

노치부를 가진 Glass/Epoxy 복합재료의 노치강도 평가와 불안정 파괴조건

김정규* · 김도식**

(1993년 8월 27일 접수)

The Notched Strength and Fracture Criterion in Plain Woven Glass/Epoxy Composites with a Crack

Jung-Kyu Kim · Do-Sig Kim

Key Words : Notched Strength Evaluation(노치강도평가), Characteristic Length(특성길이), Point Stress Criterion(점응력조건), Energy Release Rate(에너지해방율), Stree Intensity Factor(응력확대계수), Shape Correction Factor(형상보정계수)

Abstract

The fracture behavior of plain woven glass/epoxy composite plates with a crack is investigated under static tensile loading. It is shown in this paper that the characteristic length associated with the point stress criterion depends on the crack length. To predict the notched tensile strength, the point stress criterion proposed by Whitney and Nuismer are modified. An excellent agreement is found between the experimental results and the analytical prediction of the modified point stress criterion.

The condition of unstable crack growth in the presence of a pre-existing flaw(machined notch) is examined by means of the maximum stress intensity factor K_{max} using maximum load P_{max} . The values of K_{max} evaluated from energy release rate G_{max} (the compliance method) and the standard expression normally used for isotropic materials(the isotropic method) indicate a wide difference. Therefore in regard to anisotropy and heterogeneity of the composite materials studied, the modified shape correction factor $f^*(a/W)$ is obtained. K_{max} evaluated by the compliance method a little or insignificantly depends on the initial crack length a , the specimen thickness B , the crack angle θ and the specimen geometry.

* 정회원 한양대학교 기계설계학과

** 한양대학교 기계설계학과 대학원

1. 서 론

섬유강화복합재료는 높은 비강도와 비강성의 기계적 특성과 내식성, 내마멸성 및 경량성등의 우수한 기능적 특성으로 인하여 우주항공산업, 자동차산업, 해양개발분야에 이르기까지 1차 구조용 재료로서 이의 사용이 급증하고 있다. 따라서 이를 이용한 기계 구조물설계의 신뢰성과 효율성을 향상시키기 위해서는 원공, 노치등과 같은 불연속부의 존재가 재료의 파괴거동 및 파괴인성에 미치는 영향을 검토함은 대단히 중요하다.

불연속부를 가진 노치재의 강도평가는 응력집중계수만으로는 불가능하고 선형탄성파괴역학(LEFM)에 의한 Waddoups등의 결합모델¹⁾, 불연속부선단의 수직응력분포에 기본을 둔 Whitney등의 파손모델^{2,3)} 및 손상영역을 인장하중방향에 대한 투영 길이로서 2개의 인접하는 균열면에 작용하는 결합응력과 균열개구의 관계를 기초로 한 Aronsson등의 손상영역모델^{4,5)}등에 의하여 행하여지고 있다. 이들중 Whitney등^{2,3)}은 불연속부 선단으로 부터의 임의의 거리, 즉 특성길이에서의 수직응력이 평활재의 파괴강도와 같아질 때 파손이 일어난다고 가정한 점응력조건(point stress criterion)을 제안하였으며, 파손조건을 결정짓는 특성길이가 재료상수라는 가정하에서 노치강도를 평가하였다. 이 모델은 비교적 적용이 용이하다는 이점때문에 설계자들에 의하여 널리 사용되어져 왔다. 그러나 그후 많은 연구를 통하여 특성길이는 재료의 구성, 노치 민감도에 미치는 온도, 적층구조, 시험편형상등의 영향을 받음이 보고되고 있다^{6,7)}. 이의 예로서 Kim등⁸⁾은 원공을 가진 polymer기 복합재료의 노치강도 평가에 있어서 특성길이를 시험편 형상의 함수로서 가정하여 Whitney등의 모델을 수정한 점응력조건식을 제안하였으며, 이의 결과는 실험값과 잘 일치함을 보고하였다.

한편 불균질 이방성을 나타내는 복합재료에 있어서 파괴인성에 상당하는 응력확대계수 K_t 의 결정 및 실험결과의 해석과정은 아직까지 확립되고

있지 못하다. 따라서 대부분의 연구자들은 컴플라이언스를 기초로 한 에너지해방율 G_c 로 부터 K_t 를 산출하는 방법(컴플라이언스법) 또는 등방성재에 사용되어지는 K_t 의 결정법(등방성법)에 의하여 K_t 를 평가하고 있다.

이에 대하여 Barnby등⁹⁾과 Thorat등¹⁰⁾은 컴플라이언스법과 등방성법에 의하여 산출한 K_t 사이에는 약 30~50% 정도의 오차가 나타남을 보였으나, Guess등¹¹⁾과 Sun등¹²⁾은 두 방법의 결과가 서로 잘 일치함을 보고한 바 있다. 또한 K_t 에 영향을 미치는 인자로서는 균열길이, 판두께, 판폭^{13,14)}, 시험편형상 및 성형조건¹⁵⁾등이 알려져 있다.

Guess등¹¹⁾과 Owen등¹⁴⁾은 각각 carbon/carbon 적층재와 E-glass fabric/polyester재에 대하여 K_t 는 균열길이에 무관함을 보인 반면, Thorat등¹⁰⁾과 Peters¹⁶⁾는 이와 상반된 결과를 보고하였다. 판두께의 영향에 대하여 Garg¹³⁾와 Gaggar등¹⁷⁾는 glass/epoxy와 graphite/epoxy재에 있어서 그 영향이 없음을 보였으나, Thorat등¹⁰⁾과 Harris등¹⁸⁾은 두께의 영향이 존재함을 보고하였다.

