

# 구조물의 선박충돌 해석

## Ship Collision Analysis of Structures

이 성 로\*      배 용 귀\*\*      이 계 희\*\*\*  
Lee, Seong-Lo      Bae, Yong-Gwi,      Lee Gye-Hee

### 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 damage of ship and structures are obtained. In this study, results of finite element analysis are compared with previous studies in USA, Japan and some countries of Europe. 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. 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.

### 요 지

선박충돌에 따른 동적특성을 분석하기 위하여 선박의 질량 및 속도에 따른 변화와 구조물의 재료 및 형상에 따른 유한요소 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 선박과 구조물의 손상과 충돌하중-시간이력을 얻었다. 본 연구에서는 유한요소해석의 결과를 미국과 일본 및 유럽의 일부 국가에서 연구된 자료와 비교하였다. 동적특성들은 선박과 구조물의 상호작용에 따라 서로 달랐다. 선박-구조물 상호작용에 대해 많은 요소들이 영향을 미치는 것으로 보인다. 선박의 충격과 관련된 동적충격이 가해지는 동안의 재료와 구조물에 있어서의 비탄성거동에 대해서는 극히 미비한 정도의 정보만이 가용하기 때문에, 경험과 올바른 공학적 판단에 기반한 가정들을 사용하여야 한다. 따라서 선박과 구조물의 상호작용에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

**Keywords :** Ship collision, Finite element analysis, Interaction between ship and structures

**핵심 용어 :** 선박충돌, 유한요소해석, 선박과 구조물의 상호작용

\* 정희원, 목포대학교 건설공학부 교수

\*\* 학생회원, 목포대학교 석사과정

\*\*\* 목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

E-mail : sllee@mokpo.ac.kr 061-450-2472

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2006년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

선박충돌과 관련된 많은 연구는 주로 선박과 선박과의 충돌이나 선박의 좌초 등을 주요 연구대상으로 하고 있으며 조선공학 분야에서 활발하게 수행되었다. 선박의 충돌에 대한 선체강도의 연구는 1950년대 말 원자력선내의 용기를 타선박의 충돌로부터 보호하기 위하여 효율적인 구조를 갖추기 위한 목적으로 시작되어(Minorsky)<sup>(6)</sup> 근래에는 원유운반선, LNG 및 LPG 운반선 등과 같은 위험화물 운반선의 경우에는 충돌이나 좌초와 같은 해난사고로 인하여 해양오염 및 선각 거더의 붕괴라는 문제가 대두되고 있기 때문에 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

선박충돌해석에서는 충돌시 선체의 파손에 의해 소산되는 에너지에 의한 손상과 구조응답을 해석한다. 이에 대한 연구는 선박 충돌과 좌초를 포함하며 소성 변형, 파괴역학, 마찰 등을 해석하는 방법에 따라 간편식을 이용하는 방법부터 비선형 유한요소 해석에 이르기 까지 해석 모델링과 계산과정이 차이가 난다. Minorsky<sup>(6)</sup>, Akita et al.<sup>(7)</sup>는 원자력선의 충돌에 대한 해석을 간편식을 이용하여 해결하였고, Reardon and Sprung<sup>(8)</sup>, Suzuki et al.<sup>(9)</sup>, Pedersen and Zhang<sup>(10)</sup>은 Minorsky의 연구결과를 발전시켰다. 또한 Pedersen et al.<sup>(11)</sup>, Wang et al.<sup>(12)</sup>, Chen<sup>(13)</sup> 등은 설계에 적합하도록 내부역학에 대한 간편 해석법을 발전시켰다. 수치해석에 대한 연구는 초기의 간편 유한요소해석(Ito et al.<sup>(14)</sup>에서 재료의 대변형, 비선형 등을 충분히 고려하는 비선형 유한요소해석(Amdahl et al.<sup>(15)</sup>, Kitamura<sup>(16)</sup>, Kuroiwa<sup>(17)</sup>)으로 발전되고 있다. 국내에서는 그동안 교량의 선박충돌과 관련한 연구가 거의 이루어지지 않고 있었는데, 최근 들어 선박충돌 해석과 충돌 방호공에 대한 해석 등의 연구가 수행되고 있다(이성로 등<sup>(2)(3)(4)</sup>).

일반적으로 교각과 선박의 충돌시 충돌에너지의 대부분이 선체의 손상에 의해 소산되는 강성충돌이 설계의 기본개념으로 되어 있고 이로부터 교각에 작용하는 충격력을 계산하여 하부구조물을 설계하도록 규정하고 있다. 설계자는 교량이 충격하중에 대해 탄성적이거나 비탄성적인 거동을 하여 지지할 수 있도록 설계하는

데, 충돌에 의한 거동이 비탄성적이라면, 전체구조물의 파괴를 방지할 수 있도록, 구조적 여유간격이나 다른 방법을 써서 설계하여야 한다. 또는 충격하중의 크기를 교각이나, 상부구조물 부재의 강도보다 작게 감소시키거나, 이들을 개별적으로 방호할 수 있도록 방현재, 파일로 지지된 구조물, 돌핀, 섬 등을 설치하는 것이다. 현재 사용되는 방호구조물의 설계는 대부분 에너지개념에 근거하고 있다. 이때 선박의 운동에너지 손실은 방호구조물이 흡수한 에너지와 같다는 연성충돌을 기본가정으로 하고 있다. 충격에 관련된 운동에너지는 방호구조물의 휨, 전단, 비틀 및 변위에 의한 일에 의하여 흡수된다. 방호시스템의 설계는 통상 반복과정을 통하여 이루어지므로 초기설계에서는 대략적인 방호시스템을 설정한다. 이 과정에서는 해석 또는 물리적 모델링과 시험을 통하여 하중과 변위의 관계도를 구한다. 이 관계도 곡선하부의 면적이 방호시스템의 에너지 흡수 능력이다. 최종적으로 방호구조물의 충돌하중과 에너지 흡수 능력을 각각 설계 선박충돌하중 및 에너지와 비교함으로써 선박하중에 대하여 방호구조물이 안전하게 지지하는 지를 알 수 있다.

