

◎論 文

SMC 복합재료와 Carbon/Epoxy 복합재료의 파괴인성평가⁺

최 영 근* · 이 유 태** · 이 택 순***

(1992년 12월 3일 접수)

The Evaluation of Fracture Toughness of SMC Composite Material and Carbon/Epoxy Composite Material

Young-Geun Choi* · You-Tae Lee** · Taik-Soon Lee***

Key Words : Plain Woven Composite Material(평직복합재료), Sheet Moulding Compound (SMC), Area Method(면적법), Total Energy Release Rate(전에너지 방출율), Locus Method(일반곡적법), Frature Toughness(파괴인성)

Abstract

In composite materials, the fracture perpendicular to the fiber direction usually shows a non-linear behavior accompaning blunting and plastic deformation around the crack tip.

In this study, the fracture toughness in random short fiber SMC composite material and Carbon/Epoxy composite material is estimated by the A.M.(Area Method) and the G.L.M. (Generalized Locus Method) which can determine a stable total energy release rate(G_T) not only in highly elastic material but also in highly non-linear materials.

1. 서 론

현재 널리 사용되고 있는 섬유강화복합재료(fiber reinforced composite material 이하 FRP라 함)는 높은 비강성, 비강도, 내식성 등의 우수한 기계적성질을 나타내므로 최근 항공기 구조물,

자동차 및 선박 등의 경량화가 요구되는 부분에 그 사용이 증가되고 있다.⁽¹⁻²⁾ 이에 따라 기계, 구조물 부재로서의 안정성 및 신뢰성 향상을 위해서는 이의 파괴인성평가가 중요하다. 그리고 선형 파괴역학에서는 에너지방출율 G 및 응력확대계수 K등이 파괴인성의 척도로 쓰이며⁽³⁾, 비선형 파괴 역학에서는 J적분⁽⁴⁾ 및 전에너지 방출율 G_T 등

+ 1992년도 대한기계학회 추계학술대회 발표(1992년 11월)

* 영남대학교 대학원 정밀기계공학과

** 영남대학교 대학원 정밀기계공학과

*** 정희원, 영남대학교 정밀기계공학과

이 사용되고 있다.⁽⁵⁾ FRP의 경우 섬유는 구조물의 하중을 주로 담당하게 되며 기지는 섬유들을 결합하여 하중을 섬유로 전달하여 주는 역할을 한다. 아울러 섬유강화 복합재료는 불안정 파괴에 이르기 까지 안정균열성장을 함이 보고되고 있으므로 선형파괴역학에서 파괴인성의 척도로 사용되는 응력확대계수, K를 이용한 파괴인성 평가에는 한계가 있다. 본 연구에서의 파괴인성은 균열길이가 다른 동일시험편 여러개를 사용하여 거시적 불안정파괴의 개시하중인 P_{max} 를 찾아 그 점들을 연결하는 궤적선을 얻어 에너지 평형에 기초한 일반궤적법⁽⁶⁻⁸⁾과 면적법으로 섬유강화 복합재료의 파괴인성을 평가하고자 한다.

2. 이 론

2-1 면적법

면적법은 G_{IC} 를 하중(P)-변위(δ) 그래프로부터 파괴인성을 직접 구할 수 있는 방법으로 다음과 같이 표현된다.

$$G_{IC} = -\frac{\Delta U}{\Delta A} \dots\dots\dots (1)$$

G_{IC} : 에너지 방출율

ΔU : 방출된 에너지 (Fig. 1의 빗금친 부분)

ΔA : 단면의 변화량

재료의 파괴거동이 선형이라면 위의 식은 다음과 같다.

$$G_{IC} = -\frac{P_2\delta_3 - P_3\delta_2}{2B(a_3 - a_2)} \dots\dots\dots (2)$$

B: 시험편 두께

2-2 일반적 궤적법(G_T)

에너지 방출율에 기초를 둔 이 일반적 궤적법의 이론적 배경에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

