

혼합 모우드 변형하에 있는 흑연/에폭시 복합재료의 파괴

유 희 · 염영진
기계공학과

〈요 약〉

중앙에 균열이 있는 복합재료(Graphite/Epoxy) 유한평판에서 균열길이와 균열각도의 변화에 따른 파괴 현상을 실험하였다. 응력강도계수와 변형에너지 방출율을 유한평판에 대한 혼합모우드 수정계수를 이용하여 구하였다. 또한 전자현미경을 이용하여 파괴단면이 균열각도의 변화에 따라 어떤 형상을 나타내는지 알아보고 그 이유에 대하여 고찰하였다.

Fracture of Graphite/Epoxy Composites under Mixed Mode Deformation

You, Hee · Yum, Young-Jin

〈Abstract〉

The fracture test for finite composite plate with a central crack is performed for selected combinations of crack length and angle. The stress intensity factors and strain energy release rates are calculated by using the mixed mode correction factors for the finite plate. Fracture surfaces for variety of crack angle are analyzed and taken photograph by using scanning electron microscope(SEM)

I. 서 론

파괴 현상은 비행기나 자동차 또는 기계 등의 응력 집중면으로부터 균열과 같은 결함등에 의해서 일어난다. 이러한 현상은 최근까지는 인식되지 않고 있다가 파괴 역학이 발전함에 따라 차차 그 중요성이 강조되고 있다.

파괴역학 발달의 원인은 파괴사고의 발생들과 관계가 밀접한데 특히 취성파괴는 갑자기 일어나는 일이 많기때문에 큰 손실을 일으킬수 있다.

이런 파괴 현상의 예는 Shank(1) 와 Parker(2)에 의해 상세하게 조사되어 있다.

균열과 같은 결점등의 존재는 공학구조에 있어서 경시되어서는 안되는 것으로 에너지 보존이나 재료의 효율적인 사용 면에서 특히 고려되어야 한다. 이러한 면에 부합되어 최근에 복합 재료라는 높은 응력과 강도(무게에 대한 비)를 가진 재료가 개발되었다.

복합 재료는 합금(alloy)과는 달리 각 구성 성분들의 특징을 보유하고 있으며 서로 결합됨으로

* 이 논문은 1990년도 대학 연구비 지원에 의해 수행되었음.

써 나타나는 고유의 성질을 갖는 재료이다. 즉 상승작용 효과 (synergistic effect)를 갖는다.

제작 방법은 Bag molding, Compression molding, Pultrusion, Filament winding, Resin transfer molding, Elastic reservoir molding 등이 있다. Bag molding 과정은 생산비가 크게 고려되지 않는 항공산업등에 사용되는 것으로 시발재료 (starting material)는 Epoxy resin과 섬유를 포함한 Prepreg를 쓴다. Fig. 1에 직층 순서가 도식화되어 있고 Fig. 2에 Curing cycle이 있다. 이번 실험에서는 이 과정을 사용하여 재료를 만들었다.

복합 재료 연구는 재료과정, 비등방성 탄성, 비등방성 재료의 응력, 미소역학 등 많은 범위가 있다. 그러나 이런 모든 면을 이해하기는 매우 힘이 든다.

복합 재료에 대한 무한 평판 파괴현상은 일부 선각자 [3-6]에 의해 해석되었고 유한평판에 대해서도 해석 [7] 하려고 노력하였다.

그러나 복합재료 유한평판에 대한 파괴현상은 최근까지 모순이 있게 해석되어 왔다. 그들은 유한평판 실험에서도 무한평판으로 생각하고 실험 해석 [8] 했으며 또한 섬유 방향으로 균열을 내지 않고 섬유를 가로질러 균열을 만들어서 실제 파괴 현상과는 적합하지 않는 수치해석을 하였다 [9].

수정계수는 최근까지 균열길이와 폭 비에 대한 자세한 내용의 참고 문헌이 없었으나 Yum [10]에 의해 매우 자세히 구하여졌다.

이 값들은 수치해석 방법중 수정 사상선점법을 이용한 것으로 이 방법은 응력강도 계수의 모우드 I, II 성분이 용이하게 분리될 수 있기때문에 혼합 모우드의 파괴해석에 매우 많이 쓰이는 방법이다.

이번 연구에서는 유한평판에서 수정계수를 고려하고 균열을 섬유 방향과 평행하게 내어 실제로 일어날수있는 현상을 실험한다. 경사진 균열을 갖는 복합재료 시편에 길이방향 하중이 작용할때 균열 각과 균열 길이의 변화에 따라 응력강도 계수와 변형에너지 방출율이 어떻게 나타나는지 알아보고 그 값들을 그래프로 나타내어 본다.

그리고 전자현미경을 이용하여 균열 각도에 따라 섬유의 파괴정도, 핵클(hackle)이 생기는 이유, 핵클이 균열진전 방향에 대해 어떤 영향을 미치고 어떤 방향으로 생성되는지를 알아 본다.

II. 혼합 모우드 응력강도 계수와 변형 에너지 방출율

하중이 평판의 중립면에 대칭으로 작용한다고 가정하면 응력함수의 일반적인 형태는 2차원 이방성 문제에 대해서 다음과 같이 표현된다 [11].

$$F(x, y) = 2\text{Re} \{F_1(z_1) + F_2(z_2)\} \quad (1)$$

여기서 F_1 과 F_2 는 복소 변수들 Z_1 and Z_2 의 해석함수이고 $z_i = x + S_i y$ ($i = 1, 2$)이다.