본 연구에서는 소형의 선박충돌에 대한 방호구조물의 구조해석을 통하여 하중과 변위의 관계를 규명하고 방현재의 물성에 따른 특성을 평가함으로써 소형 선박충돌에 대한 방호구조물의 설계 기초자료로 활용하고자 한다. 이를 위해 ABAQUS<sup>(20)</sup>를 이용하여 비교적 작은 선박과 교각 방현재와의 충돌 해석을 수행하였다. 특히, 동일한 선박에 대하여 질량 및 속도에 의한 변화와 대상구조물의 형상 및 물성치의 변화에 따른 하중재하형태, 하중지속시간, 선박손상정도 등의 관계를 AASHTO<sup>(19)</sup>와 EUROCODE<sup>(21)</sup> 방법의 결과에 대해 비교·검토하였다.

## 2. 선박충돌 방호공

방호구조물은 대부분의 선박충돌에너지가 방호구조물의 파괴와 손상 등에 의한 에너지 소산으로 교각을 보호하도록 설계하여야 한다. 설계선박의 크기가 결정되면 선박의 충돌에너지 크기에 따라 방호시스템의 종류를 결정한다. 선박의 충돌하중과 방호구조물의 하중

-변위 관계는 간략식이나 유한요소해석을 이용한 내부 역학적 해석이나 물리적 모델링과 시험을 통하여 얻게 된다. 방호구조물의 하중-변위 관계도에서 곡선하부의 면적이 방호시스템의 에너지 흡수능력이다.

방현재는 비교적 작은 충돌하중으로부터 구조물을 보호하기 위한 장치로 교각기초의 전면이나 이를 보호하기 위한 구조물에 부착하여 사용된다. 방현재는 사용하는 재료에 따라 목재, 고무, 콘크리트, 강철방현재로 분류할 수 있으며, 해당재료의 역학적 성질을 이용하여 선박의 충돌에너지가 휨, 전단, 변형 등에 의하여 소산될 수 있도록 설계된다. Fig. 1, 2는 일반적인 형태의 콘크리트방현재 및 강철방현재를 나타낸 것으로 선수의 손상이나 불꽃발생을 방지하기 위하여 목재와 조합된 형태로 사용되고 있다. 중·대형선박의 충돌로부터 보호하기 위한 장치로는 파일지지시스템, 돌핀, 인공섬 등이 있다.

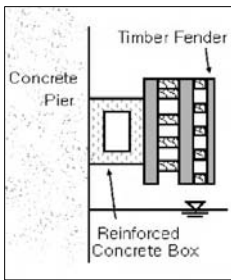


Fig. 1 콘크리트방현재

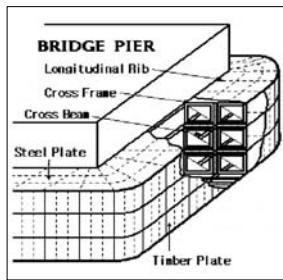


Fig. 2 강철방현재

### 3. 해석 모델

#### 3.1 선박의 모델링

선박의 톤수는 용도나 목적에 따라 용적톤수(GT), 제화중량톤수(DWT), 배수톤수(DISPT) 등으로 분류할 수 있다. 그런데 AASHTO<sup>(18)</sup>에서는 선박의 종류와 DWT에 따른 일반적인 제원과 형태를 비교적 자세하게 설명하고 있으며, 일본 분주서국연락교공단의 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 비교·검토하였다. 4,000GT 선박의 전체길이는 식 (1)과 같이 산정되며, 선수부의 표준치수는 선박의 길이에 대한 함수로써 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(m) = 50 \times \eta^{1/3}, \quad \eta = \frac{W}{500}, \quad W \leq 4,000GT \quad (1)$$

Table 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)	$L_{coll}$	$0.1L$	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(°)	$2\theta$	$35 \sim 70^\circ$	$70^\circ$

구조물과 충돌로 인한 소성변형은 일반적으로 선수부에 집중된다. 따라서 본 연구에서는 선수부만 모델링하여 사용하였으며, 선체는 등가의 질량과 단면을 가지는 Frame요소로 선수격벽과 일체로 거동하도록 모델링하였다. 선수와 선체는 운동학적으로 연결되어 있다. 실제 모델링 과정에서는 선수의 프레임 간격을 0.61m에서 0.6m로, 중통재 간격을 1.83m에서 2m로 수정하였으며 수정된 간격은 계산과정에서 고려되었다. 프레임은 공칭치수 125×125의 H형강을 사용하였으며 중통재 및 선수격벽은 외판두께와 동일한 Shell의 형태로 사용하였다. 유한요소로 모델링된 선수는 3879개의 FEM Element로 비교적 상세하게 구성되어 있으며, 선체는 10개로 단순하게 구성하였다. 또한, 선박의 부력에 의한 영향은 등가의 스프링을 사용하여 실제와 유사한 거동을 보이도록 하였다. Fig. 3은 선수부의 표준형상을 나타낸 것이며, Fig. 4는 유한요소로 모델링된 선수부의 격자망을 나타내고 있다.

