

선박충돌에 의한 선박과 방호공의 에너지 소산 메카니즘

The energy dissipation mechanism of ship and fender system by vessel collision

홍관영* 이계희** 고재용*** 이성로****
Hong, Kwan-Young Lee, Gye-Hee Ko, Jae-Yong Lee, Seong Lo

ABSTRACT

Recently, the collision problems between a bridge and a navigating ship are frequently issued at the stage of structure design. Even the many study results about vessel to vessel collision are presented, but the collision studies between vessel and bridge structure have been hardly presented.

In this study, nonlinear dynamic analysis of vessel and fender system carry out using *ABAQUS/Explicit* commercial program with consideration of some parameters, such as bow structure are composed to shell element also ship's hull is modeling to beam element. Also, buoyancy effect is considered as spring element. The two types of fender systems was comparable with both collision analysis about steel materials fender system and rubber fender system.

On the purpose of study is analyzed the plasticity dissipated energy of vessel and fender system. We know characteristic that kinetic energy is disappeared by plastic large deformation in case of collision. Also, We considered dissipated kinetic energy considering friction effect.

1. 서 론

최근 우리나라에서는 서해안을 중심으로 육지와 섬을 잇는 연륙교, 섬과 섬을 잇는 연도교 공사가 계획 또는 진행되고 있어 선박과의 충돌에 대한 가능성이 증가하고 있다. 하지만 선박충돌에 관한 연구는 주로 선박과 선박의 충돌, 선박의 좌초에 대해서 많은 연구가 이루어져, 상대적으로 선박과 교량구조물과의 충돌에 대한 연구는 적은 편이다.⁽¹⁾

한편, 우리나라 도로교 설계기준(2003)에는 충돌하중에 대해 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하도록 명시되어 있다. 여기서 선박의 충돌의 경우 하구에 가까운 항만구역의 일부나 바다에 건설되는 교각의 경우 대형 강철선의 충돌이 예상되기 때문에, 이 경우 선박의 영향을 설계에 고려하도록 하고 있다.

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 석사과정

** 정회원 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

*** 정회원 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

**** 정회원 · 목포대학교 건축조경토목공학부 교수

통상적으로 선박의 운항속도는 항계내, 항계외로 나뉘어 항계내 구역에서는 안전속도로 운항하도록 하고 있는데, 이 안전속도는 보통 최대운항속도의 1/2로 하고 있지만, 선박이 교각에 충돌하는 경우는 기상의 악조건에서 방향타를 잘못 잡는 경우나, 기관에 고장을 일으켜 표류하는 경우 등에서 주로 발생하며, 순항속도에서는 충돌이 거의 없기 때문에 충분히 조사하여 충돌하중을 정해야 한다고 명시되어 있다.⁽²⁾⁽³⁾

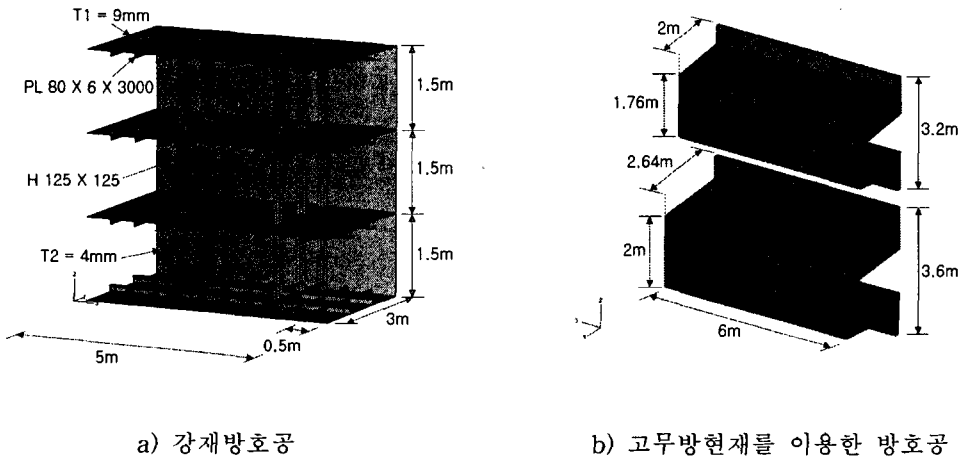
선박의 충돌로부터 교각을 보호하기 위해서 돌핀(Dolphin), 우물통, 케이슨, 섬식, 말뚝지지(Pile), 강널말뚝 사용 후 충돌 방지공으로 영구사용, 주탑 기초부분에 방호공(Fender) 설치 등 다양한 충돌 방지공들이 개발되었는데, 이러한 충돌 방지공들은 선박의 충돌 시 선박의 운동에너지를 주로 구조물의 소성변형과 충돌면에서의 마찰로 에너지를 소산하게 되며, 각 충돌 방지공에 따라 선박과 구조물의 손상정도는 다르게 평가된다. 본 연구에서는 주탑 기초부분에 설치된 방호공(Fender)에서 고무방현재를 고려한 방호공과 강재방호공의 충돌해석을 여러 가지 조건들에 대해 수행함으로써 충돌에서 발생하는 선박과 방호공의 에너지 소산 관계를 분석하고자 하였다.