특성근 s_1 과 s_2 를 구하는 방법은

$$a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial X^4} - 2a_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (2)$$

다음과 같은 특성 방정식을 이용하여 구한다.

$$a_{11} \mu^4 - 2a_{16} \mu^3 + (2a_{12} + a_{66}) \mu^2 - 2a_{26} \mu + a_{22} = 0 \quad (a_{ij} = \text{Compliance}) \quad (3)$$

여기서 구한 근중에서 s_1, s_2 는 허수부분이 양수인 근들만 취하고 그리고 Compliance는

$$a_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad a_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad (4)$$

$$a_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad a_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad \text{이다.}$$

Fig. 5와 같은 균열을 갖는 평판에 대한 응력강도 계수와 변형 에너지 방출율은 다음과 같다.

무한 평판일때의 응력강도 계수는

$$K_I = T \sqrt{L} \cdot \sin^2 \theta \quad (5)$$

$$K_{II} = T \sqrt{L} \cdot \cos \theta, \sin \theta$$

이고

유한 평판일때의 응력강도 계수는

$$K_I = Y_I \sqrt{L} \cdot s \sin^2 \theta \quad (6)$$

$$K_{II} = Y_{II} \sqrt{L} \cdot \cos \theta \sin \theta$$

로 정의되어진다. 여기서 Y_I, Y_{II} 는 각각 모우드 I 과 II 모우드의 수정계수이다.

변형에너지 방출율은 문헌(12)으로부터

$$G_I = \frac{\pi K_I^2}{2} \cdot a_{22} \cdot \operatorname{Re} \left[i \cdot \frac{s_1 + s_2}{s_1 s_2} \right] \quad (5)$$

$$G_{II} = \frac{\pi K_{II}^2}{2} \cdot a_{11} \cdot \operatorname{Im} [s_1 + s_2]$$

로 계산되고, 혼합 모우드의 경우 총 변형에너지 방출율(G_c)은 $G_c = G_I + G_{II}$ 로 표시된다.

II. 실험

(1) 실험준비 과정

재료는 한국 화이버 회사에서 8겹 일방향 Prepreg를 구입하였고 한국기계연구소의 Autoclave (Fig. 3)를 사용하여 Fig. 2와 같은 Curing cycle로 만들었다. 물성치는 $E_x=133.8 \text{ GPa}$, $E_y=9.58 \text{ GPa}$, $G_{xy}=4.80 \text{ GPa}$, $\nu_{xy}=0.28$ 이고 식(3)으로부터 구한 특성근은 $s_1=5.176i$, $s_2=0.172i$ 이다. 이 시험편(50cm×100cm)을 직접 제작한 Diamond cutter로 시편(3mm×24mm)을 하중방향에 대한 섬유 각도를 30°, 45°, 60°, 90 로하고 시편중심에 직경 1mm Drill로 실톱이 들어갈수 있도록 구멍을 낸 후 실톱으로 섬유 방향으로 균열 길이와 폭의 비(L/W)가 0.3, 0.4, 0.5 보다 조금 적게 균열을 만들었다.

그리고 균열을 정밀하게 내기위하여 면도칼을 특별히 가공하였고 Profile projector를 이용하여 1/1000mm까지 읽으면서 균열을 만들었다. 마지막으로 시편의 탭 부분은 Sand paper를 순간 접착제로 부착하였다.

최종 시편의 형상은 Fig. 4과 같다.

(2) 실험 방법

M, T, S를 사용하여 변형률 속도가 0.1mm/min 되게 조절했다. 그 후 시편이 파단될때까지 인장 시험을 하고 여기서 얻은 그래프를 사용하여 최대 파단 하중값을 구하고 이 하중을 각 시편의

면적(2W×t)으로 나누어 파단 응력을 계산했다. 각 균열 각도와 균열 길이에 대해 3-4개의 시험을 실험하였다.

그리고 파단면을 보호하여 금 도금을 한 후 전자현미경(SEM)을 이용하여 파단형상을 관찰하고 사진촬영을 하였다.

III. 결과 및 토론

좌표축과 균열 방향의 설정은 Fig. 5에 있다. 이번 연구를 통해 응력강도 계수와 변형에너지 방출율을 구하였고 그 결과가 Table 1-1에서 Table 1-4까지 나와있다. G_I/G_{II} 값에 대한 G_c 가 Fig. 6에 나타나 있는데 여기서 균열 길이에 따라서는 G_c 값이 거의 변하지 않았으나 하중 방향에는 많은 영향을 받는 것을 알수있다. Fig. 7에서는 균열각도에 대한 G 값의 그래프가 나와있는데 하중 방향이 감소함에 따라 G_I 값은 서서히 증가하다가 어느 일정 하중 방향이 되면 갑자기 증가함을 알수있다. 그러나 G_{II} 값은 본 실험에서 선택한 하중 방향의 범위 내에서도 하중 방향이 감소함에 따라 완만하게 증가하는데 하중방향이 0°에 가까워 질수록 급격히 감소하여 0에 도달할 것이다. 상당한 범위까지 G_I 이 증가하는 현상은 Donaldson의 논문(5)에서도 볼수있으나 그 원인에 대한 규명은 아직 미흡하다.

균열 길이에 대한 총 변형에너지 방출율은 Fig. 8-11에 잘 나타나 있다. 이 그림을 보면 균열 길이가 변함에 따라 총 변형 에너지 방출율은 거의 일정하다는 것을 알수있다. 즉 균열 길이는 총 변형에너지 방출율에 영향을 미치지 않는다는 결론을 내릴수 있다. 이것도 다른 문헌(10, 13)에서 확인할수 있다.