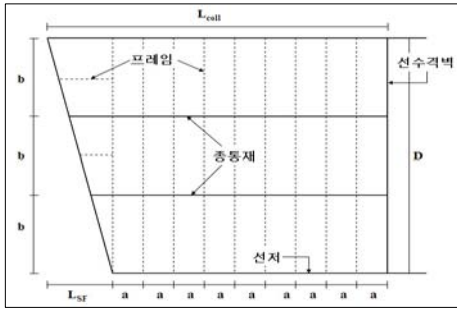


Fig. 3 선수부의 표준형상

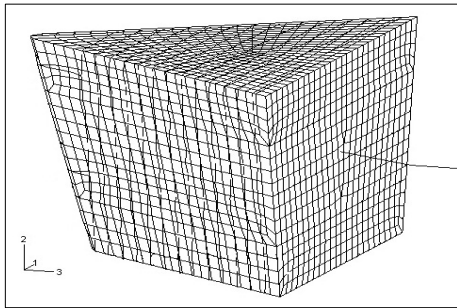


Fig. 4 선수부의 유한요소 모델링

### 3.2 구조물의 모델링

구조물에 대한 선박의 충돌은 보호시설이 없는 교각 혹은 접안시설에 대한 충돌과 방현재 등의 보호구조물에 대한 충돌을 생각할 수 있다. 먼저, 보호시설이 없는 상태는 무한 강성의 벽체에 대한 선수 충돌로써 1,500mm×900mm 단면의 Discrete Rigid 요소를 사용하여 대부분의 에너지가 선수변형에 의해 소산되도록 하였다. 보호구조물에 대한 충돌로써 고무방현재는 대형선박의 접안용으로 쓰이는 H사의 높이 2,500mm, 길이 3,000mm의 제품을 사용하였으며, Solid로 모델링된 780개의 FEM Element로 구성되어 있다. 콘크리트 방현재는 AASHTO<sup>(18)</sup>의 1,830mm×1,580mm 단면을 사용하였다. 길이는 3,000mm로 가정하였으며, Solid로 모델링된 180개의 FEM Element로 구성되어 있다. 강철방현재는 공칭치수 100×100의 H-Beam과 Equal Angle로 보강된 얇은 Shell요소를 사용하여 Fig. 7과 같이 모

델링하였으며, 3078개의 FEM Element로 구성되어 있다. 또한, 충돌방향과 수직인 면의 보강형은 선형 Frame요소를 사용하였으며, 충돌방향의 보강형은 Shell 요소로 모델링하였다.

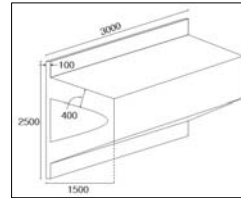


Fig. 5 고무방현재 모델

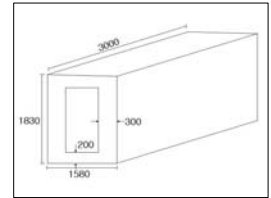


Fig. 6 콘크리트방현재 모델

Table 2 강재의 소성거동

응력(Pa)	소성변형률
$1.904 \times 10^8$	0
$1.957 \times 10^8$	0.015
$2.236 \times 10^8$	0.033
$2.318 \times 10^8$	0.044
$2.424 \times 10^8$	0.062
$2.450 \times 10^8$	1.5

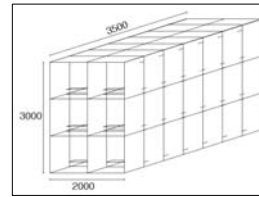


Fig. 7 강철방현재 모델

### 3.3 재료 모델링

해석에 사용된 선박의 강재는 표 2와 같이 소성거동을 하는 재료로 모델링 되었다. 그 밖의 선형거동은 일반적인 구조용 강재와 같이 포아슨비  $\nu=0.3$  탄성계수  $E_s=2.07 \times 10^{11} Pa$ 의 값을 사용하였다. 방현재는 소형선박이나 저속상태에서의 충돌을 생각할 수 있으며, 그 종류에 따라 충돌 시 거동을 달리한다. 고무 방현재는 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 방현재는 Damaged Concrete를 사용하여 재료비선형을 고려하였으며, 그밖의 선형거동은 탄성계수  $E_s=3.1 \times 10^{10} Pa$ , 포아슨비  $\nu=0.17$ 의 탄성거동을 보이는 Solid요소로 설계하였다. 강철방현재는 선박과 동일한 소성거동을 가지는 Shell요소와 탄성거동의 Frame요소로 설계하였으며, 외판의 두께는 7mm로 하여 구조적인 형태를 선박보다 약하게 하였다.

