

구조물의 선박충돌 해석

Ship Collision Analysis of Structure

이성로* 배용귀**

Lee, Seong Lo Bae, Yong Gwi

Abstract

A ship collision analysis by finite element method is performed considering the effects of mass and speed of ship and material and shape of structures to analyze the dynamic characteristics by ship collision. From this analysis, collision load-time history and inelastic deformation of ship and structures are obtained. Dynamic characteristics are different from each other according to interaction between ship and structures. It seems that there are lots of factor to have effects on the ship-structures interaction. But because little information is available on the behavior of the inelastic deformation of materials and structures during the type of dynamic impacts associated with vessel impact, assumptions based on experience and sound engineering practice should be substituted. Therefore more researches on the interaction between ship and structures are required.

1. 서론

우리나라는 성수대교 붕괴사고와 같은 교량 붕괴사고가 있었지만 아직 선박충돌에 의한 붕괴사고는 발생하지 않았다. 그러나 미국 등 내륙수로가 발달한 나라와 해협이 많은 유럽 등지에서 바지선이나 선박의 충돌에 의한 교량붕괴사고들이 있었다. 특히, 1980년 미국의 플로리다 주에서 발생한 Sunshine Skyway Bridge 붕괴사고와 2004년 오클라호마 주에서 발생한 I-40 Webbers Falls Bridge 붕괴사고는 대표적인 사례이다.

도로교 설계기준(2003)상의 충돌하중에 관하여는 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하여야 한다고 명시되어 있다. 그러나 선박충돌을 고려하여 교량을 설계하는 일은 흔히 있는 문제가 아니다. 미국에서는 AASHTO LRFD 설계기준에서 Method I, Method II, Method III의 세 가지 설계 방법에 의하여 교량이 적절히 보호되도록 하고 있으며, 일본에서는 본주사국 연락교 공단의 복합재형 완충공 설계요령에서 선수부의 형상 및 치수 등을 중심으로 기술하고 있다. 유럽에서는 덴마크 Great Belt Bridge와 관련되어 수행된 Pedersen의 연구가 대표적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 ABAQUS/Explicit를 이용하여 비교적 작은 선박과 교량 혹은 해안구조물과의 충돌 해석을 수행하였다. 특히, 동일한 선박에 대하여 질량 및 속도에 의한 변화와 대상구조물의 형상 및 물성치의 변화에 따른 하중재하형태, 하중지속시간, 선박손상정도 등의 관계를 AASHTO LRFD 및 Pedersen 방법과 비교·검토하였다.

2. 해석 모델

2.1 선박의 모델링

US Guide Specification(1991)에서는 선박의 종류와 DWT에 따른 일반적인 제원과 형태를 비교적 자세하게 설명하고 있으며, 일본 본주사국 연락교 공단의 복합재형 완충공 설계요령에서는 4,000GT 이하의 선박에 대한 일반제원 및 선수부의 표준치수를 상세하게 설명하고 있다. 따라서 본 연구에서는 4,000GT 선박에 대한 선수 모델링을 실시하였으며 선박제원이 비교적 비슷한 5,000DWT 선박과 비

*정회원, 목포대학교 건축조경토목공학부 토목공학전공 교수, E-mail : sllee@mokpo.ac.kr

**정회원, 목포대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

교·검토 하였다. 4000GT 선박의 전체길이는 100m이며, 선수부의 표준치수는 선박의 길이에 대한 함수로써 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3은 유한요소로 모델링된 선수부를 나타내고 있다.

표 1. 선수부의 표준치수 및 선박제원

| | 기호 | 표준치수 | 4,000GT |
|------------|-----------|----------------------|------------|
| 선체 폭(m) | B | $L/10 + 3.81$ | 13.8 |
| 선박길이(m) | D | $0.08L$ | 8.0 |
| 선수격벽위치(m) | L_{cut} | $0.1L$ | 10.0 |
| 선수부경사폭(m) | L_{SF} | $0.25 \cdot D$ | 2.0 |
| 프레임간격(mm) | a | 610 | 600 |
| 중통재 간격(mm) | b | $3 \cdot S$ | 2000 |
| 외판두께(mm) | t | $0.82\sqrt{L} + 2.5$ | 11 |
| 선수부각도(°) | 2θ | $35 \sim 70^\circ$ | 70° |