전에너지방출율 $G_T(a, x)$ 은 다음과 같이 정의되고 있다.

$$G_T = -\frac{1}{B} \left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_x \dots\dots\dots (3)$$

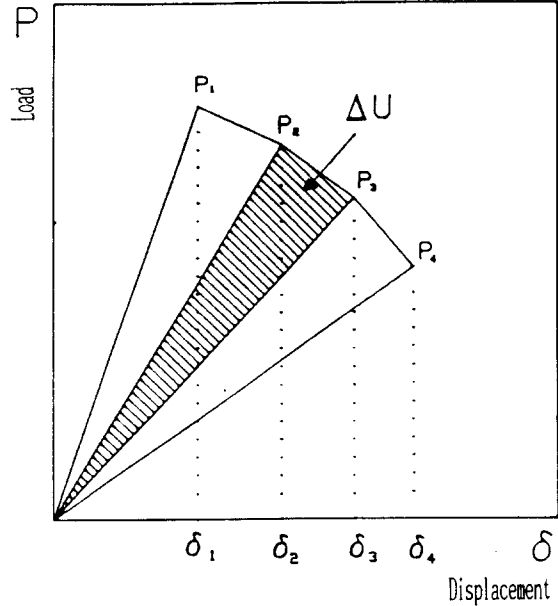


Fig. 1 Load-displacement curves for different initial crack lengths.

(B: 시험편 두께, a: 크랙 길이, x: 변위)

$$U = \int_0^x P dx,$$

$P = P(a, x)$: 적용된 하중 (4)

하중 P가 a와 x의 함수이므로 U도 a와 x의 함수이다.

$$U = U(a, x)$$

$$\left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_x = \frac{dU}{da} - \left[\frac{\partial U}{\partial x} \right]_a \cdot \frac{dx}{da}$$

$$= \frac{dU}{da} - P \frac{dx}{da} \dots\dots\dots (5)$$

식(5)을 식(3)에 대입하고, 궤적선 L을 따라 양변을 적분하면 다음과 같이 된다.

$$-B \int_L G_T da = \int_L dU - \int_L P dx \dots\dots\dots (6)$$

식(6)의 우변은 Fig. 2에 나타나 있는데, 여기서 D와 E사이의 점선이 궤적선 L이다. 궤적선 L은 특성점들을 연결하는 선인데 예를 들면 최고 하중점들의 궤적, 크랙 시발점들의 궤적 또는 크랙

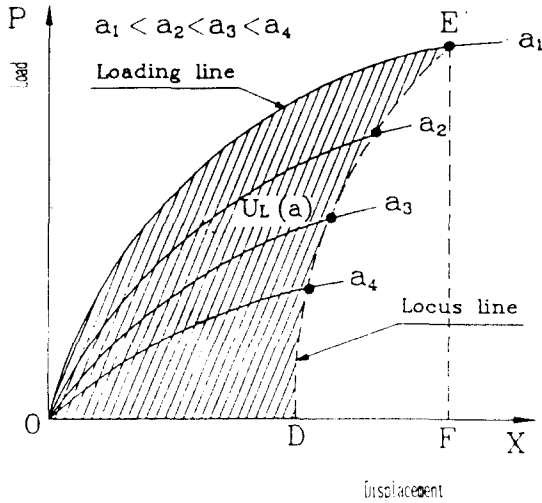


Fig. 2 Load-displacement record showing $U_L(a)$ as a function of initial crack lengths.

