

Plastic기 복합재료의 파손강도 및 파괴인성에 미치는 원공크기의 영향

김 정 규 · 김 도 식

한양대학교 공과대학 기계설계학과

The Effect of Hole Size on the Failure Strength and Fracture Toughness in Polymer Matrix Composite Plates

Jung Kyu Kim and Do Sig Kim

Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang University

초 록 Plastic기 복합재료의 파괴거동에 미치는 원공크기와 판폭의 영향을 검토하기 위하여 단축인장시험을 행하였다. 점응력파손조건에서의 특성길이 d_0 는 원공크기 및 판폭에 의존하며, 이를 기초로 파손강도를 예측하기 위한 수정 점응력 파손조건식을 제안하였다. 이 파손조건에 의한 예측값은 실험값과 잘 일치하였다. 파손 강도는 원공선단의 손상비의 증가에 따라 증가하며, 이는 손상영역의 형성으로 인한 응력완화현상으로 설명되어 진다. 또한 불안정 파괴시의 최대균열길이 a_c 는 특성길이 d_0 의 약 2배의 값을 나타낸다. 파괴인성에 대응하는 한계에너지해방율 G_c 는 동일한 판폭에 대하여 원공크기에 관계없이 거의 일정하다. 한편 섬유 종류, 체적을 및 판폭에 따른 G_c 의 변화는 원공선단의 손상영역의 증가에 의한 응력완화가 주요한 원인이라고 할 수 있다.

Abstract The effects of the hole size and the specimen width on the fracture behavior of several fabric composite plates are experimentally investigated in tension. Tests are performed on plain woven glass/epoxy, plain woven carbon/epoxy and satin woven glass/polyester specimens with a circular hole. It is shown in this paper that the characteristic length according to the point stress criterion depends on the hole size and the specimen width. An excellent agreement is found between the experimental results and the analytical predictions of the modified failure criterion.

The notched strength increase with an increase in the damage ratio, which is explained by a stress relaxation due to the formation of damage zone. When the unstable fracture occurred, the critical crack length equivalent for the damage zone is about twice the characteristic length.

The critical energy release rate G_c is independent of hole size for the same specimen width. The variation of G_c according to the material system, fiber volume fraction and specimen width relates to the notch sensitivity factor. G_c increases with a decrease in the notch sensitivity factor, which can be explained by a stress relaxation due to the increase of damage zone.

1. 서 론

원공등의 불연속부를 가진 복합재료의 파손 강도평가는 응력집중계수만으로는 불충분하다. Waddoups등의 결함모델¹⁾이나 Whitney등의 점응력(point stress) 및 평균 응력(average stress)모델²⁾은 복합재료의 파손강도를 평가하기 위한 대표적인 예로서, 이들 파손조건은 원공선단에서의 최대균열길이 또는 특성길이(characteristic length)가 일정한 조

건하에서 평가되고 있다. 그러나 많은 연구결과³⁻⁵⁾에 의하면 이 값은 반드시 일정하지 않음이 보고되고 있으며, 이의 예로서 Pipes⁴⁾등은 3-parameter모델을 제안하였다. 이 모델은 특성길이를 원공크기, 기준반경 및 노치감도 계수의 함수로서 나타낸 것으로 이에 의한 파손강도의 예측값은 실험값과 잘 일치함을 보여주었다. 그러나 이 모델에 있어서 특성길이의 물리적인 의미가 명확하지 않으므로 저자⁶⁾들은 시험편형상에 함수로서 나타낸 특성길이를

부터 점응력모델을 수정하여 이 모델의 유용성을 보고하였다.

본 연구는 원공 및 판폭의 크기가 다른 모재 플라스틱의 복합재료를 사용하여 수정한 점응력모델에 의하여 파손강도를 평가하고 또한 불안정파괴조건에서의 파괴인성에 미치는 원공크기의 효과를 검토한 것이다.

2. 수정 점응력파손이론

Whitney 등²⁾에 의한 점응력파손모델은 불연속부 선단으로 부터 일정한 거리만큼 떨어진 곳(특성길이) d_0 에서의 수직응력 σ_y 가 평활재의 파괴강도 σ_0 와 같을 때, 파손이 일어난다고 가정한 것으로 이의 관계식은 식(1)과 같다.

$$\sigma_y(R+d_0, 0) = \sigma_0 \tag{1}$$

여기에서 R은 원공의 반경이다.

