

판의 찢김 손상 추정을 위한 실험 연구

양박달치*

*울산대학교 수송시스템공학부

An Experimental Study on the Estimation of the Plate Tearing Damage

PARK-DAL-CHI YANG*

*School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Plate Tearing Damage 판의 찢김 손상, Scaling Law 축척비 법칙, Cutting Experiment for Similar Models 상사 모델의 절단실험

ABSTRACT: This paper describes a study on the tearing damage of a ship's bottom plating, during a grounding. It is widely known that different scaling laws are applied for bodies undergoing simultaneous plastic flow and crack propagation in the deformation of plate tearing. Specifically, the basic scaling law is not followed for the fracture. In this study, in order to verify the problem, plate cutting experiments for geometrically similar models have been performed. From the experimental results, it has been observed that the cutting forces and energy for the larger models are significantly lower than those of the smaller models. A simplified analytical method for the estimation of tearing is proposed, based on the experiments. It has been observed that the results of the present formula are highly correlated with the experiments.

1. 서 론

$$\frac{E}{\sigma_0 t^3} = C \left(\frac{s}{t}\right)^\alpha \text{ or } E = C \sigma_0 s^\alpha t^{3-\alpha} \quad (1)$$

선박의 충돌 및 좌초시 구조손상의 추정을 위한 연구는 지난 20년간 많은 연구자에 의해 수행되어 왔다. 이들의 대부분은 강재 웨지에 의해 면내 압축을 받는 강판의 하중 방향으로의 찢김(Tearing)손상에 관한 연구로서 실험을 토대로 한 경험식의 제안이 그 주류를 이루어 왔다. 이 분야에 대한 지난 연구 결과는 Lu and Calladine(1990), Paik(1994), 백점기 등(1994), 백점기와 이학기(1996), 그리고 최근에 Simonsen and Wierzbicki(1998), Shen et al.(1998)에 의해 자세히 정리되어 있다. 강판의 찢김 손상모델로서 강재 웨지에 의한 판의 면내 절단은 대변형을 수반하는 재료의 소성변형, 파단과 마찰에 의해 지배된다. 판의 면내 절단에 관한 실험결과로부터 실험물의 거동을 추정하기 위해서는 실험물과 모델사이에 어떠한 축척비의 법칙(Scaling Law)이 적용되는지를 검토하여야 한다. 재료의 균열과 파단은 동적하중에 의한 변형 효과, 즉 변형률의 효과와 더불어 기본 축척비의 법칙, 즉 에너지가 기하학적 축척비의 세제곱에 비례하는 법칙이 적용되지 않는 것으로 알려져 있다(Calladine, 1990; Jones, 1984). 1990년 이전 연구들의 손상 추정식은 차원적으로 적합하지 않았으나 Vaughan (1980), Jones and Jouri (1987), Lu and Calladine (1990)의 차원해석을 수행한 연구 결과 이후는 다음과 같은 형태의 찢김 손상추정식이 제안되고 있다.

여기에서 E 는 강판의 손상 흡수에너지, σ_0 는 소성흐름응력(Plastic flow stress), t 는 판의 두께, s 는 찢김 손상길이, C 와 α ($1 < \alpha < 2$)는 실험결과와 회귀분석을 통하여 구한 계수이다. 이러한 형태의 손상에너지의 추정식은 차원적으로 부합되고 기본축척비의 법칙이 적용되는 것이나 파단과 동적영향이 포함되는 찢김 손상의 문제에 대해서는 식의 형태에 있어서 근본적인 문제가 내재되어 있다고 볼 수 있다. 과거의 실험 연구에 있어서도 Wierzbicki and Thomas(1993), Shen et al.(1998)은 웨지 전단부에 앞서 파단이 발생하는 것을 관찰하였고 이를 토대로 균열을 고려한 이론식을 제안하였다. 이에 반하여 Lu and Calladine(1990), Simonsen and Wierzbicki(1998)의 실험에서는 웨지 끝부분에 앞서는 균열이 관찰되지 않아 이들 저자와 Zhang (2002)은 파단을 포함하지 않는 추정식을 제안하였다. 이와 같이 상반된 실험결과를 토대로 하여 제시된 찢김 손상식들은 실선 손상추정의 적용에 있어서 정확성에 대한 근본적인 문제를 제기한다. 본 연구에서는 이러한 문제의 찢김 손상에 관한 주요 논점을 규명하고 강판의 찢김 손상 추정법 개발을 위한 연구로서 기하학적으로 상사모델에 대하여 면내 절단실험을 수행하여 파단과 축척비의 영향을 검토한다. 또한 그 결과로부터 축척비의 법칙이 적용될 수 있는 새로운 손상 추정식을 제시하고자 한다.

