

## 論 文

大韓造船學會論文集  
 第 31 卷 第 4 號 1994年 11月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architecture of Korea  
 Vol. 31, No. 4, November 1994

### 좌초시 선저보강판의 손상에 관한 연구 (제2보 : 손상추정식)

백점기\*, 이탁기\*\*

### On the Grounding Damage of Ship Bottom Stiffened Platings (Part II : Damage Prediction Formula)

by

Jeom Kee Paik\* and Tak Kee Lee\*\*

#### 요 약

본 연구의 목적은 좌초시 선저 보강판 부재를 대상으로 강제 웨지가 종방향으로 보강된 판으로 진입할 때의 흡수에너지 - 찢김길이 관계를 나타내는 실험식을 도출하는 것이다. 본 연구는 제1보에서 수행한 시리즈 실험 결과 및 찢김응답에 관한 주요 인자들의 중요도 조사 결과를 바탕으로 하고 있다. 준정적 하중상태에서 수행된 실험 결과를 바탕으로 무차원 해석을 수행하여 찢김이 진행되는 동안의 판부재의 흡수에너지를 찢김길이, 항복응력, 동가판두께, 웨지각도의 함수로 정식화하였다. 또한, 이식을 충격하중 작용시에도 적용할 수 있도록 동적 효과를 고려하였다. 특히, 본 연구에서는 동적 마찰 효과를 고려하기 위하여 동적 마찰 감소 계수의 개념을 도입하였다. 본 제안식의 유용성을 확인하기 위하여 기존의 제안식 및 충격 실험에 의해 얻어진 결과와 본 제안식의 결과를 비교하였다.

#### Abstract

The aim of the present study is to derive an empirical formula relating the absorbed energy and the cutting length for longitudinally stiffened steel plates which are cut by a wedge, idealizing the ship bottom stiffened platings in groundings. This study is based on the test results and the investigations of some parameters affecting the cutting

발 표 : 1994년도 대한조선학회 춘계연구발표회 ('94. 4. 22.)

접수일자 : 1994년 6월 20일, 재접수일자 : 1994년 8월 29일

\* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

\*\* 학생회원, 부산대학교 대학원 조선해양공학과

response, described in Part I. By dimensionless analysis of the test results obtained in a quasi-static loading condition, the energy absorbed while a longitudinally stiffened plate is cut by a wedge is expressed as functions of the cutting length, the yield stress, the equivalent plate thickness and the wedge angle. Also, the dynamic effects are incorporated into the static formula such that the proposed formula can be applied to the impact loading situations. The validity of the proposed formula is checked by comparing with the results obtained by the other existing formulas or by the drop-hammer tests.

기 호 설 명

$A_s$	보강재의 전체 단면적
$b$	보강재 사이의 판폭 (= $B/3$ )
$B$	판폭
$C_f$	동적마찰 효과를 고려한 감소계수
$F$	전체 찢김 (cutting) 하중
$F_c$	찢김 하중 성분
$l$	찢김 길이
$t$	판두께
$t_{eq}$	등가 판두께 (= $t + A_s / b$ )
$u$	웨지의 수직변위 ( $\alpha = 0^\circ$ 일때 $u = l$ )
$V$	충격 속도
$V_m$	평균 충격 속도
$W$	전체 흡수 에너지
$W_c$	찢김 에너지 성분
$\alpha$	수직방향에 대한 판의 경사각
$\dot{\epsilon}$	재료의 변형도율(strain-rate)
$\delta_t$	균열 개구 변위
$\overline{\delta_t}$	무차원화시킨 균열 개구 변위 (= $\delta_t / t$ )
$\epsilon_{cr}$	재료인장시험에서 시험편이 두부분으로 절단될 때의 변형도
$\mu$	마찰 계수
$2\theta$	날카로운 웨지의 선단각도
$\sigma_o$	재료의 정적 flow stress
$\sigma_{od}$	재료의 동적 flow stress
$\sigma_u$	재료의 최종 인장 응력
$\sigma_y$	재료의 항복 응력 ( 0.2 % 인장변형도에서 측정 )

1. 서 언

선박이 다른 선박과 충돌할 때, 충돌선의 선수는 피충돌선의 갑판을 밀고 들어갈 가능성이 있다. 또한, 선박이 압초와 부딪힐 때 선저판은 구조 손상을 입을 수 있다. 따라서, 충돌이나 좌초시 선박의 구조 안전성을 평가하기 위하여는 갑판이나 선저판을 대상으로 갑판의 좌초/충돌 손상기구를 규명하는 것이 매우 중요하다. 특히 선박의 선수나 압초에 의한 판의 찢김 응답(cutting response)에 대한 검토가 필요하다.

이 문제와 관련하여 많은 연구들이 수행되어져 왔으며 유용한 자료를 제공하고 있다. 선박의 좌초 및 충돌시 구조 손상 기구는 매우 복잡하고 해석적인 방법만으로 손상 응답을 밝혀 내는 것은 극히 어렵다. 이같은 측면에서, 대부분의 연구들은 실험적 수법을 채용해 왔다. 강제 웨지를 사용하여 갑판의 찢김 실험을 수행하고, 이를 토대로 흡수에너지와 찢김 길이간의 관계를 나타내는 실험식이 제안되었다 [1~4]. 한편, 손상 응답을 이론적 수법으로 해석하려는 시도는 Jones와 Jouri [1] 및 Wierzbicki와 Thomas [5]에 의해 이루어졌다. 이들은 강제 웨지에 의한 판의 찢김 과정에서의 주요 응답 특성을 간단한 손상 모델을 이용하여 이론적으로 정식화하였다.

