대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 A pp. 159~164 KSME 00S028

선형파괴역학에 의한 Aluminum Foil과 종이의 파괴거동 해석

안득만* · 옥영구**

An Analysis on Fracture Behavior of Aluminum Foil and Paper by Linear Elastic Fracture Mechanics

Deuk-Man An and Young-Gu Ok

Key Words: Crack(크랙), Energy Release Rate(에너지 해방율), Strain Energy(변형에너지) Linear Elastic Fracture Mechanics(선형탄성파괴역학)

Abstract

The fracture behaviors of aluminum foils and sheet papers were analyzed on the basis of linear elastic fracture mechanics(LEFM). The fracture loads of the similarly shaped specimens were calculated by dimensional analysis. The actual fracture loads were measured using the simple tension equipment. The predicted fracture loads were compared with the experimental results.

기호설명

W : strain energy(변형 에너지)
P : 시편의 파괴 하중
S : 시편의 단면적
V : 시편의 부피
u, v, w : X,Y,Z축 방향의 변위

1. 서 론

Griffith에 의하여 시작된 선형파괴역학은 열역학 제 1법칙에 근거를 두고 있다. Griffith는 취성 파괴의 조건을 균열 끝에서의 에너지 해방율이 임계치에 도달하는 것으로 가정하였다[1]. 이 가정은 후에 Irwin, Orowan 등에 의하여 균열 끝에서의 응력 및 변위를 표현하는 응력 확대 계수가 임계치인 파괴인성치(fracture toughness)에 도달할 때 취성 파괴가 시작된다는 것과 동일하다[2,3]. 본 논문에서는 파괴역학의 기본이 되는 재료의 파괴 인성치가 존재하는 것을 상사실험을 통하여 보여주고자 한다. 즉, 만약 재료마다 그 재료의 물성치인 파괴 인성치가 존재한다면 서로 상사인 시편의 파괴하중을 예측할 수 있다. 따라서, 예측된 파괴하중과 실험으로 구한 파괴하중을 비교하여 파괴 인성치가 재료의 고유한 특징을 나타내는 물성치인 것을 보여주고자 한다[4,5]. 간단한 실험장치와 시중에서 쉽게 구할 수 있는 알루미늄 호일 및 종이를 시편으로 사용하여 이를 검증하고자 한다.

* 부산대학교 기계공학부
**부산대 대학원

2. 이론적 배경

2.2 시편의 크기를 크기를 t배 한 경우

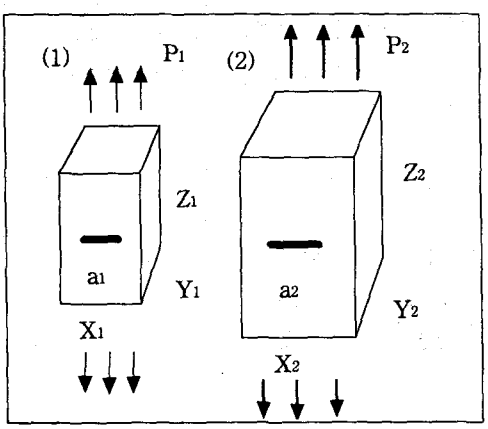

Fig. 1 Similar specimens.

$X_i, Y_i, Z_i (i=1,2)$는 시편 1 및 2의 X,Y,Z축 방향의 길이, $u_i, v_i, w_i (i=1,2)$는 시편 1,2의 X,Y,Z축 방향의 변위라 하자.

모든 방향으로 t배만큼 증가시키면,

$$X_2 = t \cdot X_1, \quad Y_2 = t \cdot Y_1, \quad Z_2 = t \cdot Z_1 \quad (1)$$

가 된다, 여기서 Fig. 1-(2) 시편의 변위를 τ 배로 가정하면,

$$u_2 = \tau \cdot u_1, \quad v_2 = \tau \cdot v_1, \quad w_2 = \tau \cdot w_1 \quad (2)$$

와 같이 된다.