제1저자 양박달치 연락처: 울산광역시 남구 무거동 산29
052-259-2159 pdcyang@mail.ulsan.ac.kr

2. 판의 면내 절단실험

2.1 실험장치 및 실험모델

강판의 찢김에 대한 축적비의 효과를 검토하기 위하여 판 두께가 1mm부터 5mm까지의 연강판을 기하학적으로 상사한 모델로 채택하였다. 강판 모델의 치수와 특성치는 Table1과 같다. 판 두께 1mm의 모델 폭을 100mm로 택하고 이를 기본으로 하여 두께의 증가에 따라 폭을 비례하여 증가시키는 기하학적 상사모델을 설정하였다. 모델의 길이는 폭의 절반에 해당하는 접힘거리를 고려하여 두께 1mm의 모델은 $L=100\text{ mm}$ 로 하고 그 이상의 두께의 모델에 대해서는 지지대와의 부착 등을 고려하여 Table1과 같이 조정하였다.

Table 1 Dimensions and mechanical properties of the cutting models

Model No.	Nominal thickness	Average Thickness	B(mm)	L(mm)	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Ductility Limit
SA101~109	1.0 mm	0.99	100	100	170	305	0.34
SA201~210	2.0 mm	1.91	200	160	215	290	0.32
SA301~310	3.0 mm	3.01	300	220	175	260	0.37
SA401~410	4.0 mm	3.87	400	280	255	330	0.40
SA501~510	5.0 mm	4.83	500	340	280	360	0.40

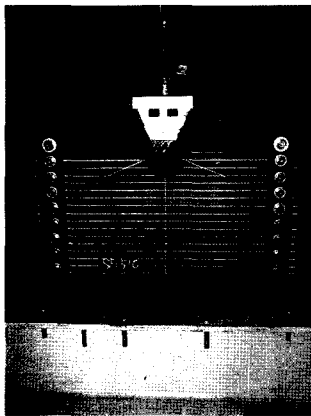


Fig. 1 The model supporting structure and the wedge of the cutting experiment

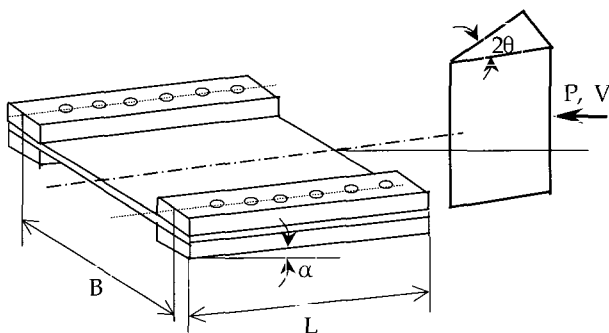


Fig. 2 Arrangement of the plate cutting experiment

각 모델의 개수는 두께별로 10개를 기준으로 하였으나 실험 결과에서 SA102은 하중-변위 자료의 기록 불량으로 제외 되었다. 폭이 서로 다른 모델에 대하여 절단시험을 수행하기 위하여 측면지지대의 위치 조정이 가능하도록 지지구조를 제작하여 하중 프레임에 설치하였다 (Fig 1 참조). Fig. 2의 절단실험 개념도에서 보인 것과 같이 웨지가 판에 인입된 후 판의 굽힘으로 인한 접힘(Folding)이 한 방향으로만 발생하도록 하기 위하여 지지구조를 수직면에 대하여 각도 $\alpha=4^\circ$ 경사시켰다. 본 실험에서 사용한 웨지는 날카로운 것으로 전단부의 각도는 $2\theta=45^\circ$ 이다.