이 일정한 길이만큼 진전한 점들의 궤적 등으로 생각할 수 있다. 우변 첫항은 OEF의 면적 항이고, 둘째항은 DEF의 면적을 나타낸다. 따라서 식(6)의 오른쪽 항들의 합은 하중선과 변위축 및 궤적선(Locus Line)에 닫혀진 빗금쳐진 부분, OED의 면적이 된다. 빗금쳐진 면적 $U_L(a)$ 는 최고하중점들의 궤적을 사용하여 구하면 되고 다른 특성점에서의 값을 구할 때는 이에 상응하는 궤적을 사용하면 된다. 궤적선 L위의 임의의 점에서의 $G_T(a)$ 는 방정식 (6)의 양변을 미분하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$G_T = -\frac{1}{B} \frac{dU_L}{da} \dots\dots\dots (7)$$

방정식(7)에서 알 수 있는 것은 Fig. 3의 경우에 나타나 있는 곡선의 기울기가 G_T 값이 된다. 예를 들어 Fig. 2의 경우와 같이 곡선의 기울기 a 가 증가함에 따라 G_T 가 감소하는 경우에는, G_T 값에서 균열의 길이가 증가함에 따라 G_T 값은 점차로 감소함을 알 수 있다. U_L/B 와 균열길이의 관계선도로서 어떤 특성점들의 궤적상에서 균열길이의 변화에 따른 G_T 값의 변화를 알아보는데 사용될 수 있다. 즉 초기크랙 a 만을 달리하는 시편들의 파괴에 있어서 최고하중점에서 G_T 값이 일

정한지 확인하는데 위와 같은 방법이 사용될 수 있다. G_T 가 궤적선을 따라서 일정할 때 G_T 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$G_T = -\frac{1}{B} \frac{\Delta U_L}{\Delta a} \dots\dots\dots (8)$$

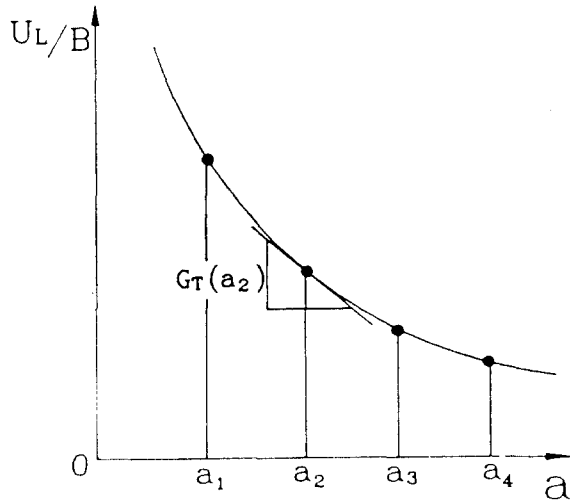


Fig. 3 U_L/B vs. initial crack length a . The slope is G_T .

3. 시험편 제작 및 실험방법

본 연구에서 사용될 시험편의 재료는 럭키(주)에서 생산된 방향이 불규칙한 단섬유로 강화된 SMC 복합재료 품번 SW2465와 한국 화이바(주)에서 제작된 평직 탄소섬유강화 복합재료 HC33 19/RS1222이다. 이 SMC 복합재료의 기계적 물성 및 화학 성분은 Table1, Table2에 나타내었다. 그리고 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)는 탄소섬유가 0° 및 90°로 배열되어 두께 0.3mm의 프리프렉 (prepreg) 6장을 겹쳐 오토클레브 (autoclave)에서 약 2.75×10^5 Pa의 압력으로 127°C, 2시간 동안 유지시켜 두께 1.1mm의 평판을 만들었으며 재료의 기계적 물성과 화학 성분은 Table 3, Table 4와 같다.

Table. 1 Mechanical properties of random short fiber SMC composite material.

Tensile Strength	49 MPa
Elastic Modulus	1.107×10^4 MPa
Compressive Strength	193 MPa
Elongation	$1.1 \pm 0.1\%$

Table. 2 Chemical composition of random short fiber SMC composite material (wt %)

UPE resin	25.9
Filler(CaCO_3)	36.3
Glass Roving	32.0
etc	5.8

Table. 3 Mechanical properties of plain woven carbon fiber reinforced composite material.