점응력조건은 원공선단에서의 수직응력분포⁷⁾와 식(1)의 관계로 부터 식(2)와 같이 얻어진다.

$$\frac{\sigma_y^{\infty}}{\sigma_0} = \frac{2}{[2+A_1^2+3A_1^4-f(K_T^{\infty}, A_1)]} \tag{2}$$

여기에서 $A_1=R/(R+d_0)$ 이며, K_T^{∞} 는 이방성 무한판의 응력집중계수로서 식(3)과 같다.

$$K_T^{\infty} = 1 + \sqrt{2(\sqrt{E_{yy}/E_{xx}-\nu_{xy}}) + E_{yy}/E_{xx}} \tag{3}$$

식(2)에서 노치재의 파손강도의 저하는 R,

K_T^{∞} 및 d_0 의 함수임을 알 수 있으며, Whitney 등²⁾은 d_0 를 불연속부의 크기에 무관한 재료상수로 가정하여 파손강도를 평가하였다. 그러나 원공을 가진 복합재료의 파손강도평가에 관한 많은 연구결과³⁻⁵⁾에 의하면 d_0 는 반드시 일정하다고 할 수 없다. 저자들⁶⁾은 원공을 가진 Glass/Epoxy 평직복합재료의 파손강도평가에서 d_0 를 식(4)와 같이 시험편 형상의 함수로서 나타내었다.

$$d_0 = \frac{1}{k} \left[\frac{2R}{W} \right]^m \tag{4}$$

여기에서 k는 2R 및 시험편 폭 W에 대한 노치감도계수이며, m은 특성길이의 변화를 나타내는 계수이다.

이 식은 Pipes⁴⁾등이 제안한 식과 같은 형태이지만 기준반경 R_0 의 선택에 따라 노치감도계수가 서로 다른 값을 나타내는 문제점을 보완한 것이다.

따라서 저자들은 식(2)의 점응력파손이론을 식(5)와 같이 수정하여 노치재의 파손강도를 검토한 결과, 이 식은 파손강도예측에 있어서 유용함을 알았다.

$$\frac{\sigma_y^{\infty}}{\sigma_0} = \frac{2}{[2+A_2^2+3A_2^4-f(K_T^{\infty}, A_2)]} \tag{5}$$

여기서 $A_2=1/(1+2^m R^{m-1} W^{-m} k^{-1})$ 이다.

3. 실험방법

사용한 재료는 plain weave된 Glass/Epoxy

Table 1. Materials and Summary of Experimental Results in Static Tension.

Composite System	E_{xx}	E_{yy}	G_{xy}	ν_{xy}	Fiber, Resin, Manufacturer
Glass/Epoxy	23.6	23.6	4.0	0.11	Korea Betrotex 37 1/0, Kook Do Chemical YD011, Sung-Won Electric Co.
Glass/Polyester	21.6*	21.6*	3.9*	0.16*	Asahi Fiber Glass SLS212, Dainippon Ink & Chem. Polylite 8010,
	14.7**	14.7**	2.7*	0.17**	Asahi Fiber Glass Co.
Carbon/Epoxy	56.7	56.7	8.7	0.22	Torayca Cloth #6343, Toray Epoxy #2500, Toray Industries, Inc.

E_{XX} : Longitudinal Young's modulus(GPa)

E_{YY} : Transverse Young's modulus(GPa)

G_{XY} : In-Plane Shear modulus(GPa)

ν_{XY} : Poisson's ratio

* : $V_f \approx 60\%$, ** : $V_f \approx 44.5\%$

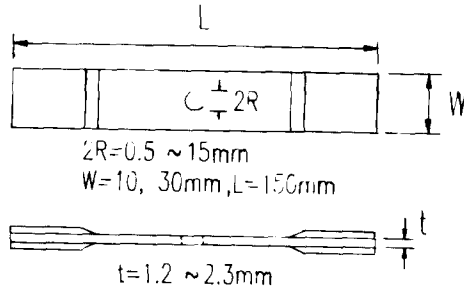


Fig. 1. Configuration of test specimen.

