

## 돌핀방호공의 선박충돌해석

### The ship collision analysis of dolphin protection system

이계희 *	이성로 †	고재용 ‡	유원진 §
Lee, Gye-Hee	Lee, Seong-Lo	Lee, Seong-Lo	Yu, Won-Jin

---

#### ABSTRACT

In this study, to evaluate the collision behaviors of the navigating vessel and the dolphin protective system protecting the substructures of bridges, the numerical simulation was performed.

The analysis model of vessel bow that the plastic deformations are concentrated was composed by shell elements, and the main body of vessel was modeled by beam elements to represent the mass distribution and the change of potential energy. The material model reflecting the confining condition was used for the modeling of the filling soil of dolphin system. The surrounding soil of the dolphin system was modeled as nonlinear springs.

As results, it is verified that the dolphin system can adequately dissipate the kinematic energy of the collision vessel. The surrounding soil of the dolphin system is able to resist the collision force of the vessel. And the major energy dissipation mechanism of collision energy is the plastic deformation of the vessel bow and the dolphin system.

---

#### 1. 서론

최근의 서남해안권의 개발과 경제성장에 따라 선박이 통항하는 항로를 가로질러 교량을 건설해야 하는 해상교량의 가설이 증가하고 있다. 따라서 통항선박에 대한 교량의 안전성 확보 문제가 이런 교량의 건설이 중요한 고려사항이 되고 있다. 그러나 현재 국내의 설계기준은 외국의 기준을 준용하고 있는 것이 현실이며, 우리나라의 현실을 반영한 설계기준은 미미한 형편이다.<sup>1,2</sup>

본 논문에서는 이러한 선박의 충돌방지를 위해 사용되는 방호공의 하나인 돌핀구조에 대해 해석을 수행하였다. 대상선박의 충돌시 발생하는 에너지의 흡수 메카니즘에 따라 선박과 돌핀구조물을 모델링하고 주어진 충돌조건에 대해 충돌해석을 수행하여 돌핀구조물이 충돌하중에 대하여 하부구조를 적절히 보호할 수 있는 지에 대한 거동을 분석하였다.

---

\*정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

†정회원, 목포대학교 건축조경토목공학부 교수

‡정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

§정회원, 삼성물산 건설부문 제2연육교현장 과장

## 2. 구조물의 개요

### 2.1 돌핀방호공

통항선박에 대한 돌핀방호공의 배치는 그림 1과 같다.

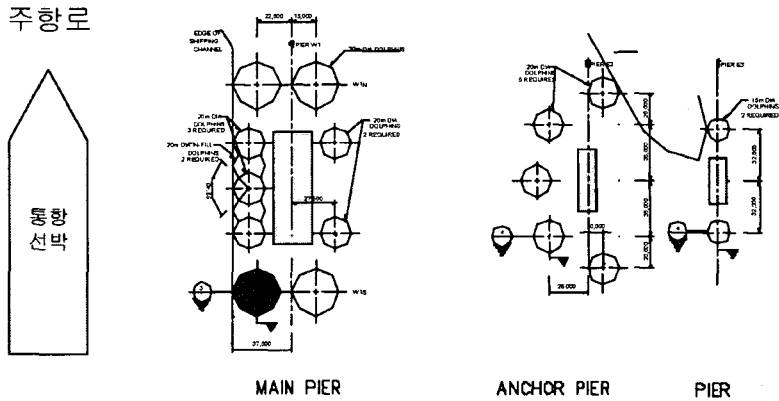


그림 1. 교각과 돌핀방호공의 배치

이러한 돌핀방호공 중에서 교각전면에 위치한 방호공에 통항선박이 충돌하는 경우를 가정하여 해석을 수행하였다. 교각전면에 위치한 지름 30m의 돌핀방호공의 구조는 그림 2와 같다.