갑판의 손상 응답에 영향을 미치는 요소로는 판두께, 재료의 항복응력, 웨지 선단의 각도 및 형상, 보강재 등을 들 수 있다. 지금까지 실험적 수법으로 수행된 대부분의 연구는 보강되지 않은 판을 대상으로 하고 있으며, 손상 응답에 관한 보강재의 영향은 근사적으로 고려하고 있다 [6]. 이같은 근사적 방법에 대한 유용성은 실험결과와 비교함으로써 검증할 필요가 있다.

또한, 거의 모든 이전의 실험들은 Lu 및 Calladine [2]에 의한 최근의 실험을 제외하면, drop-hammer법을 이용하여 수행되어졌으며, 그 결과, 전체 실험 과정 중에서의 상세한 정보를 얻기 어려운 결점이 있었다. 충격 실험을 수행하면 동적 효과는 자동적으로 포함될 수 있다. 그러나, 시험 속도나 drop-hammer의 질량을 변화시키는 다양한 실험이 수행되지 않는 한 각종 충격속도에 대해 광범위하게 적용할 수 있는 실험식을 도출하는 것은 여전히 어렵다. 더우기, 동적 효과는 준정적 응답을 수정함으로써 합리적으로 고려할 수 있다는 것이 알려져 있다 [7]. 따라서, 전 실험 과정을 통하여 상세한 손상 특성을 관찰할 수 있는 준정적 실험법이 보다 합리적이라 생각된다.

또한, Vaughan의 제안식 [4]을 제외하면, 대부분의 기존의 식들은 항복응력과 판두께의 영향은 고려하고 있으나, 웨지 각도의 영향은 무시하고 있다. 웨지에 의해 찢어지는 판의 저항은 웨지각도에도 의존하며, 찢김 응답에 대한 웨지 각도의 영향도 고려해 줄 필요가 있다.

이상의 관점에서 본 연구의 제1보에서는 종방향으로 보강된 보강판이 강체 웨지에 의해 찢어질 때의 준정적 시리즈 실험을 수행하였으며, 각종 파라메타의 영향을 분석한 바 있다 [8]. 본 연구에서는 이들 실험 결과를 토대로, 무차원 해석을 수행하여 흡수에너지와 찢김길이간의 실험식을 유도한다. 준정적 상태에서 수행된 본 실험결과로부터 유도된 실험식을 충격하중조건에도 적용할 수 있도록 동적 효과도 고려한다. 본 제안식의 유용성을 확인하기 위하여 기존의 제안식 및 충격 실험에 의해 얻어진 결과와 본 제안식의 결과를 비교하였다.

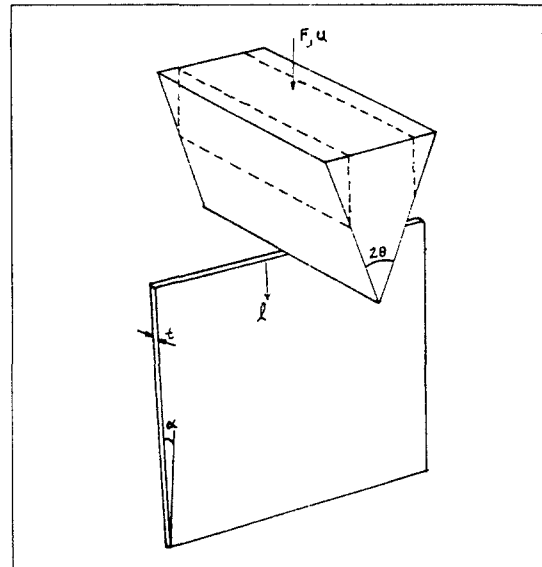
**2. 기존의 제안식**

최근 Lu 및 Calladine [2]은 실험적 연구 성과에 관한 문헌을 조사한 바 있다. 이들은 웨지에 의해 판이 찢어질 때의 흡수에너지 - 찢김 길이간의 실험식을 조사 비교하였다. 또한, 보강되지 않은 강판에 대하여 자체적으로 수행한 준정적 실험 결과를 이용하여 새로운 식을 제안하였다. 이 조사이후, Wierzbicki와 Thomas [5]는 손상추정식을 이론적 수법으로 유도하였다.

본 논문에서는 Lu 등이 이미 수행한 문헌조사는 행하지 않되, 정적 및 충격하중조건하에서 강체 웨지에 의해 손상을 받는 강판에 대해 실험적/이론적으로 제안된 이전의 식들을 간략히 요약한다. 여기서

$$dW/du = F \text{ 또는 } W = \int_0^u F du$$

(단,  $du = d l \cdot \cos \alpha$  Fig. 1 참조)이므로 흡수에너지 - 찢김길이 관계와 하중 - 찢김길이 관계를 나타내는 두개의 식을 모두 기술한다.



**Fig. 1 Parameter definition in a plate cut by a wedge**

Akita와 Kitamura [9]

본 연구에서 대상으로 하는 문제에 대한 연구는 Akita 등에 의해 처음으로 수행되어졌다. 그들은 판의 말림에 대한 영향을 무시하고, 공칭 손상 면적에 대한 수직 압축력은 재료의 항복응력과 같다고 가정하여 정적 조건에서 다음식을 제안하였다.

$$W = \sigma_0 t l^2 \cdot \tan \theta \tag{1}$$

$$F = 2 \sigma_0 t l \cdot \frac{\tan \theta}{\cos \alpha} \tag{2}$$

Vaughan [3]

등근 선단의 웨지 (R = 15mm, 2θ = 60°)에 의해 찢어지는 보강되지 않은 연강판에 대해 Akita 등 [9]이 수행한 준정적 실험 결과와 선박의 충돌 문제에 대해 Minorsky [10]가 제안한 경험식을 기초로 하여 Vaughan은 다음식을 제안하였다.

$$W = 33.9t l + 0.095t l^2 \tan \theta \quad (3)$$

$$F = \frac{(33.9t + 0.19t l \tan \theta)}{\cos \alpha} \quad (4)$$

여기서, t와 l의 단위는 mm이고, F는 kN, W는 N·m이다.