또한 Garg¹³⁾와 Harris등¹⁸⁾은 K_t 에 대한 시험편형상의 영향이 나타남을 지적하였다. 또한 Whitney등^{2,3)}은 준등방성 glass/epoxy와 graphite/epoxy적층재에 대하여 중앙균열선단의 수직응력분포와 점응력조건을 기초로 하여 K_t 의 산출식을 제안하였다. 이식은 일정한 특성길이 d_0 를 가정하였으나, 위에서 언급한 바와같이 d_0 는 재료의 상수가 아님이 보고되고 있으므로 이의 적용은 불투명한 상태이다.

본 연구에서는 평직(plain woven) glass/epoxy 복합재료를 하중방향에 대하여 0°/90°로 채취하고, 균열길이 a , 판두께 B 및 하중방향에 대한 균열각 θ 가 다른 SEN(single-edge notched)시험편에 대한 단축인장시험을 수행하였다. 이로부터 노치강도의 저하경향을 검토하고, 특성길이가 균열길이의 관계로부터 기존의 파손모델을 수정하였다. 또한 파괴인성에 상당하는 응력확대계수 K_t 의 결정법과 이에 미치는 여러 인자들의 영향을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

사용한 재료는 평직(plain woven) glass/epoxy 복합재료($v_f \approx 60\%$)로서, 한층의 두께가 약 0.18~0.2mm인 플라이를 각각 5, 10 및 20매 적층하여 가압(온도 180°C~190°C, 압력 9.8MPa, 시간 2hr.)한 것으로, 이 재료의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 시험편은 하중의 부하방향에 대한 섬유배열방향이 0°/90°가 되도록 채취하였으며, Fig. 1과 같은 두께 B가 1, 2 및 4mm인 SEN(single-edge notched) 시험편을 사용하였다. 판폭(W=20mm)에 대한 균열길이(노치길이) a의 비 a/W는 0.2~0.6의 5종류, 그리고 하중방향에 대한 균열방향(이하 균열각 θ 라 함)은 90°와 45°로 가공하였다. 균열각이 45°인 시험편에서의 초기균열길이 a는 하중방향에 수직인 축으로의 투영길이로 하였다. 또한 초기균열은 두께가 3mm인 금속톱(metal saw)를 사용하여 가공한 후 균열선단을 더욱 예리하게 하기 위하여 선단의 2mm를 두께 0.2mm인 슬리팅 금속톱(slitting metal saw)으

Table 1. Mechanical properties

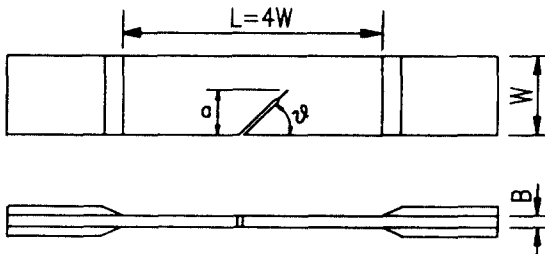
E_{XX} (GPa)	E_{YY} (GPa)	ν_{XY}	G_{XY} (GPa)
23.6	23.6	0.11	4.03

E_{XX} : longitudinal Young's modulus

E_{YY} : transverse Young's modulus

ν_{XY} : Poisson's ratio

G_{XY} : in-plane shear modulus



W=20mm, B=1,2,4mm
 $a/W=0.2\sim0.6$, $\theta=90^\circ, 45^\circ$

Fig. 1 Configuration of test specimen.

로 가공하였다. 단축인장시험은 각 a/W에 대하여 3개의 시험편을 준비하고, 1mm/min의 일정변위 속도로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노치강도 평가

균열길이에 따른 노치강도의 저하경향을 검토하기 위하여, 평활재의 파괴강도 σ_0 에 대한 노치재의 파괴강도(이하 노치강도라 함) σ_N 의 비, 즉 인장강도 감소계수(tensile strength reduction factor) σ_N/σ_0 를 정의하고 이를 판폭에 대한 균열길이의 비 a/W에 대하여 나타낸 것이 Fig. 2(a, b)이다. 그림에서 보는 바와 같이, σ_N/σ_0 은 모든 판 두께에 대하여 균열길이 a가 증가함에 따라 급격히 저하하지만, 균열각 θ 의 영향은 graphite/epoxy 적층복합재료에 대한 Brinson등¹⁹⁾의 연구결과와 같이 거의 나타나지 않는다. 따라서 본 재료의 노치강도의 변화는 균열길이에 의하여 가장 큰 영향을 받는다고 할 수 있다.

한편 Fig. 3(a, b)는 정적 균열성장거동을 나타낸 대표적인 사진으로서, 두께 B=4mm이고 a/W=0.4의 것이다. 모든 시험편은 Fig. 3과 같이 최종파단에 이르기까지 부하하중방향에 수직인 균열성장을 나타내므로, 시험편의 노치강도예측은 중앙균열(center crack)선단의 수직응력분포를 기초로 한 Whitney등의 파손모델에 의하여 가능함을 알 수 있으며, 이는 glass-cloth/epoxy적층재에 대한 Agrawal등²⁰⁾의 연구결과에서도 확인된바 있다.