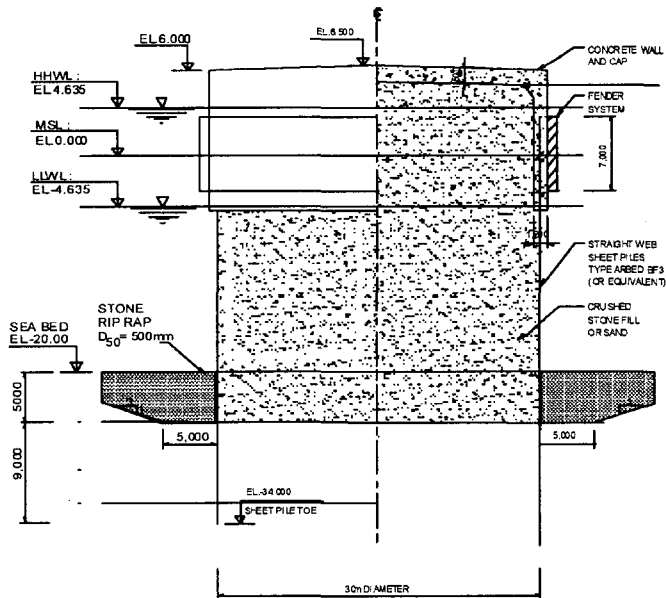


그림 2. 돌핀방호공의 구조

### 2.2 대상선박

본 연구에서 해석대상인 선박은 100,000DWT(Dead Weight Tonnage)의 산물선으로 하였다. 대상선박의 표준적인 크기는 표 1에 나타내었다.

표 1. 대상선박의 제원<sup>3</sup>

Dead Weight Tonnage(DWT)	100000 ton
Displacement Tonnage(W)	119700 ton
Length of Vessel(LOA)	270 m
Width of Vessel(B)	39 m
Depth of Bow ( $D_B$ )	25.9 m

대상선박의 항행속도는 8.88 knot(=4.568m/sec)로 가정하였다. 시방서<sup>3</sup>에 규정된 충돌방향은 선박의 진행방향과 선박진행에 수직인 방향의 두 경우가 있는데, 이 경우 선박진행에 수직인 경우는 진행방향에서 일어난 충돌력의 50%를 적용하도록 하고 있다. 따라서 선박진행방향으로의 수직충돌이 돌핀 방호공에 작용하는 최대하중이므로 본 연구에서는 선박이 선수방향의 직각충돌을 하는 것으로 가정하였다.

### 2.3 시방규정에 따른 충돌력과 충돌에너지

AASHTO<sup>3</sup>규정에 따른 대상선박의 충돌력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_s = 220\sqrt{DWT} \frac{V_{im}}{27} \quad (1)$$

여기서  $P_s$ ,  $DWT$  와  $V_{im}$  는 각각 충돌력(kips), 대상선박의 적하톤수와 충돌속도(ft/sec)를 나타낸다. 이와 같은 조건으로 일어난 충돌하중은 17520 ton (=38620 kips)이었다.

충돌시 소산되는 선박의 운동에너지는 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

여기서  $KE$ ,  $C_H$ 와  $W$ 는 각각 충돌에너지(kips-ft), 수동역학적 추가질량비와 선박의 배수톤을 나타낸다. 계산된 충돌에너지는 139600 Ton-m (=1.01E6 kips-ft)이다.

## 3. 해석모델의 구성

해석모델은 충돌에너지의 소산현상을 잘 나타낼 수 있도록 각 구조물의 소성변형과 선박과 슈트파일의 마찰, 슈트파일내부 충전토사의 마찰, 선박의 위치에너지의 변화위치에너지의 변화 등의 에너지소산 메커니즘을 고려하였다. 이러한 해석모델의 구성과정을 아래의 절에 설명하였다.

본 연구에서 사용된 해석프로그램은 ABAQUS/Explicit<sup>4</sup>로 접촉, 대변형, 마찰 등을 포함한 대형해석모델의 비선형동적해석에 적합한 해석프로그램으로 알려져 있다.