2. 구조물모델링

해석모델은 두 경우의 충돌을 고려하여 충돌속도(V), 충돌각(θ) 그리고 마찰계수(μ)에 변화를 주었다. 해석 프로그램은 비선형성이 큰 동적해석에 적합한 ABAQUS/Explicit⁽⁴⁾를 이용하여 해석을 수행하였다.

2.1 방호공의 모델링

본 연구에서는 강재방호공과 고무방현재를 이용한 고무방호공을 그림 1과 같이 모델링하였다.



a) 강재방호공

b) 고무방현재를 이용한 방호공

그림 1. 방호공 모델링

2.1.1 강재방호공

이 방호공은 소성변형으로 선박의 충돌에너지를 흡수하며, 수평판의 수에 따라 좌굴에 의한 충돌에너지 흡수 정도가 달라지게 된다.

해석에서 사용된 강재의 물성치는 탄성계수 $E = 2.07 \times 10^{11} \text{ kgf/m}^2$, 포아송비 $\nu = 0.3$ 를 적용하였으며, 수평판의 수는 4개로 하여 쉘요소(Shell element)로 모델링을 하였다. 그림 1 a)에서와 같이 H-beam을 고려하였

고, 수평판의 종방향보강재도 고려하여 수평판과 같이 셸요소(Shell element)로 모델링하였다. 재료모델은 탄소성으로 가정하였다. 경계조건은 방호공과 교각이 만나는 지점을 고정으로 하였고, 방호공 옆면은 연속체로서 경계조건을 고려하였다.

2.1.2 고무방현재를 이용한 방호공

선박의 접안시설에서 많이 사용되는 고무방현재는 시판되는 제품을 기준으로 하였고, 경계조건은 방호공과 교각이 만나는 지점을 고정으로 하였다. 고무방현재는 솔리드요소(Solid element)로 모델링하였으며, 고무재료의 거동은 초탄성재료로 가정하였다. 본 논문에서는 편의상 고무방호공으로 명칭 한다.

2.2 선박의 모델링

본 연구에서 선박은 충돌체로서 모형을 구현하였는데, 선박의 크기는 DWT5000으로 하였으며, 선체길이는 100m, 선폭은 14m, 높이 8m로 모델링하였다.

2.2.1 선수의 모델링

최근 조선기술의 발달로 인하여 선박은 조파저항을 최소화하기 위해서 선수부에 구상돌기가 있는 구상선수(Bulbous bow)를 채택하고 있으며, 선박의 용도에 따라 대개 4가지 형상으로 구분된다. 하지만 해석을 위해서는 이러한 임의의 선수형상을 표현할 수 있는 표준적인 선수모델이 필요시 되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 일본 본주사국⁽⁵⁾에서 제안한 선수모델을 사용하여 모델링하였다. 선수모델의 형상은 그림 2와 같고, 셸요소로 모델링하였다.