Vaughan [4]

보강되지 않은 연강판에 대해 drop-hammer법을 이용하여 실험한 결과를 바탕으로 (α = 10°, t = 0.75~1.9 mm, 2θ = 10°, 30°, 60°), Vaughan은 식 (3)과 (4)를 수정한 다음식을 제안하였다.

$$W = 5.5t^{1.5} l + 0.0044t^2 l^2 \tan \theta \quad (5)$$

$$F = \frac{(5.5t^{1.5} + 0.0088t^2 l \tan \theta)}{\cos \alpha} \quad (6)$$

여기서, t와 l의 단위는 mm이고, F는 kN, W는 N·m이다.

Woisin [11]

보강되지 않은 연강판에 대해 drop-hammer법을 이용하여 얻어진 실험결과에 기초하여 (α = 0°, t = 2~10 mm, 2θ = 30°, 70°, 100°), Woisin은 웨지 각도의 영향을 무시한 다음식을 제안하였다.

$$W = 4.8t l^{1.7} \quad (7)$$

$$F = \frac{8.16t l^{0.7}}{\cos \alpha} \quad (8)$$

여기서, t와 l의 단위는 mm이고, F는 kN, W는 N·m이다.

Jones와 Jouri [1]

Jones 등 [1, 12]은 보강되지 않은 연강 및 고장력 강판에 대하여 drop - hammer법을 이용한 시리즈 실험을 수행하였다. (α = 0°, t = 1.6~6.1 mm, 2θ = 15°, 30°, 45°, 60°) 그들은 판에 의한 전체 흡수 에너지를 4개의 성분, 즉 찢김 에너지(cutting energy), 말림 에너지(curling energy), 탄성 에너지(elastic energy) 및 마찰 에너지(frictional energy)로 구분하였으며, 이 때 탄성에너지 성분의 기여는 본 문제에 있어서 재료의 소성거동이 지배적이므로 무시할 수 있다고 하였다. 실험 결과를 기초로 그들은 찢김에너지 성분에 대해 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$W_c = 3.9t^{1.7} l \dots \sigma_0 = 255 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$= 7.2t^{1.305} l \dots \sigma_0 = 398.5 \text{ MPa}$$

$$F_c = \frac{3.9t^{1.7}}{\cos \alpha} \dots \sigma_0 = 255 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$= \frac{7.2t^{1.305}}{\cos \alpha} \dots \sigma_0 = 398.5 \text{ MPa}$$

여기서, t와 l의 단위는 mm이고, F<sub>c</sub>는 kN, W<sub>c</sub>는 N·m이다.

또한, 5가지의 다른 변형 모드를 가정하여 마찰 및 찌그러짐 에너지 성분을 이론적으로 도출하였다.

Lu와 Calladine [2]

보강되지 않은 고장력 강판에 대한 준정적인 실험 결과를 토대로 하여 (α = 0°, t = 0.7~2 mm, 2θ = 20°, 40°), 다음의 실험식을 제안하였다.

$$W = C_{1.3} \sigma_0 t^{1.7} l^{1.3} \quad (11)$$

$$\dots 5 < \frac{l}{t} < 150$$

$$F = \frac{1.3 C_{1.3} \sigma_0 t^{1.7} l^{0.3}}{\cos \alpha} \quad (12)$$

여기서, C<sub>1.3</sub>은 재료 및 실험 조건에 의존하는 상수이다.

Wierzbicki와 Thomas [5, 6]

Wierzbicki 등은 강체 웨지에 의한 판의 정적인 찢김 거동에 대한 주요 특성을 표현할 수 있는 간이 해석 모델을 개발하였다. 그들은 판 속으로 웨지가 진입함에 따라 판이 두개의 경사진 실린더 형태로 말린다고 가정하였다. 또한, 그들은 판의 찢김 거동은 마찰 계수에 크게 의존하나, 웨지 각도의 영향은 작다고 생각하였다. 이 간이 모델을 이용하여 찢김하중을 웨지 각도가  $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$  이고 마찰계수가  $0.1 \leq \mu \leq 0.4$ 인 범위에서 재료의 flow stress, 균열 개구 변위, 판두께, 마찰 계수의 함수로 정식화하였다. 즉,

$$W = 2.34 \sigma_0 t^{1.6} \mu^{0.4} \bar{\delta}_t^{0.6} l^{1.4} \quad (13)$$

$$F = \frac{3.28 \sigma_0 t^{1.6} \mu^{0.4} \bar{\delta}_t^{0.6} l^{0.4}}{\cos \alpha} \quad (14)$$

또한, Wierzbicki 등 [6]은 보강재의 영향을 고려하기 위하여 등가판두께법을 적용하였다. 이는 보강재의 단면적을 전체 판에 고르게 분포시키는 것으로, 다음식으로 표현된다.

$$t_{eq} = t + \frac{A_s}{b} \quad (15)$$

후술하는 바와 같이 이 근사법은 찢김 응답 평가시에 유용하다는 것이 확인되었다.