재($V_f \approx 62\%$) 및 Carbon(T300)/Epoxy재($V_f \approx 60\%$) 그리고 satin weave된 Glass/Polyester재($V_f \approx 60\%$ 및 44.5%)이다. 이들 재료의 재원 및 탄성특성은 Table 1과 같다. 이 표에서 섬유체적함유량 $V_f(\%)$ 는 현미경 사진으로

Table 2. Experimental results($W = 10\text{mm}$).

Materials	2R	σ_N	σ_N^∞	σ_N/σ_0
Glass/Epoxy ($\sigma_0 = 351.4\text{MPa}$, $V_f \approx 62\%$)	0.5	295.2	295.9	0.840
	1.0	247.0	249.8	0.703
	2.0	208.5	218.2	0.593
	4.0	148.5	181.7	0.423
	5.0	126.4	175.3	0.360
Glass/Polyester ($\sigma_0 = 308.7\text{MPa}$, $V_f \approx 60\%$)	0.5	279.1	279.8	0.904
	1.0	245.0	247.6	0.794
	2.0	208.6	218.3	0.676
	4.0	154.4	188.4	0.500
	5.0	120.1	166.0	0.389
Glass/Polyester ($\sigma_0 = 217.6\text{MPa}$, $V_f \approx 44.5\%$)	0.5	180.0	180.5	0.827
	1.0	163.4	165.1	0.751
	2.0	129.6	135.6	0.596
	4.0	89.8	109.6	0.413
	5.0	80.0	110.6	0.368
Carbon/Epoxy ($\sigma_0 = 596.2\text{MPa}$, $V_f \approx 60\%$)	0.5	567.4	568.9	0.952
	1.0	507.3	512.7	0.851
	2.0	435.2	455.4	0.730
	4.0	208.1	375.9	0.517
	5.0	262.2	362.4	0.440

2R : mm

$\sigma_N, \sigma_N^\infty$: MPa

$$\sigma_N^\infty = Y \sigma_N \quad (6)$$

여기에서 Y는 유한판 보정계수로서 이방성효과를 고려한 Tan의 제안식¹⁰⁾을 이용하였다.

선택한 영역의 면적에 대한 섬유면적의 값이다. 시험편은 섬유방향이 하중부하방향에 대하여 $0^\circ/90^\circ$ 로 채취하였다. 이의 형상은 Fig. 1과 같이 폭 $W (=10$ 및 $30\text{mm})$ 의 판의 중앙에 원공(직경 $2R = 0.5 \sim 15\text{mm}$)을 가공한 것이며, 시험은 동일한 $2R/W$ 에 대하여 각각 2개의 시험편을 준비하여 cross-head속도 0.5mm/min , 시험온도 $23 \pm 4^\circ\text{C}$ 에서 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 파손강도의 평가

Table 2는 시험편 폭 $W = 10\text{mm}$ 에 대한 원공직경 2R의 변화에 따른 실험결과를 정리한 것이다. 이 표에서 σ_N^∞ 는 식(6)의 관계로부터 유한판 노치재의 파손강도 σ_N 을 무한판에 대하여 환산한 것이다.

$$Y = \left\{ \frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{2R}{W} M \right)^6 \right. \\ \left. (K_T^\infty - 3) \left[1 - \left(\frac{2R}{W} M \right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

여기서

$$M^2 = \frac{\sqrt{1 - 8 \left[\frac{3(1 - 2R/W)}{2 + (1 - 2R/W)^3} - 1 \right]} - 1}{2(2R/W)^2}$$

이들 재료의 파손강도의 실험값을 식(5)에 의한 예측값과 비교하기 위하여 먼저 특성길이 d_0 에 미치는 시험편 형상의 영향을 검토하였다. Fig. 2는 $2R/W$ 에 대한 d_0 의 변화로서, $2R/W$ 가 커짐에 따라 d_0 는 증가함을 알 수 있다. 따라서 이들 관계를 식(4)로 나타낼 수 있으며, 각 재료의 노치감도계수 k 와 지수 m 은 Table 3과 같다. Fig. 3~5는 $W=10\text{mm}$ 의