여기서, $S_i (i=1,2)$, $V_i (i=1,2)$를 시편의 단면적과 부피라 할 때.

$$S_2 = X_2 Z_2 = t^2 X_1 Z_1 = t^2 S_1 \quad (3)$$

$$V_2 = X_2 Y_2 Z_2 = t^3 X_1 Y_1 Z_1 = t^3 V_1 \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다.

그리고, 변형율(strain)은 변위량의 좌표축에 대한 미분이므로,

$$\varepsilon_2 = \frac{\tau}{t}\varepsilon_1, \quad \sigma_2 = \frac{\tau}{t}\sigma_1 \quad (5)$$

이다.

$W_i (i=1,2)$를 시편의 변형에너지(strain energy)라 하면, 변형 에너지 밀도(strain energy density)는 $\frac{\sigma^2}{2E}$ 이므로 (4)식과 (5)식을 이용하면

$$W_2 = \frac{\sigma_2^2}{2E} V_2 = \tau^2 t \frac{\sigma_1^2}{2E} V_1 = \tau^2 t W_1 \quad (6)$$

이 된다.

Griffith에 따르면 파괴는 크랙 끝에서의 단위면적당 변형에너지가 임계 에너지 해방율에 도달할 때 일어난다. 시편의 재료가 동일하므로 파괴가 시작될 때 단위면적당 변형에너지는 두 시편에서 동일하게 된다. 즉,

$$\frac{W_2}{S_2} = \frac{W_1}{S_1} \quad (7)$$

이다.

(7)에 (3)과 (6)을 대입하면

$$\frac{W_2}{S_2} = \frac{\tau^2 t W_1}{t^2 S_1} = \frac{\tau^2}{t}\frac{W_1}{S_1} \quad (8)$$

가 되고, (7)과 (8)에 의해서

$$\tau^2 = t, \quad \tau = \sqrt{t} \quad (9)$$

이다.

$P_i (i=1,2)$를 각 시편에 작용하는 파괴하중으로 정의하면,

$$P_1 = \sigma_1 S_1, \quad P_2 = \sigma_2 S_2 \quad (10)$$

가 되어,

(10)에 (3),(5),(9)을 대입하면,

$$P_2 = \sigma_2 S_2 = \frac{\tau}{t}\sigma_1 t^2 S_1$$
$$= \tau t \sigma_1 S_1 = t\sqrt{t} P_1$$
$$\therefore P_2 = t\sqrt{t} P_1 \quad (11)$$

가 된다.

따라서, 시편의 크기를 모두 t배 만큼 증가시키면, 시편 2의 파괴하중 P_1는 P_2의 $t\sqrt{t}$배가 된다.

2.2 시편의 크기를 이정하게 유지하고 나머지 크기를 t배 한 경우

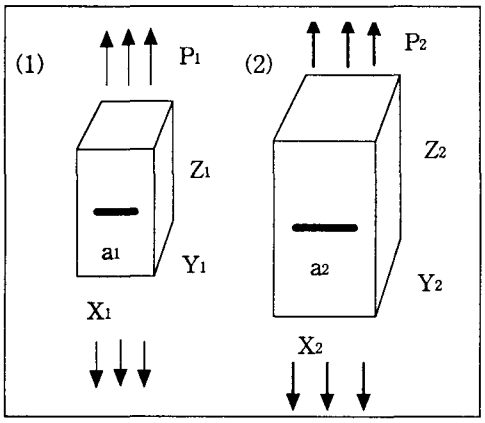

Fig. 2 Similar specimens with equal thickness.

두께는 고정시키고 폭과 길이를 변화시킬 경우,

$$X_2 = t \cdot X_1, \quad Y_2 = t \cdot Y_1, \quad Z_2 = Z_1, \quad (12)$$

$$S_2 = X_2 Z_2 = t X_1 Z_1 = t S_1 \quad (13)$$

$$V_2 = X_2 Y_2 Z_2 = t^2 X_1 Y_1 Z_1 = t^2 V_1 \quad (14)$$

$W_2 = \frac{\sigma_2^2}{2E} V_2$ 이다. (5)와 (14)에 의하여

$$W_2 = \tau^2 \frac{\sigma_1^2}{2E} V_1 = \tau^2 W_1 \quad (15)$$

이 된다.