한편 실험에 의하여 얻은 유한판의 노치강도를 무한판에 대한 파손조건에 적용시키기 위해서는 유한판 보정계수(FWC factor) Y의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 이방성효과를 고려한 Tan의 제안식(1)²¹⁾을 이용하였다.

$$Y = \frac{1}{\sqrt{1-(a/W)^2}} \dots\dots\dots (1)$$

Table 2는 노치강도의 실험결과(σ_N/σ_0)_{EXP.}와 점응력조건(point stress criterion, PSC)^{2,3)} 식(2)에 의한 예측값 (σ_N/σ_0)_{PSC}을 비교한 두께 B=4mm의

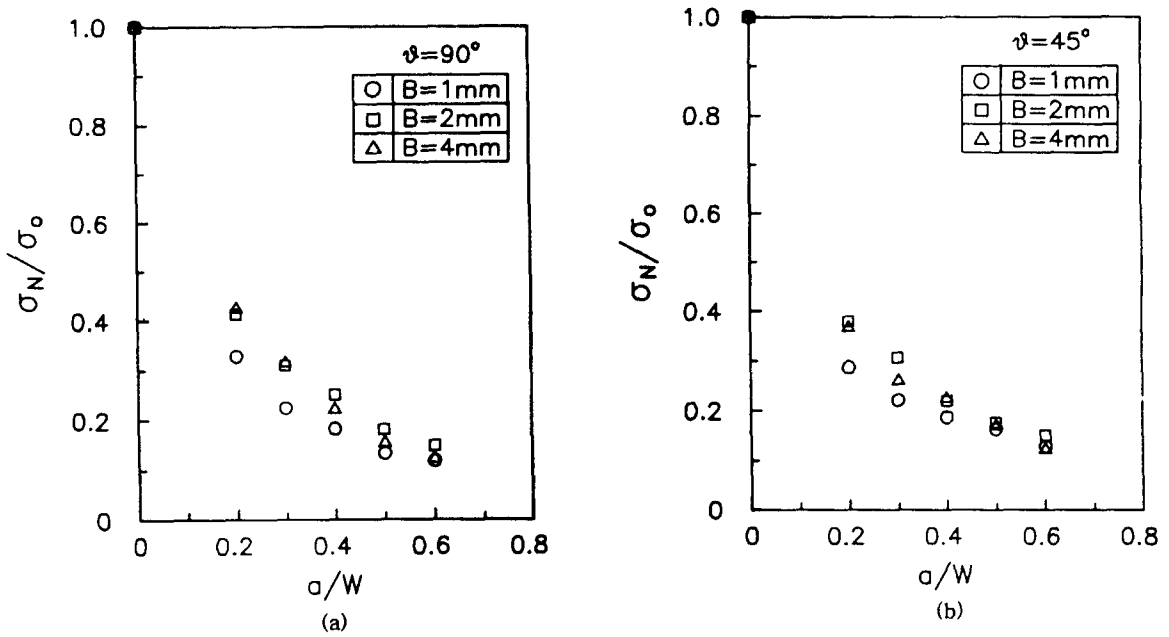


Fig. 2 (a, b) Reduction of notched strength according to crack length.

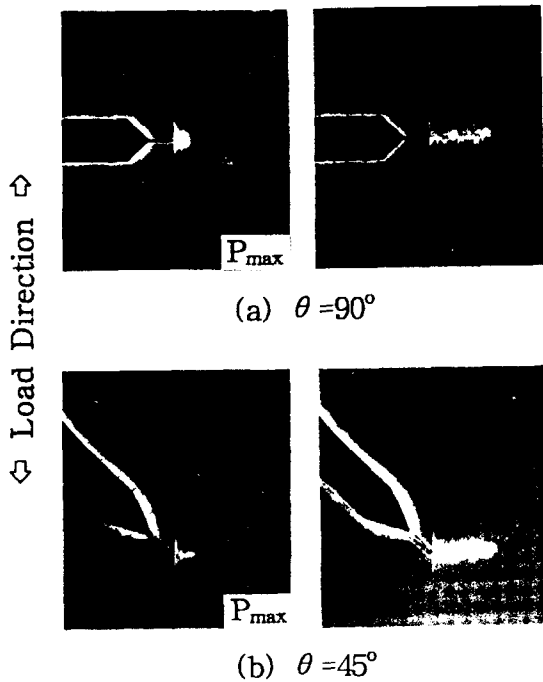


Fig. 3 (a, b) Photographs of the crack growth behavior at the machined crack tip.

Table 2. Comparisons of the experimental results* and the predictions using the PSC. (B=4mm)

θ	a/W	d_0	$(\sigma_N/\sigma_0)_{EXP}$	$(\sigma_N/\sigma_0)_{PSC}$	$\Delta(\%)$
90°	0.2	0.44	0.424	0.344	18.9
	0.3	0.37	0.319	0.278	12.9
	0.4	0.25	0.225	0.233	- 3.6
	0.5	0.16	0.153	0.197	-28.8
	0.6	0.14	0.122	0.167	-36.9
45°	0.2	0.32	0.370	0.317	14.3
	0.3	0.25	0.265	0.256	3.4
	0.4	0.26	0.229	0.214	6.6
	0.5	0.19	0.164	0.182	-11.0
	0.6	0.12	0.112	0.154	-37.5

d_0 : characteristic length(mm)

σ_N/σ_0 : $=Y(\sigma_N^*/\sigma_0)$

Y : finite-width correction factor, eq(1)

$(\sigma_N/\sigma_0)_{PSC}$: predictions of the point stress criterion using $(d_0)_{ave}$.

$$\Delta(\%) = \frac{(\sigma_N/\sigma_0)_{EXP} - (\sigma_N/\sigma_0)_{PSC}}{(\sigma_N/\sigma_0)_{EXP}} \times 100$$

* : average values of three specimens

예이다.

$$\left(\frac{\sigma_N}{\sigma_o}\right)_{PSC} = Y\left(\frac{\sigma_N^o}{\sigma_o}\right) = Y\sqrt{1-A_1^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$A_1 = a/(a+d_o)$$

여기서 a는 균열길이이며, d_o는 특성길이이다.

