

## 유조선의 간이 충돌/좌초강도 평가시스템 개발

이탁기<sup>(1)</sup>, 김재동<sup>(1)</sup>, 전태병<sup>(2)</sup>

### Development of Simplified Collision and Grounding Strength Assessment System of Oil Tankers

T.K. Lee<sup>(1)</sup>, J.D. Kim<sup>(1)</sup> and T.B. Chun<sup>(2)</sup>

#### Abstract

This paper describes a development of Collision/grounding Strength Assessment System (COSAS) using simplified method. This method is formulated in closed-form equation by taking into account crushing caused by bulbous bow collision and cutting caused by forward speed grounding. To verify the accuracy of the developed system, some examples for test models of double side/bottom structure in collision/grounding situation are considered. This system might be useful for analysis of structural damage of oil tankers in collision/grounding.

Keywords: oil tanker(유조선), collision(충돌), grounding(좌초), simplified strength assessment(간이강도평가)

#### 1. 서 론

최근 연이어 발생한 유조선의 충돌/좌초사고는 선박과 선원에 대한 안전성 확보측면에서 뿐만 아니라, 적재원유의 선외 유출로부터 해양환경의 보호 및 해양생물자원의 보전이라는 환경보전적 측면에서 대중적인 관심을 불러 일으켰다. 특히, 공식적인 피해액만도 50억 달러에 달하는 1989년 알래스카연안에서 발생한 Exxon Valdez호 좌초사고는 유조선의 해난사고에 대한 심각성을 재인식시키는 계기가 되었다.

해난사고 통계에 의하면, 대부분의 유조선사고는 운항실수와 같은 인적실수에 의해 발생하는 것으로 보고되어 있다. 따라서, 유조선사고를 줄이는

가장 최선의 방법은 인적실수를 없애는 것이다. 그러나, 충돌/좌초사고를 유발하는 인적실수를 완전히 제거한다는 것은 거의 불가능하다. 결국, 유조선의 해난사고 발생시 사고로 인한 기름유출의 영향을 방지 또는, 최소화하기 위해서는 사고 이후의 신속한 조치가 필수적이며, 이를 위해서는 사고선박의 손상정도를 신속히 파악할 필요가 있다.

이상의 관점에서 충돌 및 좌초사고에 대한 손상 및 강도 해석법에 관한 연구 성과가 다수 보고되어 있으며, 세계 각국의 각급 연구기관에서는 이 분야에 대한 연구 개발을 위하여 연구 프로젝트를 활발히 수행하고 있기도 하다 (백점기[1995], Ohtsubo[1997]). 본 연구에서는 기존의 연구성과

(1) 한국기계연구원

(2) 한국해양연구소

를 토대로 유조선의 충돌/좌초 시 손상부위의 구조적 손상거동 특성을 조사, 분석하고 구조강도 평가기법을 정립함으로써 충돌/좌초사고 발생시 이에 대한 구난 및 방제작업에 필수적인 구조강도 및 손상범위를 빠른 시간 내에 계산하기 위한 시스템을 개발하였다. 이때, 주로 구조손상과 관련된 내부 역학적 문제를 다루며, 주요 사고 시나리오 중 선측 직각충돌인 경우와 압초에 의한 선저 좌초인 경우를 대상으로 하였다.

## 2. 충돌강도 평가

### 2.1 손상거동 특성

충돌시 손상거동 특성은 충돌선의 속도, 충돌각도 등 충돌과 관련된 핵심 요소들의 상대적인 크기에 크게 의존하며, 이에 따라 거동양상이 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 선측 직각충돌의 경우만을 고려하기로 하며, 이 경우 충돌시 손상거동은 다음과 같은 단계로 이상화할 수 있다.

(i) 외판패널의 처짐/파단, (ii) 강력부재와 특설늑골의 점진적 붕괴, (iii) 내판패널의 처짐/파단 한편, 선박간 충돌시 충돌선과 피충돌선에 작용하는 반력을 계산하기 위하여는 선체 운동해석과 유체동역학적 계산과정이 필요하다 (Pedersen [1995]). 그러나, 선박간 충돌중 직각충돌인 경우, 선체운동에 대한 영향은 비교적 작으므로 본 연구에서는 이를 별도로 고려하지 않는다.

### 2.2 구조강도 평가기법의 개발

본 연구에서는 충돌시 충돌선의 선수가 선측 강력부재와 특설늑골로 둘러싸인 선측외판에 접촉할 경우에 대하여 충돌하중과 선수진입량 관계를 명시적으로 주고 있는 Arita & Aoki (1985)의 식을 수정하여 이용하기로 한다. 이때, 충돌선의 선수에 의한 선측외판의 충돌 손상거동을 앞절에서 이상화시킨 손상단계를 적용한다.