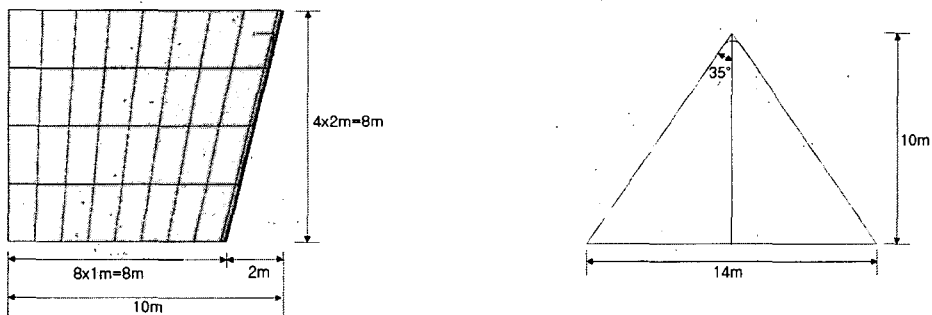


그림 2. 표준선수 모델 제원

강판의 물성치는 강판의 두께 $t = 17mm$, 탄성계수 $E = 2.07 \times 10^{11} kgf/m^2$, 포아송비 $\nu = 0.3$ 를 적용하였으며, 항복 후 거동은 방호공의 강재와 같다.

2.2.2 선체의 모델링

충돌시 선수부분에서 소성변형을 통해 운동에너지가 흡수되며, 선체부분은 변형이 일어나지 않는 것으로 가정하여 탄성재료를 갖는 보요소로 간단히 모델링하였다. 충돌시 발생하는 선수부 들림현상에 의한 부력효과

는 선체부에 스프링요소를 부착하여 위치에너지로의 에너지 변환을 고려하였다.

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

k_b 는 부력스프링, r_w 는 해수의 단위중량 ($1.03 \times 10^3 \text{kgf/m}^3$)이다. 식 (1)에 의해 부력스프링의 탄성값은 $1.442 \times 10^4 \text{kgf/m}^2$ 으로 계산하였고, 이 스프링은 선박의 진행 방향에 대해서는 자유도를 가지며, 상하 방향으로 자유도를 고정시켰다.⁽¹⁾

3. 선박의 충돌에너지

AASHTO 시방서⁽⁶⁾에 따라 다음의 식들을 이용하여 충돌력과 충돌에너지를 계산하였다.

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

P_s : 충돌력(kips), DWT : 대상선박의 적하톤수, V_{im} : 충돌속도(ft/sec)이다.

$$KE = \frac{C_H W V_{im}^2}{29.2} \quad (3)$$

KE : 충돌에너지(kips-ft), C_H : 수리동적질량계수, W : 선박의 배수톤, V_{im} : 충돌속도(ft/sec)이다.

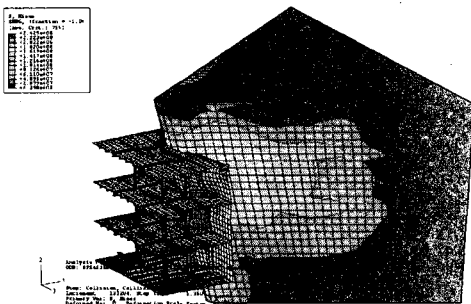
식 (2)와 (3)을 이용하여 계산해 보면, 다음 표 (1)와 같다.

충돌속도 (m/sec)	1.32 (2.57knots)	1.98 (3.85knots)	2.64 (5.14knots)
충돌력 (10^3kgf)	1130	1700	2260
충돌에너지 ($N \cdot m$)	5.71×10^6	1.28×10^7	2.28×10^7

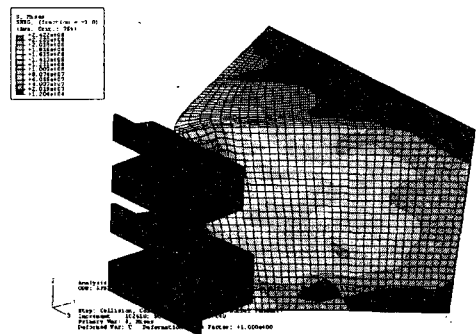
표 1 속도에 따른 충돌력과 충돌에너지

4. 충돌해석

본 연구에서는 충돌속도(V), 충돌각(θ), 마찰계수(μ)의 변화에 따른 소산에너지 관계를 고려하여, 충돌속도는 1.32m/s에서 속도를 50%씩 증가시킨 1.98m/s, 2.64m/s로 변화를 주었으며, 충돌각은 45°, 60°, 75°, 90°로 변화를 주어 해석을 수행하였다. 그리고, 마찰계수는 방호공의 재료적 특성에 맞게 각각 고무방호공은 0.9, 0.7, 0.5로 변화를 주었으며, 강재방호공은 0.15, 0.25, 0.35로 변경하여 해석을 수행하였다.