(7), (13), (15)에 의해,

$$\frac{W_2}{S_2}=\frac{\tau^2 W_1}{tS_1}=\frac{\tau^2}{t}\frac{W_1}{S_1} \qquad (16)$$

(7)과 (16)에서 (9)과 동일한 결과가 나오며

$$\tau^2=t,\quad \tau=\sqrt{t} \qquad (9)$$

(10), (5), (13)에 의하여,

$$P_2=\sigma_2 S_2=\frac{\tau}{t}\sigma_1 tS_1$$
$$=\tau\sigma_1 S_1=\sqrt{t}P_1$$
$$\therefore P_2=\sqrt{t}P_1 \qquad (17)$$

이 된다.

3. 실험

2.1 시편

본 실험에 사용된 시편은 시중에서 주방용으로 사용되는 알루미늄 호일과 복사용 B_4종이이다.

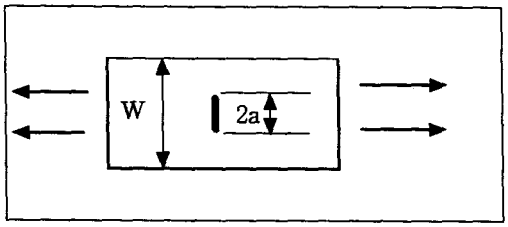

Fig. 3 Schematic of the test specimen.

시편의 모양은 Fig.3과 같이 centered cracked specimen으로 가정하였고 알루미늄 P 과 종이의 규격과 회사는 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of specimens

시편	제조업체	규격
Al Foil	신우알미늄	250㎜×30m×18㎛
	대일산업	300㎜×30m×15㎛
종이	신무림제지	257㎜×364㎜×0.1㎜

3.2 시험장치

앵글로 만든 프레임 위에 볼 부쉬(Ball Bush)와 가이드 축(Guide Shaft)을 이용한 직선운동기구를 고정시켰다. 고무가 접착된 알루미늄 판을 볼 부쉬에 부착시킨 후, 각 알루미늄 판을 용수철 저울

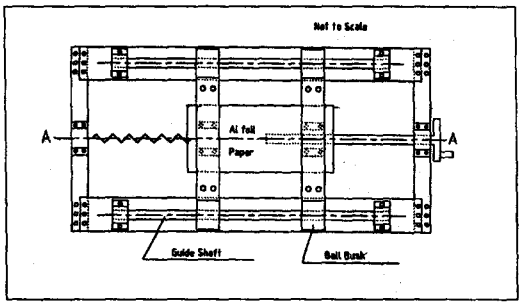

Fig. 4 The front view of the apparatus.

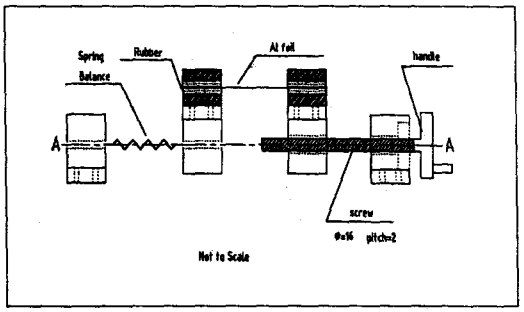

Fig. 5 The side view of the apparatus.

과 이송나사에 체결하여 시편에 작용하는 하중이 용수철에 전달되도록 하였다.

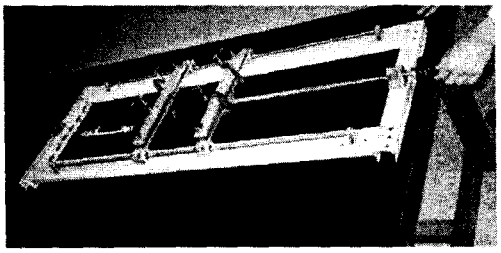

Fig. 6 Set-up of the apparatus.