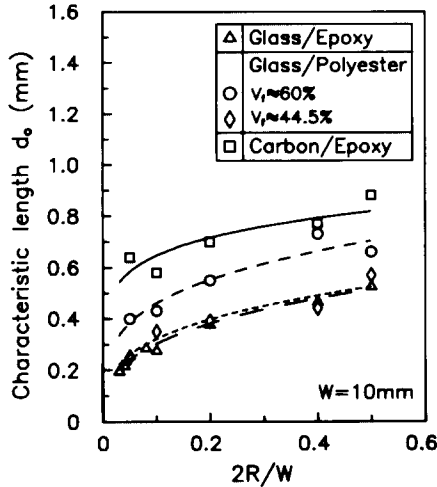


Fig. 2. Values of characteristic length according to $2R/W$.

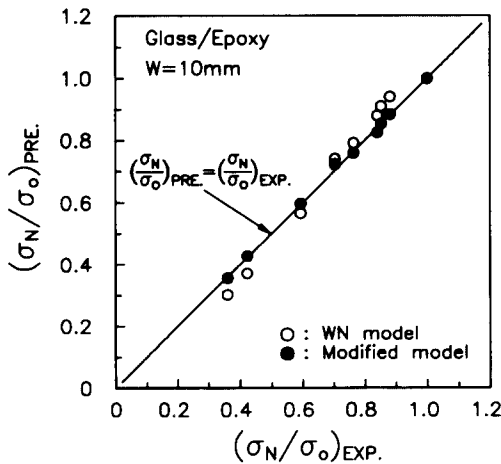


Fig. 3. Comparisons between the test result and the prediction of point stress criterion and modified point stress criterion in Glass/Epoxy specimen ($W=10\text{mm}$).

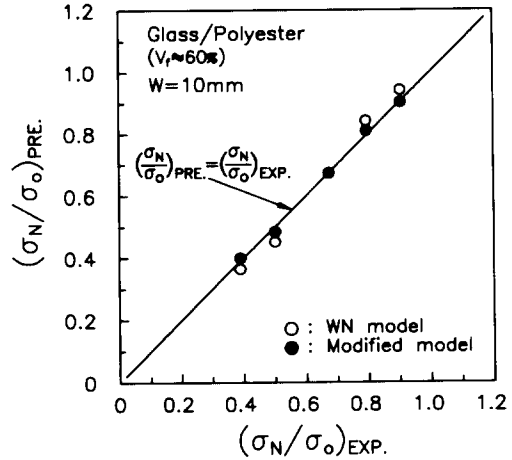


Fig. 4. Comparisons between the test result and the prediction of point stress criterion and modified point stress criterion in Glass/Polyester specimen ($V_f \approx 60\%$, $W=10\text{mm}$).

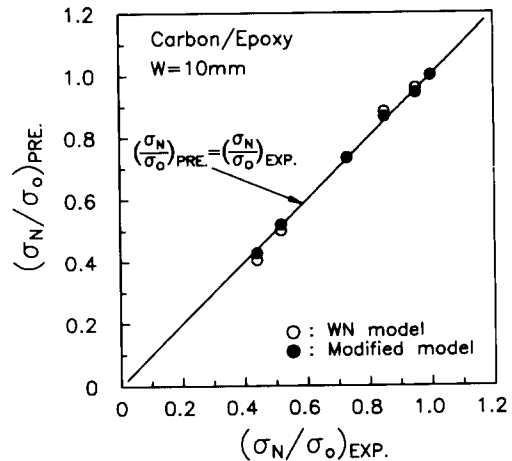


Fig. 5. Comparisons between the test result and the prediction of point stress criterion and modified point stress criterion in Carbon/Epoxy specimen ($W=10\text{mm}$).

Glass/Epoxy재, Glass/Polyester재 및 Carbon/Epoxy재의 파손강도의 실험값 $(\sigma_N/\sigma_0)_{EXP}$ 과 식(5)에 의한 예측값 $(\sigma_N/\sigma_0)_{PRE}$ 을 나타낸 대표적 예이다. 이들 재료에 있어서, $(d_0)_{ave}$ 에 의한 식(2)의 예측값 $(\sigma_N/\sigma_0)_{PRE}$ 은 실험값 $(\sigma_N/\sigma_0)_{EXP}$ 에 비하여 약 5~25% 과대 또는 과소평가되지만 수정파손모델식 (5)에 의한 예측값

Table 3. Values of k and m.