### 3. 새로운 실험식의 제안

여기서는 제1보 [8]에서 상술한 종방향으로 보강된 판부재에 대한 실험 결과를 바탕으로 흡수에너지와 찢김길이 사이의 관계를 나타내는 실험식을 제안한다. 이 때 3개의 가장 중요한 파라메타들, 즉 재료의 항복응력, 등가판두께 및 웨지각도를 고려한다.

본 논문에서는 Lu와 Calladine [2]에 의해 채용된 무차원 해석 이론을 적용한다. 즉,

$$\frac{W}{\sigma_0 t_{eq}^3} = C \cdot \left(\frac{l}{t_{eq}}\right)^n \quad (16)$$

여기서, C 및 n은 실험상수이다. 또한, 웨지 각도 영향은 실험조건에 의존하므로 실험 상수 C에 포함된다.

식 (16)에 양대수를 취하여 웨지 선단 각도별로 그래프로 나타내면, Fig. 2 ~ 4와 같이 된다.

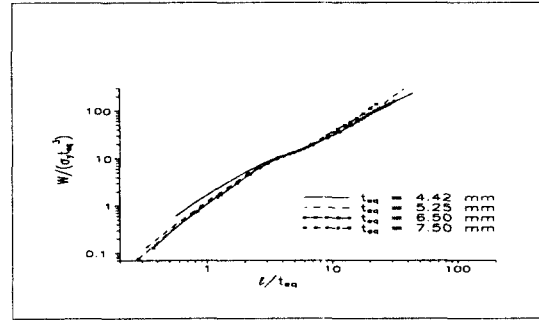


Fig. 2 Relation between the absorbed energy and the cutting length (  $\theta = 15^\circ$  )

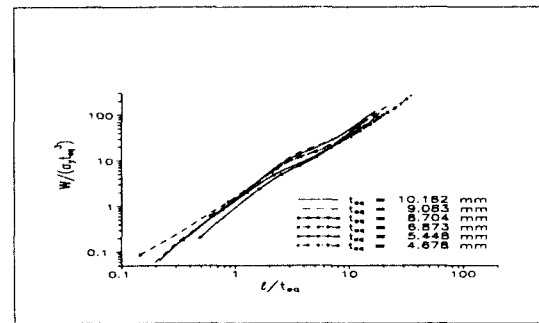


Fig. 3 Relation between the absorbed energy and the cutting length (  $\theta = 45^\circ$  )

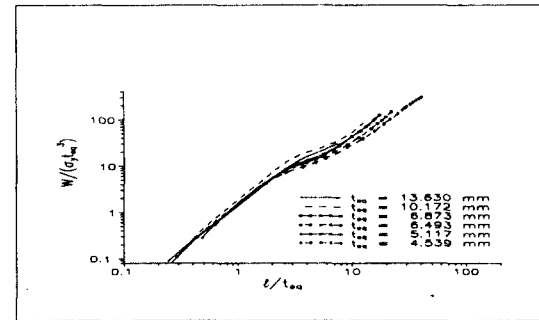


Fig. 4 Relation between the absorbed energy and the cutting length (  $\theta = 60^\circ$  )

**Table 1 Results of the dimensionless analysis for test specimens**

2θ	case	t <sub>eq</sub>	C	n	C <sub>1.5</sub>
15°	T3-20	4.420	1.781	1.284	0.850
	T3-7	5.250	1.228	1.460	1.140
	T5-16	6.497	1.219	1.424	0.920
	T5-9	7.500	1.036	1.555	1.190
45°	T3-16	4.285	1.791	1.310	1.010
	T3-14	4.678	1.549	1.389	1.170
	T3-10	5.100	1.355	1.453	1.190
	T3-6	5.448	1.245	1.469	1.190
	T3-4	6.098	0.726	1.647	1.060
	T5-15	6.493	1.579	1.380	1.150
	T5-12	6.873	1.586	1.378	1.110
	T5-10	7.525	1.160	1.513	1.180
	T5-5	7.976	1.056	1.586	1.350
	T5-4	8.704	0.915	1.624	1.270
	T7-7	9.083	1.513	1.535	1.530
	T7-6	10.182	1.450	1.565	1.640
60°	T3-17	4.539	1.351	1.425	1.120
	T3-11	4.669	1.441	1.467	1.400
	T3-9	5.117	1.486	1.489	1.500
	T3-5	5.436	1.404	1.521	1.590
	T3-3	5.956	0.981	1.658	1.440
	T5-18	6.493	1.502	1.414	1.240
	T5-13	6.873	1.392	1.531	1.510
	T5-7	7.513	1.051	1.629	1.490
	T5-6	7.976	1.089	1.639	1.480
	T5-3	8.650	0.990	1.660	1.440
	T7-8	10.115	2.035	1.465	1.820
	T7-5	10.172	1.864	1.532	1.840
	T7-4	10.500	1.694	1.546	1.820
	T7-2	11.192	1.567	1.567	1.770
	T7-1	13.630	1.379	1.661	1.600

Table 1에는 각 시험편에 대한 C와 n의 계산 결과를 나타내고 있다. 최소자승법을 적용하여 계산한 실험상수 C 및 n에 대한 검토로부터 가장 양호한 결과를 주는 n = 1.5 인 실험상수 C를 C<sub>1.5</sub>로 두면, 흡수에너지와 찢김길이간의 관계를 나타내는 식 (16)은 최종적으로 다음과 같이 된다.