### 3.1 대상선박

#### 3.1.1 선수부

대상선박의 선수부는 쉘요소로 모델링되었으며, 재료는 탄소성거동을 하는 것으로 가정하였다. 충돌에 의한 소성변형은 선수부에 집중될 것으로 판단되므로 선수부 20m만을 모델링하여 사용하였다.

표 2. 선체부를 나타내는 보의 제원

Length	250 m
Mass	1.257E8 kg
Mass per unit length	5.026E5 kg/m
Area	2.727 m <sup>2</sup>
Density*	100.0 kg/m <sup>3</sup>

\* See 3.1.1

선수부는 매우 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 이의 정확한 형상과 강성을 나타내려면 많은 요소가 필요하다. 그러나 본 연구에서 해석법으로 선택한 explicit 방법은 매우 짧은 시간간격으로 매우 많은 해석단계가 필요하다. 이때 해석과정을 발산시키지 않는 최대시간간격은 다음과 같은 비례관계를 가지고 있다.

$$t_{cr} \approx \frac{1}{K}, \rho \quad (3)$$

여기서  $t_{cr}$ 은 임계시간간격이고,  $K$ 는 강도,  $\rho$ 는 재료의 밀도이다. 따라서 해석의 효율성을 증대시키기 위하여 선수부의 밀도를 증가시켰다. 그러나 전체적인 선박의 질량은 선체부의 밀도분포를 조정하여 변화가 없도록 하였다.

### 3.1.2 선체부

충돌에 의한 소성변형은 선수부에 집중되는 것으로 가정하였기 때문에 선체부는 탄성변형을 가정한 보 요소로 모델링하였다. 선체부를 나타내는 보요소의 기본적인 제원은 표 2와 같다. 여기서 전체질량은 수동역학적 부가질량을 포함하고 있다.

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 알 수 있게 하였다. 부력을 나타내는 스프링요소는 다음과 같은 방법으로 산정하였다.(그림 3)

$$k_b = \frac{P}{\delta} = \gamma_w B \quad (4)$$

여기서  $k_b$ 는 부력스프링,  $\gamma_w$ 는 해수의 단위중량이다. 본 연구에서 사용된 선박의 모델에 있어서 이러한 부력스프링의 탄성값은 14.42Ton/m<sup>2</sup>으로 계산되었다.

이 때 스프링요소의 지점을 고정점으로 하면 선박의 진행이 따른 스프링의 변형이 부력스프링의 응답에 영향을 미치므로<sup>5</sup> 상하자유도는 고정되고, 선박의 진행방향으로는 선박의 본체와 동일한 자유도를 가진 추가절점에 스프링을 고정시켜 모델링 하였다.

## 3.2 돌핀방호공

### 3.2.1 슈트파일

슈트파일연결부의 마찰에 의한 에너지소산은 콘크리트캡에 의하여 구속된다고 가정하여 고려되지 않았다. 따라서 슈트파일자체의 소성변형을 슈트파일에 의한 주요 에너지소산 메카니즘으로 가정하였다.

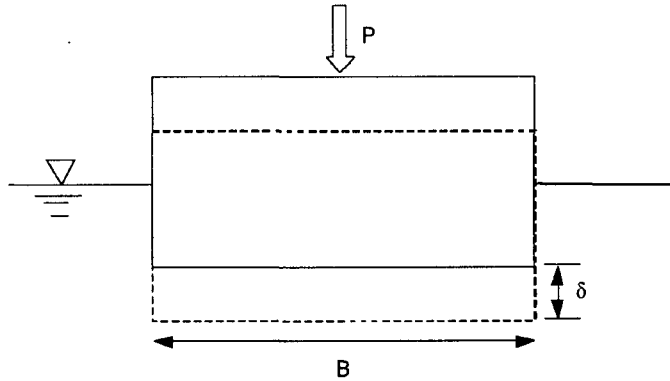


그림 3. 부력스프링

쉬트파일은 탄소성재료로 가정되었다.