3.3 실험결과

시편을 인장장치의 고무판 사이에 균형을 맞춰 끼운 후, 체결나사와 보조클램프를 이용하여 하중이 작용해도 시편이 미끄러지거나 빠지지 않도록 정확하게 고정시킨다.

핸들을 2[rev/sec]정도의 속도로 회전시키며, 시편에 하중을 가한다. 시편이 팽팽하게 당겨졌을

때, 크랙선단 (crack tip)의 변형 양상을 주의하여 관찰하고, 재료가 파괴되었을 때 저울에 나타난 최고 하중값을 읽는다.

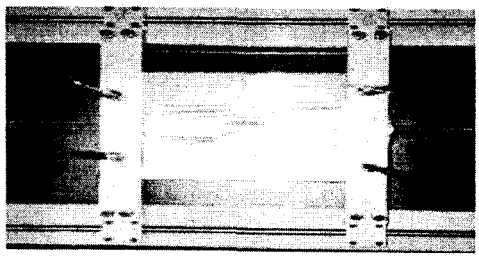

Fig. 7 Fully tensioned aluminum foil specimen.

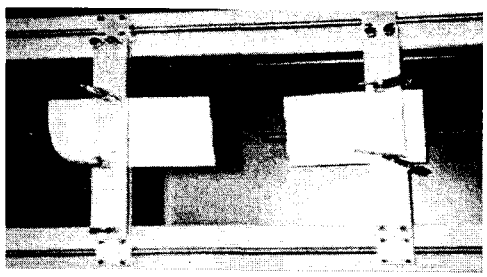

Fig. 8 Fractured paper specimen.

Table 2 2a/W=0.1, scale factor t=1.5

W[mm]		40	60	90	135	200	300
2a[mm]		4	6	9	13.5	20	30
Al 18㎛	이론값[Kg]	2.4	2.9	3.6	4.4	5.4	
	실제값[Kg]	2.4	3.5	5.2	7.4	11	
Al 15㎛	이론값[Kg]	2.1	2.6	3.2	3.9	4.8	5.9
	실제값[Kg]	2.1	3.0	4.2	6.1	10	14.2
종이 0.1mm	이론값[Kg]	12.4	15.2	18.6	22.8	27.9	
	실제값[Kg]	12.4	16.5	22	29.5	41	

Table 3 2a/W=0.2, scale factor t=1.5

W[mm]		40	60	90	135	200	300
2a[mm]		8	12	18	27	40	60
Al 18㎛	이론값[Kg]	1.8	2.2	2.7	3.3	4.0	
	실제값[Kg]	1.8	2.8	4.2	6.2	10.4	
Al 15㎛	이론값[Kg]	1.7	2.1	2.6	3.2	3.9	4.8
	실제값[Kg]	1.7	2.2	3.3	5.8	7.6	11.7
종이 0.1mm	이론값[Kg]	8.5	10.4	12.7	15.6	19.1	
	실제값[Kg]	8.5	13	16.8	24.6	34.6	

Table 4 2a/W=0.3, scale factor t=1.5

W[mm]		40	60	90	135	200	300
2a[mm]		12	18	27	40.5	60	90
Al 18㎛	이론값[Kg]	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	
	실제값[Kg]	1.5	2.3	3.7	5.4	8.6	
Al 15㎛	이론값[Kg]	1.3	1.6	2.0	2.4	2.9	3.6
	실제값[Kg]	1.3	1.8	3	4.4	6.7	10.4
종이 0.1mm	이론값[Kg]	6.5	8.0	9.8	12.0	14.7	
	실제값[Kg]	6.5	9	13.3	19.5	28	