a) 강재방호공



b) 고무방호공

그림 3 방호공의 최대변형형상

방호공에서 선수와 방호공의 에너지 소산관계는 그림 3과 같이 운동에너지의 대부분이 방호공과 선수의 소성변형에 의한 소산, 마찰에 의한 소산, 그리고 선수부 들림에 의한 선체부의 위치에너지로의 전환 등으로 소산되었다. 하지만 선수의 들림에 의한 선체부의 위치에너지로 변환은 운동에너지의 0.01% 비율로 다른 에너지 소산 메카니즘에 비해 상당히 작은 것으로 나타났기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않았다.

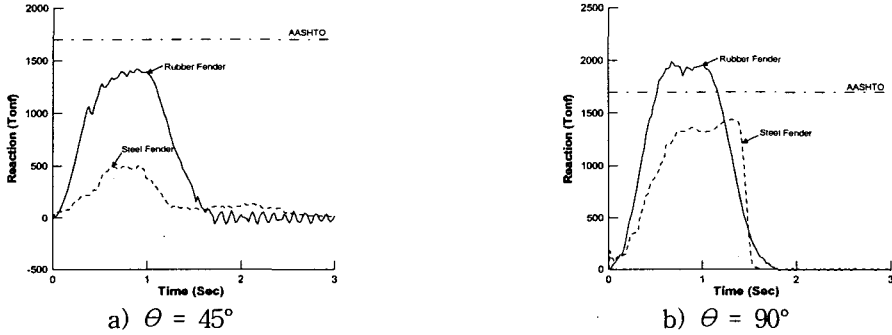


그림 4 방호공 충돌력의 시간이력 ($V=1.98m/s$)

충돌시 방호공을 통해 구조물에 전달되는 충돌력은 방호공의 지점반력의 합으로 알 수 있는데, 이러한 지점 반력의 시간이력을 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 충돌조건을 고려해도 선박과 교량사이의 완충공의 거동에 따라 교량의 하부구조에 작용하는 충돌력이 상이하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 설계시 이러한 점에 대한 고려가 효율적인 교량설계에 필요할 것으로 판단된다.

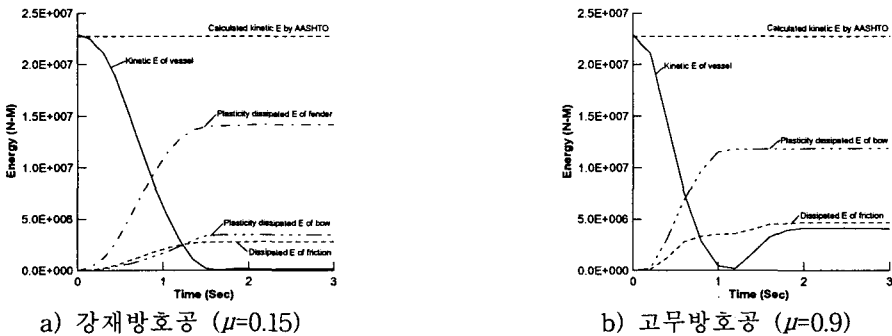
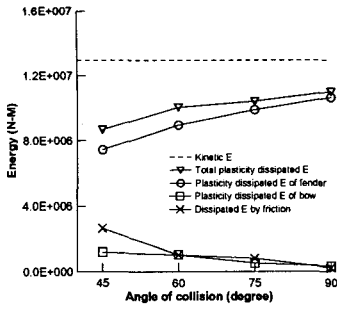


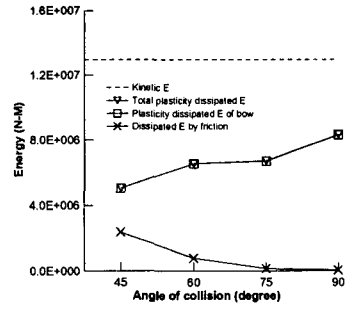
그림 5 방호공의 에너지소산 관계 ($V=2.64m/s, \theta=45^\circ$)

두 방호공은 그림 5에서 보는 바와 같이 전체적으로 강제방호공의 소성변형에 의한 소산에너지가 고무방호공에 비해 크며, 강제방호공의 경우, 그림 5 a)를 보면 방호공과 선수에서 동시에 소성변형이 일어나는데, 방호공이 선수에 비해 많은 소성변형 에너지를 흡수하고 있으나, 어느 정도 선수에서 소성변형 에너지를 흡수하여 서로 에너지를 분담함을 알 수가 있다. 고무방호공의 경우는 소성변형에 의한 소산에너지를 충돌체인 선박의 선수부가 흡수하고 있으며, 충돌 후 선박이 반동되면서 마찰에 의한 소산에너지 증가에 영향을 주는 것을 그림 5 b)를 통해 확인할 수 있다.