Tensile Strength	1027 MPa
Elastic Modulus	6.13×10^4 MPa
Compressive Strength	730 MPa
Elongation	$1.0 \pm 0.2\%$

Table. 4 Chemical composition of plain woven carbon fiber reinforced composite material. (wt %)

Wet resin content	39 ± 2
Volatile content	1.0
Resin flow	15 ± 5
Fiber weight/Area	$193 \pm 8 \text{ g/m}^2$

시험편의 노치가공은 두께 0.2mm의 저속 다이아몬드 휠 커터로 가공하여 노치의 가공으로 인한 손상을 최소화 하였으며 노치첨단에 대한 부수적인 가공은 하지 않았다. 시험편의 폭(W)에 대한 초기 균열길이(Initial Crack Length)의 비는 0.2~0.5의 4종류이며, 노치첨단의 반경은 0.1mm이다.

하중방향에 대한 균열방향(이하 균열각이라 함), θ 는 45° , 90° 두 가지로 가공하였고, 균열각이 45° 인 시험편에서의 초기균열길이 a는 하중방향에 수직한 축으로의 투영길이를 하였다. 그리고 게이지 길이는 130mm, 170mm, 210mm 3종류이며, Grip Length는 30mm, 폭은 $32 \pm 0.25\text{mm}$, 두께

는 1.1mm, 5mm이다. 시험편의 자세한 형상은 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 사용된 시험기는 인스트론사(Instron, Model NO 1332) 유압식 만능시험기이다. 각 시험편에 대해 정적인 인장하중을 변위제어(Stroke Control)를 하면서 0.3mm/min의 속도로 실험을 행하였으며 실험중에 얻어지는 하중, 변위 데이터는 AD 변환기를 통해 개인용 컴

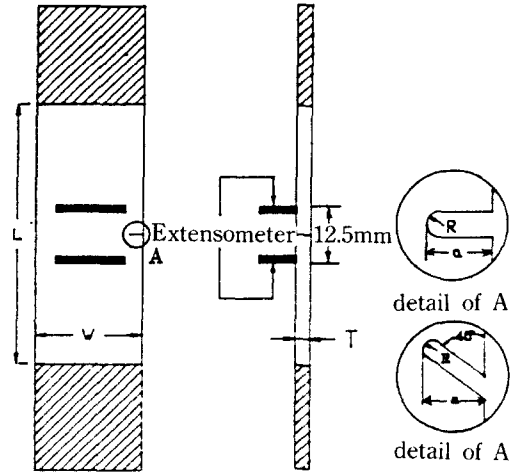


Fig. 4 Geometry of static test specimen. (SMC, SEN)

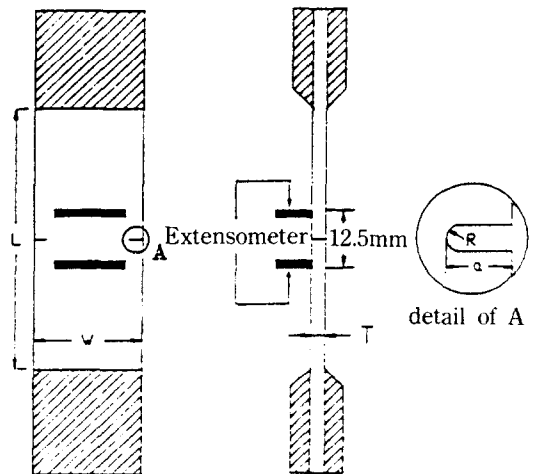


Fig. 5 Geometry of static test specimen. (CFRP, DEN)

퓨터에 20Hz의 속도로 받아들여서 하중-변위 곡선을 그렸다. 그리고 실험도중 시편의 노치(Notch) 주변에 발생하는 변위량을 측정하기 위해 게이지길이(Gage Length) 12.5mm의 변위신장계를 부착했다.