2.2 실험결과 및 고찰

각 두께의 강판 모델의 절단 실험은 판의 수직면과의 경사 각이 $\alpha=4^\circ$ 로 웨지의 각도 $\theta=22.5^\circ$ 보다 작아서 초기에 전면으로 접힘이 발생한 후 손상 깊이가 두께의 10~30배에 도달하면 후면 접힘이 발생하였다. 이는 접힘의 반전이 상대적으로 빨리 발생한 것이다. 이와 같은 현상은 $\alpha < \theta$ 인 경우에 발생하는 것으로 Wierzbicki and Thomas(1993)에 의해 보고된 바 있다. 후면 접힘 발생하기 전까지의 손상깊이에 대한 절단하중을 Fig. 5에서 보였다. 판 두께의 1mm~5mm의 하중-손상깊이 관계는 대략 고른 분포를 보이고 있으나 이에 비하여 1mm 판은 상대적으로 분산 폭이 큰 결과를 얻었다. Fig. 3에서는 손상된 판의 대표적인 형상을 보이고 있는데 절단의 뿌리 부분에 균열파단이 관찰되지 않았다.

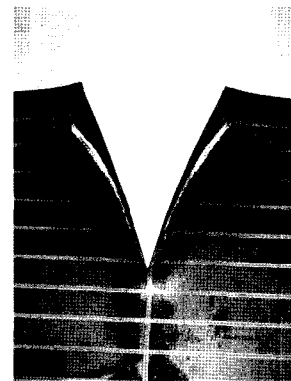


Fig. 3 A typical picture of damaged model(SA510) : mild steel, $t=4.9\text{mm}$

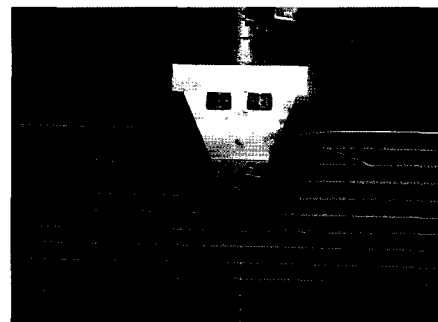


Fig. 4 A picture of the cutting process

Fig. 4의 절단과정의 사진에서 보인 바와 같이 웨지 전단부에 앞서서 판의 파단이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 이는 연강과 같은 연성재료가 상온에서 갖는 대표적인 파단특성으로 절단실험 과정에서 파단면이 웨지에 의해 깎인 자리에 붙어 있는 칩으로도 확인할 수 있었다. 따라서 파단이 직접 관찰되지는 않았지만 찢김 손상에 대한 해석모델의 설정에 있어서 파단을 고려하여야 한다.

실험결과와 절단하중 F 를 $F/\sigma_0 t^2$ 으로, 이를 적분하여 얻은 절단에너지 E 를 $E/\sigma_0 t^3$ 로 무차원화하여 무차원 손상깊이(s/t)에 대하여 비교하였다. 이를 위하여 실험 결과를 일정한 $s/t = 1.0 \sim 8.0$ 까지 8개의 값에 대하여 정리하였다. 각 두께에 대한 결과들의 평균값을 Table 2에 정리하였다. 또한 이 평균치에 표준편차의 2배에 대한 범위를 Fig. 6~7에 도시하였다. Fig. 6의 무차원 하중 곡선에서는 2mm~5mm판의 결과는 뚜렷한 최대하중의 특성을 보이고 있는데 비하여 1mm판의 최대하중은 명확하게 나타나지 않았음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 얇은 1mm 판은 하중이 작용하는 초기에 웨지에 의해 국부적으로 절단이 발생하여 최대하중이 관찰되지 않은 것으로 판단된다.

