論文

# 탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파단면 고찰

윤성호* · 홍창선*

# Investigation of Interlaminar Fracture Surfaces in Graphite/Epoxy Composite Material under Mixed-Mode Deformations

Sung Ho Yoon* and Chang Sun Hong*

## ABSTRACT

In this study, interlaminar fracture toughness of graphite/epoxy composite material under mixed mode deformations was evaluated experimentally and fracture surfaces were investigated to obtain information on interlaminar fracture mechanism by means of a scanning electron microscope. An antisymmetric test fixture with interlaminar cracked specimen was employed. By rotating the loading angles, interlaminar fracture under mixed mode deformations was produced in which the direction of crack propagation and loading state at fracture were well defined. Morphology of fracture surfaces was sensitive to applied loading condition and provided an insight to estimate the state of stress at fracture.

## 초 록

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파괴인성을 실험적인 방법에 의해 평가하였으며 층간파괴 메카니즘에 관한 정보를 얻기 위해 전자현미경을 통한 파단면 양상을 조사하였다. 층간균열 시편이 부착된 비대칭 형상의 실험장치는 하중각도에 따른 다양한 혼합모우드 변형을 유발시키며 균열진전 방향과 파괴가 발생하였을 때의 하중상태를 잘 정의할 수 있는 층간파괴를 제공해 주기 때문에 작용된 하중상태에 따른 파단면 양상의 조사가 가능하였다. 관찰된 탄소섬유강화 복합재료의 층간파단면 양상은 작용된 하중상태에 따라 민감하게 변하며 파괴가 발생하였을 때의 응력상태를 예측할 수 있는 좋은 정보를 제공하여 주었다.

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서 론

탄소섬유강화 복합적층구조물은 탄소섬유들을 에폭시와 같은 기지에 함침시켜 만든 프리프레그 상태의 단층들을 원하는 강성과 강도 등의 기계적 특성을 갖도록 적절하게 적층한 다음 이를 규정된 경화싸이클에 따라 온도와 압력등을 작용시켜 줌으로써 제작하게 된다. 이와 같은 복합적층구조물은 강화섬유의 배열방향에 따라 이방성의 정도가 달라지며 강화섬유와 기지의 상호작용, 작용된 하중상태 등의 영향에 따라 파괴 양상이 매우 복잡하게 나타난다. 이들 파괴 양상은 그림 1에 보인 바와 같이 강화섬유에 수직방향으로 파괴가 발생하는 섬유의 횡방향 파단(Transfibrous fracture), 단층내에서 강화섬유에 평행하게 기지를 따라 파괴가 발생하는 층내 파단(Translaminar fracture) 그리고 단층과 단층 사이의 경계면에서 발생하는 층간 파단(Interlaminar fracture) 등으로 구분되며 기존의 등방성 재료와는 달리 기지의 균열, 강화섬유와 기지의 접착분리, 강화섬유의 파단 등과 같은 파괴현상들이 복합적으로 결합되어 발생한다. 특히, 강화섬유보다 훨씬 낮은 하중지지 능력을 가진 층간면은 적층구조물에서 가장 취약한 부분으로 재료 자체가 갖는 취

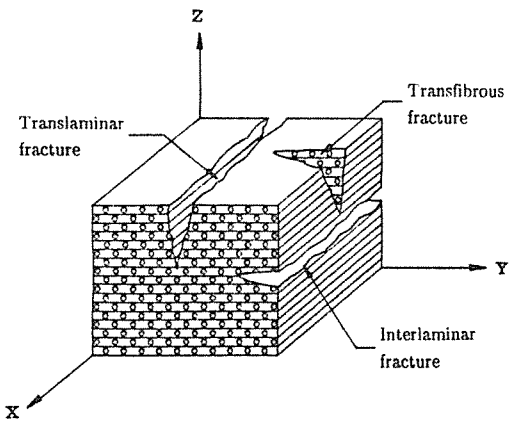



Fig. 1 Several fracture modes in laminated composite material

성등의 영향과 결부되어 급작스러운 균열진전을 유발할 가능성을 내재하고 있다.