Materials	V _f (%)	W(mm)	k	m
Glass/Epoxy	62	10	1.54	0.33
Glass/Polyester	60.3	10	1.19	0.26
	60.3	30	0.80	0.34
	44.5	10	1.54	0.31
	44.5	30	1.18	0.29
Carbon/Epoxy	60	10	1.11	0.15

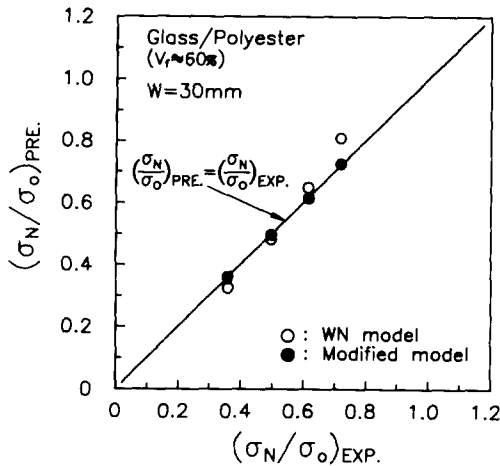


Fig. 6. Comparisons between the test result and the prediction of point stress criterion and modified point stress criterion in Glass/Polyester specimen ($V_f \approx 60\%$, $W = 30\text{mm}$).

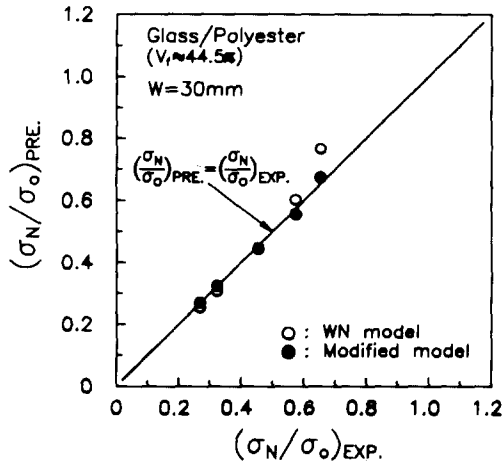


Fig. 7. Comparisons between the test result and the prediction of point stress criterion and modified point stress criterion in Glass/Polyester specimen ($V_f \approx 44.5\%$, $W = 30\text{mm}$).

은 실험값과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 6 및 7은 $W = 30\text{mm}$, 체적율이 60%와 44.5%의 Glass/Polyester satin woven 복합재료의 결과로서, Fig. 3~5의 결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 이상의 결과로부터 노치재의 파손강도는 식(5)의 수정 점응력과 손조건식으로 부터 충분히 예측될 수 있음을 알 수 있다.

4-2. 파손강도와 손상

Beaumont등⁹⁾은 노치선단에 형성된 손상의 직접관찰에 의하여 강도예측모델을 제안하고, 노치선단의 손상은 응력완화의 효과에 의하여 파괴강도가 상승함을 보고하였다. 또한 Aronsson등¹⁰⁾은 손상영역을 인장하중방향에 대한 투영길이로서 2개의 인접하는 균열면에 작용하는 결합응력과 균열개구와의 해석에 의하여 파손강도를 예측하고 있다. 이러한 관점에서 불연속부선단의 손상거동은 파손강도에 현저한 영향을 미친다고 생각된다.