이 표에서 특성길이는 모든 시험편에 대하여 균열길이 a가 감소할수록 증가하는 경향을 나타내며, 평균특성길이 (d_o)_{ave}.에 의하여 산출된 노치강도는 실험값에 비하여 약 4~40%정도 과대 또는 과소평가됨을 알 수 있다. 따라서 일정한 특성길이를 가정한 Whitney등의 모델 식(2)를 본 재료의 노치강도에측에 사용하는 것은 부적당하다.

Fig. 4는 Table 2에서 나타낸 특성길이 d_o와 a/W의 관계를 나타낸 대표적인 예로서, 특성길이 d_o는 a/W의 함수로 식(3)과 같이 표현되어진다.

$$d_o = \frac{1}{S} \left(\frac{a}{W}\right)^m \dots\dots\dots (3)$$

여기서 S는 균열길이 a 및 판폭 W에 대한 노치민감도를 나타내며, m은 특성길이의 변화를 나타내는 계수를 의미한다.

이상에서 검토한 바와 같이, 특성길이는 재료의

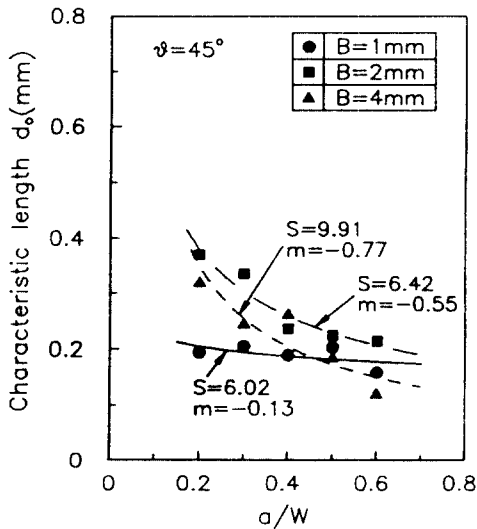


Fig. 4 The relationship between characteristic length and crack length.

상수가 아니므로 식(3)에 의하여 식(2)의 점응력 조건을 수정하면 다음과 같이 수정점응력조건 식(4)를 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\sigma_N}{\sigma_o}\right)_{PSC} = Y\left(\frac{\sigma_N^o}{\sigma_o}\right) = Y\sqrt{1-A_2^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$A_2 = 1/[1+a^{m-1}W^{-m}S^{-1}]$$

Fig. 5 (a, b)는 노치강도의 실험결과와 점응력

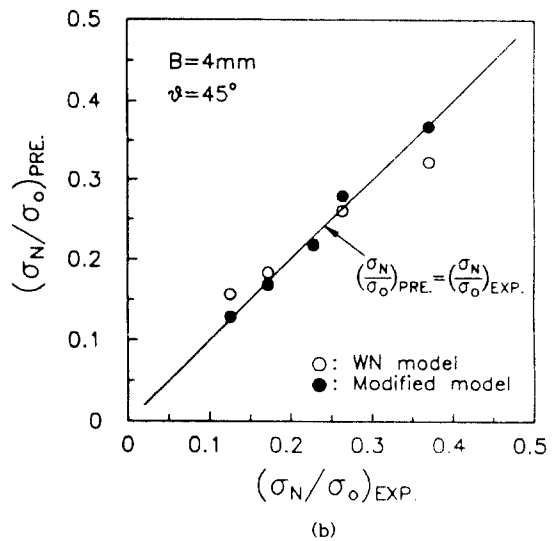
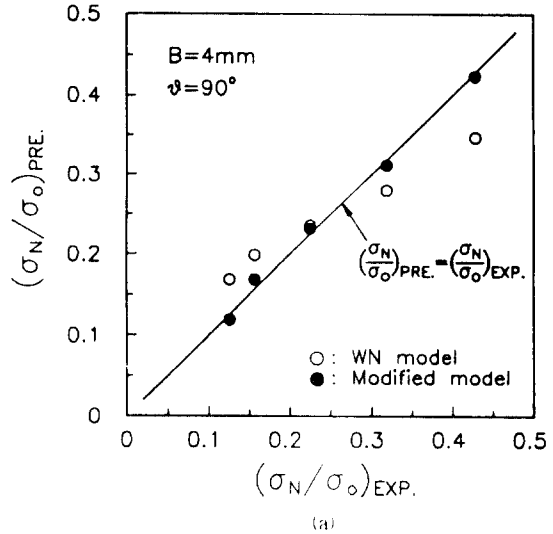


Fig. 5 (a, b) Comparisons of the prediction using the P.S.C. and the modified P.S.C. with the experimental result.

조건 식(2) 및 수정점응력조건 식(4)의 해석결과를 비교한 예이다. 이 그림에서 실선은 실험값과 예측값이 일치함을 나타낸 것으로서, 식(4)에 의한 예측결과는 식(2)의 것보다 실험결과에 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 수정점응력조건은 균열길이와 판폭에 따라 서로 다른 노치강도를 나타내는 섬유강화복합재료의 노치강도 예측에 있어서 유용하다고 할 수 있다.

3.2 불안정 파괴조건 K_{max} 의 결정

Fig. 6은 $B=4mm$, $\theta=90^\circ$ 의 시험편의 대표적인 하중-변위(P-COD)곡선을 나타낸 것이다. 본 재료는 최대하중 P_{max} 의 약 54~65% 정도에서 부터 비선형거동을 나타내며, P_{max} 이후에는 하중의 저하가 계속되면서 불안정 파괴가 일어남을 보인다. 일반적으로 복합재료의 균열발생하중으로는 (i) 미시적 균열발생에 주목한 비선형 거동의 개시하중²²⁾ 또는 팝-인(pop-in)하중¹³⁾ (ii) ASTM E399에 기본을 둔 거시적 균열성장에 주목한 P_Q 하중^{10, 13)} (iii) 거시적 불안정 파괴에 주목하는 최대하중 P_{max} ^{11, 12, 16, 18, 23)} 등이 적용되고 있다.