파단면에 대한 기하학적 형상은 Fig. 12-15에서 볼수있다. Fig. 12는 하중 방향과 섬유 방향이 30°인 파단면을 찍은 것으로 다른 각도일 경우 보다 전단응력이 크게 작용하므로 비늘 모양의 hackle이 많고, 크게 발생했다.

한 파단면만 가지고는 크랙 진전방향은 알수없다. 그 이유는 Fig. 14에서 처럼 파단 상하면을 보면 크랙 진전방향에 대해 서로 다른 hackle 기울기 방향을 나타내기 때문이다. 이러한 현상은 전단응력이 서로 반대방향으로 작용하기 때문에 일어난다.

Fig. 15에서 보면 한 파단면에서 hackle 기울기가 서로 반대 방향인 것이 보이는데 이 현상은 시편을 grip에 물렸을 때 순간적으로 압축하중이 가하여져 기지의 약한 부분이 미소 파단됐기때문에, 이때 전단력이 인장하중때와는 반대방향으로 작용함으로 hackle 방향이 반대방향으로 생성된 것으로 생각된다.

이상 처럼 하중상태의 변화에 따라 파단면 형상을 알아보았다. 결론적으로 파단면 형상을 조사하면 파괴를 일으킨 응력상태를 알수있다는 것을 알아 내었다.

V. 결 론

복합 재료 유한평판에서 수정계수를 고려하여 응력강도 계수와 변형에너지 방출율을 여러가지 조건에 대하여 구하였고 알아보기 쉽게 그래프를 그렸다. 여기서 균열 길이에 따른 총 변형 에너지를 방출율은 거의 일정하였으나, 균열각도에는 영향을 받는 것을 알수 있었다.

그리고 전자 현미경을 사용하여 파단면을 관찰하였는데 하중 방향에 따라서 많은 특이현상이 나타났다. 이러한 파단면 형상으로 파단을 유발시킨 응력 상태를 유추할수가 있었다.

<참 고 문 헌>

- Shank, M.E. (ed), "A Critical Survey of Brittle Fracture in Carbon Steel Structures other than Ships", Weld. Res. Coun. Bull., 17(1954).
- Parker, E.R., Brittle Behavior of Engineering Structures, John Wiley and Sons Inc., New York(1957).
- Blikstad, M. and T.R. Johannesson, "The Influence of Moisture and Toughened Resin on Mixed Mode Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy Laminates" J. Composites Technology and Research, Vol, 7, pp. 115-120(1985).
- Morris, D.T. "A Mixed-Mode Fracture Criterion for Composite Materials" Composites Technology Review, Vol, 5, pp. 26-29(1983).
- Donaldson, S.L "Fracture toughness testing of graphite/epoxy and graphite/PEEK composites" Composites, Vol, 16, pp. 103-112(1985).
- Hahn, H.T. "A Mixed-Mode Fracture Criterion for Composite Materials" Composites Technology Review, Vol, 5, pp. 28-29(1983).
- Wilson, W.K. "Numerical Method for Determining Stress Intensity Factors of Interior Crack in Finite Plate" J. Basic Engineering, Vol, 93, pp. 685-690(1971).
- McKinney, J.M. "Mixed-Mode Fracture of Graphite/Epoxy Composites" J. Composite Materials, Vol, 6, pp. 164-166(1972).
- Gandhi, K.R. "Analysis of an Inclined Crack Centrally Placed in an Orthotropic Rectangular plate" J. Strain Analysis, Vol, 7, pp. 157-162(1972).
- Yum, Y.J. and C.S. Hong, "Strain Energy Release Rates in Finite Graphite/Epoxy Plates with a Crack under Mixed Mode Deformation" J. Reinforced Plastics and Composites, Vol, 9, pp. 346-361(1990).
- Lekhnitskii, S.G. Anisotropic Plates, New York: Gordon and Breach Science Publishers(1968).
- Liebowiiz, H. Fracture edited by H. Liebowiiz, New York: Academic Press (1968).
- Yoon, S.H. "Characterization of Interlaminar Fracture in Graphite/Epoxy Composite under Mixed-Mode Deformations" Ph.D. Thesis, KAIST(1990).

<Table 1-1>

Experimental critical mixed mode stress intensity factors and strain energy release rates of graphite/epoxy specimens (2H=180mm, 2W=30mm)

L/W		0.3	0.4	0.5	AVERAGE
ANGLE 30°	K _I	0.729	0.721	0.763	0.738
	K _{II}	1.217	1.191	1.206	1.204
	G _{II}	139.0	142.5	151.0	144.2
	G _{IV}	103.6	98.63	100.7	102.0
	G _c	242.7	241.2	251.1	245.2

단위 (K:MPa \sqrt{m} , G:J/m²)

<Table 1-2>

L/W		0.3	0.4	0.5	AVERAGE
ANGLE 45°	K _I	0.705	0.740	0.712	0.719
	K _{II}	0.682	0.691	0.641	0.671
	G _{II}	129.6	142.1	131.3	134.2
	G _{IV}	32.35	33.11	28.50	31.32
	G _c	161.6	175.2	159.9	165.5

단위 (K:MPa \sqrt{m} , G:J/m²)