탄소섬유강화 복합재료를 실제 구조물에 응용하기 위해서는 구조물의 안전성 관점에서 본 손상허용(Damage tolerance) 평가가 행해져야 하며 이를 위해서는 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성을 정량적으로 평가할 수 있는 적절한 방법의 제시가 필요하다[1—3]. 모우드 I 층간파괴인성의 평가는 층간균열 진전의 한계를 제시해 준다는 점에서 많은 연구가 수행되어 왔으며[4, 5] 모우드 II 층간파괴인성의 평가는 모우드 II 변형에 의한 층간파괴 뿐 아니라 혼합모우드 변형에 의한 층간파괴 거동을 예측할 수 있는 정보를 제시해 준다는 점에서 연구의 대상이 되어 왔다[6, 7]. 그러나 모우드 II 층간파괴인성의 평가방법은 모우드 I 층간파괴인성의 측정과는 달리 층간균열이 존재할 시편부위에 균일한 순수전단응력 영역이 형성되어 균열선단이 이 영역 안에 존재해야 한다는 조건을 만족시켜야 하는 어려움이 있다. 혼합모우드 층간파괴인성의 평가도 실제 구조물에서 발생하는 층간파괴 거동을 예측할 수 있는 정보를 제시해 준다는 점에서 중요하지만 현재에는 주로 모우드 I 과 모우드 II 층간파괴인성에 의한 경험적인 방법에 의해 혼합모우드 층간파괴 거동의 예측이 행해지고 있다[6, 8, 9]. 탄소섬유강화 복합재료를 실제 구조물의 일차 구조재료로 사용하기 위해서 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성들을 평가할 수 있는 적절한 방법과 층간파괴메카니즘이 규명되어야 한다.

최근들어 복합적층구조물이 하중을 받아 층간파괴가 발생할 경우의 파단면을 미시적으로 관찰함으로써 파단을 유발시킨 일련의 층간파괴 메카니즘을 조사하려는 시도가 행해지고 있다[10—12]. 파단면 양상에 의한 파괴메카니즘의 미시적인 연구는 1950년대부터 시작되어 주로 금속과 같은 등방성 재료에 대해 적용되어 균열형성의 근원, 균열진전의 방향, 파단면 양상과 파단을 유발시킨 작용하중과의 상호관계등 여러가지 정보들이 규명되었다. 탄소섬유강화 복합적층구조물에서의 층과 층의 경계면인 층간면, 섬유와 기지의 경계면 등은 작용된 하중상태에 따른 다양한 기지 변형이 발생하는 영역으로 하중상태에 따른 이 영역에서의 파단면을 관찰함으로써 작

용된 응력 상태에 대한 특유의 파단면 양상을 조사하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파괴인성을 평가할 수 있는 실험장치를 이용하여 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성을 실험적인 방법에 의해 평가하였으며, 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성 실험후의 파단된 시편에 대해 전자현미경을 이용한 파단면 관찰을 행함으로써 작용된 하중상태에 따른 특유의 파단면 양상을 조사하였다.

## 2. 층간파괴인성의 평가

혼합모우드 변형하의 층간파괴인성을 평가하기 위해 Arcan 등[13]이 제시한 비대칭 형상의 시편을 수정하여 그림 2와 같이 시편고정장치에 층간균열 시편이 부착된 비대칭 형상의 실험장치를 사용하였다. 이는 하중각도를 바꾸어가며 하중을 작용시킬 수 있기 때문에 하중경로에 따른 여러가지 상태의 혼합모우드 변형을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

비대칭 형상의 시편고정장치에 부착된 층간균열 시편이 하중각도가 $\theta$인 하중을 받아 층간파괴가 발생하였을 때의 혼합모우드 응력강도계수 $K_I$과 $K_{II}$는 실험장치의 기하학적 형상과 작용된 하중상태에 대해

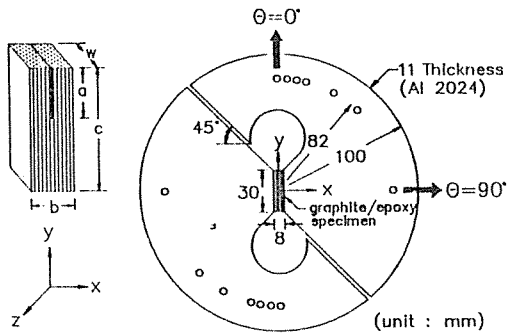



Fig. 2 Configuration of test fixture with interlaminar cracked specimen

$$K_I = \frac{P_c}{cw}\sin\theta\sqrt{\pi a}\ Y_I(a/c)$$

$$K_{II} = \frac{P_c}{cw}\cos\theta\sqrt{\pi a}\ Y_{II}(a/c) \quad \cdots\cdots (1)$$