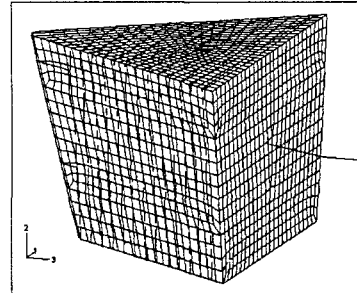


그림 3. 선수부의 유한요소 모델링

2.2 구조물의 모델링

구조물에 대한 선박의 충돌은 보호시설이 없는 교각 혹은 접안시설에 대한 충돌과 방충재 등의 보호구조물에 대한 충돌을 생각할 수 있다. 먼저, 보호시설이 없는 상태는 무한 강성의 벽체에 대한 선수 충돌로써 1500mm×900mm 단면의 Discrete Rigid 요소를 사용하여 대부분의 에너지가 선수변형에 의해 소산되도록 하였다. 보호구조물에 대한 충돌은 재료에 따라 고무, 콘크리트 강철방충재를 그림 4~6과 같이 모델링하였다.

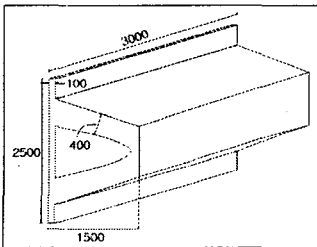


그림 4. 고무 방충재

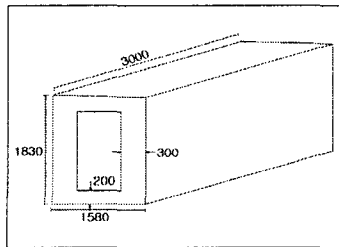


그림 5. 콘크리트 방충재

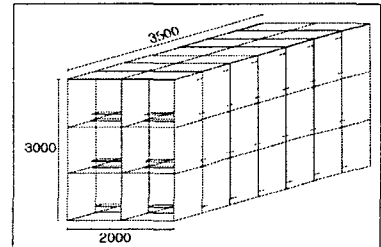


그림 6. 강철 방충재

2.3 재료 모델링

해석에 사용된 선박의 강재는 표 2와 같이 소성거동을 하는 재료로 모델링 되었다. 그 밖의 선형거동은 일반적인 구조용 강재로 포아슨비 $\nu = 0.3$ 탄성계수 $E_S = 2.07 \times 10^{11} Pa$ 의 값을 사용하였다. 고무 방충재는 Mooney-Rivlin Model의 변형에너지에 대한 계수로 $C_{10} = 3.2 \times 10^6 Pa$, $C_{01} = 8 \times 10^5 Pa$ 의 초탄성거동을 보이는 Solid요소로 설계하였으며, 콘크리트 방충재는 탄성계수 $E_S = 2.2 \times 10^{10} Pa$, 포아슨비 $\nu = 0.17$ 의 탄성거동을 보이는 Solid요소로 설계하였다. 강철방충재는 선박과 동일한 소성거동을 가지는 Shell요소와 탄성거동의 Frame요소로 설계하였으며, 외판의 두께는 7mm로 하였다.

표 2 강재의 소성거동

| 응력(Pa) | 소성변형률 |
|---------------------|-------|
| 1.904×10^8 | 0 |
| 1.957×10^8 | 0.015 |
| 2.236×10^8 | 0.033 |
| 2.318×10^8 | 0.044 |
| 2.424×10^8 | 0.062 |
| 2.450×10^8 | 1.5 |

3. 구조해석 및 검토

3.1 선박의 질량과 속도에 의한 결과 및 검토

선박의 질량과 속도에 의한 구조해석은 AASHTO LRFD 및 Pedersen의 경험식과 비교하기 위하여

충돌에너지의 대부분이 선수변형에 의해 소산되는 강성충돌로 정의하였다. 선박의 질량은 4000GT 선박과 제원이 비교적 비슷한 5000DWT 선박의 배수톤수를 이용하여 2600ton~6800ton로 분류하고, 해당구간을 4등분하여 선박의 질량에 따른 동적특성의 변화를 조사하였다. 그림 7은 시간에 따른 하중의 형상을 나타낸 것으로 질량에 따른 크기의 변화는 있으나 형상은 대체로 유사하다. 그림 8은 해석결과를 AASHTO LRFD 및 Pedersen의 경험식과 비교한 것으로, 배수톤수에 따른 최대충격력은 AASHTO LRFD의 경우 최대충격력이 DWT와 속도에 대한 함수로 표현되므로 선박의 질량에 관계없이 동일하며 만재상태에서 해석결과와 거의 유사한 값을 가진다. Pedersen의 경험식에서는 최대충격력을 선박의 질량, 제원 그리고 속도에 의한 함수로 표현되므로 더 합리적이라 할 수 있으나 해석결과에 비하면 다소 과대평가된 경향이 있다.