Table 5 2a/W=0.4, scale factor t=1.5

W[mm]		40	60	90	135	200	300
2a[mm]		16	24	36	54	80	120
Al 18㎛	이론값[Kg]		2	2.4	2.9	3.6	
	실제값[Kg]		2	3.2	4.8	7.4	
Al 15㎛	이론값[Kg]		1.5	2.6	3.2	3.9	4.8
	실제값[Kg]		1.5	2.6	3.9	5.6	8.6
종이 0.1mm	이론값[Kg]	5.5	6.7	8.2	10.0	12.2	
	실제값[Kg]	5.5	8.0	11.5	15.7	25	

Table 6 2a/W=0.5, scale factor t=1.5

W[mm]		40	60	90	135	200	300
2a[mm]		20	30	45	67.5	100	150
Al 18㎛	이론값[Kg]		1.6	2.0	2.4	2.9	
	실제값[Kg]		1.6	2.6	3.9	6	
Al 15㎛	이론값[Kg]		1.3	1.6	2.0	2.4	2.9
	실제값[Kg]		1.3	2.2	3.3	4.7	7.1
종이 0.1mm	이론값[Kg]	4	4.9	6.0	7.3	9.0	
	실제값[Kg]	4	6.2	8.5	12.5	20.8	

Table 7 2a/W=0.6, scale factor t=1.5

W[mm]		40	60	90	135	200	300
2a[mm]		24	36	54	81	120	180
Al 18㎛	이론값[Kg]			2.1	2.6	3.2	
	실제값[Kg]			2.1	3.2	4.9	
Al 15㎛	이론값[Kg]			1.8	2.2	2.7	3.3
	실제값[Kg]			1.8	2.6	3.8	5.8
종이 0.1mm	이론값[Kg]	3	3.7	4.5	5.5	8.3	
	실제값[Kg]	3	5	7	9.7	16	

이론값은 시편 너비 대 크랙 크기의 비율 (2a/W)이 일정할 때, 각 시편에 대하여 제일 작은 하중값을 기준으로 하여 $\sqrt{t}\simeq 1.22$배씩 한 경우의

예상 하중을 표시한 것이다.

실험값은 각 시편에 대한 파괴하중값을 나타낸다. 해당하는 시편의 크기에 맞는 재료가 없거나 파괴하중이 너무 작아 측정하기 어려운 경우에는 측정값이 빠져 있다.

Table 8 Ratio of fracture loads for similar specimens

시편 종류	크랙길이 대 시편너비 (2a/W)	하중증가비(상사된 시편의 하중/기준 시편의 하중)					평균
		P_{60}/P_{40}	P_{90}/P_{60}	P_{135}/P_{90}	P_{200}/P_{135}	P_{300}/P_{200}	
Al 18μm	0.1	1.46	1.49	1.42	1.49		1.47
	0.2	1.56	1.5	1.42	1.68		1.56
	0.3	1.53	1.61	1.46	1.59		1.55
	0.4		1.6	1.5	1.54		1.55
	0.5		1.63	1.5	1.54		1.56
	0.6			1.52	1.53		1.53
Al 15μm	0.1	1.43	1.4	1.45	1.64	1.42	1.47
	0.2	1.29	1.5	1.76	1.31	1.54	1.48
	0.3	1.38	1.67	1.47	1.52	1.55	1.52
	0.4		1.33	1.5	1.44	1.54	1.45
	0.5		1.69	1.5	1.42	1.51	1.53
	0.6			1.44	1.46	1.53	1.48
종이 0.1mm	0.1	1.33	1.33	1.34	1.39		1.35
	0.2	1.53	1.29	1.46	1.41		1.42
	0.3	1.38	1.48	1.47	1.44		1.44
	0.4	1.45	1.44	1.37	1.59		1.46
	0.5	1.55	1.37	1.47	1.66		1.51
	0.6	1.67	1.4	1.39	1.65		1.53

Table 8은 기준시편과 상사된 시편의 파괴하중 증가비를 나타낸 것이다.