그러나 본 연구에 사용된 재료는 Fig. 3 (a, b)

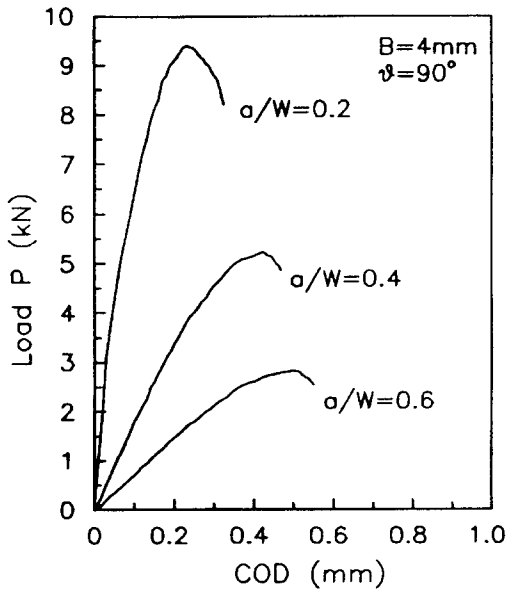


Fig. 6 Typical P-COD curves.

에서와 같이 가공균열선단의 손상발생은 최대하중 P_{max} 의 약 95%에서 나타나지만, 균열의 거시적 불안정 성장은 P_{max} 에서 개시되어 가공균열(machined crack)과 동일한 평면상(Mode I)으로 진행된 후 최종과단되어 진다. 따라서 본 연구에 있어서 불안정 파괴조건은 거시적 불안정 균열성장의 개시하중인 P_{max} 에 의한 최대응력확대계수 K_{max} 로 평가하였다.

서론에서 언급한 바와 같이, 복합재료의 K평가법은 시험편의 판폭에 대한 초기균열길이의 비 즉 a/W 에 따른 컴플라이언스의 변화를 기초로 한 에너지해방율 G 로 부터 K 를 산출하는 방법(the compliance method), 등방성체에 대하여 사용되는 등방성법(the isotropic method) 및 Whitney등의 점응력조건을 사용한 WN 모델(the WN model)등에 의하여 행하여지고 있다.

3.2.1 컴플라이언스법

거시적인 균열진전이 Model I으로 나타난다면, 응력확대계수 K 와 에너지해방율 G 사이에는 식(5)의 관계가 성립된다^{24, 25)}.

$$K_{max}^2 = (1/C) G_{max} \dots\dots\dots (5)$$

$$C = \sqrt{\frac{A_{11}A_{22}}{2}} \sqrt{\left(\frac{A_{22}}{A_{11}}\right)^{1.2} + \frac{2A_{12} + A_{66}}{2A_{11}}}$$

여기서 A_{ij} 는 이방성 재료의 강성텐서이며, G_{max} 는 에너지해방율로서 두께가 B 이고 폭이 W 인 시험편에서 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$G_{max} = \frac{1}{2} \frac{P_{max}}{BW} \frac{dC}{d(a/W)} \dots\dots\dots (6)$$

식(6)의 컴플라이언스 C 는 정적인장시험에 의한 하중-변위곡선에서 구하였다. 또한 Fig. 7은 각 시험편의 a/W 에 대한 컴플라이언스의 변화를 나타낸 것으로 식(7)로 나타내어진다.

$$C = A_0 + A_1(a/W) + A_2(a/W)^2 + A_3(a/W)^3 \dots (7)$$

여기서 상수 A_0, A_1, A_2 및 A_3 는 Table 3과 같다.

3.2.2 등방성법

등방성 탄성체에 있어서, SEN(single-edge

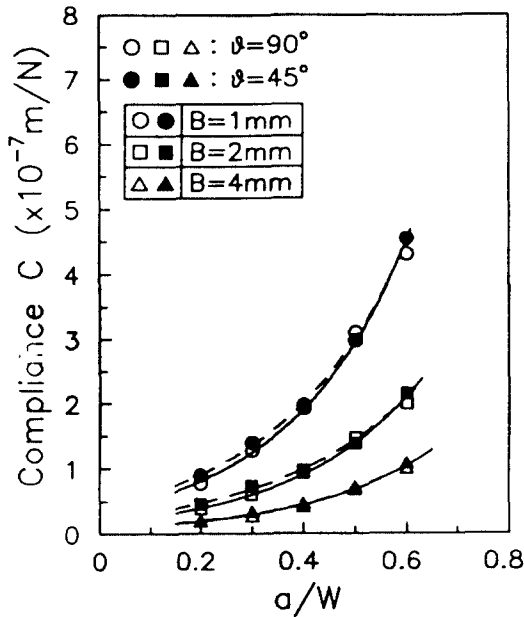


Fig. 7 Compliance of specimens as a function of a/W.

