

## 파일형 선박 충돌방호공의 거동특성 연구

### Study on Behavior Characteristics of a Pile-Type Vessel Collision Protective Structure

이 계 희<sup>†</sup> · 이 정 우\*

Lee, Gye-Hee · Lee, Jeong-Woo

**Abstract** In this study, the behavior were analyzed for the bow collision event. The model of protective Structure was consist of slab, RCP and non-linear soil spring. The ship was modeled by bow and midship. The bow model was composed by elastic-plastic shell elements, and the midship was composed by elastic solid element. According to the weight of the ship's change from DWT 10000 until DWT 25000 increments 5000. The head-on collision was assumed, its speed was 5knot. Analysis was carried out ABAQUS/Explicit. As the result, increasing the weight of the ship deformability in athletes and to increase the amount of energy dissipated by the plastic could be confirmed.

**Keywords** Ship Collision, Pile-type Vessel Collision Protective Structure, Collision Energy

요 지 본 논문에서는 파일형 선박충돌방호공에 선박이 충돌하였을 때 거동을 해석하였다. 충돌방호공은 슬래브, RCP말뚝 및 이를 지지하는 지반을 비선형스프링으로 모델링하였다. 선박의 선수는 탄소성거동을 하는 셸요소로 모델링하였으며, 선체부는 충격 시 변형이 크게 발생하지 않으므로 선형재료로 고체요소를 이용하여 모델링을 하였다. 선박의 중량의 변화에 따른 거동특성을 파악하기 위해 선박의 질량을 DWT 10000 부터 DWT 25000까지 5000씩 증가시켜 해석을 수행하였다. 또한 선박과 방호공의 충돌은 정면충돌로 고려하였으며, 충돌 속도는 5knot로 가정하였다. 선박과 방호공과의 충돌 해석은 비선형 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit을 이용하여 수행하였으며, 이를 통하여 선박 충돌 시 방호공의 에너지 거동을 분석하였다. 해석결과 선박의 중량이 증가할수록 선수와 슬래브의 변형에 의한 소성 소산 에너지량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

핵 심 어 선박충돌, 파일형 방호공, 충돌에너지, AASHTO

## 1. 서 론

교량 시공기술의 발전과 연안개발에 따라 연육나나 연도교의 가설을 증가시켰으며 이에따라 선박의 통항로에 교량을 건설해야하는 사례가 증가하고 있다. 또한 선박건조 기술의 발전에 따라 선박의 대형화 및 물류 수송 등에 의한 선박 통항로의 증가는 선박과 교량의 충돌의 가능성을 증가시키고 있다. 따라서 통항 선박에 대한 교량의 안정성 확보는 필연적이며, 매우 중요한 사항이다. 현재 국내의 설계기준은 2006년 제정한 케이블 강교량 설계지침(대한토목학회, 2006)을 통하여 제시하고 있으나 이는 미국 AASHTO의기준(AASHTO, 1991)을 준용한 것으로, 미국의 경우 1980년 Sunshine Skyway Bridge

† 교신저자 : 정희원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수  
E-mail : lghlsk@mmu.ac.kr  
TEL : 061-240-7314 FAX : 061-240-7301

\*\* 정희원, (주) 전택엔지니어링 사원

사고 이후 선박의 항로에 위치한 교량의 안정성 확보에 관심이 모아지게 되었고, 여러 나라 기존 교량의 취약성 평가, 신설 교량에 대한 설계기준 확립, 선박 충돌에 대한 규약의 제정에 노력하였으며, 이를 통하여 1991년에 선박과 교량의 충돌에 대한 설계기준을 제시하였다. 하지만 선박의 충돌하중에 대해서는 많은 논의가 계속되고 있으며, 많은 추가적인 연구가 진행되고 있다(이성로 등, 2004; 고광오 등, 2004; 배용귀 등 2008; 홍관영 등, 2005).

선박의 충돌로부터 교각을 보호하는 방법으로는 교각 자체의 강성을 충분히 확보하여 충돌에 저항하는 방법과 충돌방호공과 같은 희생구조물의 파괴를 통하여 선박의 충돌에너지를 소산시키는 방법이 있다. 소형선박 충돌의 경우는 교각의 강성확보를 통하여 충분히 이루어 질 수 있지만, 대형 선박의 경우 교각의 강성을 확보하는 것은 매우 비경제적이며 어렵기 때문에 충돌방호공을 설치하는 것이 일반적이다. 충돌 방지공의 종류로는 섬식, 돌핀식, 파일지지식 등이 있으며, 선박의 충돌 시 선박의 운동에너지를 주로 구조물의 소성변형과 충돌면에서의 마찰에너지로 에너지를 소산하게 되며, 충돌방지공의 종류와 충돌조건에 따라 선박과 구조물의 손상평가는 차이를 나타낸다.