화물을 실지 않은 5000DWT 선박의 질량은 2600ton으로 운항속도를 4~7m/s(7.8~13.6knot)로 하였으며, 만재상태는 질량을 6800ton으로 하고, 운항속도를 1~4m/s(1.9~7.8knot)로 하여 속도에 따른 변화를 조사하였다. 그림 9는 화물을 실지 않은 경우 시간에 따른 하중의 형상을 나타낸 것으로 4~6m/s는 사인곡선과 유사한 형상을 가지며, 7m/s는 사다리꼴과 유사한 형상을 가지고 있다. 그림 10은 해석결과를 AASHTO LRFD 및 Pedersen의 경험식과 비교한 것으로, AASHTO LRFD에서는 질량의 상태를 정확하게 표현하지 못하고 있으며, Pedersen의 경험식에서는 과대평가된 경향이 있다. 그림 11은 만재상태인 경우 시간에 따른 하중의 형상을 나타낸 것으로 대체로 비슷한 형상을 가지고 있으나 2m/s 이하의 충격력은 충돌초기 낮은 충격력이 일정정도 지속되며 속도가 낮을수록 지속시간이 길어진다. 그림 12는 해석결과를 AASHTO LRFD 및 Pedersen의 경험식과 비교한 것으로, 만재상태에서