<Table 1-3>

L/W		0.3	0.4	0.5	AVERAGE
ANGLE 60°	K _I	0.686	0.680	0.659	0.675
	K _{II}	0.382	0.369	0.351	0.367
	G _{II}	121.8	120.1	112.9	118.2
	G _{IV}	10.11	9.452	8.606	9.391
	G _c	132.0	129.5	121.5	127.7

단위 (K:MPa \sqrt{m} , G:J/m²)

<Table 1-4>

L/W		0.3	0.4	0.5	AVERAGE
ANGLE 60°	K _I	0.685	0.688	0.598	0.657
	G _{I-Cc}	122.0	122.8	92.66	112.4

단위 (K:MPa \sqrt{m} , G:J/m²)

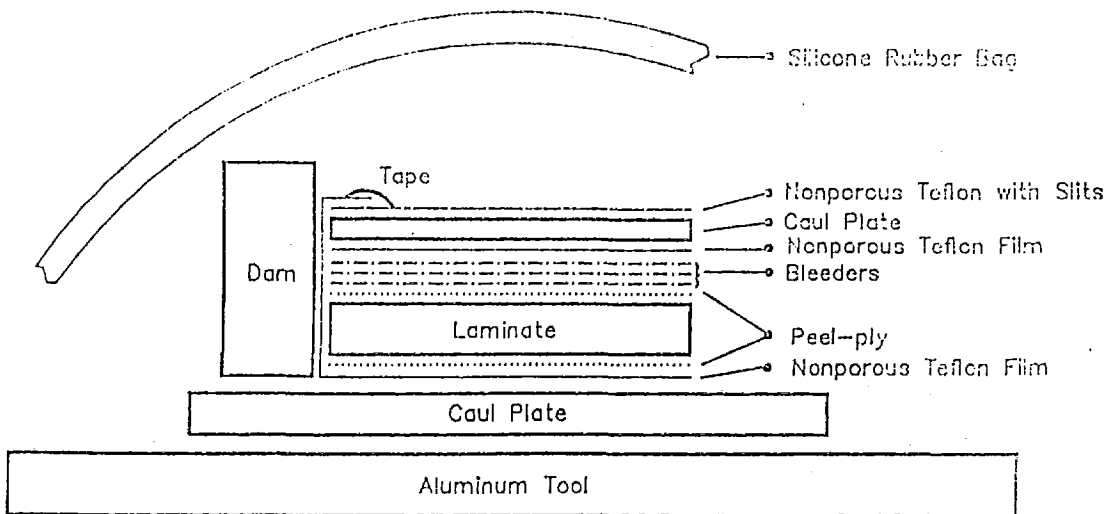