본 연구에서는 충돌방호공의 한 종류인 파일형 선박충돌 방호공과 선박의 충돌을 선박의 중량을 변화시켜 해석을 수행함으로써 충돌 시 파일 및 주요부재의 거동을 파악하였다.

## 2. 대상구조물의 모델링

충돌거동의 적절한 묘사를 위하여 케이스, 방호공, 선박으로 나누어서 대상구조물을 모델링 하였다. 방호공은 파일형 충돌방호공으로 가정하였다. 파일형 방호공은 슬래브(slab), 파일(pile)로 구성되어 있으며, 파일은 슬래브에 의하여 일체화 거동을 하도록 모델링 하였다. 선박의 충돌 시 선박의 변형은 선수부에 집중이 되므로 선수부분과 선체부분으로 나눠서 모델링 하였다. 선수부분은 충돌의 상세한 묘사를 위하여 쉘 요소로 모델링 하였다. 선체부분은 탄성체로 가정하였다.

### 2.1 선박의 모델링

선박은 판과 보강재를 효율적으로 조립한 매우 복잡한 구조물이고, 이동하는 구조물으로써는 최대 규모의 구조물이다. 또한 불규칙파 해면상을 이동하는 특성상, 다양하고도 복잡한 하중을 받는 구조물이기도 하다. 그 위에 부유 구조물으로써의 수밀성이 요구되는 것도 선박의 특징 중 하나이다. 이러한 선박의 특징을 고려하여 안전성과 경제성을 균형 있게 유지하려면 고도의 구조설계 기술이 요구되며, 이에 따라 구조물의 형상은 복잡하게 구성되어 있다.

선체의 구성은 보강판 구조로 되어 있는데, 그 구성은 크게 평판, 늑골, 특선 늑골로 구분할 수 있다. 선각을 구조 부재별로 구분하면 다음과 같다.

- 갑판구조 : 갑판, 보, 횡거더 등으로 구성
- 선측구조 : 선측외판, 늑골, 횡거더 등으로 구성
- 선저구조 : 선저외판, 늑판, 늑골, 횡거더 등으로 구성
- 격벽구조 : 격벽판, 보강재, 보강 거더 등으로 구성

위에 나타나듯이 선체는 부재수가 매우 많은 복잡한 구조물로서 개개의 부재를 모두 고려하여 해석하는 것은 비경제적이다. 따라서 본 연구에서는 AASHTO에서 제안한 선박의 제원을 기준으로 하였으며, 충돌 시 변형이 집중되는 선수부분과 변형이 발생하지 않는 선체부분으로 나누어 모델링 하였다. 선박의 충돌부에 발생하는 대소성 변형이나 국부 좌굴 등을 고려하기 위하여, 선박의 충돌부는 세부적으로 모델링을 실시하였으며, 선체부는 변형이 일어나지 않으므로 탄성체로 모델링 하였으며 선체 질량의 95%를 차지하도록 하였다.

본 연구에서 사용한 선박의 규모는 DWT25000을 기준으로 설계하였으며, AASHTO에 명시된 선박의 제원은 아래의 Table 1과 같다. 선박 질량에 의한 에너지 거동을 비교하기 위하여 비교군으로 DWT 10000, 15000, 20000에 대한 해석을

실시하였으며, 각 질량에 대한 선체의 단위 중량 값과 탄성계수를 수정하여 모델링 하였다.

1) 선수(Shipbow) 모델링

실제 선박의 선수부는 운항 시 유체의 저항력을 최소화하고, 그 하중을 견디도록 설계된다. 최근 선박의 선수는 구상돌기가 있는 구상선수(Bulbous bow)를 채택하고 있다. 교량의 충돌방호공 설계 시 설계에 있어서 충돌선박을 설정하는 것이 필요하며, 항행실적 등과 같이 그 수역을 항행하는 선박에 맞는 선박의 구조, 형상을 기본으로 하여 선수강도를 계산하여야 한다(S. Zhang, 1999).

선수부는 충돌 시 변형의 발생이 집중이 되는 부분이므로 상세한 변형모사를 위하여 Shell요소를 사용하여 모델링을 실시하였다(Fig. 1). 선박을 건조할 때 사용하는 강재는 MS400, AH32 및 AH36을 주로 사용하는데, 이러한 강재의 표기기호는 토목에서 쓰는 강재의 표기기호 SS400, SM400등과 다르게 표기되고 있다. 이와 같이 표기기호는 토목에서 쓰는 강재와 표기 방식이 다르지만 MS400의 경우는 탄성계수(E)  $2.07 \times 10^{11} Pa$ , 포아송비( $\nu$ ) 0.3, 항복응력( $\sigma_y$ )  $2.4 \times 10^8 Pa$ 로 SS400과 거의 비슷하다. 따라서 선박 충돌시 구조물에 전달되는 충돌력과 에너지 소산이 재료의 물성치의 영향을 배제하기 위하여 SS400의 물성치를 적용하였다. 해석에 사용된 SS400에 대한 강재의 물성치는 탄성계수(E)  $2.07 \times 10^{11} Pa$ , 포아송비( $\nu$ ) 0.3, 항복응력( $\sigma_y$ )  $2.4 \times 10^8 Pa$  이다. 충돌시 탄성거동과 소성거동을 고려하였으며 소성영역에서의 거동은 다음 Table 2와 같다.