Fig. 8은 투명재인 Glass/Polyester재의 원

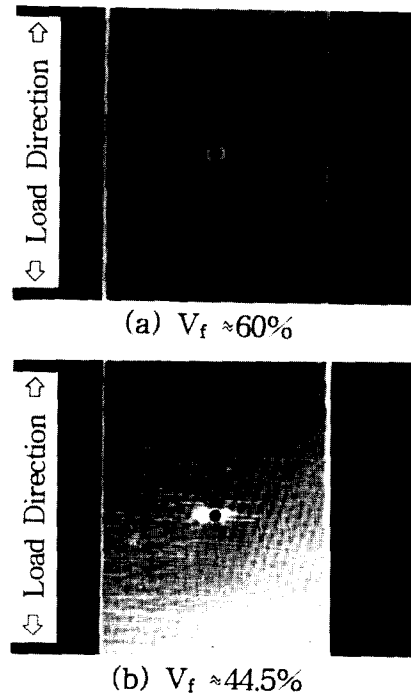
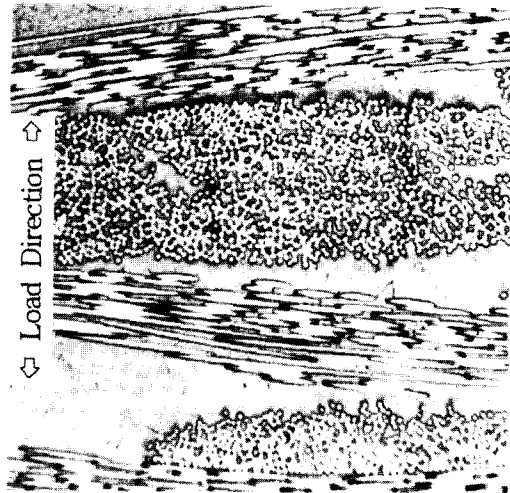


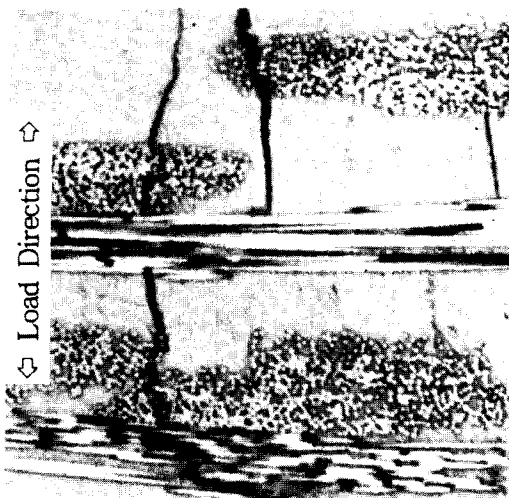
Fig. 8. Damage modes after loading to 90% of the average fracture stress in Glass/Polyester specimen.

공선단에서 형성된 손상영역의 대표적인 예이다. 체적율이 높은 경우는 원공선단의 넓은 영역으로 손상이 이루어지지만, 체적율이 낮은 경우에는 90° 방향으로 길게 형성되고 있다. 이러한 손상거동은 미시균열형성거동과도 관련이 있다고 할 수 있다.

Fig. 9는 손상영역을 원공선단에 접한 종단면에 대하여 관찰한 균열양상의 예이다. 체적



(a) $V_f \approx 60\%$



(b) $V_f \approx 44.5\%$

Fig.9. Photographs of microcracks observed on the edge of circular hole after loading to 90% of the average fracture stress in Glass/Polyester specimen.

율이 높은 경우에는 90° 방향의 섬유에서 섬유와 모재사이의 평균열형성이 보이지만, 체적율이 낮은 경우는 이들 균열이 더욱 모지 쪽으로 진전한다든가 또는 0° 방향의 섬유파단 및 박리현상의 균열형성이 용이함을 알 수 있다. 이들의 결과로부터 원공선단의 손상영역은 균열형성거동과 관련이 있으며 이는 파손강도의 대소에 영향을 미친다고 생각되므로 이들 재료의 파손강도와 파단후의 손상영역과의 관계를 검토하였다. Fig. 10은 손상이 일어날 수 있는 단위면적에 대한 실제의 손상면적의 비, 즉 손상비와 파손강도와와의 관계이다. 이 그림에서 손상비가 클수록 파손강도는 상승함을 보이고 있다. 이로부터 notch선단의 손상형태는 응력완화에 영향을 미쳐 파손강도를 지배한다고 할 수 있다.