Fig. 1 Example of composites lay-up

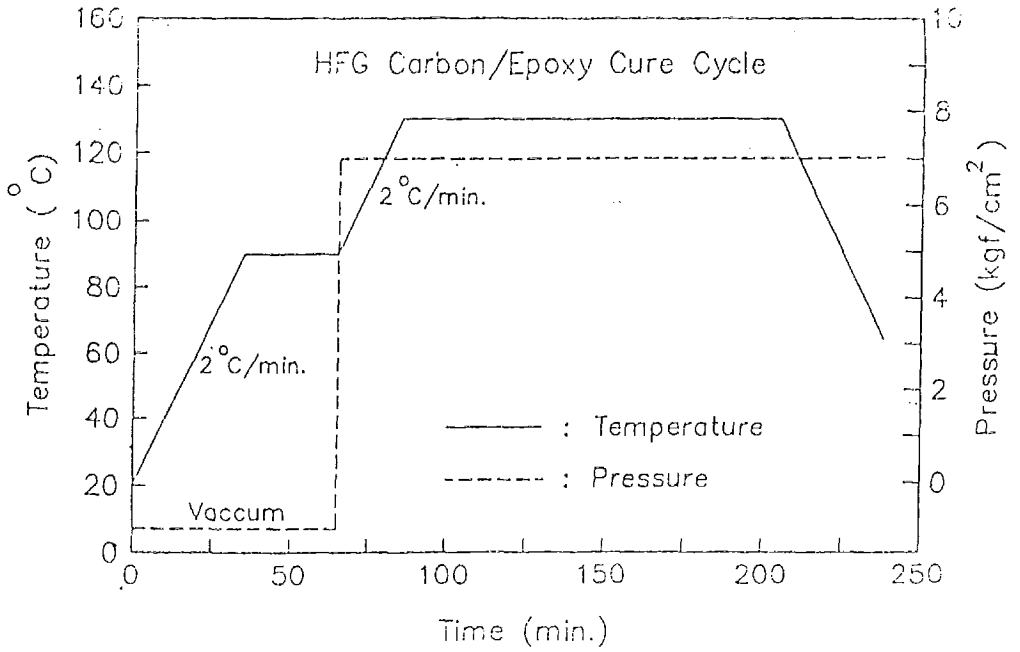


Fig. 2 Panel autoclave cure cycle for HFG graphite/epoxy composite

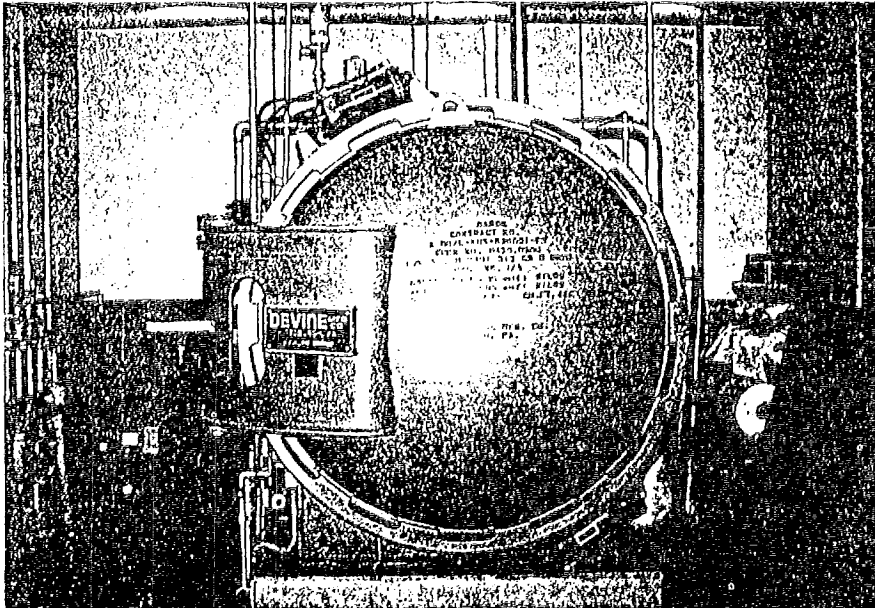


Fig. 3 Autoclave

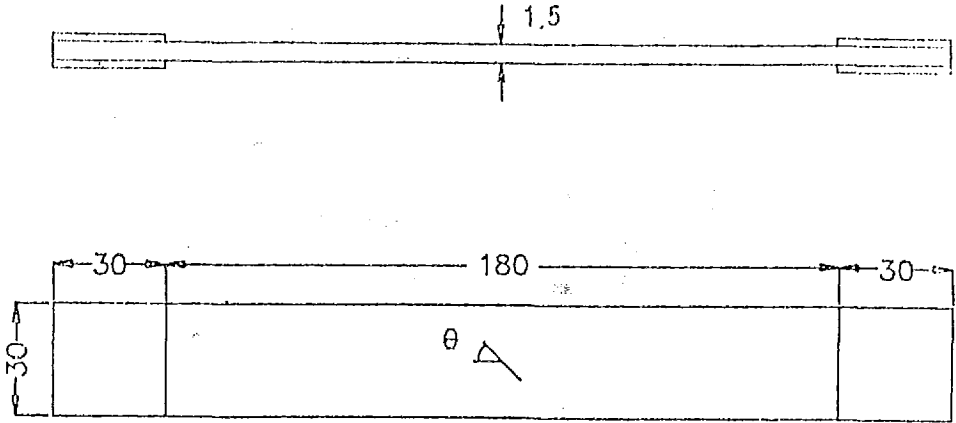


Fig. 4 Specimen geometry

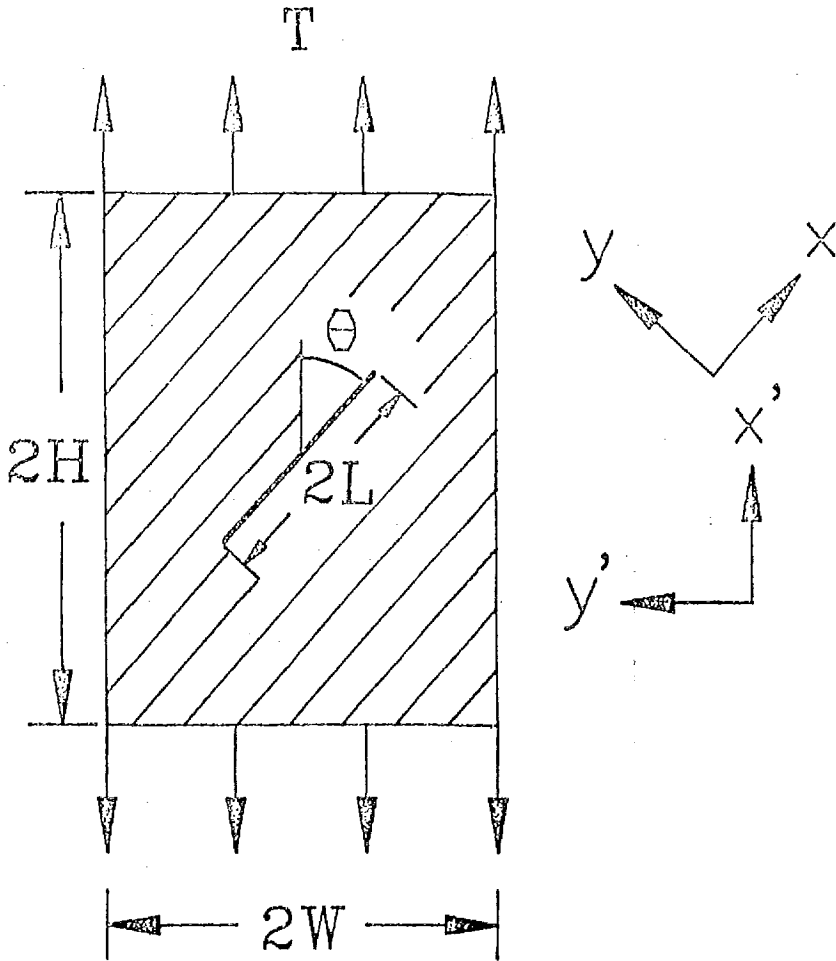


Fig. 5 Plate geometry

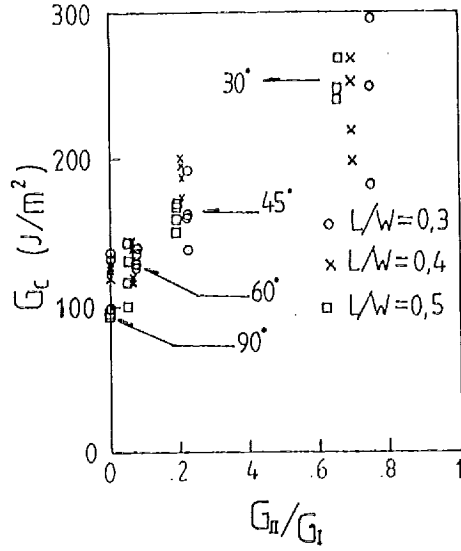


Fig. 6 Critical strain energy release rates of graphite/epoxy specimens for G_{II}/G_I