#### 2.2.1 외판패널의 처짐조건 (막응력의 발생에 의한 저항)

충돌의 첫 단계로서 외판패널의 처짐 붕괴거동은 Fig. 1과 같이 강력부재와 특설늑골에 의해 단선 지지된 패널이 중앙부에 충돌선수의 진입에 따른 횡집중하중을 받아 변형된 상태로 나타낼 수 있다. 이 경우, 충돌선수의 진입량과 충돌하중과의

관계는 소성상태에 놓인 외판의 전포텐셜에너지를 구하고, 최소 포텐셜에너지 원리를 적용하면 다음 식으로 계산될 수 있다 (Paik[1991]).

$$F = 4 \sigma_y t \delta R \left[ \frac{\ell_w}{\ell_s \sqrt{1 + (2 \delta R / \ell_s)^2}} + \frac{\ell_s}{\ell_w \sqrt{1 + (2 \delta R / \ell_w)^2}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_y$  : 항복응력, 아래첨자 W, S: 특설늑골, 강력부재 의미.  $t$ : 외판패널의 판두께,  $\delta R$ : 선수진입량

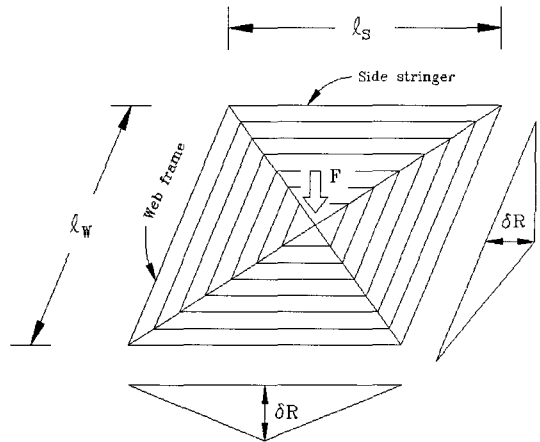


Fig. 1 Collapse mechanism of plate element under concentrated lateral loading (Paik [1991])

$\ell_w$ : 1개 패널에 대한 특설늑골의 길이,

$\ell_s$ : 1개 패널에 대한 강력부재의 길이

#### 2.2.2 외판패널의 파단조건

충돌선수에 의한 집중하중의 증가와 함께 패널의 인장 변형률이 임의의 한계 변형률  $\epsilon_{cr}$ 에 도달하면 패널에 균열이 발생하여 파단하는 것으로 본다. 이때, 패널의 인장 변형률은 특설늑골과 강력부재 쪽에서의 변형률  $\epsilon_w$ 와  $\epsilon_s$ 로 고려할 수 있다. 따라서, 이 두 값 중에서 큰 값이 한계 변형률  $\epsilon_{cr}$ 보다 커지면 패널은 파단하게 된다. 특설늑골 및 강력부재 쪽의 변형률은 각각 다음과 같이 된다.

$$\epsilon_w = \sqrt{1 + \left(\frac{2\delta R}{\ell_w}\right)^2} - 1$$

$$\epsilon_s = \sqrt{1 + \left(\frac{2\delta R}{\ell_s}\right)^2} - 1 \quad (2)$$

한편, 패널의 파단에 대한 한계 변형률  $\epsilon_{cr}$  는 일반적으로 10~20% 정도로 설정하면 실용적으로 충분하다는 것이 실험적으로 알려져 있다 (McDermott[1974], Kitamura[1978], Vredeveldt [1995]).

### 2.2.3 패널 파단후 손상거동 (강력부재와 특설늑골의 점진적 붕괴)

패널 파단후 충돌선수의 진입에 대한 저항은 Arita & Aoki[1985]가 제안한 강력부재와 특설늑골로 이루어진 십자판의 개념을 도입하여 해석한다. 즉, 패널에 균열이 발생하여 파단이 발생한 후 충돌선수가 진입을 계속할 때 강력부재와 특설늑골은 그 교차점에서부터 일정한 유효폭을 가지는 십자판의 형태로 저항하며, 충돌선수의 반경  $R$  이 십자판의 위치에 도달할 때까지 하중의 증감 없이 진입량만 증가한다.