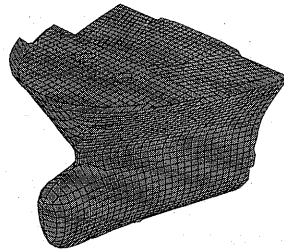


Fig. 1. 선수 모델링

Table 1. DWT25000선박 제원

| 대상 선박 | DWT (ton) | 선장 (m) | 선폭 (m) | 만재 홀수 (m) | 높이 (m) | 만재 배수량 (tonf) |
|-------|-----------|--------|--------|-----------|--------|---------------|
| 산물선   | 25,000    | 175.87 | 25.12  | 9.81      | 21.58  | 31500         |

Table 2. SS400 Plasticity 거동

| 응력(Pa)    | 순 소성변형률 |
|-----------|---------|
| 1.587e+08 | 0       |
| 1.631e+08 | 0.015   |
| 1.863e+08 | 0.033   |
| 1.932e+08 | 0.044   |
| 2.020e+08 | 0.062   |
| 2.070e+08 | 1.5     |

2) 선체(MidShip) 모델링

선박의 운동에너지는 선수의 소성변형 및 방호공의 파괴로 인하여 충돌에너지가 흡수되며, 선체에서는 변형이 일어나지 않는다. 따라서 선체 중앙부는 탄성재료로 모델링 하였다.(Fig. 2)

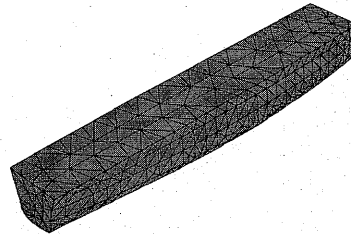


Fig. 2. 선체 모델링

선체 중앙부의 부피는  $V_{mid} = 108364m^3$ 이고 선체중앙부의 질량이 전체 선박 질량의 95%로 가정한다면 다음과 같이 선체 중앙부의 밀도  $\rho_{mid}$ 를 구할 수 있다.

$$\rho_{mid} = \frac{0.95M_{imp}}{V_{imp}} \tag{1}$$

충돌해석에 사용되는 Explicit 해석의 최소 해석시간간격은 팽창파(dilatational wave)의 전달속도로 결정된다. 따라서 선체 중앙부의 질량은 실제 재료에 비해 낮은 값을 보여주기 때문에 높은 팽창파의 전달속도를 가지므로 최소해석시간간격을 작게 만들어 해석비용을 증가시킨다.

등방재료의 경우 밀도와 탄성계수의 비에 따라 팽창파의 속도가 결정되므로 해석시간의 감소를 위해 선체 중앙부의 수정된 탄성계수를 사용하였다.

$$E_{mid} = \frac{\rho_{mid}}{\rho_s} E_s \tag{2}$$

선박 충돌시 발생하는 선박의 부력 변화에 의한 선박의 들림현상에 의한 위치에너지 변화와 회전에 의해서도 운동에너지가 흡수된다. 따라서 선체의 운동방향을 제외한 모든 회전과 이동을 구속하여, 진행방향에 대해서만 거동하도록 자유도를 고려하였다.

2.2 방호공 모델링

파일 지지형 선박충돌 방호공은 파일그룹(pile group)의 휨에 의한 소성변형과 슬래브의 파괴거동을 통해 충돌 에너지를 흡수하는 보호시스템으로, 보호시스템의 파단에 의해 선박이 교량에 충돌하기 전에 멈추거나, 시스템의 파괴 이후 교량에 전달되어지는 충격 하중이 교량의 저항 강도 아래에 있도록 설계 되어져야 한다. 본 연구에서 파일지지형 선박충돌 방호공은 Slab와 Pile로 구성 되어져 있다.

1) 슬래브 (slab)

슬래브는 파일을 일체화 거동하도록 파일 그룹의 상부에 설치된다. 이 슬래브는 충돌하중의 작용 시 각 파일(pile)에 힘을 전달하여 소산할 수 있도록 한다. 또한 자체의 질량의 관성력과 파괴거동으로 충돌 에너지를 소산시킨다. 해석에 사용된 슬래브는 콘크리트로 구성된 상부슬래브와 실제 철근 영향을 고려하기 위한 Rebar로 구성되어 있다.