와 같이 나타나며 여기에서 $P_c$는 파괴가 발생하였을 때의 임계하중, c는 시편의 길이, w는 시편의 두께, $\theta$는 하중각도, a는 균열길이를 나타낸다. $Y_I(a/c)$와 $Y_{II}(a/c)$는 사용한 실험장치의 기하학적 형상, 시편재료 등의 영향이 고려된 모우드 I과 모우드II 수정계수로서 균열길이비가 $0.3 \le a/c \le 0.7$인 범위에서[3]

$$\begin{aligned} Y_I(a/c) &= 7.53608 - 61.21942(a/c) + \\ &\quad 213.94717(a/c)^2 - 323.04497(a/c)^3 \\ &\quad - 194.43793(a/c)^4 \\ Y_{II}(a/c) &= -0.81550 + 12.39517(a/c) - \\ &\quad 32.83199(a/c)^2 + 39.26487(a/c)^3 \\ &\quad - 16.24160(a/c)^4 \quad \cdots\cdots (2) \end{aligned}$$

이다. 특히 하중각도가 0°인 모우드II 변형을 받아 층간파괴가 발생하였을 때의 모우드II 응력강도계수 $K_{II}$는 모우드II 임계응력강도계수 $K_{IIc}$가 되며 하중각도가 90°인 모우드 I 변형을 받아 층간파괴가 발생하였을 때의 모우드 I 응력강도계수 $K_I$은 모우드 I 임계응력강도계수 $K_{Ic}$로 정의된다. 에너지 방출율 $G_I$과 $G_{II}$는 균열방향진전(Self-similar crack propagation)이 발생하고 균열선단에서의 소성 영역이 매우 작아 선형탄성파괴 이론의 적용이 가능하므로 파괴가 발생하였을 때의 응력강도계수 $K_I$과 $K_{II}$ 그리고 사용한 재료의 재료상수들에 의해 [14]

$$G_I = K_I^2\left(\frac{1}{2E_1E_2}\right)^{1/2}\left[\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/2} - \nu_{12} + \frac{E_1}{2G_{12}}\right]^{1/2}$$

$$G_{II} = K_{II}^2\frac{1}{\sqrt{2}E_1}\left[\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/2} - \nu_{12} + \frac{E_1}{2G_{12}}\right]^{1/2} \quad \cdots\cdots (3)$$

와 같이 표현된다.

## 3. 실험방법

본 연구에서 사용한 비대칭 형상의 시편고정장치는 Al-alloy이고 층간균열 시편은 graphite/epoxy 프리프레그(두께 : 0.15mm)를 사용하였으며 이에 대한 재료상수는 표 1에 나타나 있다.

층간균열 시편은 그림 3과 같이 $[0]_{30}$과 $[0]_{30}$의 두 적층된 프리프레그 사이에 접착분리층을 형성시키기 위해 테프론 필름(두께 : 0.012mm)를 넣어 층간균열을 만든 다음 경화싸이클에 따라 Panel Autocalve로 성형하였으며 성형된 적층판은 시편의 크기에 맞게 다이아몬드 휠로 절단한 다음 FM-73 접착필름을 이용하여 시편고정장치에 부착시켰다. 층간균열 시편이 부착된 비대칭 형상의 실험장치는 그림 4와 같이 Instron(Model 1350)에 장착한 다음 하중각도를 바꾸어가며 원하는 혼합모우드 하중을 가함으로써 층간파괴 실험을 행하였다. 실험은 동적 영향을 줄이기 위해 0.2mm/min 하의 변위제어 상태에서 행하였으며 하중-변위 곡선을 그려 파괴가 일어난 순간의 임계하중에 의해 층간파괴인성을 평가하였다.

또한 파단을 유발시킨 응력상태에 대한 특유의 파단면 양상을 조사하기 위하여 전자현미경을 이용하여 층간파단 실험후의 파단면을 관찰하였다. 사용한 전자현미경은 ISI-SX-30E Scanning Electron Microscope이며 최적 화상을 얻기 위해 파단면의 표면을 200-300 Å의 금막처리를 하였고 시편의 경사 각도는 0°이며 가속전압은 25KV로 하였다.