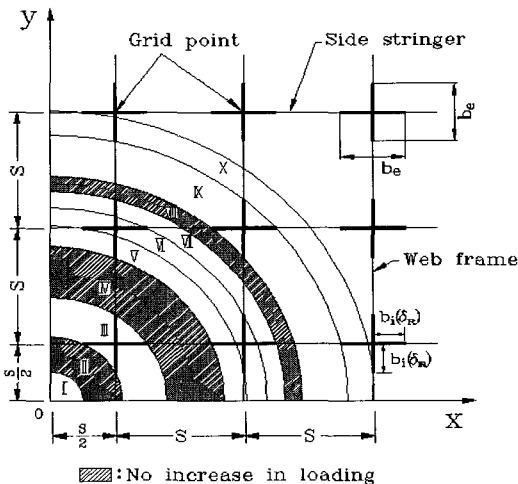


Fig. 2 Region of side structure collapsed during bow penetration (Arita & Aoki [1985])

이러한 십자판의 개념을 도입하면 충돌시 선측 구조의 손상해석 단계를 Fig. 2와 같이 구분할 수 있다. Fig. 2는 강력부재와 특설늑골의 길이가 동

일한 경우이며, 이와 같은 단계구분은 해석을 단순화시켜 선측구조의 기하학적 특징만으로 선측충돌시 강도계산을 용이하게 해 주는 잇점이 있다. 충돌선수가 십자판의 격자점에 도달하면 십자판의 저항에 의해 하중이 증가하게 되는데, 이때 하중과 진입량과의 관계는 다음 식을 따르게 된다.

$$F = \sum_{i=1}^{n_w} \sigma_w t_w b_{i,w}(\delta R) + \sum_{j=1}^{n_s} \sigma_s t_s b_{j,s}(\delta R) \quad (3)$$

- 여기서,  $t_w$ : 특설늑골의 판두께,
- $t_s$ : 강력부재의 판두께,
- $n_w$ : 충돌선수가 도달한 특설늑골 쪽의 격자점 수
- $n_s$ : 충돌선수가 도달한 강력부재 쪽의 격자점 수,
- $b_{i,w}(\delta R)$ : 충돌선수가 늑골부의 격자점에 도달했을 때의 유효폭,
- $b_{j,s}(\delta R)$ : 충돌선수가 강력부재의 격자점에 도달했을 때의 유효폭

위의 식에서  $b_{i,w}(\delta R)$  과  $b_{j,s}(\delta R)$  은 각 단계에 대한 기하학적 고려를 통하여 다음과 같이 간단하게 계산할 수 있다.

$$b_{i,F}(\delta R) = \sqrt{\left\{\delta R \tan \theta + \frac{r}{\cos \theta} - r\right\}^2 - \left(\frac{\ell_s}{2}\right)^2} - \frac{\ell_w - b_{e,w}}{2}$$

$$b_{j,G}(\delta R) = \sqrt{\left\{\delta R \tan \theta + \frac{r}{\cos \theta} - r\right\}^2 - \left(\frac{\ell_w}{2}\right)^2} - \frac{\ell_s - b_{e,s}}{2} \quad (4)$$

여기서,  $\theta$  및  $r$ : 각각 충돌선수의 선단반각 및 반경,  $b_{e,w}$ ,  $b_{e,s}$ : 각각 특설늑골과 강력부재의 유효폭

특설늑골과 강력부재의 교차점에서의 유효폭  $b_{e,w}$ 와  $b_{e,s}$ 를 계산하는 방법은 충돌선수가 십자판에 도달했을 때의 하중조건이 복잡하므로 일

의적으로 결정하기 곤란하며, Arita & Aoki는 좌굴후 유효폭의 개념을 도입하여 Faulkner(1975)의 식에 계수  $C$ 를 곱한 아래의 식들을 이용하고 있다.

$$\frac{b_{e,W}}{l_W} = C_W \left( \frac{2}{\beta_W} - \frac{1}{\beta_W^2} \right) \quad \text{for } \beta_W \geq 1, \quad (5)$$

$$\frac{b_{e,W}}{l_W} = C_W \quad \text{for } \beta_W < 1$$

$$\frac{b_{e,S}}{l_S} = C_S \left( \frac{2}{\beta_S} - \frac{1}{\beta_S^2} \right) \quad \text{for } \beta_S \geq 1,$$

$$\frac{b_{e,S}}{l_S} = C_S \quad \text{for } \beta_S < 1$$

여기서,  $\beta_W = \frac{l_W}{t_W} \sqrt{\frac{\sigma_W}{E}}$ ,

$\beta_S = \frac{l_S}{t_S} \sqrt{\frac{\sigma_S}{E}}$ ,  $E$ : 재료 탄성 계수

계수  $C_W$  및  $C_S$ 는 압축 하중을 받는 부재에 있어서의 좌굴 후 유효 폭에 대한 Faulkner식의 수정 계수이며, 모형 구조물의 경우 0.6~0.7 정도의 값을 취하며, 실제 구조물의 경우 1.0 이다.