4. 실험 결과 및 검토

FRP의 실제 파괴거동을 조사하여 보면 보강섬유의 파괴, 기지재의 파괴 및 섬유와 기지재의 분리현상 등 복합적인 파괴현상⁽⁹⁾이 동반된다. 그러므로 기지재와 보강섬유 모두 선형적 성질의 재료일 경우라도 결과적으로 나타나는 재료의 파괴현상은 비선형적 성질을 띄게된다. 본 연구에서는 여러가지 조건하에서 비선형파괴역학을 기초로 한 일반 궤적법을 사용하여 파괴인성치를 평가하여 보았다.

(1) Carbon/Epoxy 복합재료에서 초기 균열 길이가 파괴인성치에 미치는 영향

Carbon/Epoxy 복합재료에서 초기균열길이를 변화시켜 파괴인성을 평가하여 보았다. Fig. 6은 Carbon/Epoxy 복합재료 시편에 초기균열길이의 변화에 따른 하중-변위 곡선이다. 이 곡선에서 식(6)를 이용하여 최고하중점을 이은 궤적선, 하중곡선 및 변위축으로 둘러싸인 면적인 방출된 전에너지(U_L)를 구하고 이값과 초기균열 길이사

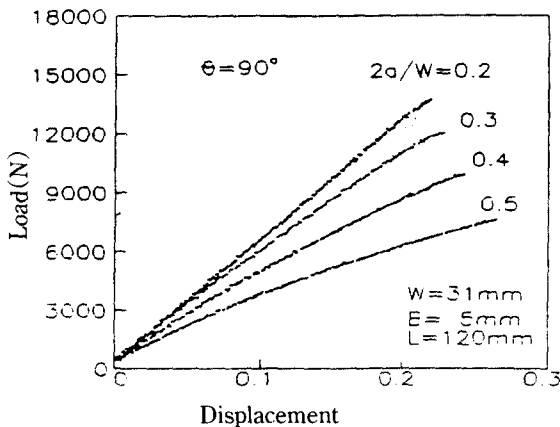


Fig. 6 Load vs. displacement curves (CFRP).

이의 관계를 Fig. 7에 나타내어 보았다. 이 관계 곡선의 기울기가 전에너지 방출율(G_T)를 나타낸다. 방출된 전에너지와 초기 균열길이 사이의 관계가 선형성을 나타내므로 파괴인성치인 전에너지 방출율(G_T)는 초기균열 길이에 관계없이 항상 일정함을 알 수 있다.

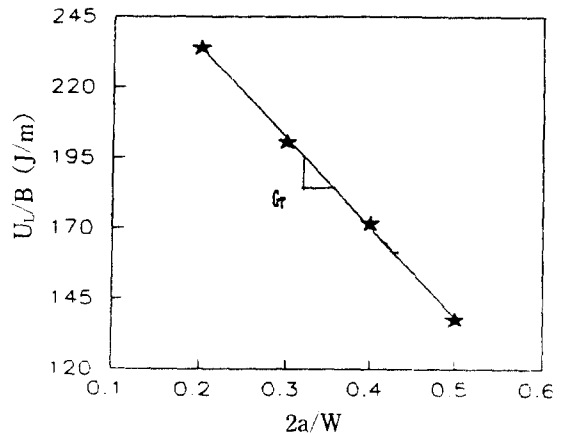


Fig. 7 U_L/B vs. $2a/W$ curves. The slope is G_T . (CFRP, $\theta = 90^\circ$)

(2) SMC복합재료에서의 초기균열길이와 균열각이 파괴인성치에 미치는 영향

SMC 복합재료에서 초기균열 길이와 균열각이 파괴인성치에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 초기균열 길이(a/W)를 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 변화시켜 실험하고 각각의 초기균열 길이에서 균열각을 45° , 90° 로 변화시켜 보았다.

Fig. 8은 균열각이 45° 일 때의 초기균열길이에 따른 하중-변위곡선을 나타내고 Fig. 9는 균열각이 90° 일 경우의 하중-변위곡선이다. 이 두가지 경우의 곡선에서 방출된 전에너지(U_L)를 구하고 Fig. 10에서 U_L/B 와 a/W 의 함수로 나타내었다. 최소자승법으로 구한 기울기를 사용하여 최고하중점에서의 파괴인성을 구할 수 있었다.