아래의 그림 6은 에너지 소산 관계를 충돌각의 변화에 따라 보여주고 있는데, 두 방호공의 경우에서 소성변형에 의한 에너지 소산과 마찰에 의한 에너지 소산관계를 나타내고 있다. 이를 보면 두 방호공 모두 충돌각이 커질수록 전체 소성변형에 의한 에너지 소산은 커지고, 마찰에 의한 소산 에너지는 감소함을 보여주고 있



a) 강재방호공 ($\mu=0.15$)



b) 고무방호공 ($\mu=0.9$)

그림 6 충돌각에 따른 에너지 소산 ($V=1.98m/s$)

는데, 그림 6 a) 강재방호공에서는 충돌각이 커질수록 방호공의 소성변형은 증가하는 반면 선수의 소성변형은 감소하였다. 충돌각이 90° 일 때, 고무방호공(그림 6 b))은 마찰에 의한 에너지 소산이 거의 발생하지 않았지만, 강재방호공(그림 6 a))은 선수의 소성변형에 의한 에너지 소산과 비슷하게 나왔다. 이는 선수가 방호공에 관입해 들어가면서 발생하는 마찰에 의한 에너지 소산으로 판단된다. (그림 7)

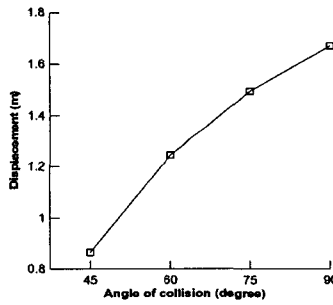
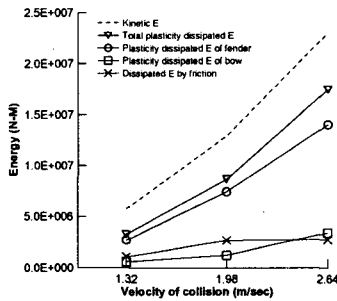
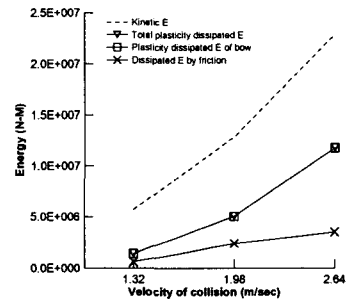


그림 7 충돌각에 따른 강재방호공의 관입량 ($V=1.98m/s$)

그림 8은 충돌각 45° 일때, 충돌속도에 따른 에너지 소산을 나타내고 있다. 그림 8 a)를 보면 전체 소성변형 에너지는 증가하지만, 마찰에 의한 소산에너지는 충돌속도가 1.98m/s, 2.64m/s 사이에는 거의 변화가 없는데, 이는 충돌속도가 증가함에 따라 선수의 방호공에 대한 충돌 관입량이 증가하고, 선수의 미끄러짐이 감소한 결과로 판단된다.



a) 강재방호공 ($\theta=45^\circ, \mu=0.15$)



b) 고무방호공 ($\theta=45^\circ, \mu=0.9$)

그림 8 충돌속도에 따른 에너지 소산

그림 9에서는 마찰계수의 변화에 따른 두 방호공의 에너지 소산 관계를 확인할 수가 있는데, 고무방호공(그림 9 b))에서는 마찰계수가 변하여도 선수가 부담하는 소성변형 에너지에는 변화가 거의 없으나 마찰에 의한 에너지 소산은 마찰계수가 증가할수록 감소하였다. 이는 방호공의 충돌면에 수직으로 작용하는 힘과 수평으로 작용하는 힘에는 변화 없이 마찰계수가 증가하면서 선수의 미끄러짐이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