### 3.2.2 콘크리트캡

콘크리트캡은 쉬트파일의 상단에서 쉬트파일을 구속하여 자립할 수 있게 하고, 선박의 충돌시 선수상부의 충돌이 발생하는 지점이다. 본 연구에서 콘크리트캡은 쉘요소로 모델링되었으며, 내부에 포함된 철근도 충상으로 고려되었다. 콘크리트의 재료모델은 damaged plasticity 모델을 사용하여 충돌에 의한 파괴시 발생하는 에너지의 소산을 나타낼 수 있도록 하였다.

### 3.2.3 충전토사

본 연구에서 사용된 돌핀방호공의 주 에너지소산 메카니즘은 돌핀내부에 충전된 토사의 소성변형이다. 따라서 충전토사는 Drucker-Prager의 재료모델을 따르는 것으로 가정하였다. 이 모델은 마찰저항을 하는 조립토 등에 주로 쓰이며, 압력이 증가할수록 큰 강도를 가지는 특징을 나타낸다. 또한 비선형부분에서 연화현상도 나타낼 수 있는 특징이 있다. 본 연구에서 사용된 Drucker-Prager 재료모델의 마찰각은  $43.3^\circ$ 로 Mohr-Coulumb 재료모델의 마찰각  $35^\circ$ 와 등가의 값이다.

### 3.2.4 주변지반

쉬트파일은 지반에 관입되어 주변지반에 의해 지지된다. 충돌시 쉬트파일은 주변지반에 충돌력을 전달하므로 이러한 주변지반의 지지력을 비선형스프링<sup>6</sup>을 이용하여 고려하였다.

이 때 조립토지반은 인장력에는 저항할 수 없으므로 압축력만을 받는 스프링으로 모델링하였다. 이는 내부의 인장력을 받는 비선형 스프링으로 치환할 수 있다. 점성토지반의 경우에는 점착력을 고려하여 쉬트파일의 양면에 부착되었다.

## 4. 해석결과

### 4.1 구조물의 변형형상

충돌도중의 선수부와 돌핀방호공의 변형형상을 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서 콘크리트의 극한강도는 강재에 비해 매우 낮기 때문에 콘크리트의 응력분포는 가장 작은 응력단계로 나타내어진다.

돌핀방호공과 선수부의 주요 변형모드는 충전토사의 전단변형과 선수부의 좌굴변형이다. 이러한 선수부의 좌굴현상은 돌출선수에 집중되었으며, 선수모델의 뒤쪽은 항복응력에 도달하지 않아 본 연구에서 선정한 선수부의 모델범위가 적절함을 보여주었다.

돌핀방호공의 횡방향자유도는 구속하지 않았지만 돌핀방호공의 횡방향 이동은 나타나지 않았다. 즉 돌핀방호공의 전단변형으로 충돌에너지를 흡수할 수 있었다. 이는 또한 슈트파일의 관입된 지반이 충돌력을 지지하는데 충분한 강성을 발휘한다는 점을 의미한다.