## 4. 충돌경험식

### 4.1 본주서국 연락교 공단(1981)

복합재형 원충공 설계요령에 의하면 충돌의 초기에는 접촉면적이 적기 때문에, 압괴하중은 변위  $\delta_s$ 가  $L_{SF}$ 에 도달할 때까지 점차 증가하고, 그 이후에는 거의 일정한 값을 가진다. 여기서 허용변위량은  $2/3 \cdot L_{coll}$  정도로 생각할 수 있으며 이때, 선수부 측판의 좌굴강도  $\sigma_{cr}$ 와 선수의 압괴하중  $P_{cr}$ 은 식 (2), (3)과 같다. 여기서, 좌굴강도 및 압괴하중은 종통재와 프레임으로 보강된 선수부의 선체강도와 변형량을 근거로 하중 및 에너지와의 관계를 추정하는 것으로, 질량 및 속도를 주요 변수로 하는 충돌해석과 비교하는 것은 큰 의미가 없는 것으로 판단된다.

$$\sigma_{cr(s)} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq \sigma_y \quad (2)$$

$$P_{cr(s)} = 2 \cdot D \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \sigma_{cr(s)} \quad (3)$$

여기서,  $k$  : 좌굴계수  $= \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)^2$

$E$  : 탄성계수  $= 2.07 \times 10^{11} (N/m^2)$

$\nu$  : 포아슨 비  $= 0.3$

$\sigma_y$  : 강재의 항복응력도

### 4.2 AASHTO(1991, 2004)

1976년 Woisin은 원자력선박이 다른 선박의 충돌하였을 때의 안정성을 검토하기 위한 물리모델 실험을 실시하였으며 이로부터 선박의 규모에 대한 충돌하중을 삼각형 확률분포함수로 나타내었다. AASHTO는 이러한 데이터에 기초하여 실험자료의 계속적인 분석을 통해 강성 물체에 대한 평균충돌하중식을 제안하였다. 또한, 일반 운동에너지에 수리동적질량계수를 고려한 선박의 충돌에너지식과 충돌하중 그리고 선수변형길이를 간단히 추정할 수 있는 식을 제안하였다.

$$P_S = 1.2 \times 10^5 \sqrt{DWT} \quad (4)$$

$$KE = 500 \cdot C_H \cdot M \cdot V^2 \quad (5)$$

$$a_S = 1.54 \frac{KE}{P_S} \quad (6)$$

여기서,  $P_S$  : 선박 충격력(N)

$V$  : 설계속도(m/s)

$DWT$  : 선박의 적재중량 톤수

$KE$  : 선박의 충돌에너지

$C_H$  : 수리동적 질량계수 (1.05~1.25)

$M$  : 선박의 질량(배수톤수)

$a_S$  : 선수 손상 길이

### 4.3 EUROCODE(2001)

1991년 덴마크에서는 Great Belt Bridge Project에서 Pedersen et al.(Larsen,<sup>(22)</sup>)의 수치자료를 근거로 한 세부적이고 포괄적인 선박의 충돌하중을 규정하였다. 이러한 연구를 통해 밝혀진 동적 특성들로부터 등가 정적분석에 근거한 설계에서 사용하는 충돌하중은 평균 충돌하중보다는 최대 충돌하중을 사용해야 한다는 결론을 내렸다. 이러한 결과를 바탕으로 분석적 충돌 사례의 결과에 근거하여 500DWT~300,000DWT사이의 일반적인 상선에 대하여 최대 선수 충돌하중과 선수손상길이, 하중재하 시간을 간편하게 추정할 수 있는 경험식을 제안하였다. 여기서, 선박에 의한 충돌은 강성충돌로 고려되어야 하며 운동에너지는 선박 자체의 탄성 또는 소성변형에 의해 흡수되는 것으로 한다.

$$P_{bow} = P_o \cdot \overline{L} [\overline{E} + (5.0 - \overline{L}) \overline{L}^{1.6}]^{0.5} \quad \text{for } \overline{E} \geq \overline{L}^{2.6} \quad (7)$$

$$P_{bow} = 2.24 P_o [\overline{E} \cdot \overline{L}]^{0.5} \quad \text{for } \overline{E} \leq \overline{L}^{2.6} \quad (8)$$

$$S_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{E_{imp}}{P_{bow}} \quad (9)$$

$$T_0 = 1.67 \frac{S_{max}}{V} \quad (10)$$

여기서,  $P_{bow}$  : 최대 선수충돌력(MN)

$P_o$  : 참조 충돌력 (=210MN)

$\overline{L} = L_{pp}/275 m$ ,  $L_{pp}$  : 선박길이(m)

$\overline{E} = E_{imp}/1425 MNm$ ,

$E_{imp}$  : 충돌 에너지  $\left(= \frac{1}{2} m_x V^2\right)$

$m_x$  : 선박질량과 부가질량(5%)

$V$  : 설계속도(m/s)

$S_{max}$  : 선수부 손상길이(m)

$T_0$  : 하중지속시간(sec)

## 5. 구조해석 및 검토

### 5.1 선박의 질량과 속도에 의한 결과 및 검토

구조물에 대한 선박충돌은 크게 강성충돌과 연성충돌로 분류할 수 있다. 강성충돌은 운동에너지의 대부분이 선박의 변형에 의해 흡수되며, 연성충돌은 운동에너지가 선박과 구조물이 분담하여 흡수되는 것으로 대상 구조물의 종류에 따라 다른 양상을 가진다. AASHTO LRFD에서는 교각에 대한 등가정적충돌하중과 강성한 물체에 대한 선수변형길이를 정의하고 있으며, EUROCODE에서도 강성충돌을 고려하여 정의

되었다. 따라서, 선박의 질량과 속도에 의한 구조해석은 AASHTO LRFD 및 EUROCODE와 비교하기 위하여 강성충돌로 정의하였다.