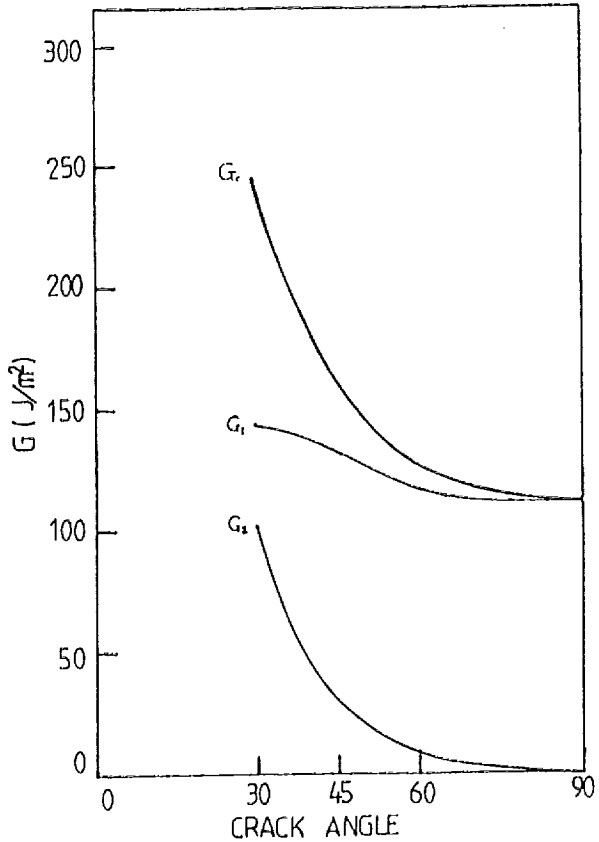


Fig. 7 Strain energy release rates of graphite/epoxy specimens for crack angles

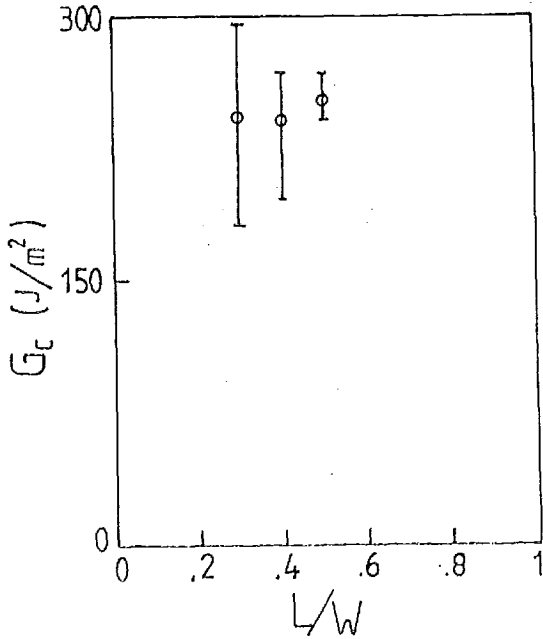


Fig. 8 Strain energy release rates of graphite/epoxy (30) specimens for crack lengths

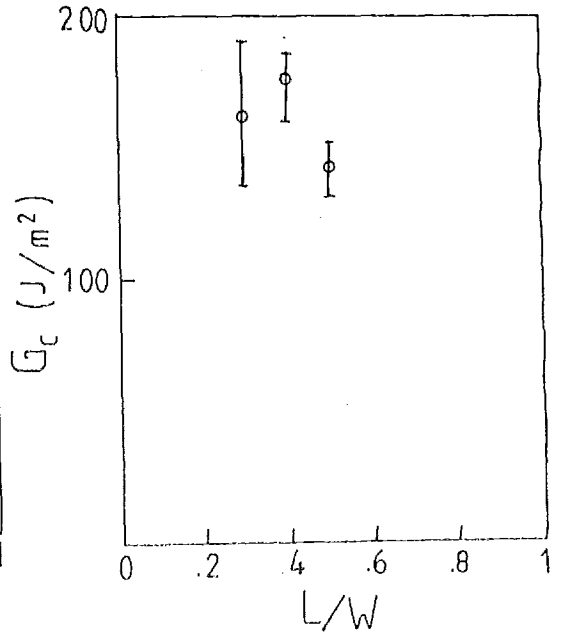


Fig. 9 Strain energy release rates of graphite/epoxy (45) specimens for crack lengths