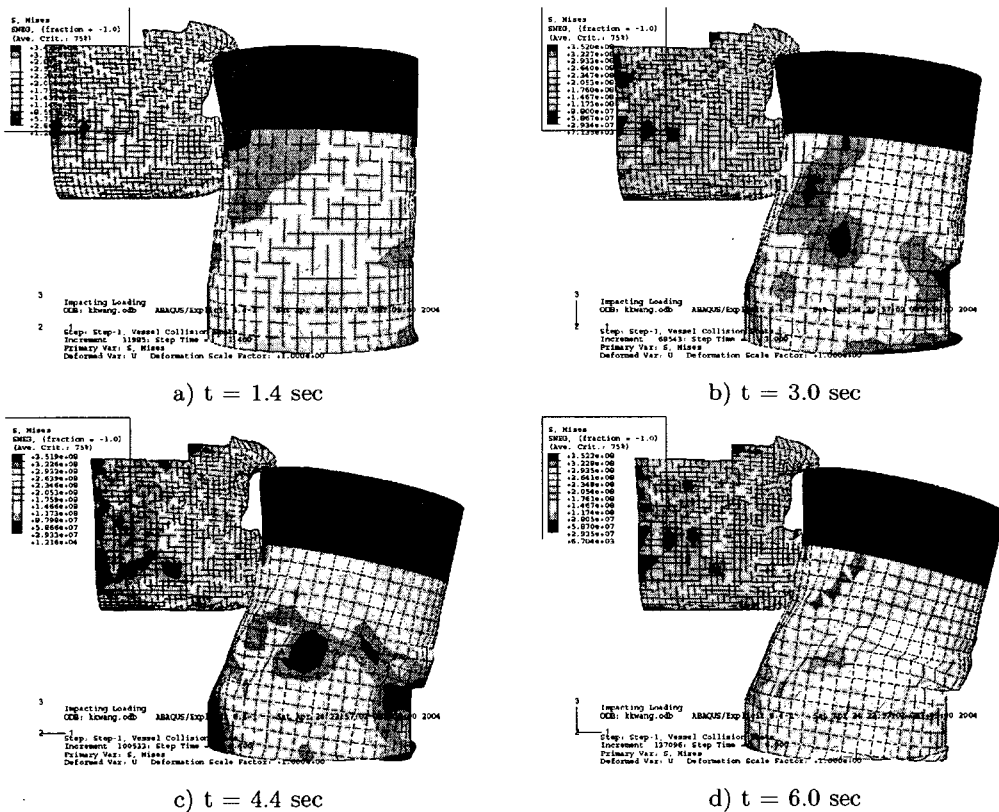


그림 4. 시간에 따른 선박의 선수부와 돌핀방호공의 변형형상

충돌이 종료된 후의 선수부와 돌핀방호공의 최종변형형상은 그림 5에 나타난 바와 같다.

### 4.2 시간이력응답

충돌선박의 속도와 변위의 시간이력곡선은 그림 6에서 보이는 바와 같다. 이 시간이력은 선수모델의 뒷부분에서 얻어진 것이다. 이 그래프에서 속도는 충돌시작후 6초 정도에서 0에 도달하고, 이 시점 이후로는 속도의 방향이 바뀌어 선박이 반동하고 있음을 나타낸다. 이 때 발생하는 최대 변위는 약 12m정

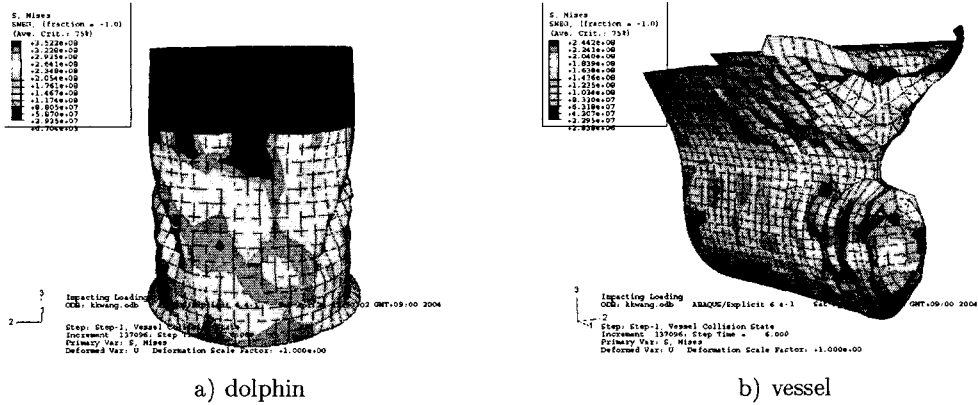


그림 5. 선박의 선수부와 돌핀방호공의 최종변형

도이다.