$$W = C_{1.5} \cdot \sigma_0 t_{eq}^{1.5} l^{1.5} \quad (17)$$

**Table 2 Variation of C<sub>1.5</sub> as a function of the wedge angle**

2θ	case	C <sub>1.5</sub>	Mean	Var.	C.O.V.
15°	T3-20	0.850	1.025	0.028	0.161
	T3-7	1.140			
	T5-16	0.920			
	T5-9	1.190			
45°	T3-16	1.010	1.238	0.035	0.150
	T3-14	1.170			
	T3-10	1.190			
	T3-6	1.190			
	T3-4	1.060			
	T5-15	1.150			
	T5-12	1.110			
	T5-10	1.180			
	T5-5	1.350			
	T5-4	1.270			
	T7-7	1.530			
	T7-6	1.640			
60°	T3-17	1.120	1.537	0.044	0.137
	T3-11	1.400			
	T3-9	1.500			
	T3-5	1.590			
	T3-3	1.440			
	T5-18	1.240			
	T5-13	1.510			
	T5-7	1.490			
	T5-6	1.480			
	T5-3	1.440			
	T7-8	1.820			
	T7-5	1.840			
T7-4	1.820				
T7-2	1.770				
T7-1	1.600				

또한,  $F = dW / (d l \cdot \cos \alpha)$  이므로 전체 찢김 하중 F는 다음으로 표시할 수 있다.

$$F = \frac{1.5 C_{1.5} \sigma_0 t_{eq}^{1.5} l^{0.5}}{\cos \alpha} \quad (18)$$

전술한 바와 같이, 실험상수 C<sub>1.5</sub>는 웨지 각도에도 의존한다. 그리고, 웨지 각도에 관한 C<sub>1.5</sub>의 값 (Table 2 참조)으로부터 C<sub>1.5</sub>는 웨지선단의 반각 θ

(rad.)에 관한 2차의 대수식으로 표현할 수 있다. 즉,

$$C_{1.5} = 3.760 \theta^2 - 1.156 \theta + 1.112 \quad (19)$$

일반적으로 시험편과 웨지 사이의 마찰도 찢김 응답에 큰 영향을 미친다 [1, 15]. 실제로 마찰의 영향은 실험 조건뿐만 아니라 재료 특성에도 의존할 것이다. 그러므로, 실험상수  $C_{1.5}$ 는 실험조건이나 재료 특성에 의해 결정되는 것임에 유의해야 할 것이다. 또한  $\sigma_0$ 는 통상 변형 경화(strain hardening) 효과를 근사적으로 고려하여  $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_u) / 2$ 의 평균 flow stress로 다룬다.

#### 4. 준정적 하중상태에서의 본 제안식의 정도 검증

먼저, 준정적 하중상태하에서 본 제안식과 기존의 제안식 및 실험결과를 비교한다. 기존의 식들은 직접적으로 보강재 효과를 고려하고 있지 않으나, 판두께 파라메타  $t$ 를 등가판두께  $t_{eq}$ 로 교체하여 보강재 효과를 포함시킬 수 있다.

이 비교에서 Lu 등의 식에 대해서는  $C_{1.3} = 2.4$ 를 채용하고, Wierzbicki 등의 식에 대해서는 가장 양호한 근사치를 제공하는  $\mu = 0.3$ 과  $\bar{\delta}_t = 1.0$ 을 채용한다. 이때 비교 대상은 제1보의 실험 경우중 각 웨지 각도에 대한 최대 및 최소 등가판두께인 경우를 취하였다.

Fig. 5에서 10까지 비교 결과를 보여주고 있다. 웨지 각도가 극히 작고 판두께가 얇은 경우, 본 제안식은 흡수에너지를 다소 높게 평가하는 경향이 보이지만, 실제 선박에서와 같이 상대적으로 두꺼운 판부재가 큰 선단 각도를 가진 웨지에 의해 찢어지는 경우는 본 제안식이 실험 결과와 비교하여 좋은 정도를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 이들 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 Lu 등의 식과 Wierzbicki의 식은 유사한 특성을 보여주고 있다. 즉, 얇은 판 및 날카로운 웨지에 대하여는 높은 흡수 에너지를 주고 두꺼운 판 및 뾰족한 웨지에 대하여는 낮은 흡수 에너지를 주고 있다. 또한, 이들 결과로부터 보강판을 등가판두께를 가진 보강되지 않은 등가판으로 근사적으로 치환하여 찢김 응답을 평가할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

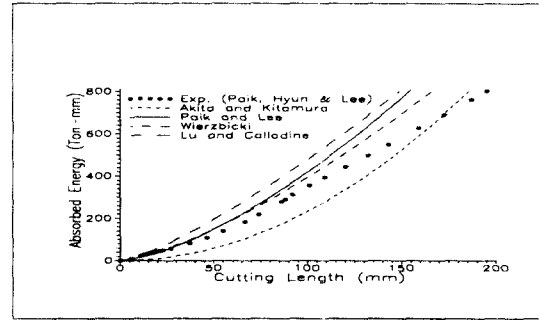


Fig. 5 Comparison of the proposed formula with the previous formulas and the experimental results for  $t_{eq} = 4.42$  mm and  $2\theta = 15^\circ$