이 결과 균열각에 따라 전에너지 방출율(G_T)는 거의 일치된 경향을 보였으며 초기균열 길이에 따른 기울기도 선형성을 나타내었다. 따라서 일반 궤적법을 이용한 SMC복합재료의 파괴인성치는 초기균열 길이와 균열각에 무관하게 항상 일정한 값으로 나타났다.

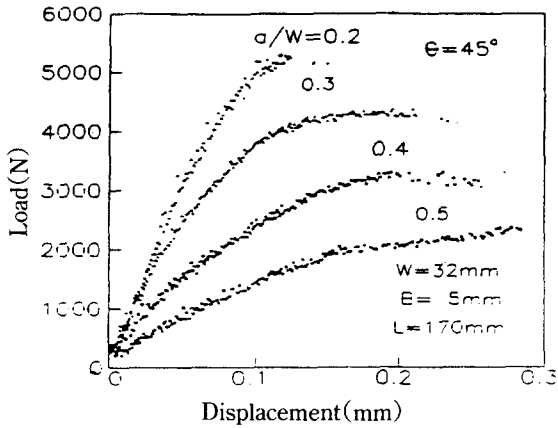


Fig. 8 Load vs. displacement curves (SMC).

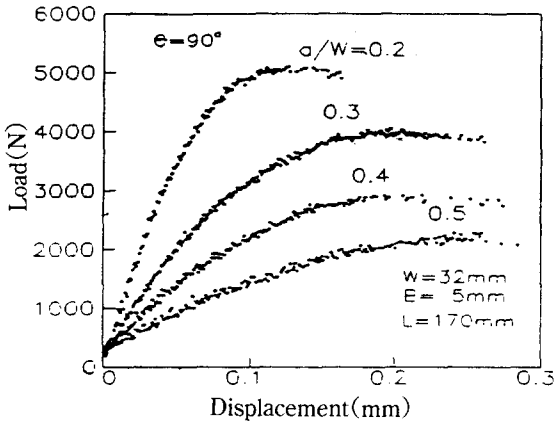


Fig. 9 Load vs. displacement curves (SMC).

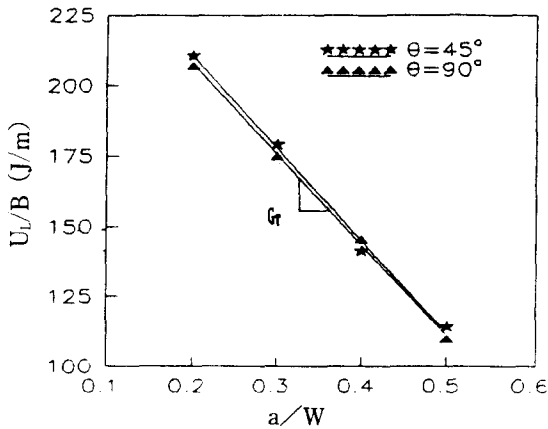


Fig. 10 U_L/B vs. a/W for two different angles. The slope is G_T . (SMC)

(3) 시험편의 게이지 길이가 파괴인성치에 미치는 영향

균일재료에 대하여 시험편 폭에 대한 시험편의 게이지 길이의 비가 4이상이라는 ASTM기준이 섬유강화 복합재료에서도 유효한가를 판정하기 위하여 시험편 게이지 길이를 130, 170, 210mm로 변화시켜 실험을 행하였다.

