 계산식에 의한 설계충돌력

AASHTO방법⁷ 이 방법은 Woison의 선박충돌시험에 기초한 방법으로 다양한 크기의 선수모형과 선박의 충돌시험을 통해 실험식을 제안하였다. AASHTO에서는 이 방법을 적절한 단위 환산을 통해 다음과 같이 제시하였다.

$$P_s = 220\sqrt{DWT} \frac{V_{im}}{27} \quad (2)$$

여기서 DWT 는 설계선박의 재하중량톤(=5000), V_{im} 는 충돌속도(= 1.32 m/sec)를 각각 의미한다. 이식에 의해 계산된 대상선박의 충돌력은 약 1100Ton이다.

위과 같은 AASHTO식에 의해 제시된 충돌력은 평균적인 충돌력을 의미한다.

Pedersen의 방법⁸ 1993년 Pedersen은 수치해석결과와 기존의 실험결과들을 종합하여 다음과 같은 충돌력에 관한 경험식을 제안하였다. 이 식들은 DWT500□300000범위의 선박에 적용할 수 있도록 하였으며 충돌시 발생하는 최대충돌력을 산정한다. 다음은 Pedersen이 제안한 충돌력의 식이다.

$$P_{bow} = P_o \cdot [EL^2 + (5.0 - l)L^{2.6}]^{1/2} \text{ for } E \geq L^{2.6} \quad (3)$$

$$P_{bow} = P_o \cdot [5.0EL]^{1/2} \text{ for } E < L^{2.6}$$

여기서 P_{bow} 는 최대 선수충돌하중, P_o 는 참조충돌하중(=210MN), $L = L_{pp}/275m$, $E = E_{imp}/1425MN$, L_{pp} 은 선박길이, E_{imp} 는 선박의 운동에너지를 각각 의미한다. 이 식의 의해 얻어진 대상선박의 충돌력은 약1800Ton이다. 이 값은 앞에서 언급한 바와 같이 최대 충돌력의 값이다.

일본 설계 기준에 의한 방법³ 일본의 본주사국기준에서 제안된 식으로 강재방호공의 설계에 사용되는 식이다. 이 식은 앞의 두식과는 다르게 강체에 대한 충돌이 아니라 방호공에 대한 충돌을 가정한 것이다. 따라서 실제 설계에서는 선수부의 좌굴하중과 방호공의 좌굴하중을 비교하여 작은 값을 좌굴하중으로 사용한다. 다음은 본주사국기준에서 제안한 선수의 충돌하중이다.

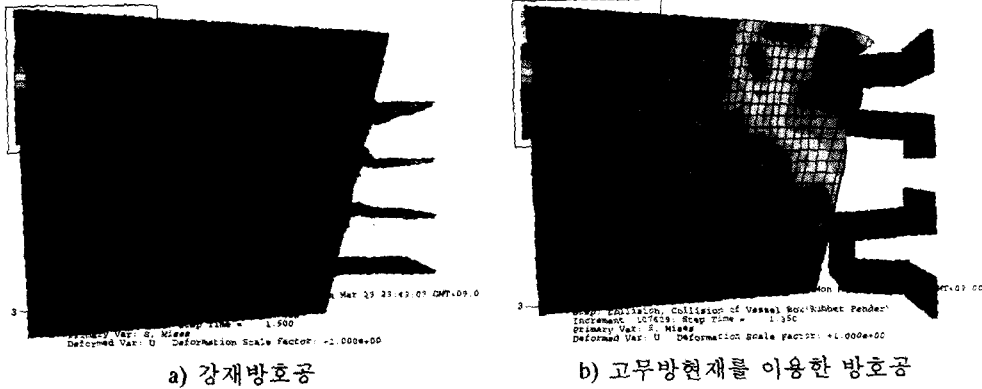
$$P_{crs} = 2Dt \cos(\theta) \sigma_{crs} \quad (4)$$

여기서 P_{crs} 는 선수충돌하중, D 는 선수높이, θ 는 0선수각 σ_{crs} 은 선수의 좌굴응력을 나타낸다. 이와 유사하게 방호공의 충돌하중은 수평판의 좌굴응력과 돌입길이의 함수로 나타난다. 본 연구의 대상선박과 방호공에 대하여 이 식을 적용한 경우 약 각각 1270Ton와 890Ton의 충돌력이 발생하는 것으로 계산되었다.