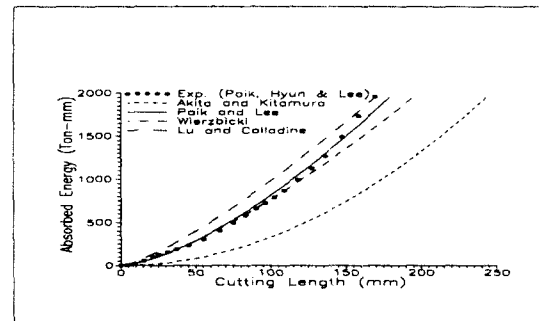
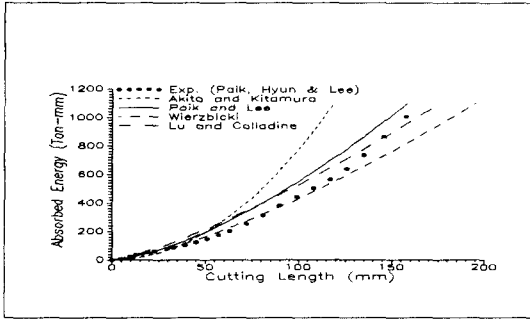


Fig. 6 Comparison of the proposed formula with the previous formulas and the experimental results for  $t_{eq} = 7.5$  mm and  $2\theta = 15^\circ$

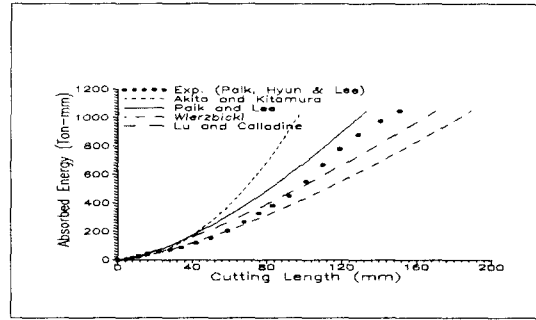
#### 5. 동적 효과

앞에서 제안한 계산식은 준정적인 상태에서 수행된 실험 결과를 바탕으로 유도되었다. 그러나, 실제 선박의 충돌이나 좌초시 충격하중이 작용할 때 판의 찢김 응답은 동적 효과에 의해 영향을 받을 것이다.

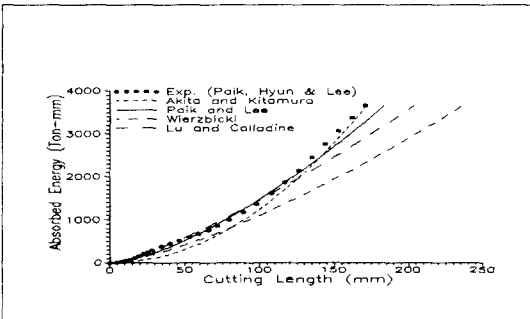
이에 대하여는 대개 세가지 인자들을 생각할 수 있다 [2]. 첫째는 재료의 변형도율(strain-rate)의 영향이다. 재료의 항복응력은 충격속도가 증가함에 따



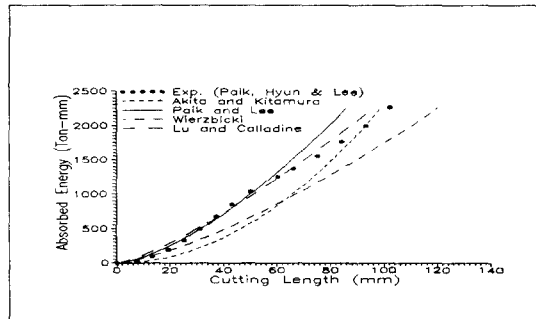
**Fig. 7 Comparison of the proposed formula with the previous formulas and the experimental results for  $t_{eq} = 4.678$  mm and  $2\theta = 45^\circ$**



**Fig. 9 Comparison of the proposed formula with the previous formulas and the experimental results for  $t_{eq} = 4.669$  mm and  $2\theta = 60^\circ$**



**Fig. 8 Comparison of the proposed formula with the previous formulas and the experimental results for  $t_{eq} = 10.182$  mm and  $2\theta = 45^\circ$**



**Fig. 10 Comparison of the proposed formula with the previous formulas and the experimental results for  $t_{eq} = 13.63$  mm and  $2\theta = 60^\circ$**

라 증가한다. 두번째는 가속도에 관한 관성 효과이다. 변형 모드는 충격 하중 속도에 의해 달라질 가능성이 있다. 세번째는 동적 마찰의 영향이다. 동적 하중 상태에서 마찰 계수는 정적 상태에서 보다 낮다는 것이 알려져 있다 [13]. 첫째와 두번째의 인자들은 찢김 과정에서 흡수에너지를 크게 하는 반면, 세번째 인자는 그것을 작게 할 것이다.

많은 연구들은 항복응력에 재료 변형도율의 영향을 도입하여 동적 효과를 근사적으로 고려하고 있다. 그들 중에서, 식 (20)에 나타난 Cowper-Symonds 구성 방정식은 아주 폭넓게 사용되고 있으며, 많은 이론적·수치적 계산에 있어서 높은 정도를 준다는

것이 알려져 있다 [14]. 따라서, 본 연구에서는 Cowper-Symonds 식에 의한 동적 항복응력을 고려해 줌으로써 재료의 변형도율의 효과를 포함시킨다. 즉,

$$\frac{\sigma_{od}}{\sigma_0} = 1.0 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{d}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (20)$$

여기서, 연강의 경우,  $d = 40.4 \text{ sec}^{-1}$ 이고,  $q = 5$ 이다. 이식으로부터 변형도율이 약  $40.4 \text{ sec}^{-1}$ 일 때 동적 항복응력이 정적 항복응력의 두배가 됨을 알 수 있다.