상부 슬래브를 구성하는 콘크리트의 단위중량  $\gamma_c = 22050N/m^3$ 이다. 본 연구에서는 슬래브의 자중에 해사가 적재되어 있다고

가정하였으며, 이 중량을 슬래브의 지중에 포함시켜 모델링을 수행하였다. 이에 수정된 상부슬래브의 단위중량은  $\gamma_{sb} = 38682N/m^3$ 로 가정하였다(Fig. 3-a).

슬래브의 배근철근은 크게 전면부에 배근되는 철근(wall rebar)과 슬래브에 2층으로 배근되는 철근(slab rebar)으로 나눌 수 있다. Wall Rebar에 배근된 철근의 총 부피는  $0.857m^3$ 이며 또한 Slab Rebar의 경우 각 층의 철근량은  $0.9795m^3$ 이다. 충돌 해석의 경우 철근을 하나씩 모델링 하는 것은 해석의 능률을 저해하므로 총 철근량을 면적으로 나눠서 사용한 등가면적으로 모델링하였다 (Fig. 3-b,c).

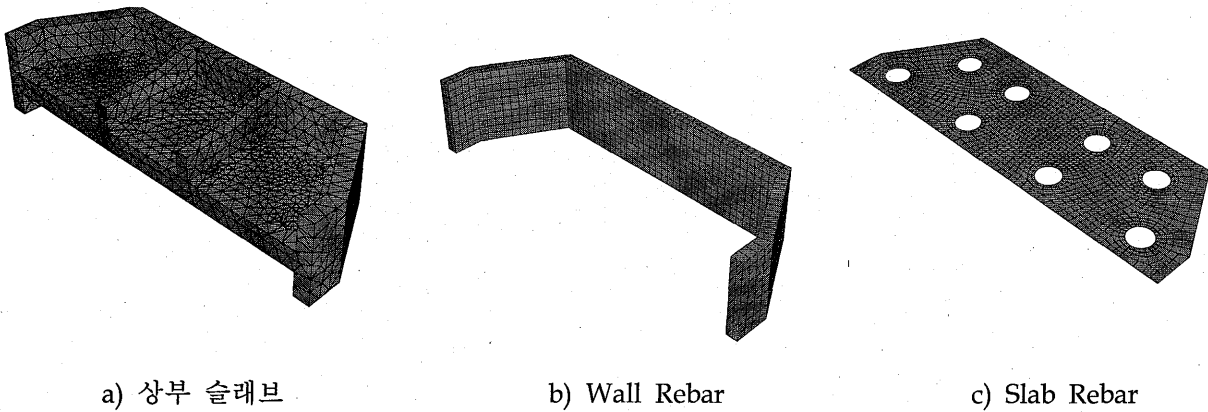


Fig. 3. 슬래브의 철근 배치

2) 파일 (Pile)

파일지지 시스템 방호공에서 파일은 선박의 운동에너지를 소산시키는 주요 부재로서 충돌 에너지를 소산시키기 위해 충분한 숫자의 파일과 직경을 필요로 한다. 본 연구에서 파일의 직경은 1.8m 이며, 길이는 30m로 가정하였다. 파일은 희생강관, 콘크리트 말뚝 그리고 철근망으로 나누어 모델링하였다(Fig. 4). 파일의 모델링에서는 콘크리트를 Damaged Plastic 재료로 모델링하여 균열 및 파쇄현상을 나타낼 수 있도록 하였고, 파일에 삽입된 종방향철근을 모델링하여 콘크리트 영역에 Embedded Element로 고려하도록 하였으며, 희생강관은 쉘요소로 모델링 하였다.