변위에 따른 선박의 속도와 운동에너지의 변화를 그림 6에 나타내었다. 선박의 속도는 최대변위에 이르렀을 때 0이 되며, 이 후에는 반동에 의해 속도가 증가된다. 선박의 운동에너지는 변위에 따라 감소하며, 따라서 선수부와 돌핀방호공이 변형에너지로 전이된다. 반동에 의한 선박의 운동에너지는 전체 운동에너지에 비해 미미한 것으로 나타났다. 그러나 이는 충돌 후에서 돌핀시스템이 강성을 완전히 잃지 않고 강성을 지니고 있는 것을 나타낸다. 그러므로 돌핀방호공의 안정성은 충돌 후에도 유지할 수 있는 것으로 판단되었다. 또한 충돌시 선박의 운동에너지는 주로 선수부와 돌핀의 소성변형으로 소산 되는 것으로 나타났다.

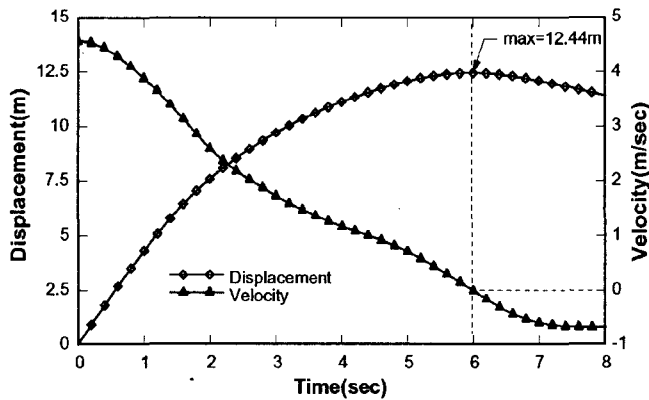


그림 6. 충돌선박의 변위와 속도

## 5. 결론

본 연구에서는 운항선박의 충돌로부터 교량의 하부구조를 보호하는 돌핀방호공에 선박이 선수충돌한 경우, 선박과 방호공의 거동을 평가하기 위한 수치해석이 수행되었다.

선박은 소성변형이 집중적으로 일어나는 선수부를 쉘요소로 상세모델링하였으며, 본체는 구조물의 질량분포 및 위치에너지 변화를 나타낼 수 있도록 보요소로 모델링 되었다. 돌핀방호공은 내부의 충전

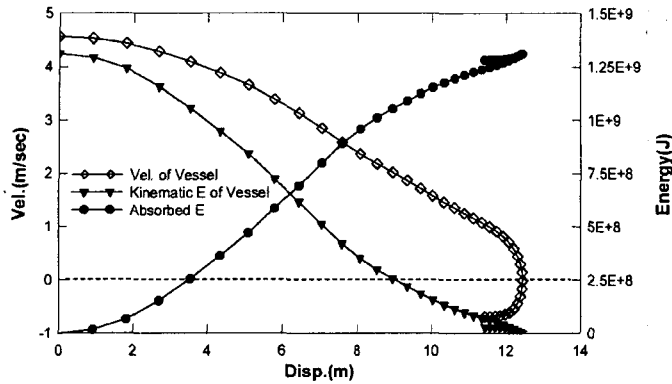


그림 7. 변위에 따른 속도와 운동에너지의 변화

토사의 구속조건을 고려한 재료모델을 사용하였으며, 주변지반도 비선형지반스프링으로 고려하였다.

해석결과 주어진 조건에 대하여 돌핀방호공은 선박의 운동에너지를 적절히 소산시킬 수 있었으며 이 때 지반은 충돌시 발생하는 충돌력을 지지할 수 있는 것으로 나타났다. 충돌시 선박의 운동에너지를 소산시키는 주요메카니즘은 선수부와 돌핀방호공의 소성변형인 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

1. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003.
3. *Guide Specification and commentary for vessel collision design of highway bridges.*, AASHTO, 1991
4. *ABAQUS analysis user's manual.*, HKS, 2003
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. 깊은 기초(개정판), 한국지반공학회, 2002