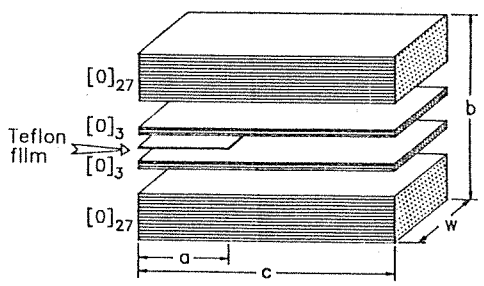



Fig. 3 Configuration of graphite/epoxy composite specimen

Table 1. Material properties used for this study

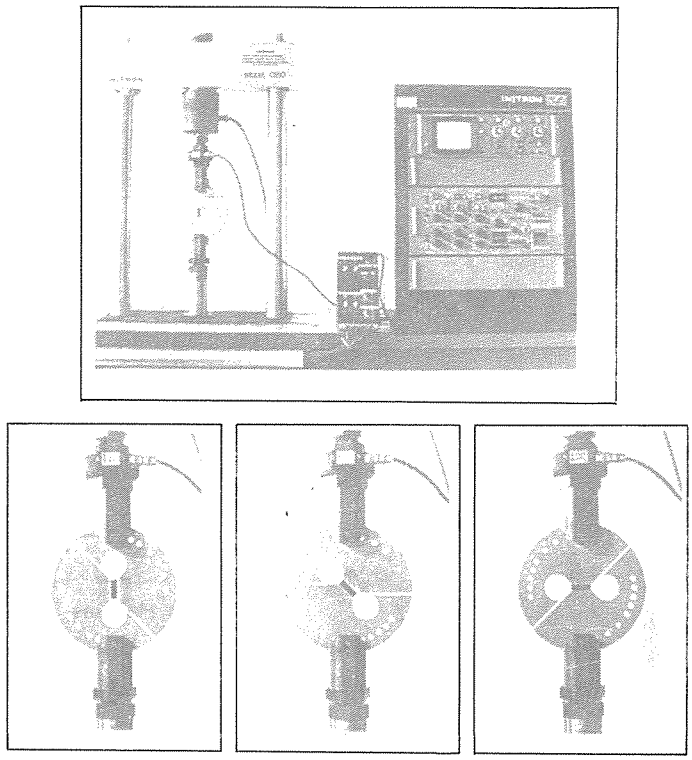
| | | |
|---|---|---|
| **Graphite/Epoxy composite** | | |
| $E_1$ | 135 | GPa |
| $E_2$, $E_3$ | 11 | GPa |
| $G_{12}$ | 5.41 | GPa |
| $\nu_{12}$, $\nu_{13}$ | 0.34 | |
| $\nu_{23}$ | 0.52 | |
| $V_f$ | 71.7 | % |
| **Al-alloy 2024** | | |
| E | 73 | GPa |
| G | 27.6 | GPa |
| $\nu$ | 0.3 | |

1 : Direction parallel to fiber.
2,3 : Direction transverse to fiber.
$V_f$ : Fiber volume fraction.

## 4. 실험결과 및 고찰

그림 5는 탄소섬유강화 복합재료의 하중각도에 따른 혼합모우드 에너지방출율을 나타낸 것으로 모우드 I 에너지방출율은 하중각도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하다가 15° 보다 큰 하중각도에서는 하중각도에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 나타낸다. 모우드 II 에너지방출율은 하중각도가 증가함에 따라 급격히 감소하여 30° 보다 큰 하중각도에서는 전체 에너지방출율에 대한 모우드 II 에너지방출율의 비율은 낮아진다. 하중각도에 따른 전체 에너지방출율의 변화는 하중각도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 비대칭 형상의 실험장치를 이용하면 하중각도에 따른 여러가지 상태의 혼합모우드 변형을 얻을 수 있을 뿐 아니라 각 혼합모우드 변형에 대한 층간파괴 메카니즘의 미시적 관찰이 가능하다.

그림 6은 층간균열을 가진 탄소섬유강화 복합재료 시편이 하중각도가 0°인 모우드 II 변형을 받아 파단된 경우의 파단면 양상을 전자현미경을 이용하여 관