#### 5.1.1 선박의 배수톤수 변화

배수톤수는 선박의 질량을 표현한 것으로 AASHTO에서는 5,000DWT 선박의 배수톤수를 2,600ton~6,800ton로 표현하고 있다. 본 연구에서는 해당구간을 4등분하여 선박의 질량에 따른 동적특성의 변화를 조사하였다. 이때, 선박의 속도는 4m/s로 하였다. Fig. 8은 시간에 따른 하중의 형상을 나타낸 것으로 질량에 따른 크기의 변화는 있으나 형상은 대체로 유사하다. Fig. 9~11은 해석결과를 AASHTO LRFD 및 EUROCODE와 비교한 것으로, 배수톤수에 따른 최대충격력은 AASHTO LRFD의 경우 최대충격력이 DWT와 속도에 대한 함수로 표현되어 만재상태 이외의 재하상태를 제대로 표현하지 못하고 있다.

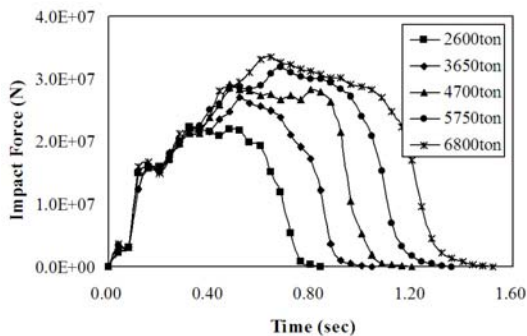


Fig. 8 배수톤수에 따른 하중의 형상

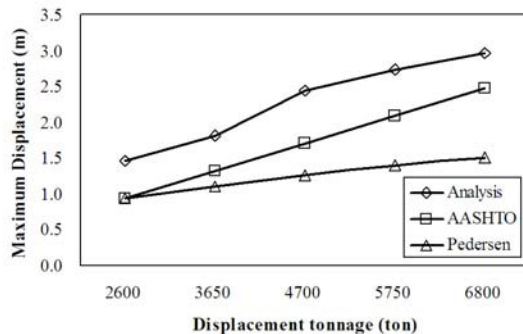


Fig. 10 배수톤수에 따른 최대변위 비교

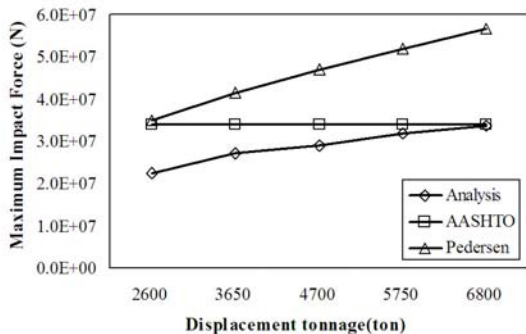


Fig. 9 배수톤수에 따른 최대충격력 비교

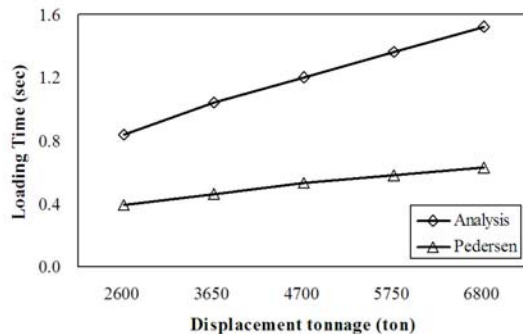


Fig. 11 배수톤수에 따른 하중재하시간 비교

EUROCODE에서는 최대충격력을 선박의 질량, 제원 그리고 속도에 의한 함수로 표현되므로 더 합리적이라 할 수 있으나 해석결과에 비하면 다소 과대평가된 경향이 있다. 최대변위와 재하시간은 AASHTO LRFD 및 EUROCODE에 비하여 다소 크게 나왔는데, 이는 선박의 모델링 과정에서 구형선수를 고려하지 않은 것이 주요인이 될 수 있으며 향후 이에 대한 검토가 필요하다.

### 5.1.2 공선상태 선박의 속도 변화

화물을 실지 않은 5,000DWT 선박의 질량은 2,600ton으로 운항속도를 4~7m/s(7.8~13.6knot)로 하여 속도에 따른 변화를 조사하였다. Fig. 12는 시간에 따른 하중의 형상을 나타낸 것으로 4~6m/s는 Haversine곡선과 유사한 형상을 가지며, 7m/s는 사다리꼴과 유사한 형상을 가지고 있다. Fig. 13~15는 해석결과를 AASHTO LRFD 및 EUROCODE와 비교한 것으로, 최대충격력은 배수톤수에 따른 결과와

같이 AASHTO LRFD에서는 질량의 상태를 정확하게 표현하지 못하고 있으며, EUROCODE에서는 과대평가된 경향이 있다. 최대변위 및 재하시간도 배수톤수에 따른 결과와 유사한 경향을 가지고 있다.