### 2.2.4 내판패널의 처짐/파단

충돌선수가 내판에 도달하면, 내판 패널은 외판 패널과 유사한 메카니즘으로 붕괴한다고 가정하여, 앞서 기술한 방법을 그대로 적용할 수 있다.

## 2.3 간이평가시스템

선박의 충돌시 구조강도를 평가하기 위한 일반적인 방법은 구조손상에 의해 흡수되는 일의 양이 선박이 가진 초기 운동에너지와 일치한다고 하는 것이다. 속도  $V$ 로 진행되는 선박의 초기 운동에너지  $E_k$ 는 부가질량의 영향을 고려하면 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$E_k = \frac{1}{2} m(1 + C_a)V^2$$

(6) Fig. 3 Main window for Collision-Grounding Strength Assessment System

여기서,  $C_a$ : 부가질량계수, 일반적으로 0.4 (선충돌시), 0.1 (좌초시) 정도임.

본 연구에서는 상기의 가정에 바탕을 두고, 앞서 개발된 선충구조의 흡수에너지에 관한 간이식을 이용하여 선충충돌시 구조강도를 평가할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이때, 프로그래밍 언어로는 Visual Basic을 이용하였다. Fig. 3~5에는 본 연구를 통하여 개발된 충돌강도 간이 평가시스템의 화면들을 보여주고 있다.

## 2.4 개발시스템의 검증

본 연구를 통하여 개발된 시스템의 정도를 검증하기 위하여, Arita[1986]가 수행한 충돌실험 및 탄소성-대변형 해석결과를 이용하였다. Fig. 6은 Arita에 의해 수행된 실험에 대한 구조모형과 하중 작용법을 나타내고 있다. 충돌선수 모형은 끝부분이 둥근 원추형상 (끝부분의 반경: 80 mm, 각도 90 deg.)을 가진 강체이다. 또한, Fig. 7은 Arita에 의해 수행된 실험에 대한 이중 선충 모형을 상세히 나타내고 있다. 사용된 재료의 항복값은 284MPa이다. 한편, MARC를 사용하여 탄소성-대변형 유한요소해석을 수행하기도 하였다. 이때, 해석범위는 계산시간을 고려하여 모형전체를 대상으로 하지 않고, 하중 작용점 근방에만 국한시켰다. 계산시간은 FACOM M-180 컴퓨터로 5 시간 이상이었다.