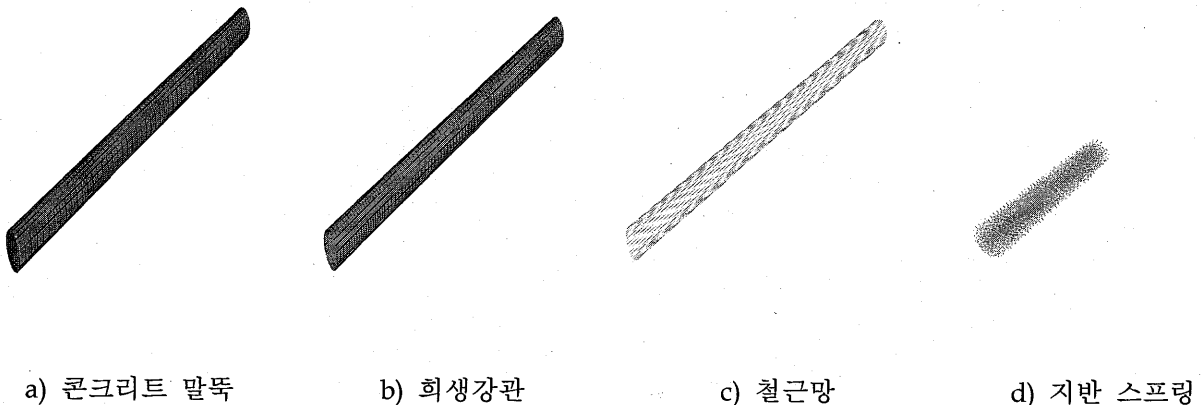
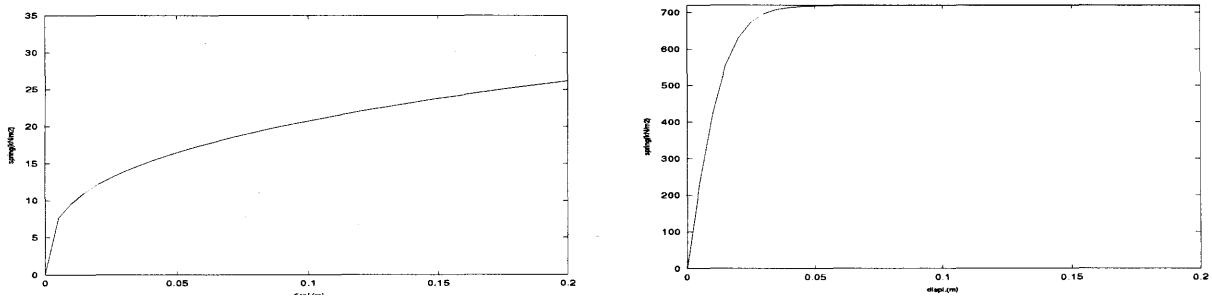


Fig. 4. 슬래브의 철근 배치

### 2.3 지반스프링

파일을 횡방향으로 지지하고 있는 주변 지반은 충돌하중의 작용시 대변형을 겪게 된다. 이러한 대변형을 겪는 지반은 일반적인 유한요소보다도 변형상태에서 비선형 특성을 잘 나타낼 수 있는 지반스프링을 사용해 모델링 하는 것이 해석의 효율성을 높일 수 있으므로 본 논문에서는 비선형 지반 스프링을 이용하여 지반의 비선형성을 고려하였다. 대표적인 지층의 파일의 단위 폭 당 지반스프링의 p-y곡선은 Fig. 5 에서 보이는 바와 같다(한국지반공학회, 2002). 이런 지반 스프링의 p-y 곡선은 지층의 깊이별로 다른 값을 가지므로 실제 해석에서는 해석모델의 절점좌표를 기준으로 생성된다. 생성된 지반스프링은 파일의 중심선을 따라 고정 되는 것을 가정하였다. 이는 파일의 표면과 방사방향으로 무한대점과의 연결과 동일한 효과를 나타낸다



a) 점토층

b) 자갈층

Fig. 5. 지반 스프링의 p-y 곡선

### 2.4 재료의 모델링

해석모델을 구성하는 재료는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 우선 선박과 파일을 구성하는 강재와 파일의 속채움과 파일을 일체화하는 상부슬래브 그리고 추가적으로 강재로 구성되지만 콘크리트에 매립되어 거동하는 철근이다. 본 연구에서 강재는 탄소성 거동을 하는 것으로 가정하였으며 재료모델의 응력변형률 곡선은 Fig. 6 과 같다.

강 파일내부에 충전되는 콘크리트는 Damaged Plastic 재료모델을 사용하였다. 이 모델은 콘크리트의 압축파괴와 인장연화 현상을 나타낼 수 있으며 균열분포를 파악할 수 있다. 해석에 적용된 콘크리트 재료모델의 응력변형률 곡선은 Fig. 7 에서 보이는 바와 같다.