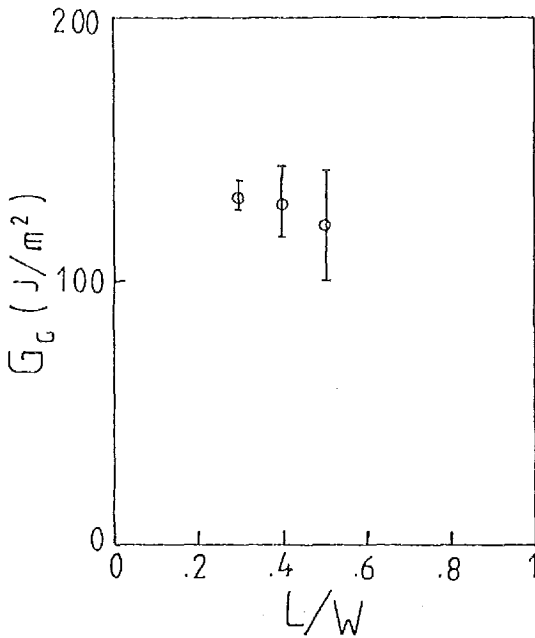


Fig. 10 Strain energy release rates of graphite/epoxy (60) specimens for crack lengths

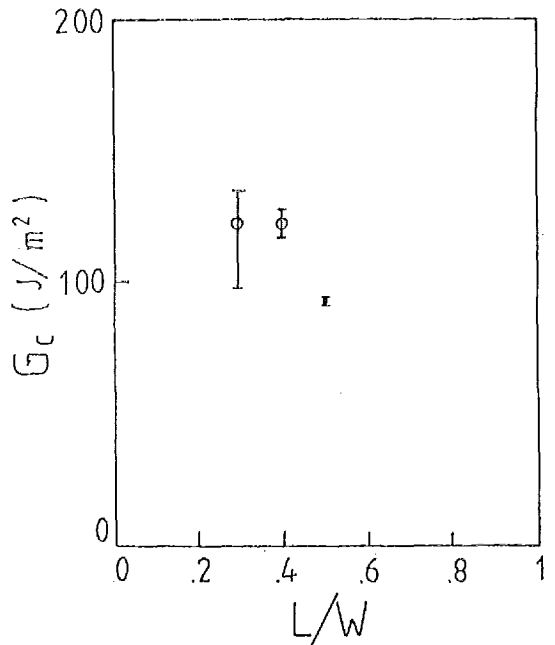


Fig. 11 Strain energy release rates of graphite/epoxy (90) specimens for crack lengths

CRACK PROPAGATION DIRECTION

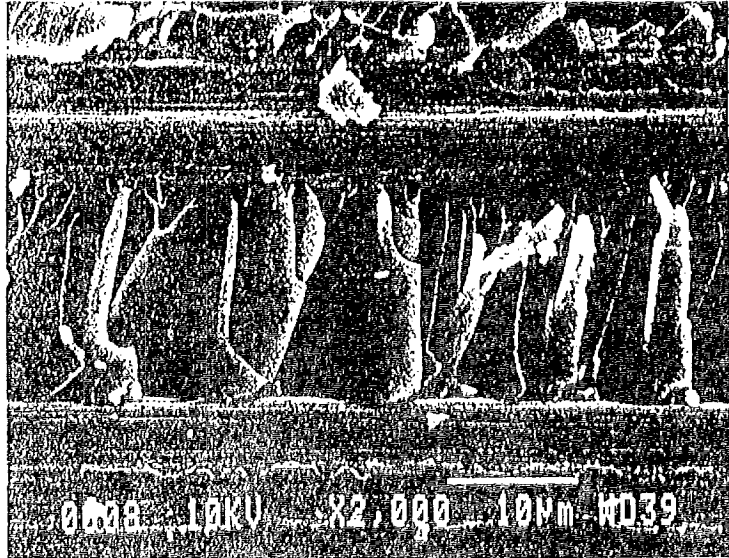


Fig. 12 Fracture surface geometry(30)

CRACK PROPAGATION DIRECTION

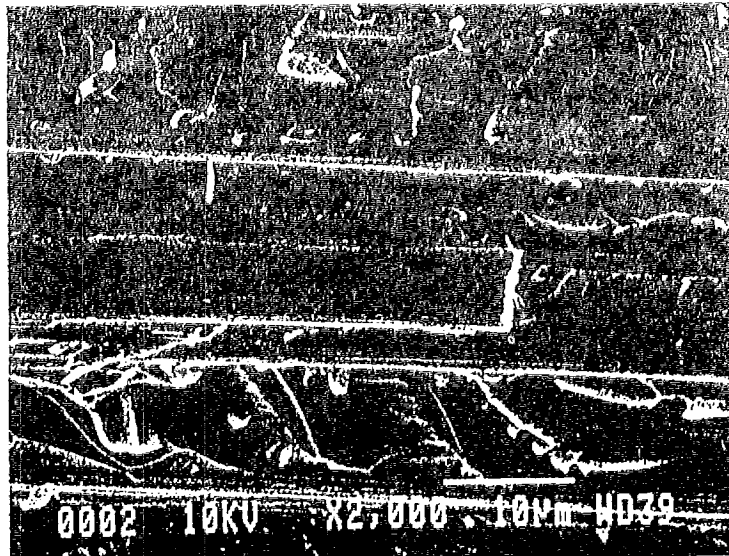
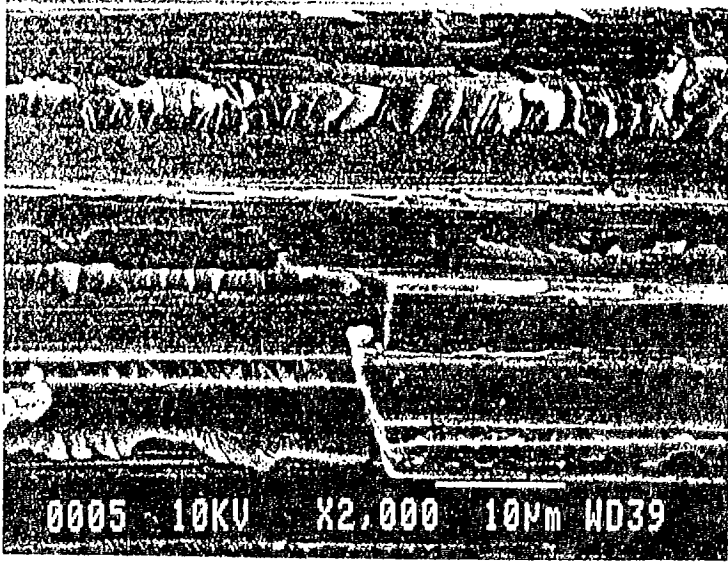