Fig. 11, 12, 13은 각 시험편 게이지 길이에 대한 하중-변위 곡선이다. 각각의 경우로부터 구한 방출된 전에너지(U_L)와 a/W 의 관계를 Fig. 14에 나타낸 결과 시험편 게이지 길이 130, 170, 210mm의 세 경우 모두 거의 일치된 경향을 보였으며 방출된 전에너지(U_L)와 초기균열 길이의 변화에 대한 관계가 선형적인 관계를 가진다. 그러므로 시

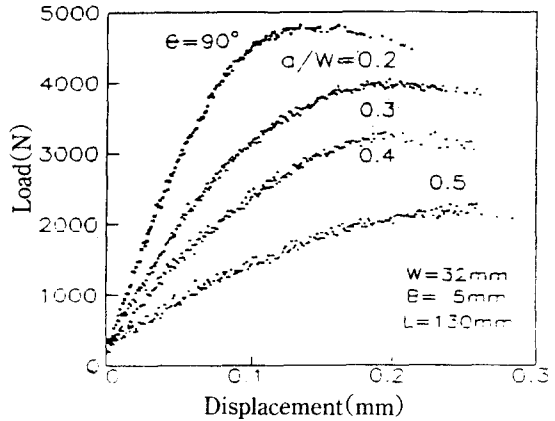


Fig. 11 Load vs. displacement curves (SMC).

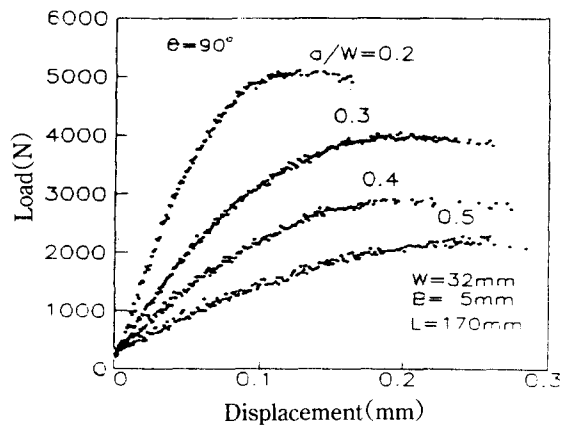


Fig. 12 Load vs. displacement curves (SMC).

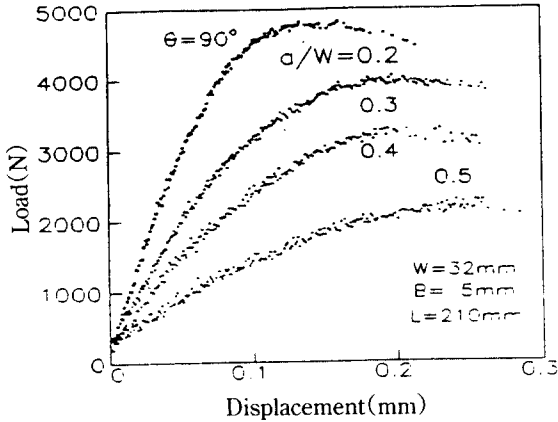


Fig. 13 Load vs. displacement curves (SMC).

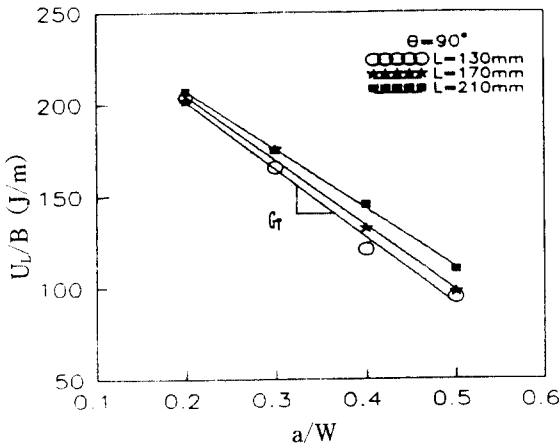


Fig. 14 U_L/B vs. a/W for three different lengths. The slope is G_T . (SMC)

험편 게이지 길이와 초기균열길이의 변화에 무관하게 일반케적법으로 구한 파괴인성치는 일정한 값을 나타낸다.