### 5.1.3 만재상태 선박의 속도 변화

만재상태인 5,000DWT 선박의 질량은 6,800ton으로 운항속도를 1~4m/s(1.9~7.8knot)로 하여 속도에 따른 변화를 조사하였다. Fig. 16은 시간에 따른 하중의 형상을 나타낸 것으로 대체로 유사하다. Fig. 17~19는 해석결과를 AASHTO LRFD 및 EUROCODE와 비교한 것으로, 만재상태에서 최대충격력은 AASHTO LRFD와 EUROCODE에 의한 결과 사이에 분포하고 있으나, 속도에 따른 최대충격력의 변화율은 다소 낮은 것을 알 수 있다. 최대변위는 다른 해석결과에 비해 다소 유사한 값을 가지며, 하중재하시간은 기존의 결과와 유사한 경향을 가지고 있다.

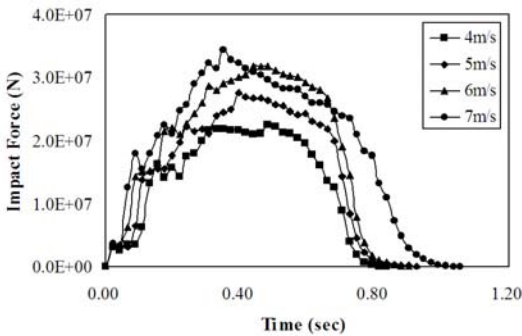


Fig. 12 공선상태의 속도에 따른 하중의 형상

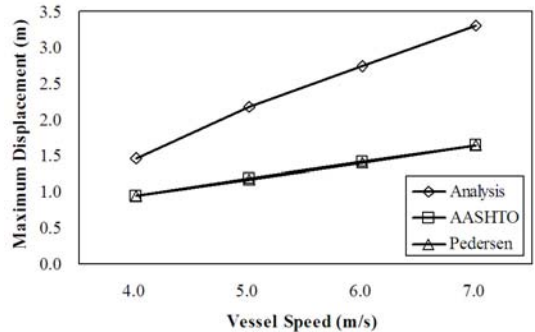


Fig. 14 공선상태의 속도에 따른 최대변위 비교

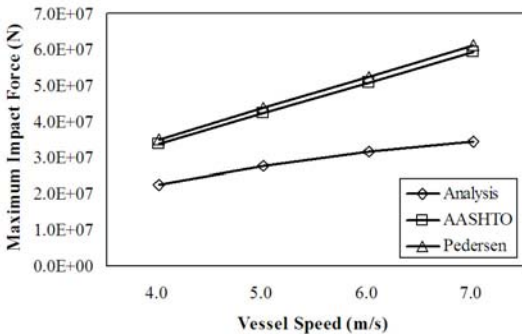


Fig. 13 공선상태의 속도에 따른 최대충격력 비교

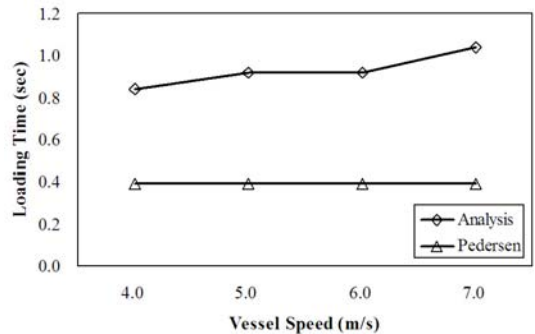


Fig. 15 공선상태의 속도에 따른 하중재하시간 비교

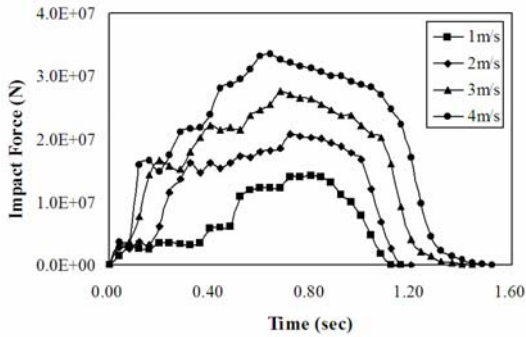


Fig. 16 만재상태의 속도에 따른 하중의 형상

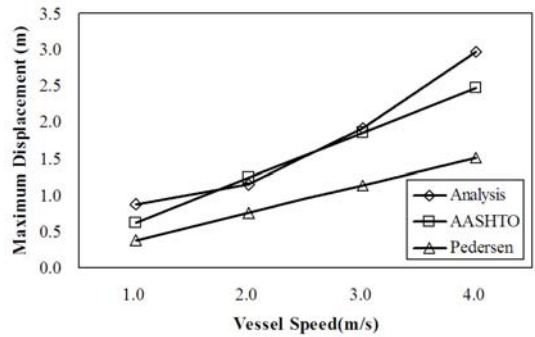


Fig. 18 만재상태의 속도에 따른 최대변위 비교

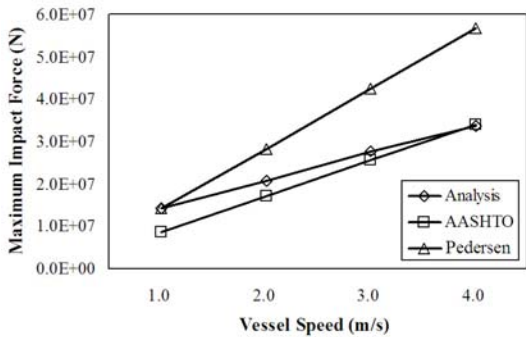


Fig. 17 만재상태의 속도에 따른 최대충격력 비교

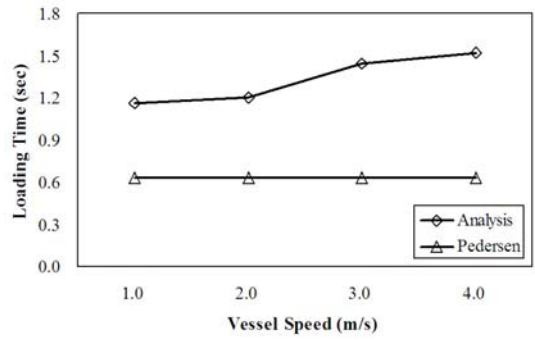


Fig. 19 만재상태의 속도에 따른 하중재하시간 비교

## 5.2 구조물의 재료와 형상에 의한 결과 및 검토

구조물의 재료 및 형상에 따른 충돌은 연성충돌로 정의할 수 있으며, 충돌에 따른 운동에너지가 일부는 선박 자체의 탄성 또는 소성변형에 의해 흡수되며, 일부는 구조물의 탄성 또는 소성변형에 의해 흡수된다. 예제모델에서는 방현재의 특성을 감안하여 5,000 DWT 선박이 공선상태(2,600ton)일 때, 1m/s의 속도로 충돌하는 것으로 가정하였다.