Fig. 3 Main window for Collision-Grounding Strength Assessment System

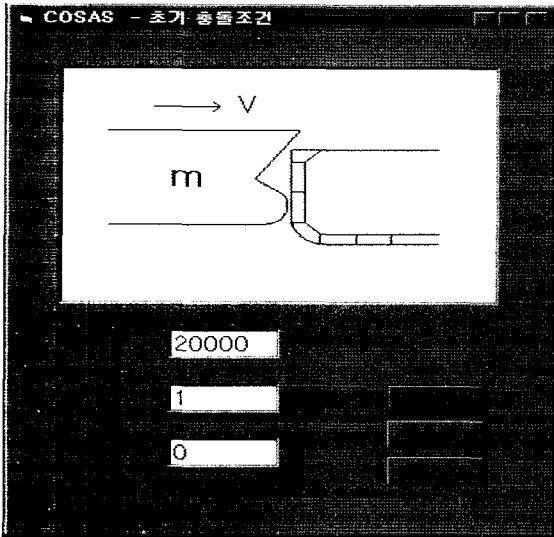


Fig. 4 Striking ship condition

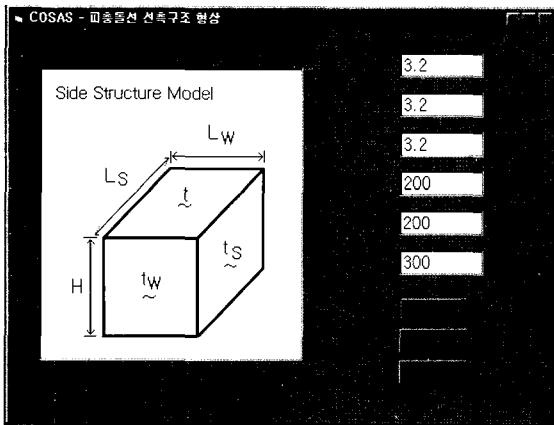


Fig. 5 Side structure of struck ship

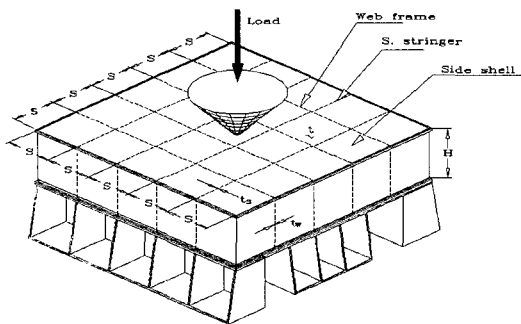


Fig. 6 Test set-up for side structure of Arita[1986]

Fig. 8에는 Arita 모델에 대한 실험, 비선형 유한요소해석 및 본 시스템에 의한 계산을 통하여 얻어진 하중 - 진입량 곡선을 비교하고 있으며, 충돌선수가 선측 내판에 이르기까지 손상에 의해 소비된 흡수에너지 값에 대하여 실험치와 계산치를 비교하면, 약 10% 정도의 차를 보이고 있다. 이때, 선측외판 패널의 한계 변형률  $\epsilon_{cr}$  과 십자판의 좌굴 후 유효폭에 대한 계수  $C$ 는 각각 0.1과 0.6으로 취하여 계산하였다.

이들 결과에 의하면, 본 시스템에 의한 결과는 실험 및 탄소성 유한요소해석 결과와 잘 대응하고 있으며, 계산속도도 약 1초 이내로서 시간적·경제적 측면에서 많은 노력과 비용을 절감할 수 있었다.

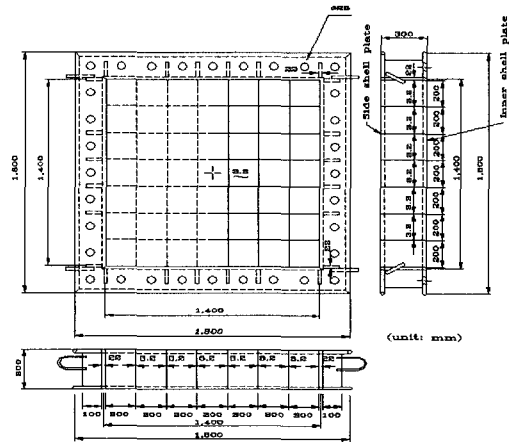


Fig. 7 Dimensions of side model of Arita[1986]

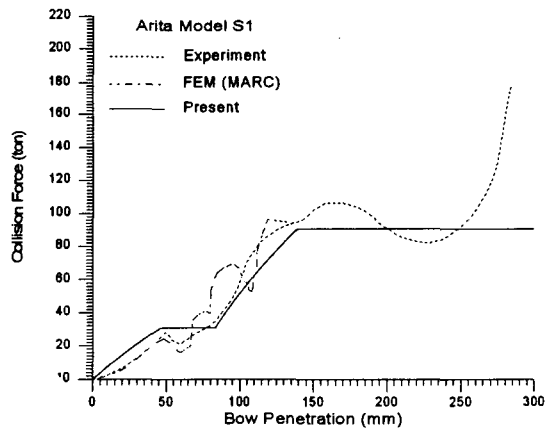


Fig. 8 Comparison of load-penetration curves for Arita model

### 3. 좌초강도 평가

#### 3.1 손상거동 특성 및 좌초 시나리오

##### 3.1.1 손상거동 특성

선박이 암초와 부딪혀 좌초사고를 당하였을 경우, 일반적으로 다음과 같은 손상과정을 겪게 된다.

(i) 선박의 전체적인 운동, (ii) 암초의 수직 방향 진입에 따른 국부 손상, (iii) 수평 방향 손상  
본 연구에서는 좌초시 구조강도의 평가에 초점을 두고 있으므로, 선박의 전체적인 운동 모드는 고려하지 않으며, 에너지 흡수의 관점에서 비교적 기여도가 낮은 수직 방향의 암초 진입에 따른 손상 또한 제외하는 것으로 한다. 결과적으로, 좌초시 선박의 주요 손상모드는 선저외판의 찢김 거동이 되며, 이를 대상으로 하여 구조손상 및 강도를 평가하기로 한다.