(4) 일반케적법과 면적법에 의한 파괴인성치의 비교

일반케적법의 적용성을 판단하기 위해 비선형 인자를 고려한 일반케적법으로 구한 파괴인성치와 선형거동으로 가정한 면적법으로 구한 파괴인성치를 비교하여 보았다. 각 조건에서 3-4개의 시험편에 대해 실험을 하여 얻은 하중-변위 곡선으로 부터 기준에 많이 사용하여 왔던 면적법으로 구한 SMC 복합재료의 파괴인성은 8.54KJ/m^2

이었으며, Carbon/Epoxy복합재료의 파괴인성치는 62.31KJ/m^2 이었다. 그리고 비선형 파괴역학을 기초로 한 일반케적법으로 구한 SMC 복합재료의 파괴 인성치는 9.36KJ/m^2 이었으며, Carbon/Epoxy 복합재료의 파괴인성치는 63.74KJ/m^2 의 높은 파괴인성값을 얻을 수 있었다.

그 결과 면적법에 의해 구한 값보다는 일반케적법으로 구한 파괴인성치가 SMC 복합재료의 경우는 9.76%의 차이를 보였으며 Carbon/Epoxy 복합재료의 경우는 2.24%의 차이를 보여 상당히 잘 일치하였다. 여기서 발생한 차이는 일반케적법에서는 비선형구간에서 방출된 에너지까지를 고려함으로써 생긴 차이로 사료되는 바이다.

5. 결 론

이상의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일반케적법과 면적법으로 구한 SMC 복합재료와 Carbon/Epoxy복합재료의 파괴인성을 평가한 결과 파괴인성치가 초기균열길이, 시편길이 및 균열각에 무관하게 일정한 값을 나타내었다.
2. 일반케적법으로 구한 SMC복합재료와 Carbon/Epoxy복합재료의 파괴인성치는 각각 9.36KJ/m^2 , 63.74KJ/m^2 로 나타났고 면적법으로 구한 파괴인성치는 각각 8.54KJ/m^2 , 62.31KJ/m^2 로 평가되었다.
3. 에너지 평형에 기초한 일반케적법이 취성파괴에서 비선형파괴의 경우까지 두루 사용될 수 있는 일반적인 파괴인성 평가방법임을 SMC복합재료와 Carbon/Epoxy복합재료의 파괴실험을 통하여 검증되었다.

참 고 문 헌

1. Hayashi, T., 1982, "Composite in Japan", Progress in Science and Engineering of Composites, Vol. 1, pp. 1~8.

2. Peterson, P., 1980, "Advanced Composites : Past Persepective and Fracture Strategy", Advance in Composite Materials, Vol. 1, pp. 3~10.
3. D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th reved., Martinus Nijhoff Publishers (1986) pp. 130~136, 202~208.
4. J.R.Rice, J.apple, Mech. 35, pp. 379~386 (1968).
5. Liebowitz, H. & Eftis, J. Eng. Fracture Mech., 3 (1971) pp. 267~81.
6. B.H.KIM and C.R.JOE, "A Method to Evaluate Critical J-Integral Value : Locus Method", Polymer Testing, 1987, Vol. 7, pp. 355~363.
7. C.R. Joe, and B.H. Kim, "On the essential work of fracture", International Journal of Fracture 42 : R3-R8, 1990.
8. B.H. Kim and C.R. Joe, "Comparision of the Locus and the Extrapolation Methods that Determine the Critical J-Integral in the Presence of Remote Energy Dissipation", Engineering Fracture Mechanics Vol. 30, No. 4, pp. 493~503, 1988.
9. Dibenedetto, A.T. and Gideon Salee, 1979, "Fatigue Crack Propagation in Graphite Fiber Reinforced Nylon 66" Polymer Engineering and Science, Vol. 19, pp. 512~518.
10. J.E.Srawley, International Journal of Fracture 12, pp. 475~476, 1976.