Fig. 20, 21은 시간에 따른 하중과 변위의 형상을 나타낸 것으로 Rigid-Wall과 콘크리트방현재는 재하시간이 짧고 최대 충격력이 큰 반면, 고무방현재와 강철방현재는 비교적 적은 충격력에 재하시간이 상대적으로 길다. Rigid-Wall에서 시간에 따른 충격력의 갑작스러운 변화는 선수가 Frame과 Shell로 보강되어 있고, 선수의 형상이 다소 복잡하여 단면에 따른 저항강도가 달라지기 때문이며, 구조물에서는 비교적 단단

한 콘크리트 방현재가 Rigid-Wall과 유사한 거동을 보이며, 유연한 고무방현재는 매끄러운 증감을 보인다. 강철방현재에서는 선박과 마찬가지로 Frame과 Shell로 보강되었을 뿐 아니라, 형상이 복잡하여 가장 불규칙한 거동을 보인다.

Fig. 22, 23은 선수변형에 의한 에너지와 대상구조물에 의한 에너지를 나타낸 것이다. 방현재는 재료의 성질에 따라 다른 특성을 가지는데, 강철방현재와 고무방현재는 충돌에너지의 흡수율이 좋고, 콘크리트방현재는 흡수율이 다소 떨어지는 것으로 나타났다. Table 3은 충돌에너지와 구조물 종류별 선수변형 및 구조물 변형에너지를 백분율로 나타낸 것이다. 산정방법은 구조물의 반력으로부터 얻어진 등가의 충돌하중과 선수 및 구조물의 변형량의 관계도의 하부면적으로부터 계산되었다. 기타 손실은 충돌면의 마찰이 그로 인해 발생하는 열이나 불꽃, 선박의 양력, 파랑과 난류의 생성 등에 의해 발생하며 대부분 정량적으로 측정이 어렵고, 그 양이 미비하다.



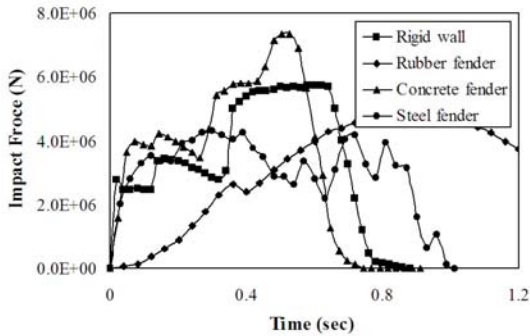


Fig. 20 대상구조물에 따른 하중의 형상

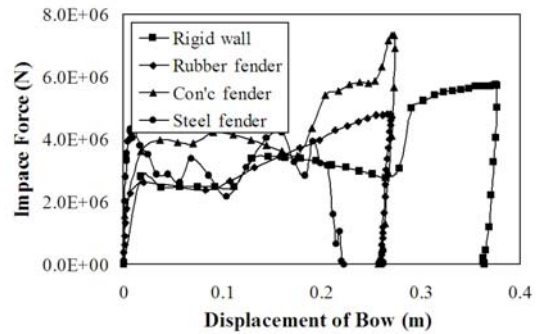


Fig. 22 선수변형에 의한 에너지소산

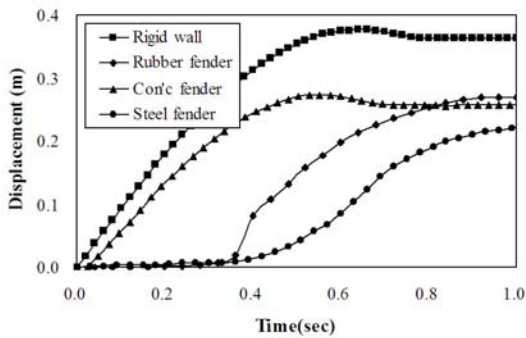


Fig. 21 대상구조물에 따른 변위의 형상

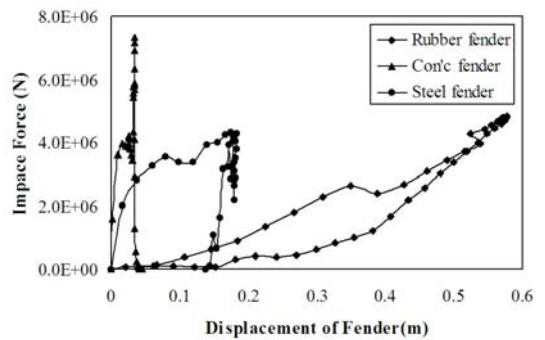


Fig. 23 대상구조물에 의한 에너지소산

Table 3 구조물의 종류에 따른 에너지 소산(Joule)