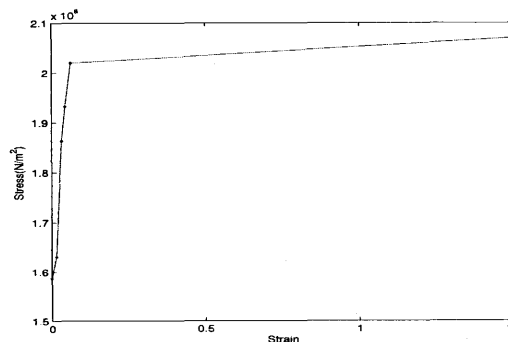


Fig. 6. 강재의 응력 변형률 곡선

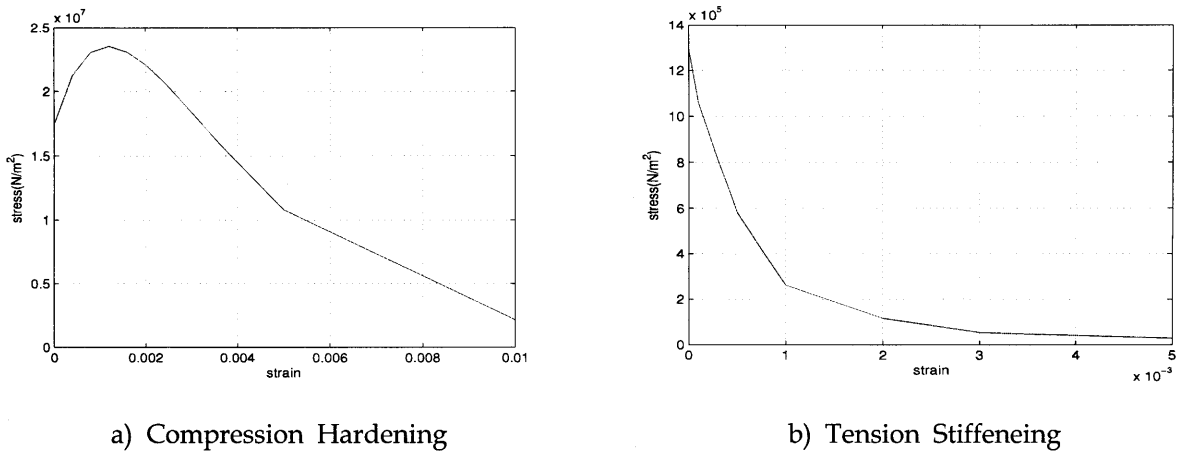


Fig 7. 콘크리트 재료의 소성응력변형률곡선

### 3. 해석 조건

선박 충돌해석에서 충돌속도는 매우 중요한 요소이다. 교량의 주 경간 사이를 통과하는 선박의 적당한 설계속도 산정을 위해서는 풍속, 해당 해역에서의 유속, 항로 형상 등의 자연적인 조건과 설계선박의 운항속도를 고려해야 한다. 본 연구에서는 항내수로에서 충돌이 발생할 수 있는 최대운항속도인 5knot(2.573m/sec)로 충돌속도를 가정하였다.

선박의 충돌 형태는 선박의 상태 및 시계, 조류 등의 영향으로 인하여 정면 충돌에서부터 표류에 의한 충돌까지 많은 형태를 고려해야하기 때문에 일정한 모델을 정하기 어렵다. 본 연구에서는 선박의 충돌시 구조물에 가장 큰 에너지를 전달할 수 있는 정면충돌을 고려하여 해석을 수행하였다.

선박충돌 충돌해석은 짧은 순간에 발생하는 구조물의 운동상태 및 재료의 파괴 등을 고려해야 하므로 일반적으로 매우 큰 해석모델과 세밀한 해석간격을 필요로 한다. 이러한 해석은 일반적인 해석 프로그램으로는 수렴이 어려우므로 외연적 시간적분을 사용한 해석프로그램을 이용하여 해석하는 것이 효율적이다. Abaqus/Explicit는 외연적 시간 적분법(explicit time Integration)을 이용한 범용 유한 요소 해석 프로그램으로 비선형성이 강한 Transient Dynamic 문제와 접촉이 주된 준정적 비선형 문제들을 해석에 널리 사용되는 프로그램이고 다양한 프로젝트에서 신뢰성이 검증되었다. 본 해석에서는 ABAQUS/Explicit 6.5를 사용하였다(HKC, 2005).

본 연구에서는 선박의 중량(DWT)에 따른 충돌에너지 소산을 고려하여 해석을 수행하였다. 선박의 중량은 DWT 10000에서 DWT 25000까지 5000씩 증가 시켰으며, 선박의 충돌 속도는 5knot이며, 선박의 운동에너지가 구조물에 가장 크게 전달될 수 있게 정면충돌(90°)로 해석을 수행하였다(Fig. 8).

### 4. 해석결과

#### 4.1 변형

Fig. 9 는 충돌 후 최종형상으로, 선박의 선수부와 파일의 상하단부, 그리고 슬래브에서의 변형을 확인할 수 있다. 파일은 슬래브와 지반스프링에 의해 구속된 부분이 꺾이면서 소성힌지가 발생되었고, 그 부분에 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 선수의 관입으로 인한 슬래브의 파괴 및 변형을 확인할 수 있다.