Table 2 Mean values of the cutting forces and energy at 8 nondimensional penetrations; P_m : mean of cutting force, E_m : mean of cutting energy

s/t	Plate Thickness					
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	
2.0	P_m	5.00	6.38	6.49	5.86	5.91
	E_m	6.31	7.12	7.10	6.09	6.32
3.0	P_m	5.52	7.21	7.25	7.05	7.50
	E_m	11.3	13.8	14.2	12.8	13.2
4.0	P_m	5.67	5.92	5.72	5.37	5.63
	E_m	16.6	20.2	20.8	19.2	19.9
5.0	P_m	5.58	5.29	4.88	4.57	4.56
	E_m	22.3	25.8	25.9	23.9	25.0
6.0	P_m	5.63	5.14	4.75	4.58	4.50
	E_m	27.9	31.3	30.8	28.5	29.4
7.0	P_m	5.80	5.48	5.09	5.00	4.80
	E_m	33.6	36.6	35.6	33.3	34.1
8.0	P_m	6.10	5.97	5.63	5.50	5.19
	E_m	39.6	42.4	40.9	38.5	39.2

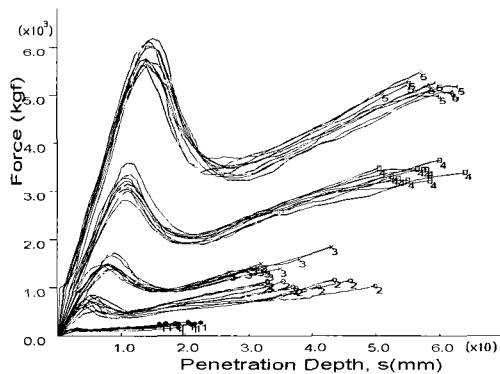


Fig. 5 Cutting force vs. penetration depth for all specimens of the tearing experiments : Numbers shown at the end of the curve are the plate thickness

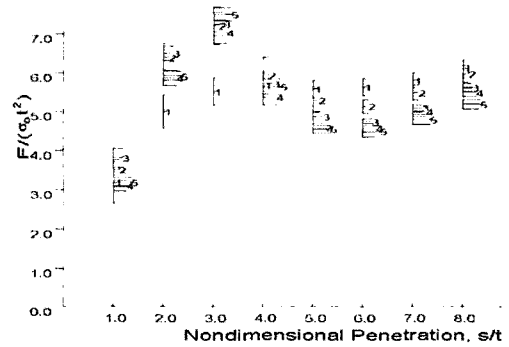


Fig. 6 Mean nondimensional cutting forces and its distributions : Numbers shown in the figures are the plate thicknesses and its position is the corresponding the mean value (the vertical bar represents the ± 2 standard deviation)

Table 2 와 Fig. 6에서 보인 바와 같이 판 두께가 두꺼워질수록 하중 ($P/\sigma_0 t^2$)이 작아지는 경향을 볼 수 있다. 손상깊이 s/t 가 커질수록 이와 같은 경향은 두드러지게 나타나는데 이것은 최종강도의 영향에서 벗어나서 웨지가 지속적으로 인입되는 상태에서의 손상깊이에 대한 결과라는 점에서 주목할 필요가 있다. 이는 판의 찢김현상에 파단과 같은 축척비의 법칙을 따르지 않는 요인이 포함된 결과로 볼 수 있다.

3. 판의 찢김 손상 추정식

본 연구에서는 강판의 찢김에 소요되는 에너지 E 를 굽힘과 파단을 위주로 하는 소성변형에 대한 에너지 E_p , 마찰에 의해 소산되는 에너지 E_f 로 구성된다고 가정한다.

$$E = E_p + E_f \tag{2}$$

3.1 소성 굽힘변형

Fig. 8과 같이 웨지의 전진속도 V 에 의해 강판에 찢김변형이 발생하는 동안 웨지의 옆면과 접촉되는 판에 굽힘이 일어난다. 이 굽힘은 반경 R 인 실린더 주위에서 판이 발생한다고 가정하면 변형에 소요되는 에너지는 실린더 전단부 AB에서 연속적인 소성 굽힘변형에 의해 흡수된다. 판의 재료특성을 완전소성으로 가정하면 실린더 주위의 소성굽힘 변형에너지 변화율은

$$E'_B = 2M_0 \phi' L_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 t^2 \frac{V_r s}{R} \tan \theta \tag{3}$$