웨지의 충격 속도  $V$ 는 웨지가 판 속으로 거리  $l$ 만큼 진입했을 때 0으로 줄어들 것이다. 따라서, 평균 충격 속도  $V_m$ 은  $V/2$ 이므로 식 (20)에서 변형도를  $\dot{\epsilon}$  ( $\text{sec}^{-1}$ )는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon} \cong \frac{V_m}{l} \cong \frac{V}{2l} \quad (21)$$

상기식으로부터 찢김이 진행되는 동안, 변형도율은 상수가 아니며, 웨지가 판 속으로 진입되어감에 따라 줄어든다는 것을 알 수 있다.

준정적 하중상태에서의 계산식을 충격 하중 조건에 적용코자 할때는 정적 항복응력  $\sigma_0$ 를 식 (20)에서 정의된 동적 항복응력  $\sigma_{od}$ 로 대체하면 된다.

찢김 응답중 판부재 내에서 응력파의 전파는 충격 관성때문에 진로가 바뀔 것이고, 임의 시점에서의 변형을 분포는 비조화적이다. 그러나, 이 영향은 작다고 생각되고 대개 무시할 정도이다. 실제로, Lu와 Calladine [2]에 의해 수행된 준정적인 실험과 drop-hammer에 의한 동적 실험의 비교에 따르면, 손상 모드에 대한 관성 효과는 극히 미소하다는 것이 확인되고 있다.

마지막으로, 준정적 실험 결과에 기초하여 유도된 준정적 경험식을 동적 하중 상태에 그대로 적용하면 마찰 계수를 과대평가하게 될 가능성이 있다. 따라서, 동적 마찰에 의한 흡수에너지의 감소효과를 고려해 줄 필요가 있으며, 본 연구에서는 감소계수  $C_f$ 를 정적 계산식에 곱하여 동적 마찰 효과를 고려해 주는 방법, 즉 동적 마찰 감소 계수법(Dynamic Friction Reduction Factor Method)을 제안한다. 동적 충격 실험을 수행하면 동적 마찰 효과는 자동적으로 포함되는 요소이지만 준정적 상태에서 이론적으로 하중(또는 에너지)-변형 관계식을 도출한 뒤, 이것을 동적 하중 상태에 대해 근사적으로 적용코자 하는 경우에 여기서 제안한 방법을 유용하게 활용할 수 있으리라 사료된다.

최종적으로, 동적 효과를 고려한 본 제안식은 다음과 식으로 다시 쓸 수 있다

$$W = C_f C_{1.5} \sigma_{od} t_{eq}^{1.5} l^{1.5} \quad (22)$$

$$F = \frac{1.5 C_f C_{1.5} \sigma_{od} t_{eq}^{1.5} l^{0.5}}{\cos \alpha} \quad (23)$$

동적 마찰 감소 계수  $C_f$ 는 기존의 실험 결과를 기초로 정의할 수 있을 것이다. 예를 들어 Jones와 Jouri [1]는 충격 속도뿐 아니라 판두께 및 웨지 각도와 같은 여러 파라메타들을 변화시키면서 보강되지 않은 강판에 대하여 drop-hammer를 이용한 시리즈 실험을 수행하여 상세한 실험 자료를 제공하고 있다. 이들 충격 실험 결과를 이용하면, 본 연구에서 도입한 동적 마찰 감소 계수  $C_f$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_f = \frac{1000 \cdot W_{exp}}{C_{1.5} \sigma_{od} t_{eq}^{1.5} l^{1.5}} \quad (24)$$

여기서,  $W_{exp}$ 는 drop-hammer법을 이용한 충격 실험으로부터 얻어진 흡수 에너지 ( $N \cdot m$ )이며,  $t_{eq}$ 와  $l$ 의 단위는 mm이고  $\sigma_{od}$ 는 MPa이다.

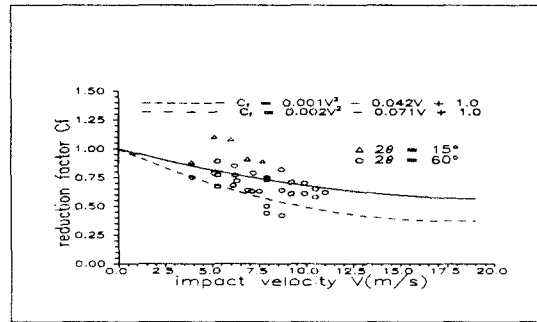


Fig. 11 The dynamic friction reduction factor versus the impact velocity

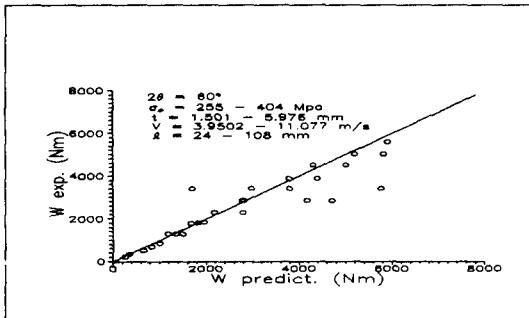
Fig. 11은 두 종류의 웨지 각도, 즉  $2\theta = 15^\circ$  및  $2\theta = 60^\circ$ 에 대해 충격 속도에 대한  $C_f$ 의 변화를 보여주고 있다. 이 그림으로부터 날카로운 웨지에 있어서 계수  $C_f$ 는 거의 1.0이 되는 반면, 뾰족한 웨지의 경우는  $C_f$ 가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 웨지 각도가 커질수록 마찰 계수 효과가 중요하게 되고, 준정적 상태에서 마찰 효과가 크게 고려되고 있으므로 동적 상태에서는 상대적으로 마찰 기여도가 작게 되어 감소 계수  $C_f$ 의 값이 작

아지게 된다는 것을 의미한다. 여기서 도입한 동적 마찰 감소 계수를 이용하면 동적 마찰 효과를 합리적으로 규명할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11에는 동적 마찰 감소 계수의 하계해(Lower Bound) 및 평균해를 주는 다음식을 비교하고 있다. 즉,

$$C_f = 0.002 V^2 - 0.071 V + 1.0 \quad (25)$$

$$C_f = 0.001 V^2 - 0.042 V + 1.0 \quad (26)$$

여기서,  $V$ 의 단위는  $m/s$ 이다.