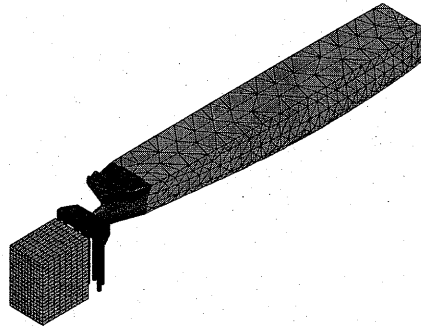
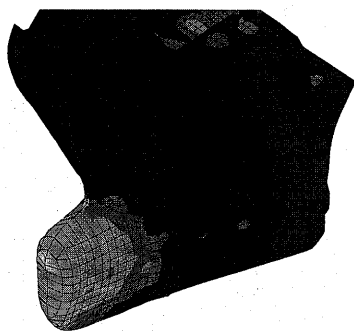
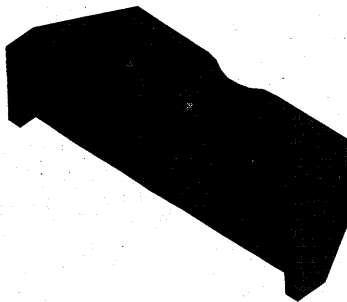


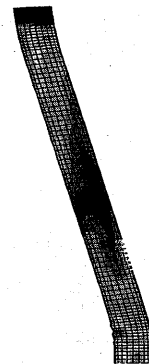
Fig. 8. 충돌해석 모델



a) Shipbow



b) Slab



c) Pile

Fig. 9. 충돌후 최종형상

#### 4.2 에너지 거동

Fig. 10은 파일형 방호공의 충돌 중 충돌조건에서 선박의 중량을 변화시켜 에너지 소산 관계를 정리한 그래프이다. 운동에너지(kinematic energy, KE)의 소산은 선박 중량에 관계없이 주로 소성소산(plasticity dissipation, PD)으로 이루어지며 변형에너지(strain energy, SE)에 변환도 나타났다. 선박의 중량이 증가할수록 충돌이 종료되는 시점이 늦어지는데 이는 선박의 중량이 커지면서 운동상태를 유지하려는 선박의 관성력이 커지기 때문이며, 변형에너지(SE)의 경우 충돌 진행 시 증가하다 충돌이 종료되면서 감소되는데 이는 충돌이 종료되면서 구조물의 탄성 회복에 의한 것으로 판단된다.

선박중량에 따른 소산에너지의 변화 그래프는 Fig. 11에 나타나있다. 그래프에서 보면 ① 2초~2.5초까지는 선형 거동을 하며, ② 2.5초 이후에는 급증하다 ③ 3.5초를 전후해서 에너지의 증가가 거의 없어진다. ①은 선박과 충돌로 인하여 슬래브와 파일이 일체 거동을 하며 케이슨에 접촉하기 까지 거동을 나타낸 것이다. 이 때 소성소산은 파일 그룹과 지반 스프링의 휨거동에 의한 것이며, 그 크기는 선박의 중량에 따른 크기 변화는 크게 나타나지 않는다. ②는 슬래브가 케이슨과 접촉된 후 슬래브와 선수부에서의 파괴 및 변형이 일어나기 때문이며, 이때는 파일의 소성소산의 증가는 거의 나타나지 않는다. ③은 선박 충돌이 종료된 시점으로 모든 부재가 완전 소성상태가 되어서 더 이상의 소성소산이 증가하지 않는다.



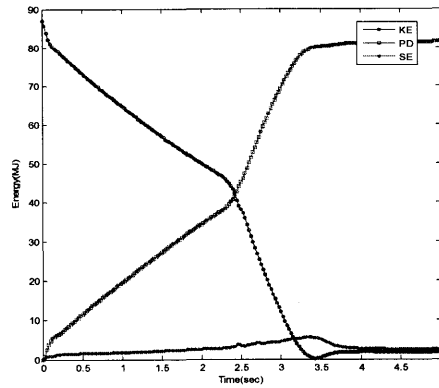


Fig. 10. 에너지 소산 거동(DWT10000)

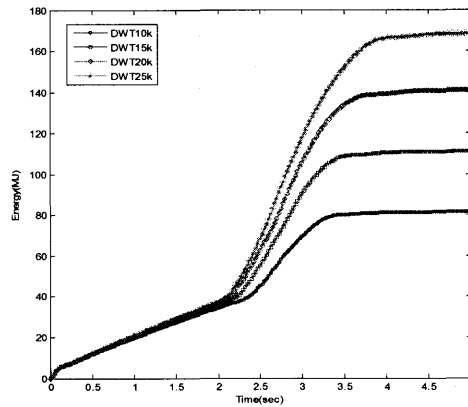


Fig. 11. 선박 중량에 따른 소성소산의 변화

Table 3과 Table 4는 슬래브의 운동이 종료되었을 때와 선박의 운동이 종료되었을 때 각 중량 Case에서 주요부재(slab, pile, shipbow)의 소성소산을 나타낸 것이다.