여기에서 윗첨자 '은 시간에 대한 변화율을 의미한다. 평판의 완전소성 굽힘모멘트는 평면응력을 고려한 항복조건을 사용하면 $M_0 = \sigma_0 t^2 / 2\sqrt{3}$ 로 표시된다 (Wierzbicki and Thomas, 1993). σ_0 는 평균 소성흐름응력(Plastic flow stress)으로 본 연구에서는 재료의 항복응력과 최종강도의 평균값으로 택한다. 또한 V_r 은 판의 경사로 인한 상대 전진속도로 $V_r = V / \cos \alpha$ 이고 $L_{AB} = s / \cos \theta$, 판의 실린더 주위의 롤링 각도 $\phi = s \sin \theta / R$ 이 사용되었다.

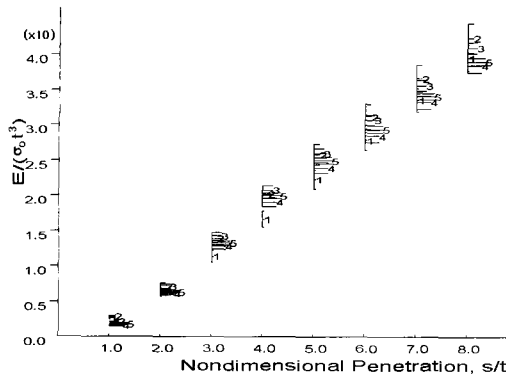


Fig. 7 Mean nondimensional cutting energy and its distributions : Numbers shown in the figures are the plate thicknesses and its position is the corresponding the mean value (the vertical bar represents the ± 2 standard deviation)

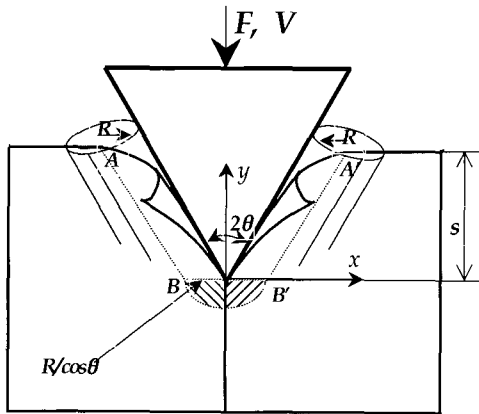


Fig. 8 Bending and membrane deformation of the cutting model

Fig. 8에서 보인 것과 같이 웨지 전단부의 균열 전진에 따르는 소성역의 확대를 반영이 $R/\cos\theta$ 인 반원내의 평면이 완전 소성되는 것으로 가정하면 이에 대한 면내 변형에너지 변화율은 $E'_m = \int \sigma_{\alpha\beta} \epsilon'_{\alpha\beta} dA$ 로 표시될 수 있다. 여기에서 아래첨자 α, β 는 평면응력 성분의 항을 표시한다. 면내 변형이 횡 방향의 인장이 지배적인 것으로 가정하고 다른 성분들을 무시하면 E'_m 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E'_m &\cong \frac{2}{\sqrt{3}} \int_A \sigma_0 t \epsilon'_y dx dy = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 t \int_A \frac{d\epsilon_y}{dx} x' dx dy \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 V t \int_A [(\epsilon_y)_{BB} - (\epsilon_y)_{\infty}] dy \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 V t \int_A (\epsilon_y)_{BB} dy = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 V t \frac{2R}{\cos\theta} \epsilon_u \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 균열 전단부의 소성역 BB' 의 변형률은 인장한도 ϵ_u 에 도달한다고 가정하였다.