구조물	충돌 에너지	선수변형 에너지 (소산율)	구조물변형 에너지 (소산율)	기타 손실
Rigid-Wall	1,300,000	1,277,825 (98.3%)	0 (0.0%)	1.7%
Concrete fender	1,300,000	1,160,000 (89.2%)	122,000 (9.4%)	1.4%
Rubber fender	1,300,000	864,000 (66.5%)	386,000 (29.7%)	3.8%
Steel fender	1,300,000	793,000 (61.0%)	507,000 (39.0%)	0.0%

따라서 전체에너지와 비교하여 선박과 구조물에 의해 소산되는 에너지를 제외한 나머지를 기타손실로 가정하였다.

## 6. 결론

선박충돌시 발생하는 동적 특성들의 변화를 주는 요인은 크게 선박에 의한 요인과 대상구조물에 의한 요

인으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 선박의 제하상태 및 충돌속도에 따른 변화와 대상구조물의 형상 및 재료에 따른 하중재하형태, 하중지속시간, 선수손상정도 등의 관계를 살펴보았다. 또한, 미국과 일본 및 유럽에서 연구된 자료를 바탕으로 하여 유한요소 해석결과와 함께 비교·검토하였다.

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 제하상태에 따른 질량이 고려되지 않았으나, 만재상태에서는 대체로 유사한 결과를 보였다. EUROCODE에서는 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 과대평가되

는 경향이 있다. 본 연구는 선박충돌에 대한 방호공을 설계하기 위한 기본연구이며, 이를 바탕으로 에너지 흡수개념의 방호공설계를 하기 위해서는 선박충돌시 동적 특성들의 변화를 상세하게 조사하기 위한 확장연구가 요구되고 추가의 연구에서는 선수 형태나 보호공의 종류를 포함하는 다양한 조건에 의한 분석이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-00-0-10144-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 도로교통준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. 이성로, 이계희, 이완수 “교량의 선박충돌 에너지 산정,” 대한토목학회 논문집, 24권 5-A호, 2004(a). 9, pp.951-960
3. 이성로, 이계희, 고재용, “방호공을 고려한 선박의 충돌 하중”, 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 제17권, 1집, 2004(b), pp.193-200.
4. 이계희, 이성로, 고재용, 유원진, “돌핀방호공의 선박충돌해석,” 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 제18권, 제1집, 한국전산구조공학회, 2005, pp.143-150.
5. 複合材型緩衝工の設計要領(案), 本州四國連絡橋公團, 1981.
6. Minorsky W., An Analysis of Ship Collisions with reference to Nuclear Power Plants. J. of Ship Res; 3(2): 1-4, 1959.
7. Akita Y., Ando N., Fujita Y., and Kitamura K., Studies on Collision-Protective Structures in Nuclear Powered Ships, Nuclear Engineering Design, 19:365-401, 1972.
8. Reardon P.C., Sprung J., Validation of Minorsky's Ship Collision Model and Use of the Model to Estimate the Probability of Damaging a Radioactive Material Transportation Cask during a Ship Collision, International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, CA, 1996.
9. Suzuki K., Ohtsubo H., and Sajit K.S., Evaluation of Absorbed Energy in Collision of Ships-the Effectiveness of Minorsky's Formula in Anti-Collision Structure, J. of the Society of Naval Architects of Japan;155:311-7, 1999.
10. Pedersen PT, Zhang S. Absorbed energy in ship collisions and grounding-revising Minorsky's empirical method. J Ship Res 44(2): 140-54, 2000.
11. Pedersen P.T., Valsgard S., Oisen D., and Spangenberg S., Ship Impacts: Bow Collisions. International J. of Impact Engineering;13:163-57, 1993.
12. Wang G, Ohtsubo H, Arita K. Inner dynamics of side collision to bridge piers. In: Gluver H, Olsen D, editors. Ship Collision Analysis. Rotterdam: Balkema. 1998.
13. Chen D., Simplified Ship Collision Model, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
14. Ito H., Kondo K., Yoshimura N., and Kawathima N., A Simplified Method to Analyze the Sstrength of Double Hulled Structures in Collision, J. of the Society of Naval Architects of Japan;160:266-74, 1992.
15. Amdahl J, Kavlie D., Johansen A., Tanker grounding resistance. Proceedings of the Sixth International Symposium on Practical Design of Ships and Mobil Units (PRADS'95), vol. 2, Seoul, pp, 1072-83, 1995.
16. Kitamura O. Comparative study on collision resistance of side structure. International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, 1996.
17. Kuroiwa T. Numerical simulation of actual collision and grounding experiments. International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, 1996.
18. AASHTO, Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, February, 1991.
19. AASHTO, “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications”, 2004.
20. ABAQUS analysis user's manual, HKS, 2003.
21. EUROCODE 1, Basic of Design and Actions on Structures, European Standard, 2001.
22. Larsen, O. Damgaard, “Ship Collosion with Bridges” The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, IABSE, 1993.

(접수일자 : 2005년 5월 19일)