Table 9 Fracture loads of cracked and uncracked specimens

시편종류	시편너비 (㎜)	크랙크기 (㎜)	파괴하중 (Kg)
크랙 없는 시편	36	0	2.5
	54	0	4.1
	81	0	6.0
	121.5	0	9.0
크랙 있는 시편	40	4	2.1
	60	6	3.0
	90	9	4.2
	135	13.5	6.1

Table 9는 크랙 길이가 2a, 폭 W인 시편과 크랙이 없는 폭 $(W-2a)$인 시편의 파괴하중을 비교하였다.

크랙이 없는 폭 $(W-2a)$의 시편이 크랙 2a를 가진 폭 W의 시편보다 큰 파괴하중을 나타내었다.

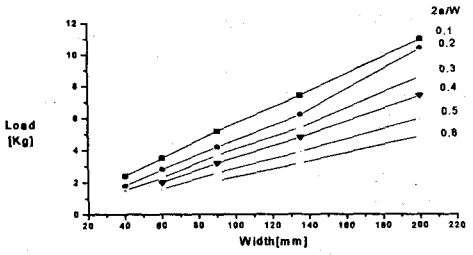

Fig. 9 Aluminum foil, thickness 18 μm.

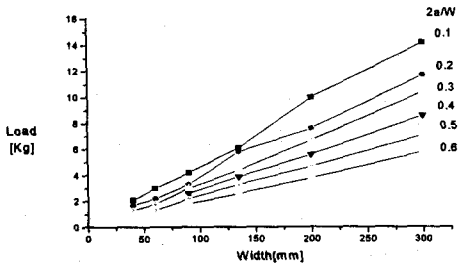

Fig. 10 Aluminum foil, thickness 15 μm.

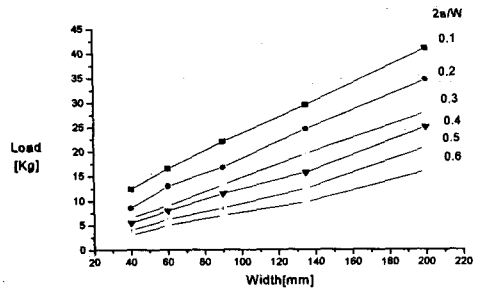

Fig. 11 Paper, thickness 0.1㎜

각 시편에 대하여 크랙길이 대 시편너비의 비(2a/W)를 일정하게 유지시키고, 시편의 크기를 증가시킬 때의 하중값을 그래프로 나타내었다.

4. 결 론

차원해석 결과 시편의 크기가 1.5배로 증가할 때 파괴하중의 예측값은 식 (17)에서 $\sqrt{1.5} \simeq 1.22$배로 계산되었다. 실험결과 파괴하중의 평균값은 두께 18㎛의 알루미늄일 때 1.54배, 두께15㎛의 알루미늄에서 1.49배, 두께 0.1mm종이에서 1.45배의 증가를 보였다. 이는 예상한 값보다 18% ~ 26% 더 큰 값이다. 종이보다 알루미늄의 오차값이 더 큰 이유는 알루미늄 호일의 과도한 소성변형에 그 원인이 있다고 사료된다. 특히, 알루미늄 호일은 Table 9에서와 같이 균열이 있을 때와 없을 때 파괴하중의 차이가 있었다. 이는 알루미늄 호일이 변형율의 임계치에 의하여 파단된다는 것을 보여준다.

참고문헌

(1) Griffith, A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids", Phil. Trans. Roy. Soc. of London, pp.163-191, 1921.
(2) Irwin. G. R., "Fracture dynamics, Fracturing of Metals", ASM publ., pp.147-166, 1948.
(3) Orowan. E., "Energy criteria of fracture, Welding Journal", 34, pp.1575-1605, 1955.
(4) T.L Anderson, "Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications", CRC Press Inc., Florida, pp.3 - 109, 1991.
(5) D. Broek, "Elementary engineering fracture mechanics", Martinus Nijhoff Publ., London, 1982.