Table 3. Coefficients of Eq.(7)

B(mm)	θ	A ₀ (×10 ⁻⁹)	A ₁ (×10 ⁻⁹)	A ₂ (×10 ⁻⁹)	A ₃ (×10 ⁻⁹)
1	90°	-6.0152	587.35	-1316.60	2685.10
	45°	8.6190	515.00	-989.11	2255.50
2	90°	0.0237	258.76	-547.39	1165.50
	45°	10.5330	213.98	-336.58	882.83
4	90°	-0.4038	129.59	-279.13	586.42
	45°	0.8584	123.97	-252.16	552.08

notched) 시험편에 대한 Mode I에서의 응력확대 계수 $K^{26,27}$ 는 식(8)과 같이 표현된다.

$$K_I = \sigma_o \sqrt{\pi a} f(a/W) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $f(a/W)$ 는 형상보정계수로서 식(9) 및 (10)과 같다.

$$\theta = 90^\circ : f(a/W) = 1.12 - 0.231(a/W) + 10.55(a/W)^2 - 21.72(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \dots\dots\dots (9)$$

$$\theta = 45^\circ : f(a/W) = -1.13 - 22.592(a/W) - 95.38(a/W)^2 + 175.83(a/W)^3 - 112.5(a/W)^4 \dots\dots\dots (10)$$

3.2.3 WN 모델

Whitney와 Nuismer는 무한폭 이방성 평판에 단축인장하중이 작용할 때 길이 2a인 중앙균열선단에서의 응력분포와 식(2)로부터 응력확대계수 K를 식(11)로 제안하였다^{2,3}.

$$K = \sigma_o \sqrt{\pi a(1-A_1^2)} \dots\dots\dots (11)$$

$$A_1 = a/(a+d_o)$$

식(11)은 평활재의 파괴강도 σ_o , 균열길이 a 및 특성길이 d_o 의 함수이며, d_o 는 재료상수로 가정하였다. 그러나 본 재료의 경우, Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 d_o 는 균열길이와 판폭의 함수로 식(3)과 같이 나타내어 지므로, 이를 고려하면 식(11)은 아래와 같이 수정된다.

$$K = \sigma_o \sqrt{\pi a(1-A_2^2)} \dots\dots\dots (12)$$

$$A_2 = 1/[1+a^{m-1}W^{-m}S^{-1}]$$

3.2.4 K 평가법의 비교

Fig. 8(a, b)는 컴플라이언스법 식(5), 등방성법 식(8) 및 수정 WN모델 식(12)에 의하여 산출된 최대응력확대계수 K_{max} 와 a/W의 관계로서, B=2 mm의 것이다. 이 그림에서 식(12)의 K_{max} 값은 균열길이가 증가함에 따라 균열각의 변화에 관계없이 직선적으로 상승함을 나타낸다. 따라서 수정 WN모델 식(12)는 본 재료의 K 평가법으로 부적당하다고 할 수 있다. 또한 등방성법 식(8)로 산출된 K_{max} 는 $\theta=90^\circ$ 의 경우에 초기균열길이 a가 커짐에 따라 증가하지만, $\theta=45^\circ$ 에서는 식(5)의 것보다 약 50% 정도 낮은 일정한 값을 나타내고 있다. 이러한 현상의 주요한 원인은 재료 및 시험편 형상에 따라 나타나는 이방성의 차이를 식(8)의 형상보정계수 $f(a/W)$ 가 고려하지 못하기 때문으로 지적되고 있다^{23,28}. 따라서 식(8)을 응용하여 K를 평가하기 위해서는 $f(a/W)$ 대신에 적층복합재료에서 나타나는 이방성을 고려한 새로운 형상보정계수 $f^*(a/W)$ 의 산출이 반드시 필요하다. 이들 균열각을 가진 시험편 각각에 대한 f^*

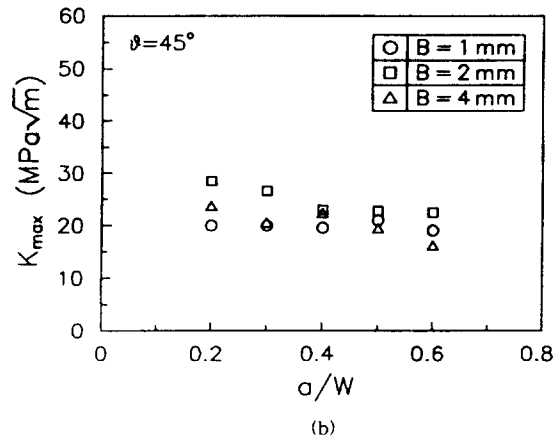
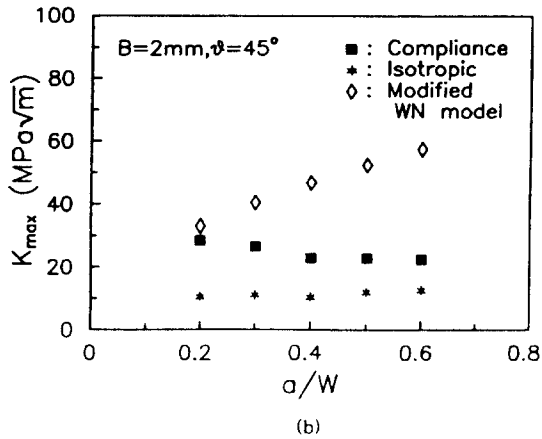
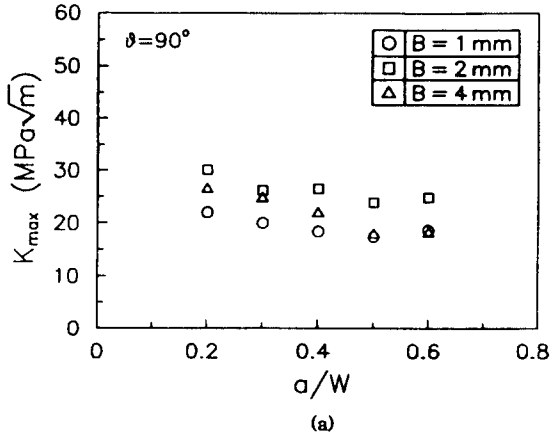
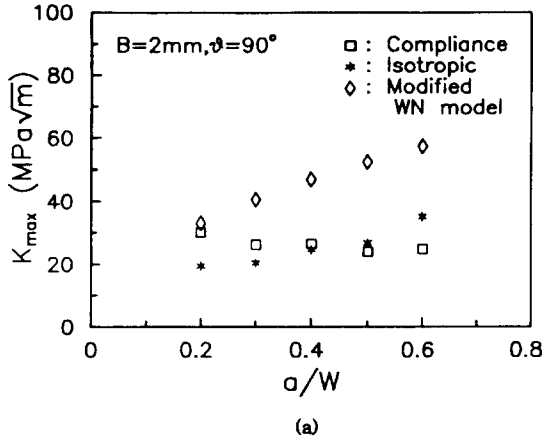