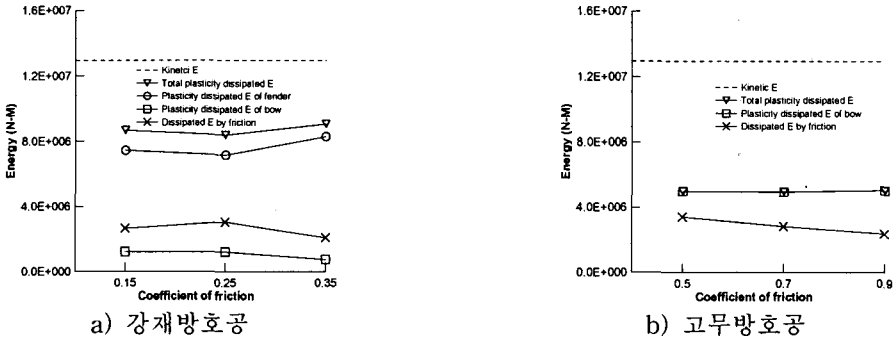


그림 9 마찰계수에 따른 에너지 소산 ($V=1.98m/s$, $\theta=45^\circ$)

강재방호공의 경우는 $\mu = 0.35$ 일때, 그림 9 a)에서 보는 바와 같은 에너지 소산관계가 나타났는데, 이는 마찰계수의 증가로 선수의 미끄러짐이 감소하여 선수보강보 역할을 하는 *H-beam*을 크게 좌굴시키지 못하고, 방호공의 강재판(Plate)에서 소성변형에너지로 흡수된 것으로 판단된다. (그림 10)

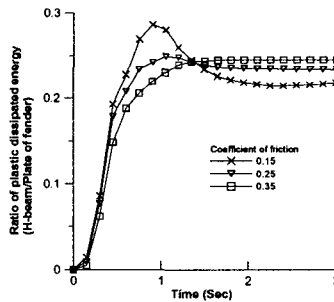


그림 10 강재방호공의 *H-beam/Plate*의 소성변형에너지 비 ($V=1.98m/s$, $\theta=45^\circ$)

5. 결론

본 논문에서는 선박과 방호공의 충돌 시 발생하는 에너지 소산 관계를 두 방호공에 충돌조건을 달리하여 분석하였다.

고무방호공과 강재방호공에서 구조물에 전달되는 충돌력은 동일한 조건에서 시방서에서 산정한 충돌력과 큰 차이가 있었다. 이는 충돌력을 계산하는데 있어서 충돌조건을 고려한 충돌력 산정식이 요구됨을 확인할 수 있었다.

충돌시 소성변형에 의한 에너지 소산이 선박의 운동에너지 소산에 크게 기여하고 있는데, 특히 강재방호공에서는 전체 소성변형에 의한 에너지 소산이 고무방호공에 비해 크게 나왔으며, 선박선수의 소성변형에너지를

비교해 보면 오히려 고무방호공에 비해 소성변형에너지가 작게 나왔다. 이는 교량과 선박 모두의 안전을 고려한다는 측면에서 볼 때, 고무방호공에 비해 바람직한 결과임을 확인할 수 있었다.

마찰계수를 증가시켰을 경우, 선수의 미끄러짐이 줄어들어 충돌시간이 감소하였는데, 충돌시간의 감소는 방호공의 반력을 증가시켜 결과적으로 구조물에 영향을 미치게 된다. 이는 방호공에 표면처리를 하여도 그 효과를 기대할 수 없음을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 이계희, 고재용, 이성로, "방호공을 고려한 선박의 충돌하중", 한국전산구조공학회학술발표회 논문집, 제17권, 32호, 2004, pp. 193-200
2. 도로교표준시방서(부록 : 하중저항계수 설계편), 건설교통부, 1996
3. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003
4. *ABAQUS User's Guide*, HKC Inc., 2002
5. 多室型緩衝公の設計要領 (案), 本州四國連絡橋公團, 1980
6. *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, AASHTO, 1991
7. 이계희, 홍현석, 백종균, "강재 충돌방호공의 선박충돌해석", 한국전산구조공학회학술발표회 논문집, 제16권, 31호, 2003, pp. 71-78
8. 이성로, 이계희, 이완수, "교량의 선박충돌 에너지 산정", 대한토목학회 논문집, 제24권, 제5A호, 2004, pp. 951-960
9. Pedersen, P.T., "Ship impact : Bow collision". *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 13, No.2, pp. 163-187, 1993