Fig. 13 Fracture surface geometry(45)

CRACK PROPAGATION DIRECTION

(a)



(b)

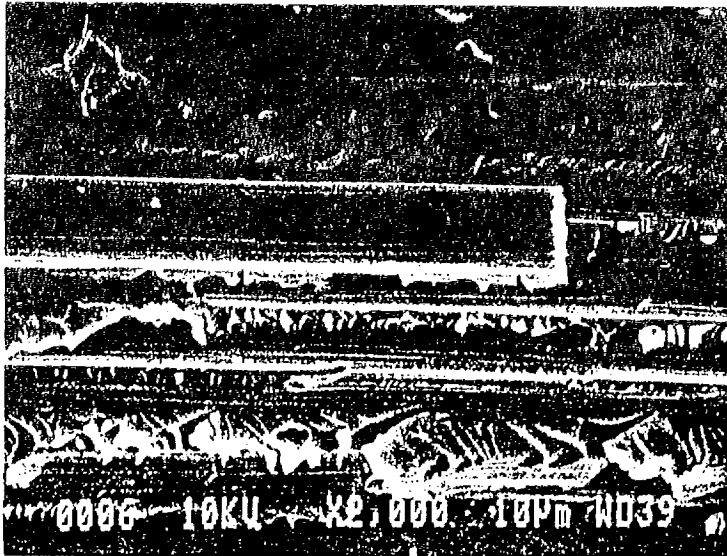
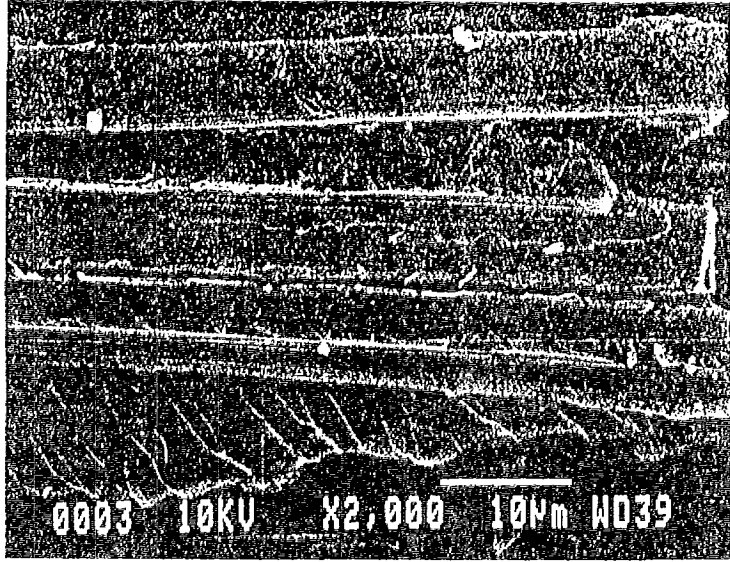


Fig. 14 Fracture surface geometry (90)

CRACK PROPAGATION DIRECTION

(a)



(b)

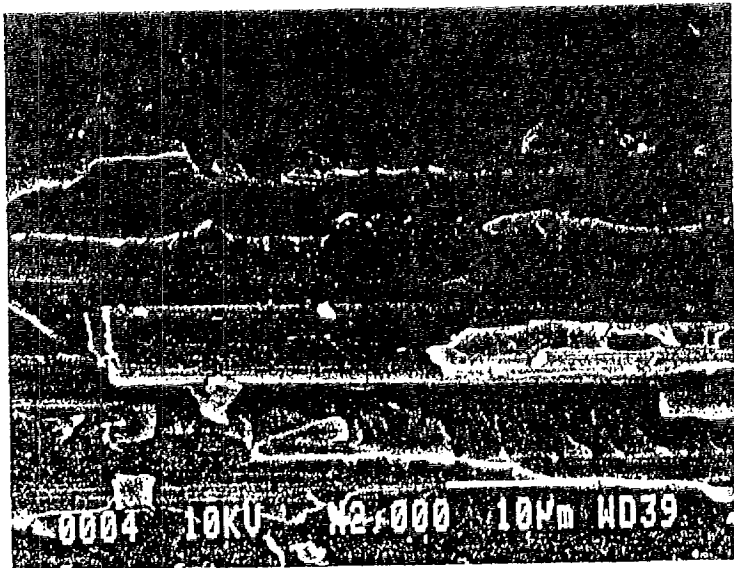


Fig. 15 Fracture surface geometry (60)