Fig. 8 (a, b) Comparisons of K_{max} evaluated by the compliance method, the isotropic method and the modified WN model.

Fig. 9 (a, b) The correlation between K_{max} and crack length.

(a/W)는 식(5)와 (8)로부터 a/W 의 함수로서 아래와 같이 표현되어진다.

$$\theta = 90^\circ : f^*(a/W) = 1.406 + 9.557(a/W) - 43.31(a/W)^2 + 82.83(a/W)^3 - 50.56(a/W)^4 \dots\dots\dots (13)$$

$$\theta = 45^\circ : f^*(a/W) = 2.099 + 3.421(a/W) - 23.88(a/W)^2 + 60.20(a/W)^3 - 45.70(a/W)^4 \dots\dots\dots (14)$$

Fig. 9 (a, b)는 컴플라이언스법에 의하여 구한 K_{max} 와 a/W 의 관계를 시험편 두께 및 균열각의

변화에 대하여 나타낸 것이다. $0.2 \leq a/W \leq 0.6$ 의 조건에서 실시한 CT(compact tension)시험편의 결과²⁵⁾와 마찬가지로 K_{max} 는 균열길이의 변화에 관계없이 거의 일정함을 보이고 있으며, 이러한 결과는 시험편 두께 및 균열각의 크기에 무관함을 알 수 있다.

또한 Fig. 10은 SEN($B=2mm$), 원공을 가진 시험편($B=2mm$) 및 CT시험편($B=6mm$)의 K_{max} 에 대한 균열길이 및 원공크기의 영향을 검토한 것이다. 이 그림에서 원공을 가진 시험편의 K 는 준등방성 재료에 대해서도 적용될 수 있는 Sih의 K 해석을 이용한 결과^{24, 29)}이며, CT시험편의 경우

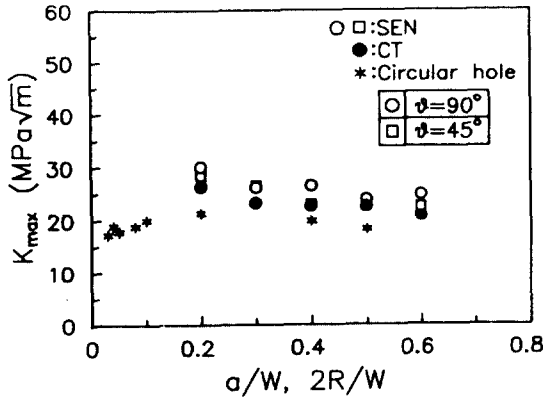


Fig. 10 The correlation between K_{max} and specimen geometry.

는 ASTM E399의 K해석에 복합재료의 적층구조에 따른 탄성특성의 변화를 고려한 새로운 형상보정계수 $f^*(a/W)$ 를 산출하여 K를 구한 값이다²⁵⁾. $0.2 \leq a/W \leq 0.6$ 의 범위 안에서 원공시험편에 대하여 얻어진 K_{max} 값은 SEN 및 CT시험편의 값보다 약간 과소평가되는 경향을 보이지만 본 재료의 불안정 파괴조건인 K_{max} 는 불연속부 형상의 차이에 관계없이 $K_{max} \approx 25 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 거의 일정한 값을 나타낸다고 할 수 있다.

4. 결 론

균열을 가진 평직(plain woven) glass/epoxy 복합재료에 대하여 노치강도에 미치는 판폭에 대한 균열길이의 비 a/W 의 영향을 고려한 새로운 파손조건식을 제안하였으며, 파괴인성에 상당하는 K_{max} 의 결정법과 이 값에 미치는 균열길이 a , 균열각 θ 및 시험편 두께 B 의 영향을 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 점응력조건(point stress criterion)에서의 특성길이 d_o 와 균열길이 a 의 관계로부터 수정점응력조건을 제안하였으며, 이의 예측값은 노치강도의 실험값과 잘 일치한다.

$$d_o = \frac{1}{S} \left(\frac{a}{W} \right)^m$$

여기서 S 는 노치감도계수, m 은 특성길이의 변화를 나타내는 계수이다.