##### 3.1.2 좌초 시나리오

본 연구에서는 대표적인 좌초 시나리오를 다음과 같이 가정하였다. 즉, Fig. 9에서와 같이 질량  $m$  인 선박이 전진속도  $V$  를 가지고 뾰족한 강체 암초 위를 지나간다. 그림에서  $\Delta_R$  은 선저위 암초 높이이며,  $\theta$  는 암초 앞부분의 반각이다.

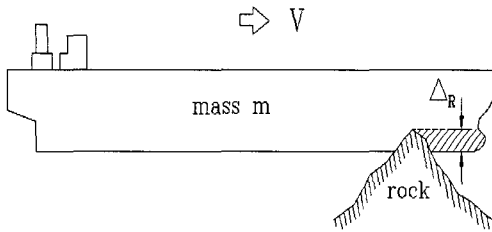


Fig. 9 Typical scenario of grounding on a rock

#### 3.2 구조강도 평가기법의 개발

본 연구에서는 Paik 등 [1994]에 의한 종보강판에 대한 시리즈 찢김 실험 결과를 바탕으로 흡수 에너지와 찢김 길이 사이의 관계를 나타내는 실험식을 제안한다.

종보강판에 대한 흡수에너지  $E_L$  을 계산하기 위하여 Lu & Calladine[1990]에 의하여 채택된 무차원 해석 이론을 적용하였다. 이때, 종보강재의 영향을 고려하기 위하여 종보강판에 대한 등가 판두

께  $t_{eq}$  를 이용하였다. 주요 파라메타에 대한 무차원 해석을 수행하면 흡수에너지와 손상길이  $\ell$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$\frac{E_L}{\sigma_o t_{eq}^3} = C \cdot \left( \frac{\ell}{t_{eq}} \right)^n \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_o$ : 항복강도,  $C$  및  $n$ : 실험 상수.  
위 식에 양대수 좌표를 취한 후 실험결과를 웨지 선단각도별로 비교한 결과, 그 관계는 동일한 웨지각도 하에서 매우 잘 성립하고 있음을 확인할 수 있었으며, 최소사승법을 적용하여 계산한 실험 상수  $C$  및  $n$ 에 대한 검토로부터 가장 양호한 결과를 주는  $n=1.5$ 인 실험 상수  $C$ 를  $C_{1.5}$ 로 두어, 흡수 에너지와 찢김 길이 간의 관계를 다음과 같이 다시 표현할 수 있었다.

$$E_L = C_{1.5} \cdot \sigma_y t_{eq}^{1.5} \ell^{1.5} \quad (8)$$

여기서,  $t_{eq}$ : 등가 판두께 ( $= t + A_s/b$ ),  $A_s$ : 보강재의 단면적,  $b$ : 보강재 간격

등가 판두께법은 Vaughan[1977]에 의해 제안되어 Wierzbicki 등[1990]과 Pippenger[1995]에 의하여 일반화된 방법으로, 하중 작용방향으로 보강된 판부재의 손상거동시에 보강재의 효과를 근사적으로 고려해 주기 위한 개념이다. 이 방법에서는 보강재의 단면적을 판에 고르게 분포시켜 판의 두께를 증가시킴으로써 보강재에 의한 내력 증가부분을 고려할 수 있도록 하고 있다.

실험 상수  $C_{1.5}$  는 손상의 진행방향에서 바라본 암초의 선단각도에 의존한다고 보아 암초 선단의 반각  $\theta$  (rad.) 에 관한 2차의 대수식으로 표현할 수 있다.

$$C_{1.5} = 3.76 \theta^2 - 1.156 \theta + 1.112 \quad (9)$$

이상과 같은 과정을 거쳐 개발된 식 (8)은 좌초시 선저 보강판 구조의 찢김에 대한 흡수 에너지를 구할 수 있으며, 본 연구에서는 상기와 같은 좌초시 흡수에너지 계산식을 이용하여, 좌초에 대한 구조강도 평가 시스템을 구성한다. Fig. 10, 11은 개발된 좌초강도 간이 평가시스템의 화면중 일부를 보여주고 있다.