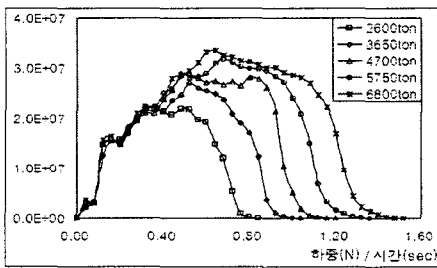


그림 7. 배수톤수에 따른 하중의 형상

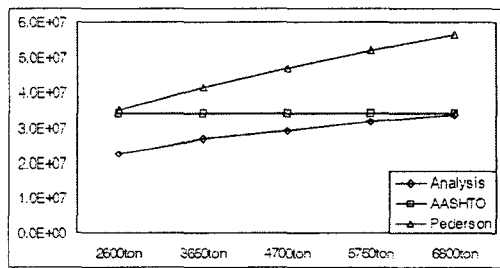


그림 8 배수톤수에 따른 최대충격력 비교

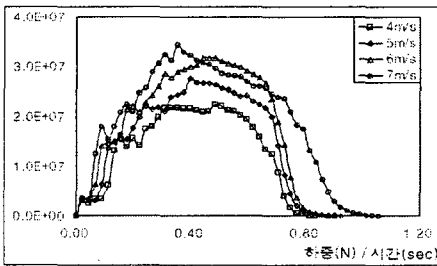


그림 9. 공선상태의 속도에 따른 하중의 형상

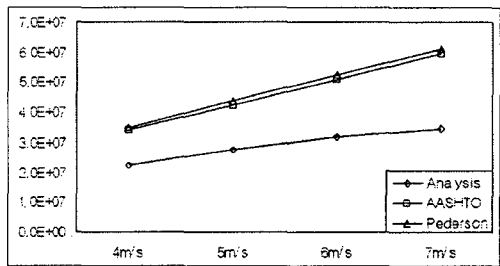


그림 10 공선상태의 속도에 따른 최대충격력 비교

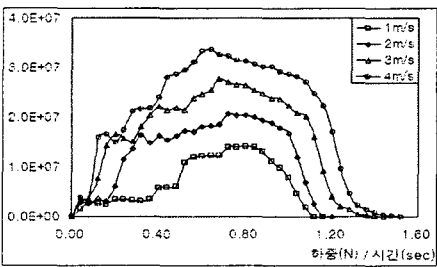


그림 11. 만재상태의 속도에 따른 하중의 형상

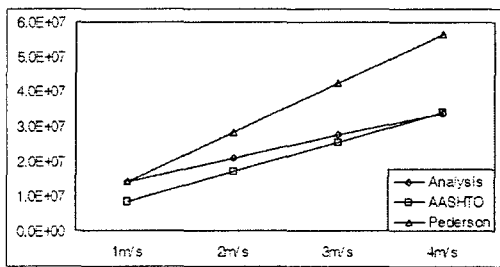


그림 12 만재상태의 속도에 따른 최대충격력 비교

최대충격력은 AASHTO LRFD와 Pedersen의 경험식에 의한 결과 사이에 분포하고 있으나, 속도에 따른 최대충격력의 변화율은 다소 낮은 것을 알 수 있다.

3.2 구조물의 재료와 형상에 의한 결과 및 검토

구조물의 재료 및 형상에 따른 충돌은 연성충돌로 정의할 수 있으며 충돌에 따른 운동에너지가 일부는 선박 자체의 탄·소성 변형에 의해, 일부는 구조물의 탄·소성 변형에 의해 흡수된다. 그림 13은 대상구조물의 시간에 따른 하중의 형상을 나타내고 있으며, 그림 14는 하중-변위 곡선으로 선수변형에 의해 소산되는 에너지를 나타낸 것이다. 탄성거동의 콘크리트방충체는 비교적 강성한 물체이므로 Rigid-Wall과 거의 동일한 거동을 보이며, 충돌에너지의 대부분이 선수변형에 의해 소산된다. 소성거동을 정의한 강철방충체는 충돌에너지의 약 1/3정도가 선수변형에 의해 소산되며, 초탄성거동의 고무방충체는 구조물의 에너지흡수율이 높아 선수변형에 의한 에너지 소산이 거의 없다.

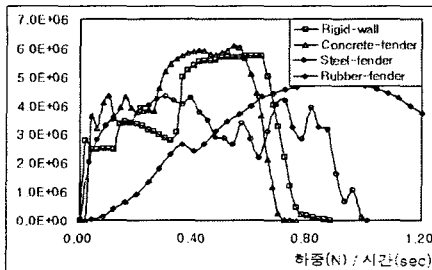


그림 13. 대상구조물에 따른 하중의 형상

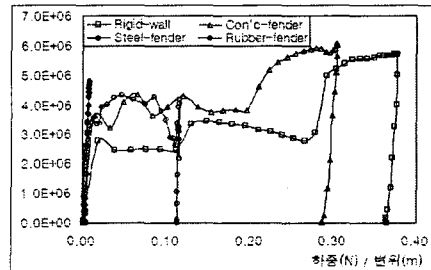


그림 14. 대상구조물에 따른 하중-변위 곡선

4. 결론

선박충돌시 발생하는 동적 특성들의 변화를 주는 요인은 크게 선박에 의한 요인과 대상구조물에 의한 요인으로 분류할 수 있다. 연구결과에 의하면, 선박의 질량 및 속도는 하중재하형태, 하중지속시간, 선수손상정도 등의 충돌특성을 결정짓는 주요한 요인이며, 대상구조물의 재료 및 형상에 따라 서로 다른 형태로 나타난다. AASHTO LRFD에서는 선박의 등가정적 충돌하중을 DWT와 속도에 의한 함수로 표현하고 있어 선박의 재하상태에 따른 질량이 고려되지 않았으나, 만재상태에서는 대체로 유사한 결과를 보였다. Pedersen의 경험식에서는 충격력을 선박의 제원, 질량 그리고 속도에 의한 함수로 표현하고 있어 AASHTO LRFD보다 합리적이라 할 수 있다. 그러나 Pedersen의 경험식은 최대충돌하중을 사용한 것으로 해석결과에 비하여 다소 과대평가되는 경향이 있다. 선박충돌시 동적 특성들의 변화를 상세하게 조사하기 위하여 선수 형태나 보호공의 종류를 포함하는 다양한 조건에 의한 분석이 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003.
2. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
3. 複合材型緩衝工の設計要領(案), 本州四國連絡橋公團, 1981.
4. AASHTO, Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, February, 1991.
5. Larsen, O. Damgaard, "Ship Collision with Bridges", The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, IABSE, 1993.