3.2 파단에너지

2장의 실험 결과에서 고찰한 바와 같이 연강판과 같은 연성 재료의 면내 절단과정에서 웨지 전단부에 앞서는 균열이 관찰되지는 않았지만 파단에 의해 소산되는 에너지를 포함하는 것이 합리적이다. 이는 상온에서 연강과 같은 재료에서 발생하는 연성파단(Ductile fracture)의 대표적인 현상이다. 균열절단에 의해 소산되는 에너지는 파단면 단위 면적당 에너지 방출량인 에너지이완률(Energy Release Rate) G_C 로 표시할 수 있다 (Barsom and Rolfe, 1987).

$$G_C = 1.2(1-\nu^2)\sigma_0\delta_C \quad (5)$$

이 식에서 ν 는 Poisson의 비, δ_C 는 CTOD(Crack Tip Opening Displacement)로서 Barsom and Rolfe(1987)에 의하면 25mm이하의 강판이 상온에서 $\delta_C = 1.0 \sim 1.5mm$ 를 갖는다. $\nu = 0.3$, 소성응력 $\sigma_0 = 300MPa$ 인 경우 에너지이완률은 $G_C = 400KJ/m^2$ 이되는데 이 값은 Atkins(1987)가 제시한 $G_C = 200 \sim 1000KJ/m^2$ 의 값의 범위에 드는 것이다. (5)식에서 $\nu = 0.3$ 를 사용하면 균열에 의해 소산되는 에너지 변화율은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$E'_C = 1.1\sigma_0\delta_C t V \quad (6)$$

3.3 소성변형저항력

전체 소성변형에 대한 에너지 변화율 E'_P 는 (3), (4)식과 (6)식의 합으로 표시된다.

$$E'_P = F_P V_r = E'_B + E'_m + E'_T$$

이 식에서 F_P 은 소성변형저항력으로 이를 도입하면

$$F_P V_r = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 t^2 \frac{\tan\theta}{R} V_r + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 t \frac{2R}{\cos\theta} \epsilon_u V_r + 1.1\sigma_0\delta_C t V_r$$

이 식에서 미지수 R 은 최소 소성변형저항력의 조건, $\partial F_P / \partial R = 0$ 에서 구해질 수 있다(Wierzbicki and Thomas, 1993).

$$R = \sqrt{\frac{sts \sin\theta}{4\epsilon_u}} \quad (7)$$

$$F_P = \frac{4}{\sqrt{3}} \epsilon_u^{0.5} \left(\frac{\tan\theta}{\cos\theta} \right)^{0.5} \sigma_0 t^{1.5} s^{0.5} + 1.1\sigma_0 t \delta_C \quad (8)$$

3.4 마찰력, 전체 절단력 과 찢김 손상에너지

판의 면내 절단에 대하여 기 발표된 논문들에 의하면 마찰이 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다(Lu and Calladine, 1990; Simonsen and Wierzbicki 1998). 마찰저항은 웨지와 접촉면의 상대적인 운동에 의해 발생한다. Fig. 9와 같이 웨지와 판의 수직 접촉력을 N 으로 놓으면 Coulomb의 마찰법칙에 의해 마찰력이 면을 따라 작용한다. 여기서 판의 파단에 저항하

는 힘을 F_c (8식의 2 번째 항)은 수직 접촉력 N 에 기여하지 않는다고 가정한다. 이는 파단력이 그 방향으로 보아 직접 판의 절단력 F 에 작용할 것으로 보기 때문이다. 하중 방향의 힘의 평형조건과 일-에너지의 평형을 고려하면 전체 절단력 F 를 구할 수 있다.

$$F = F_c + 2N \sin \theta + 2\mu N \cos \theta \rightarrow N = \frac{F - F_c}{2(\sin \theta + \mu \cos \theta)}$$

$$FV = F_p V_r + 2\mu N \frac{V_r}{\cos \theta}$$

상대속도 $V_r = V / \cos \alpha$ 를 고려하고 위의 두 식에서 전체 절단력 F 를 구하면 다음과 같다.