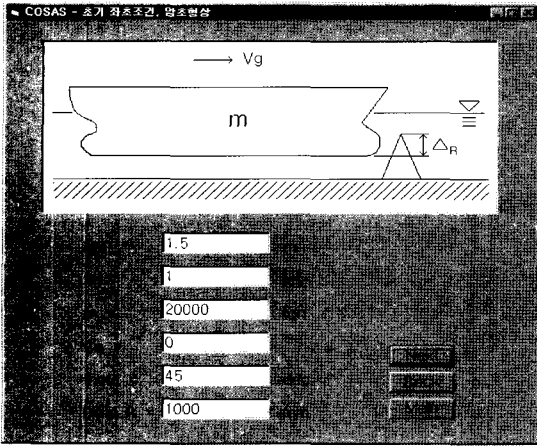


Fig. 10 Initial grounding condition

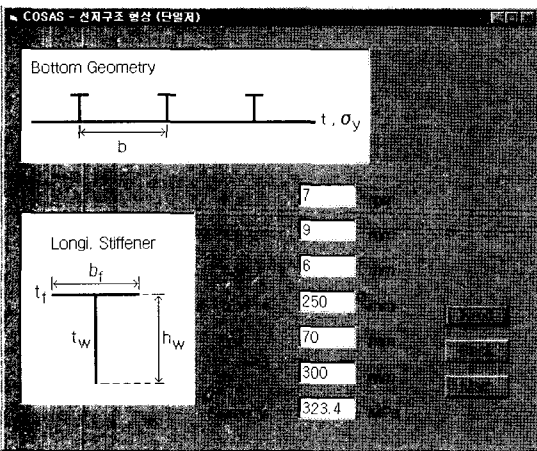


Fig. 11 Dimension of single bottom

### 3.3 개발시스템의 검증

Kuroiwa 등[1992]은 Fig. 12에 나타내는 바와 같이 준정적인 하중 조건하에서 1/3 축척의 단저 및 이중저 모델에 대하여 찢김 실험을 수행하였다. Table 1에는 Kuroiwa 등의 선저 모형에 대한 주요 치수를 보여 주고 있다. 압초 모형의 선단 각도는 90 deg.이며, 하중 조건은 준정적이므로 속도  $V$ 는 0으로 취하였다. Fig. 13는 단저 및 이중저 구조 모형에 대한 실험 결과와 본 제안식에 의한 계산 결과를 보여 주고 있다. 단저 및 이중저 구조 모형 모두에 대하여 비교적 양호한 일치를 나타내고 있음을 알 수 있다.

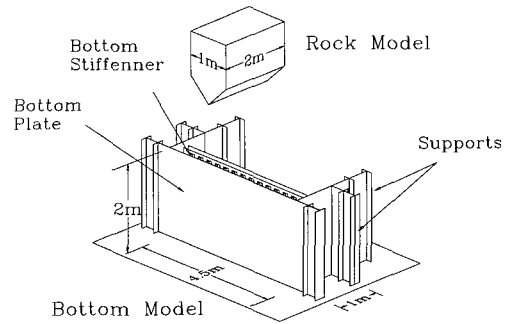


Fig. 12 Test set-up for a 1/3 scale single and double bottom models (Kuroiwa[1992])

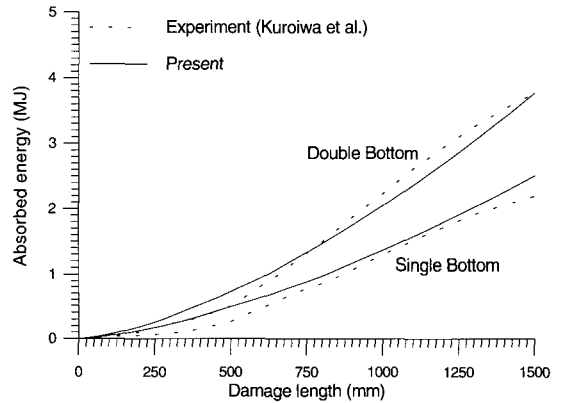


Fig. 13 Absorbed energy - raking length curves for a 1/3 scale single and double bottom models

Table 1 Principal scantlings of single and double bottom models (Kuroiwa[1992])

	(unit: mm)	
	Single bottom	Double bottom
Bottom plate	7.0	7.0
Bottom stiffener	W250×6 +F70×9	W170×4.5 +F70×7
Bottom stiffener spacing	300	300
Inner bottom plate		7.0
Inner bottom stiffener		W150×6 +F70×9
Double bottom height		1000

※Note: = 323.4 MPa for all members

#### 4. 결 언

유조선 충돌/좌초사고는 선체 및 승무원의 안전 확보 측면에서뿐만 아니라, 적재 기름의 선외 유출로부터 해양 환경을 보호한다는 측면에서 매우 중요하게 다루어지고 있으며, 일반적인 관심 또한 증대되어 있다.