- 2) 불안정 파괴조건은 최대응력확대계수 K_{max} 로 평가하였다. K_{max} 의 결정법인 컴플라이언스법, 등방성법 및 WN 모델에 의하여 산출된 결과들은 상당한 차이를 보였으며, 이는 재료 및 시험편형상에 따른 이방성의 차이로 설명될 수 있다. 이를 고려하여 등방성법에 대하여 사용되는 새로운 형상보정계수 $f^*(a/W)$ 를 얻었다.
- 3) 컴플라이언스법을 사용하여 산출한 최대응력확대계수 K_{max} 는 균열길이 a , 균열각 θ 및 시험편 두께 B 에 무관하게 일정한 값을 나타낸다. 또한 K_{max} 에 대한 불연속부 형상의 영향도 보이지 않는다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원(과제번호 90-07-00-08)으로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

참 고 문 헌

- 1) Waddoups, M. E. and Eisemann, J. R., "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials", Journal of Composite Materials, Vol. 5, pp. 446~455, 1971.
- 2) Whitney, J. M. and Nuismer, R. J., "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", Journal of Composite Materials, Vol. 8, pp. 253~265, 1974.
- 3) Nuismer, R. J. and Whitney, J. M., "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentration", ASTM STP 593, pp. 117~142, 1975.
- 4) Aronsson, C-G. and Backlund, J., "Tensile Fracture of Laminates with Cracks", Journal of Composite Materials, Vol. 20, pp. 287~307, 1986.
- 5) Eriksson, I. and Aronsson, C-G., "Strength of

- Tensile Loaded Graphite/Epoxy Laminates Containing Cracks, Open and Filled Holes”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, pp. 456~482, 1990.
- 6) Karlak, R. F., “Hole Effects in a Related Series of Symmetrical Laminates”, *Proc. 4th Joint ASM—Metallurgical Society of AIME Symposium on Failure Modes in Composites*, Chicago 1977, the Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Warrendale, Pennsylvania, pp. 105~117, 1979.
 - 7) Pipes, R. B., Wetherhold, R. C. and Gillespie Jr., J. W., “Notched Strength of Composite Materials”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 13, pp. 148~160, 1979.
 - 8) 김정규, 김도식, “Plastic기 복합재료의 파손강도 및 파괴인성에 미치는 원공크기의 영향”, *한국재료학회지*, 제3권, 제2호, pp. 197~204, 1993.
 - 9) Barnby, J. T. and Spencer, B., “Crack Propagation and Compliance Calibration of Fibre Reinforced Polymers”, *Journal of Materials Science*, Vol. 11, pp. 78~82, 1976.
 - 10) Thorat, H. T. and Lakkad, S. C., “Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Carbon Hybrid Composites”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 2~14, 1983.
 - 11) Guess, T. R. and Hoover, W. R., “Fracture Toughness of Carbon—Carbon Composites”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, pp. 2~20, 1973.
 - 12) Sun, C. T. and Prewo, K. M., “The Fracture Toughness of Boron Aluminum Composites”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, pp. 164~175, 1977.
 - 13) Garg, A. C., “The Fracture Mechanics of Some Graphite Fiber—Reinforced Epoxy Laminates, Part I : Quasi—Isotropic Laminates”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, No. 2, pp. 141~148, 1986.
 - 14) Owen, M. J. and Bishop, P. T., “Critical Stress Intensity Factors Applied to Glass Reinforced Polyester Resin”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, pp. 146~158, 1973.
 - 15) Slepetz, J. M. and Carlson, L., “Fracture of Composite Compact Tension Specimens”, *ASTM STP 593*, pp. 143~162, 1975.
 - 16) Peters, P. W. M., “On the Increasing Fracture Toughness at Increasing Notch Length of 0/90 and 0/±45/0 Graphite/Epoxy Laminates”, *Composites*, Vol. 14, No. 4, pp. 365~369, 1983.
 - 17) Gaggar, S. and Broutman, L. J., “Fracture Toughness of Random Glass Fiber Epoxy Composites : An Experimental Investigation”, *ASTM STP 631*, pp. 310~330, 1977.
 - 18) Harris, C. E. and Morris, D. H., “Effect of Laminate Thickness and Specimen Configuration on the Fracture of Laminated Composites”, *ASTM STP 893*, pp. 177~195, 1986.
 - 19) Brinson, H. F., and Yeow, Y. T., “An Experimental Study of the Fracture Behavior of Laminated Graphite/Epoxy Composites”, *ASTM STP 617*, pp. 18~39, 1977.
 - 20) Agrawal, D. C., Agarwal, B. D. and Banerji, K., “Fracture Behavior of Glass-Cloth Reinforced Composites”, *Polymer Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 29~33, 1985.
 - 21) Tan, S. C., “Finite—Width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 1080~1097, 1988.
 - 22) Kawada, H., Otsuka, T., Kajitani, T. and Hayashi, I., “Effects of Thickness and Specimen Size on Fracture Toughness of Glass/Epoxy Laminates”, *Japan Society of Materials Science, Japan*, Vol. 34, No. 377, pp. 164~170, 1985.
 - 23) Mandell, J. F., McGarry, F. J., Wang, S. S. and Im, J., “Stress Intensity Factors for Anisotropic Fracture Test Specimens of Several Geometries”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, pp. 106~116, 1974.
 - 24) Paris, P. C. and Sih, G. C., “Stress Analysis of Cracks”, *ASTM STP 381*, pp. 30~80, 1964.

- 25) 김정규, 김도식, "Glass/Epoxy 복합재료의 파괴 조건 및 균열진전거동", 대한기계학회논문집, 제 16권, 제9호, pp. 1681~1690, 1992.
- 26) Brown, W. F., Jr. and Srawley, J. E., "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials", ASTM STP 410, p. 12, 1966.
- 27) Bowie, O. L., "Solutions of Plane Crack Problems by Mapping Technique" edited by Sih, G. C., Noordhoff, Vol. 1, pp. 1~55, 1973.
- 28) Awerbuch, J. and Hahn, H. T., "K-Calibration of Unidirectional Metal Matrix Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 12, pp. 222~237, 1978.
- 29) 김정규, 김도식, "원공을 가진 Glass/Epoxy 복합 재료의 노치강도 및 파괴조건", 대한기계학회논문집, 제16권, 제7호, pp. 1285~1293, 1992.