$$F = C_A F_p - \frac{C_A \mu F_c}{\cos \theta (\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad \text{or}$$

$$F = \frac{4}{\sqrt{3}} C_A \left(\frac{\epsilon_u \tan \theta}{\cos \theta} \right)^{0.5} \sigma_0 t^{1.5} s^{0.5} + 1.1 C_A C_R \sigma_0 \delta_c t \quad (9)$$

여기에서 C_A , C_R 는 마찰로 인한 계수로 다음과 같다.

$$C_A = \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \alpha (\sin \theta + \mu \cos \theta) - \mu / \cos \theta} \quad (10)$$

$$C_R = 1.0 - \frac{\mu}{\cos \theta (\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad (11)$$

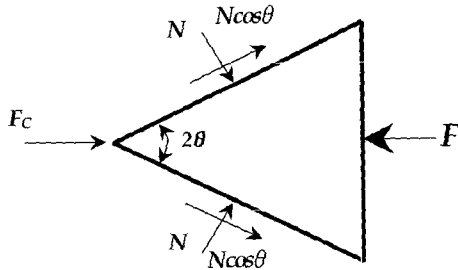


Fig. 9 Frictional force acting on the wedge

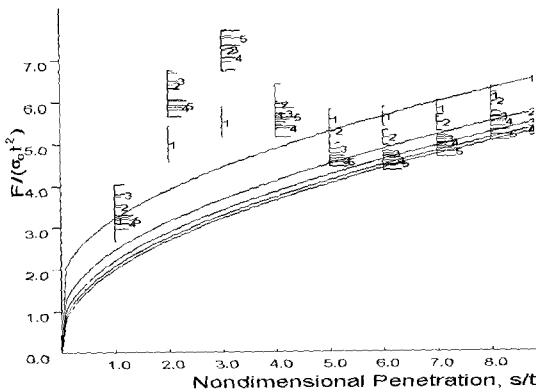


Fig. 10 Comparison the experimental results with the present formula of the cutting force, eq.(13) : $\delta_c = 1.3 \text{ mm}$, $\mu = 0.3$

(9)식을 적분하면 판의 찢김에 소요되는 전체에너지 E 를 구할 수 있다.

$$E = \frac{8}{3\sqrt{3}} C_A \left(\frac{\epsilon_u \tan \theta}{\cos \theta} \right)^{0.5} \sigma_0 t^{1.5} s^{0.5} + 1.1 C_A C_R \sigma_0 \delta_c t \quad (12)$$

(9)식과 (12)식의 전체 절단력과 에너지를 무차원화하여 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{F}{\sigma_0 t^2} = \frac{4}{\sqrt{3}} C_A \left(\frac{\epsilon_u \tan \theta}{\cos \theta} \right)^{0.5} \left(\frac{s}{t} \right)^{0.5} + \frac{1.1 C_A C_R \delta_c}{t} \quad (13)$$

$$\frac{E}{\sigma_0 t^3} = \frac{8}{3\sqrt{3}} C_A \left(\frac{\epsilon_u \tan \theta}{\cos \theta} \right)^{0.5} \left(\frac{s}{t} \right)^{1.5} + \frac{1.1 C_A C_R \delta_c}{t} \left(\frac{s}{t} \right) \quad (14)$$

3.5 실험결과와의 비교

강판의 면내 절단력 추정식 (13)식을 2장의 실험결과에 대하여 적용하였다. 이 계산에서 CTOD $\delta_c = 1.3 \text{ mm}$ 를 택하였고, (10), (11)식의 C_A , C_R 의 마찰계수는 금속속에 대한 대표적인 값인 $\mu = 0.3$ 을 사용하였다. Fig.6에서 보인 각 판 두께에 대한 무차원 절단력의 분포에 (13)식을 사용한 해석 결과를 Fig.10에 보였다. 이 비교에서 면내 압축에 대한 최대하중이 발생하기 전후에는 실험과 이론결과가 큰 차이를 보이고 있으나 어느 정도 찢김이 진행된 후에는 강판의 각 두께들의 하중 분포에 대해서 해석결과가 잘 대응한다는 것을 보여준다. 이는 (1)식과 같은 형태의 손상추정식이 축척비에 따라 두께의 영향을 감안하지 못하는 하나의 단일 곡선으로 나타나는 점과 대비되는 것이다.