4-3. 불안정 파괴조건

불안정 파괴시의 최대손상의 크기는 점응력 조건에서의 특성길이와 대응하므로 먼저 특성 길이와 파괴강도와와의 관계에 주목하였다. 불안정파괴조건은 전보⁶⁾에서 검토한 식(8)의 응력확대계수에 의하여 검토하였다.

$$K_c = \sigma_N \sqrt{\pi a_c} F(a_c/R) \quad (8)$$

K_c 는 불안정파괴시의 한계응력확대계수, a_c 는 이때에 원공 2R의 선단에서 발생하는 최대균열길이를 나타낸다. 또한 $F(a_c/R) = \sigma_0/Y\sigma_N$ 은 a_c/R 의 함수이고 Sih¹¹⁾의 응력해로부터 구하여진다. 이 식은 등방성재료에 대한 것이지만 준등방성재료에도 이용되고 있으며, 또한 K_c 와 한계에너지해방율 G_c 사이에는 다음 식의 관계가 있다.

$$G_c = \left[\left(\frac{a_{22}}{a_{11}} \right)^{1/2} + \frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} \right]^{1/2} \left[\frac{a_{11}a_{22}}{2} \right]^{1/2} K_c^2 \quad (9)$$

여기서 a_{ij} 는 직교이방성 강성텐서로서 첨자 i 와 j 는 하중의 부하방향에 평행 및 수직의 방향을 나타낸다.

Waddoups¹⁾과 Aronsson¹⁰⁾은 a_c 가 일정한 가정하에서 파손강도를 예측하고 있으나, Prabhakaran¹²⁾과 김⁶⁾등은 식(10)의 관계가 얻어짐을 보고하고 있다.

$$a_c \approx 2d_0 \quad (10)$$

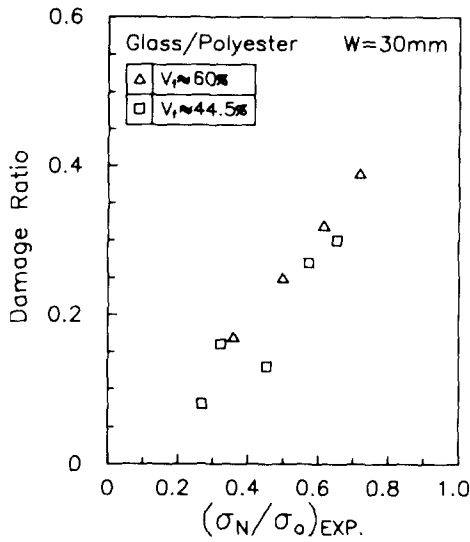


Fig. 10. Relations between damage ratio and $(\sigma_N/\sigma_o)_{EXP.}$.

따라서 이들의 관계가 다른 적층재 또는 직조복합재에서도 동일한 관계가 얻어지는지를 검토하였다. Fig.11은 전보⁶⁾의 결과와 함께 d_o 와 a_c 와의 관계를 나타낸 것이다. 식(10)은 복합재료의 적층형태, 종류 및 시험편의 형상에 관계없이 성립함을 보여주고 있다. 이상의 결과로부터 불안정파괴시의 최대균열길이는 특성길이 d_o 로부터 예측할 수 있다.

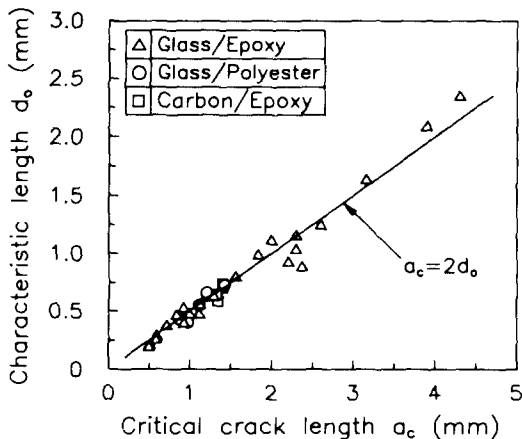


Fig.11. Relations between characteristic length and critical crack length.

Fig.12는 식(9)로부터 계산된 각 재료의 G_c 를 $2R/W$ 에 대하여 나타낸 것으로서, 파괴인성에 대응하는 한계에너지해방율 G_c 는 원공크기의 대소에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. 한편 섬유 종류, 체적을 및 시험편의 폭에 따른 G_c 의 변화는 Fig.13의 노치감도계수로 부터 설명된다. Glass 섬유강화 복합재료에서는 노치감도계수가 클수록 G_c 는 감소하며 또한 동일한 노치감도계수에서는 Carbon 섬유강화 복합재료의 G_c 가 Glass계에 비하여 높은 값을 나타낸다. 따라서 노치감도계