**Fig. 12 Comparison of the absorbed energy between the present predictions and the drop-hammer tests by Jones and Jouri [1]**

Fig. 12에는 웨지각도가  $\theta = 60^\circ$ 인 경우, 본 제안식에 의해 계산한 흡수에너지와 Jones 및 Jouri [1]의 drop-hammer 실험에 의해 얻어진 흡수에너지를 비교하고 있다. 본 계산치는 식 (26)의 평균해를 주는  $C_f$ 를 이용하여 식 (22)로부터 얻어졌다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 계산치는 충격 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 특히, 여기서 도입한 동적 마찰 감소 계수를 이용하면 동적 마찰 효과를 합리적으로 규명할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결론 및 앞으로의 연구에 대한 제안

본 연구에서는 강재 웨지에 의해 찢겨진 종방향으로 보강된 고장력 강판에 대한 준정적 시리즈 실험 결과를 이용하여 판부재의 흡수에너지와 찢김 길이

간의 관계식을 도출하였다. 본 연구 결과, 다음의 결론을 얻었다.

(1) 판부재의 찢김 응답에 대한 보강재의 영향은 크며, 찢김 응답 평가시 보강판을 등가판두께를 가진 보강되지 않은 등가판으로 치환하여 다룰 수 있다.

(2) 재료의 항복응력, 판두께뿐만 아니라 웨지 각도도 찢김 응답에서 중요하다는 것이 확인되었다. 본 연구에서  $\theta = 15^\circ$ 일 때에 비하여  $\theta = 60^\circ$ 일 경우 흡수에너지가 약 50 % 증가하는 것으로 관측되었다. 본 제안식은 웨지 각도의 영향도 고려하고 있다.

(3) 동적 하중 상태에서 동적 효과는 무시할 수 없다. 변형도율(strain-rate)이 증가하면, 흡수에너지가 증가하는 반면, 마찰계수는 감소하게 되어 흡수에너지는 감소한다. 또한, 날카로운 웨지에 있어서 동적 마찰효과는 상대적으로 적다는 것이 확인되었다. 동적 항복 응력과 동적 마찰 효과를 고려해 줌으로써 준정적 상태에서 도출한 식을 동적 하중 상태에서도 적용할 수 있음을 확인하였다. 특히, 정적 계산식에 본 연구에서 도입한 동적 마찰 감소 계수를 이용하면 동적 마찰 효과를 합리적으로 고려할 수 있다는 것이 확인되었다.

(4) 실제 선박의 판부재는 종방향뿐만 아니라 횡방향으로도 보강재를 가지고 있으므로 보강판 부재에 대한 찢김 응답을 보다 상세히 규명하기 위하여는 횡방향 보강판이나 직교 보강판에 대한 실험적 연구도 필요하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Jones, N. and Jouri, W. S., "A study of plate tearing for ship collision and grounding damage," *J. of Ship Research*, Vol.31, No.4, 1987
- [2] Lu, G. and Calladine, C. R., "On the cutting of a plate by a wedge," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.32, No.4, 1990
- [3] Vaughan, H., "Bending and tearing of plate with application to ship-bottom damage," *The Naval Architect*, RINA, May 1978
- [4] Vaughan, H., "The tearing of mild steel plate," *J. of Ship Research*, Vol.24, No.2,

- 1980
- [5] Wierzbicki, T. and Thomas, P., "Closed-form solution for wedge cutting force through thin metal sheets," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.35, No.3/4, 1993
- [6] Wierzbicki, T., Peer, D. B. and Ray, E., "The anatomy of tanker grounding," *Marine Technology, SNAME*, Vol.30, No.2, 1993
- [7] Arita, M., "A study on the collision strength of ships," Dr. Dissertation, Osaka University, 1987 (in Japanese)
- [8] 백점기, 현명현, 이탁기, "좌초시 선저보강판의 손상에 관한 연구 (제1보:실험)", *대한조선학회 논문집 제 31권 1호*, 1994
- [9] Akita, Y. and Kitamura, K., "A study on collision by an elastic stem to a side structures of ships," *J. Soc. NavalArchitects of Japan*, Vol.131, 1972
- [10] Minorsky, V. U., "An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants," *J. of Ship Research*, Vol.3, No.2, 1959
- [11] Woisin, G., "Comments on Vaughan: the tearing strength of mild steel plate," *J. of Ship Research*, Vol.26, No.1, 1982
- [12] Jones, N., Jouri, W. S. and Birch, R. S., "On the scaling of ship collision damage," *Proc. of 3rd Int. Congress on Marine Technology*, Vol.2, *Int. Maritime Association of East Mediterranean, Hellenic Institute of Marine Technology*, Athens, 1984
- [13] Bowden, F. P. and Tabor, D., "The friction and lubrication of solids," Oxford University Press, Oxford, 1950
- [14] Jones, N., "Structural impact," Cambridge University Press, Cambridge, 1989
- [15] Wierzbicki, T., Private Communication, 1993