Table 3. 슬래브 운동이 종료된 후 각 중량 Case 주요부재 소성소산

| DWT     | 10000             | 15000             | 20000             | 25000             |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 총 소성소산  | 38.93             | 39.17             | 38.57             | 38.58             |
| Pile    | 26.22<br>(67.35%) | 26.69<br>(68.14%) | 25.09<br>(65.06%) | 24.86<br>(64.44%) |
| Shipbow | 3.91<br>(10.04%)  | 3.98<br>(10.16%)  | 4.04<br>(10.48%)  | 4.03<br>(10.45%)  |
| Slab    | 8.80<br>(22.61%)  | 8.50<br>(21.70%)  | 9.43<br>(24.46%)  | 9.69<br>(25.12%)  |

※ ( ) : 소성소산량/총 소성소산, 에너지 단위: MJ

Table 4. 선박의 운동이 종료된 후 각 중량 Case 주요부재 소성소산

| DWT     | 10000             | 15000             | 20000             | 25000             |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 총 소성소산  | 82.02             | 111.62            | 141.44            | 169.20            |
| Pile    | 28.28<br>(34.48%) | 29.06<br>(26.03%) | 28.03<br>(19.82%) | 28.06<br>(16.58%) |
| Shipbow | 13.73<br>(16.74%) | 20.85<br>(18.68%) | 34.74<br>(24.56%) | 54.70<br>(32.33%) |
| Slab    | 40.01<br>(48.78%) | 61.71<br>(55.28%) | 78.67<br>(55.62%) | 86.44<br>(51.09%) |

※ ( ) : 소성소산량/총 소성소산, 에너지 단위: MJ

Table 3 및 4에서 알 수 있듯이, 충돌 초기에는 파일에 의한 에너지의 소산이 65%정도로 매우 큰 비중이지만, 슬래브의 운동이 종료된 시점부터는 파일의 휨이 거의 발생하지 않기 때문에 에너지 소산량이 크게 증가하지 않는다. 슬래브가 케이슨과 접촉하여 운동이 종료된 후에는 선박과 슬래브에서 충돌에너지를 소산하게 되는데 이는 선수와 슬래브의 파괴 및 변형에 의한 것으로 선박과 슬래브가 총 소산에너지의 최대 80%를 차지하게 된다. 특히 선수보다는 슬래브의 소산에너지가 높는데 이는 선수의 변형보다 슬래브에서 더 큰 변형이 일어나기 때문이다. 또한 선박의 중량이 클수록 슬래브가 소산하는 에너지의 양이 증가한다. 하지만 선박의 중량 증가에 따른 소산 에너지 증가 폭은 슬래브보다 선수의 증가가 더 뚜렷이 나타나는데 이는 선수의 구상선수부분의 관입 깊이가 깊어짐에 따라 구상선수의 변형이 증가하기 때문이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 선박이 파일형 선박충돌 방호공과 충돌하였을 때를 가정하여 선박의 중량을 변화시키면서 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻어왔다.

- 충돌 초기는 파일의 휨 변형에 의한 에너지 소산이 우세하나 슬래브가 교량의 하부구조와 접촉한 후에는 슬래브와 선수의 변형 및 파괴로 인한 소산이 이루어진다.
- 파일에 의한 에너지 소산은 충돌선박의 중량 변화에 관계없이 거의 일정하고 이는 소성현지의 회전량에 의해 결정된다.
- 파일의 에너지 소산능력을 넘어서는 충돌에너지는 슬래브와 선수에서 소산된다. 특히 선수의 변형에 의한 에너지소산의 증가가 뚜렷이 나타난다.
- 파일형 방호공의 설계 시 파일에 의한 에너지소산은 파일의 강성확보, 파일의 수 및 회전량으로 결정된다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. (No.20100021227)

## 참고문헌

- [1] AASHTO (1991). Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges.
- [2] HKC (2005). ABAQUS V6.5 User's manual.
- [3] Zhang, S. (1999). The Mechanics of Ship Collisions. Technical University of Denmark
- [4] 고광오,, 김종성, 조의경 (2004). “선박과 교량의 충돌해석.” 한국강구조학회지 학술기사.
- [5] 배용귀, 이성로 (2008). “파일지지 구조물의 선박 충돌거동에 대한 해석.” 대한토목학회논문집, Vol.28, No.3, pp.323-330
- [6] 이성로, 이계희, 이완수 (2004). “교량의 선박충돌 에너지 산정.” 대한토목학회 논문집, Vol.24, No.5, pp.951-960.
- [7] 홍관영, 이계희 (2005). “선박충돌에 의한 선박과 방호공의 에너지 소산 메카니즘.” 전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집.
- [8] 한국지반공학회 (2002). 깊은기초.
- [9] 대한토목학회 (2006). 케이블 강교량 설계지침.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 03월 16일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 03월 17일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 03월 31일