유조선 사고의 70-80%가 인적 실수에 의한 사고이므로, 이를 줄이려는 노력을 경주해야 할 것이다. 이와 동시에, 만약 인적 실수에 의한 사고가 발생하더라도 이로 인한 피해를 최소화할 수 있는 방안을 강구해야 할 것이다. 이는 사전에 합리적이고 체계화된 시스템을 갖추으로써 만약의 경우 사고발생시에 신속정확한 구난 및 방제작업을 수행하는 것으로 집약되며, 이를 위하여는 유조선의 충돌 및 좌초사고에 관한 기술적 배경이 필수적인 것은 물론이다.

이러한 관점에서 1990년 이후 유조선의 충돌 및 좌초사고에 관한 연구가 세계적으로 활발히 추진되고 있다. 그러나, 대부분의 연구들은 기술적 우위의 확보를 위하여 상세한 연구자료가 공개되지 않고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위하여는 자체적인 연구 노력을 지속적으로 기울여야 할 것으로 생각되며, 본 연구에서는 이를 위한 과정의 하나로 유조선의 충돌 및 좌초사고에 대한 기본적인 연구를 수행하였다. 즉, 유조선의 선측충돌 및 암초에 의한 선저 좌초 시를 대상으로 구조손상 특성을 규명하고, 구조강도 평가기법을 개발하였으며, 이를 토대로 PC-based computer program을 작성하였다. 본 연구를 통하여 개발된 구조강도 평가시스템은 충돌/좌초손상의 가시화, 내충돌 성능에 대한 보강재의 영향과 좌초손상시 능력이나 격벽과 같은 횡부재의 영향에 대한 고려 등 향후 지속적인 보완 작업이 뒤따른다면 유조선의 충돌 및 좌초사고시 현장 작업에 대한 기술적 지원이 가능할 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 논문은 과학기술부에서 1998년도 시행한 기관고유사업 “유조선 구난기술 개발(Ⅲ)”의 연구결과 중 일부이다.

#### 참고문헌

[1] 백점기, 1995, “선박의 충돌 및 좌초에 관한

최신 연구 동향”, 대한조선학회지, 제32권, 제2호, 27-33.

[2] Arita, K. and Aoki, G., 1985, “Strength of ship bottom in grounding (1st Report) - An Investigation into the Case of a Ship Stranded on a Rock -”, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 158, 385-393.

[3] Arita, K., 1986, *A study on the strength of ships in collision*, Doctorial Thesis, Osaka University.

[4] Faulkner, D., 1975, “A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression”, J. of Ship Research, Vol. 19, No. 1, 1-17.

[5] Kitamura, K., Okumoto, Y. and Shibue, T., 1978, “On the model tests of double bottom strength for stranding”, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 143, 346-356.

[6] Kuroiwa, T. et al., 1992, “Study on damage of ship bottom structures due to grounding”, Proc. of 1st Joint Conf. on Marine Safety and Environment/Ship Production, Delft University of Technology, Delft.

[7] Lu, G. and Calladine, C. R., 1990, “On the cutting of a plate by a wedge”, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 4, 293-313.

[8] McDermott, J. F. et al., 1974, “Tanker structural analysis for minor collisions”, Trans. SNAME, Vol. 82, 382-414.

[9] Ohtsubo, H. et al., 1997, “Structural design against collision and grounding”, Report of the Specialist Panel V.4, Proc. of the 13th International Ship and Offshore Structure Congress, Thondheim, Norway, Vol. 2, 83-116.

[10] Paik, J. K. and Kim, C. Y., 1991, “Strength analysis of double bottom structures in stranding by Idealized Structural Unit Method”, Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 28, No. 1, 125-138.

[11] Paik, J. K. et al., 1994, “A study on damage of stiffened plate in grounding”, Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 1, 117-128.

[12] Pedersen, P. T., 1995, “Collision and grounding mechanics”, Proc. of Ship Safety and Protection of the Environment, WEMT'95, Copenhagen, Denmark, 1, 125-157.



- [13] Pippenger, D., 1995, *Coupled vertical and horizontal resistance of hull girder in grounding accidents*, Joint MIT-Industry Program on Tanker Safety, Report No. 47.
- [14] Vaughan, H., 1977, *Damage of ship due to collision and grounding*, Det norske Veritas, DnV Report 77-345.
- [15] Vredeveldt, A. W. et al., 1995, "Dynamic loading and strength of a stranded double hull tanker in waves", Proc. of Int. Conf. on Technologies for Marine Environment Preservation (MARIENV'95), Vol. 1, Tokyo, 91-98.
- [16] Wierzbicki, T. et al., 1990, *Damage estimates in high energy grounding of ships*, Joint MIT -Industry Program on Tanker Safety, Report No. 1.