5. 결론

선박의 좌초시 선저구조 찢김손상 추정을 위하여 강재 웨지에 의한 강판의 정적 절단에 대한 연구를 수행하였다. 판의 찢김 현상에는 소성변형과 파단이 포함되는데, 이에 대한 축척비의 영향을 고찰하기 위하여 기하학적 상사모델에 대한 실험을 수행하였다. 두께 1mm ~ 5mm까지 강판에 대한 기하학적 상사모델에 대한 절단실험 결과로부터 절단에 필요한 힘과 에너지가 파단의 영향으로 기본 축척비의 범칙에 벗어남을 확인하였다.

실험결과를 토대로 찢김손상 모델을 설정하여 파단을 고려한 손상 추정식을 유도하고 실험결과와 비교하여 판 두께의 변화에 따라 잘 대응하는 것을 확인하였다. 본 연구 결과를 실선 구조에 적용하기 위해서는 동적인 영향과 다양한 판의 두께의 영향을 고려한 실험을 수행하여 이론적인 손상 모델에 대한 보완이 필요하다.

후 기

본 연구는 울산대학교의 연구비 지원으로 수행된 연구결과 중

일부임을 밝히고 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 실험 수행과 자료정리를 도와준 이종식, 박혜준, 우경훈군의 수고에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 백점기, 현명현, 이탁기 (1994). "좌초시 선저보강판의 손상 에 관한 연구" 대한조선학회논문집, 제31권, 제1호, pp 121-132.
- 백점기, 이탁기 (1996). "판의 찢김응답에 대한 치수 및 동적 효과" 대한조선학회논문집, 제33권, 제3호, pp 48-60.
- Barsom, J.W. and Rolfe, S.T. (1987). *Fracture and Fatigue Control in Structures*, 2nd edition Prentice-Hall Inc., pp 556-558.
- Calladine, C.R. (1983). An Investigation of Impact Scaling Theory, in 'Structural Crashworthiness' ed. by N. Jones, and T. Wierzbicki, Butterworths, pp 169-174.
- Jones, N. (1984). Scaling of Inelastic Structures Loaded Dynamically in 'Structural Impact and Crashworthiness', ed. by G.A.O. Davies, Elsevier Applied Science Publishers, pp 45-74.
- Jones, N. and Jouri, W.S. (1987). A Study of Plate Tearing for Ship Collision and Grounding Damage *J. of Ship Research*, Vol 31, No 4, pp 253-268.
- Lu, G. and Calladin, C.R. (1990). "On the Cutting of a Plate by A Wedge", *Int. J. of Mech. Science*, Vol 32, No 4, pp 293-313.
- Paik, J.K. (1994). "Cutting of a Longitudinally Stiffened Plate by a Wedge", *J. of Ship Research*, Vol 38, No 4, pp 340-348.
- Shen, W.Q., Fung, K.W., Trinatafyllou, P., Wajid, N.M. and Nordin, N. (1998). "An Experimental Study on the Scaling of Plate Cutting", *Int. J. of Impact Engineering*, Vol 21, No 8, pp 645-662.
- Simonsen, B.C. and Wierzbicki, T. (1998). "Plasticity, Fracture and Friction in Steady-state Plate Cutting", *Int. J. of impact Engineering*, Vol 21, No 5, p387-411.
- Vaughan, H. (1980). "The Tearing Strength of Mild Steel Plate", *J. of Ship Research*, Vol 24, No 2, pp 96-100.
- Wierzbicki, T. and Thomas, P. (1993). "Closed-form Solution for Wedge Cutting Force Through Thin Metal Sheets", *Int. J. of Mech. Science*, Vol 35, No 3/4, pp 209-229.
- Zhang, S. (2002). "Plate Tearing and Bottom Damage in Ship Grounding", *J Marine Structures*, Vol 15, pp 101-117.

2003년 10월 14일 원고 접수

2003년 12월 26일 최종 수정본 채택