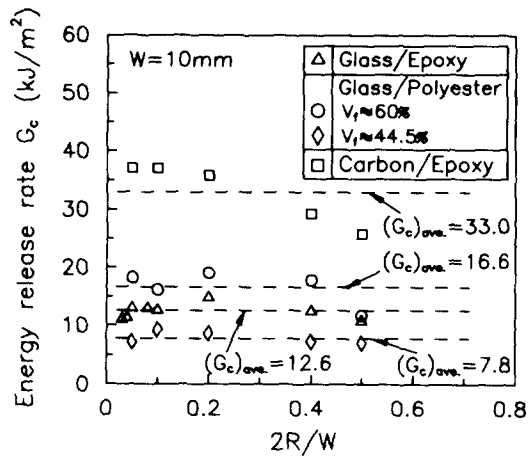


Fig.12. Variations of energy release rate according to $2R/W$.

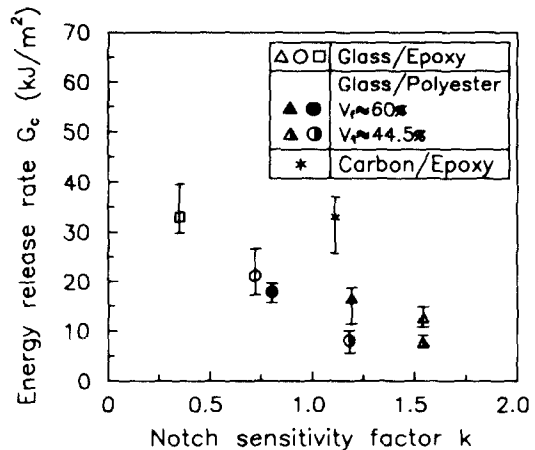


Fig.13. Relations between energy release rate and notch sensitivity factor.

수가 저하함에 따라 파괴인성이 향상되는 것은 원공선단의 손상영역의 증가에 의한 응력완화가 주요한 원인이라고 할 수 있다.

5. 결 론

Plastic기 복합재료(Glass/Epoxy, Glass/Polyester 및 Carbon/Epoxy)의 파손강도 및 불안정 파괴조건에 미치는 원공크기의 영향을, 수정한 점응력파손조건식 및 에너지해방율로부터 얻어지는 파괴인성에 대하여 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 수정 점응력파손조건식에 의한 파손강도의 예측값은 실험값과 거의 일치한다.
2. 파손강도의 대소는 원공주위에 형성되는 손상영역의 크기에 관계하며, 형성되는 손상영역이 넓을수록 원공주위의 응력완화로 인하여 파손강도는 증가한다.
3. 불안정 파괴시의 최대균열길이 a_c 와 특성길이 d_0 사이에는 $a_c \approx 2d_0$ 의 관계가 얻어진다. 또한 파괴인성에 대응하는 한계에너지해방율 G_c 는 동일한 판폭에 대하여 원공의 크기에 관계없이 일정하며, 이는 노치감도계수가 저하할수록 증가한다.

후 기

본 연구결과의 일부는 한양대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M.E. Waddoups and J.R. Eisenmann, J. Composite Materials, 446 (1971)
2. J.M. Whitney and R.J. Nuismer, J. Composite Materials, 5, 446 (1974)
3. R.J. Nuismer and J.M. Whitney, ASTM STP 593, 117 (1975)
4. R.B. Pipes, R.C. Wetherhold and J.W. Gillespie Jr., J. Composite Materials, 13, 148 (1979)
5. R.F. Karlak, Proc. 4th Joint ASTM-Metallurgical Society of AIME Symp. on Failure Modes in composites, 105 (1977)
6. 김정규, 김도식, 대한기계학회논문집, 16-7, 1285 (1992)
7. H.J. Konish and J.M. Whitney, J. Composite Materials, 9, 157 (1975)
8. S.C. Tan, J. Composite Materials, 22, 1080 (1988)
9. M.T. Kortschot and P.W.R. Beaumont, Composites Science and Technology, 39, 289 (1990)
10. I. Eriksson and C. G. Aronsson, J. Composite Materials, 24, 456 (1990)
11. P.C. Paris and G.C. Sih, ASTM STP 381, 30 (1964)
12. R. Prabhakaran, Materials Science and Engineering, 41, 121 (1979)