3.2.2 해석결과 얻어진 충돌력

해석결과 얻어진 방호공의 변형형상은 그림 4과 같다. 이 그림에서 각 방호공은 충돌에너지를 흡수하여 변형을 일으키고 있다. 다만 고무방호공의 경우 선수의 좌굴이 상당히 발생하는 것을 볼 수 있다.

충돌시 발생하는 충돌력은 방호공의 지점반력의 합으로 알 수 있다. 이러한 지점반력의 시간이력을 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 탄성변형을 하는 고무방호공의 경우, 소성변형을 일으키는 강재방호공에 비해 2배이상의 충돌력을 보인다. 또한 최대 반력의 발생시점도 강재방호공의 경우 보다 빨리 나타난후 급속히 충돌력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 강재방호공에 발생하는 반력은 각 수평판이 좌굴을 일으키는 시점에서 부분적인 침투값을 보이며 지속적으로 증가함을 볼 수 있다. 충돌의



a) 강재방호공

b) 고무방현재를 이용한 방호공

그림 4: 방호공의 최대변형형상

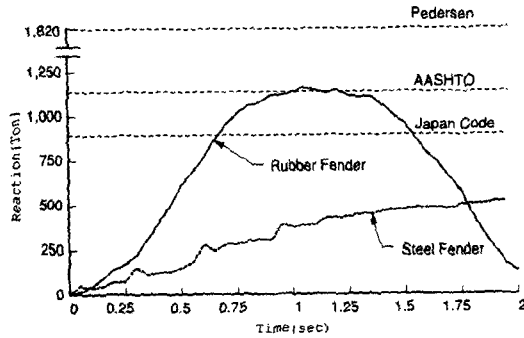


그림 5: 방호공 충돌력의 시간이력

후반부에서는 이러한 반력값이 일정한 값에 수렴하여 급속한 변화가 일어나지 않는 현상을 보여주고 있다.

이들 충돌력의 값과 설계기준에서 제시된 값을 비교하여 보면 AASHTO의 값과 비슷한 값을 보이지만 강재방호공의 경우에는 AASHTO나 Pedersen의 경우는 물론 방호공의 좌굴거동에 대한 반력인 일본시방에 비해서도 상당히 작은 값을 보인다. 이 점은 설계기준에 포함된 보수적인 가정이 실제상황보다 지나치게 큰 설계충돌력을 요구하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 방호공과 선박의 비선형 거동과 충돌시 발생하는 에너지 소산 메카니즘을 고려하여 선박과 방호공의 충돌시스템을 모델링하고 이 때 얻어진 충돌력을 설계기준중에 제시된 충돌력과 비교하였다. 그 결과 방호공을 고려한 경우 교량이 미치는 선박의 충돌력은 방호공의 거동 특성에 따라 매우 큰 차이를 보이며 기존의 설계식들은 대체적으로 방호공을 고려한 경우보다 큰 충돌력을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 경제적인 방호공의 설계를 위해 앞으로 다양한 충돌조건에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(R01-2003-000-10144-0)의 지원에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 도로교표준시방서(부록: 하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003.
3. 多室型緩衝公の設計要領(案),本州四國連絡橋公園, 1980
4. *ABAQUS User's Guide*, HKC Inc., 2002
5. G. R. Consolazio, R. A. Cook, *Barge impact test of the S.T. George island causeway bridge Phase I : Feasibility study*, Depart of civil & coastal engineering, University of Florida, 2002
6. Frandsen, A.G. and Langsoe, H., *Ship Collision Problems: I. Great Belt Bridge and II. International Enquiry*, *IABSE Periodica* No.2, 1980.
7. *Guide Specification and Commentary for Vesse Collision Design of Highway Bridges*, AASHTO, 1991
8. Pedersen, P.T., "Ship impact: Bow collision". *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 13, No.2, pp163-187, 1993.
9. US National Research Council, *Ship Collisions with Bridges. The Nature of the Accidents, Their Prevention and Mitigation*, National Academy Press, Washington D.C., 1983.