(a) Mode Ⅱ test (b) Mixed mode test (c) Mode Ⅰ test

Fig. 4 Overview of test set-ups

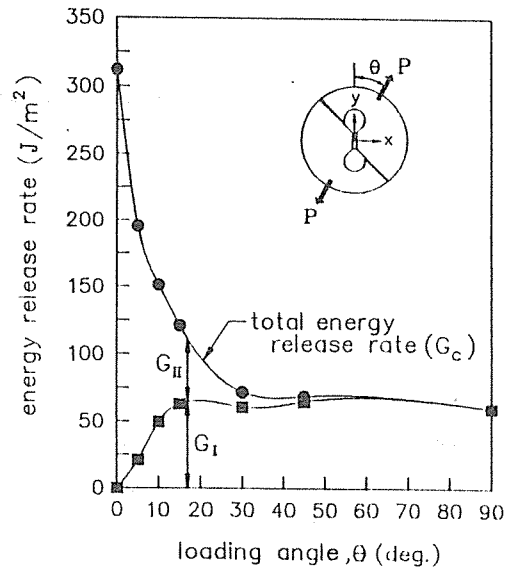
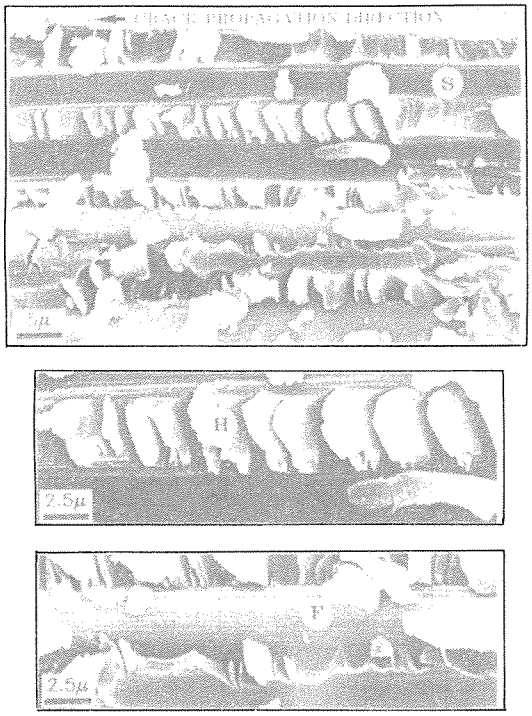



Fig. 5 Variations of mixed mode fracture toughness with various loading angles

찰한 것으로 이 때 평가된 층간파괴 인성은 312.01 J/m² 이다. 여기에서 보면 넓은 영역에 걸쳐 hackle 과 같은 심한 기지변형이 지배적으로 발생하며 섬유과 기지 사이의 접착분리 현상도 관찰된다. 특히 전단응력 성분에 의한 기지변형인 hackle은 인접해 있는 평행한 섬유 사이에서 섬유방향에 수직하게 생기고 동일한 파단면 내에서는 균일한 경사방향을 갖는다.

그림 7에서는 전단응력에 의한 기지변형을 나타낸 것으로 hackle과 조개껍질 형상의 오목한 파단면인 scallop이 관찰된다. 이들은 S자 형태로 발생하는 전단 변형하의 대표적인 파단면 양상으로 hackle과 조개껍질 형상의 오목한 파단면은 서로 한 쌍을 이루며 형성된다.

그림 8은 하중각도가 0°인 모우드Ⅱ 변형을 받아 형성된 hackle을 고배율(×5000)로 관찰한 것이다. (a)에서는 균일진전과 반대 방향으로 hackle의

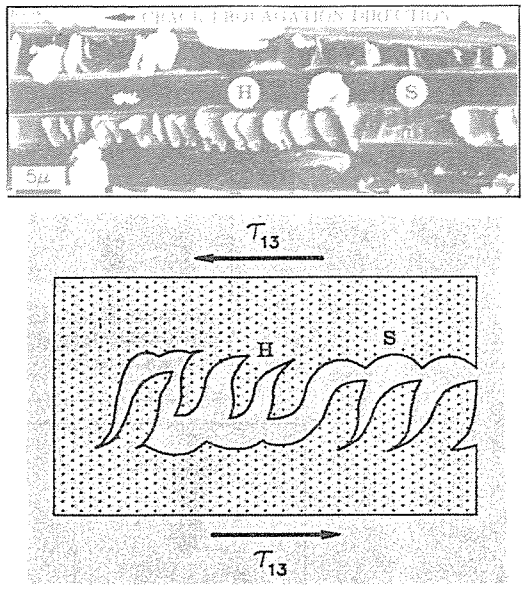



(F) : Fiber/Matrix separation
(H) : Hackles
(S) : Scallops

Fig. 6 Typical fracture suface of graphite/epoxy composite in mode II loading condition ($G_c$=312.01 J/m²)

경사가 생기며 (b)와 (c)는 (a)의 상대 파단면으로 균열진전과 동일한 방향으로 hackle의 경사가 생긴다. 형성된 hackle은 양쪽 파단면 모두에서 관찰이 가능하지만 상대 파단면에 대해서는 서로 다른 반대 방향의 hackle 경사가 생긴다. 따라서 hackle의 경사방향에 의해서는 균열진전 방향을 예측하기는 어렵다. 또 (b)와 (c)에서 보면 인접해 있는 섬유의 간격에 의해 hackle의 크기가 달라진다.

그림 9는 하중각도가 90°인 모우드 I 변형을 받아 파단된 경우의 파단면 양상으로 이때 평가된 층간파괴인성은 60.02J/m² 이다. 이 경우의 파단면 양상을 조사해 보면 모우드 II 변형과는 달리 수직응력이 최대 주응력으로 되어 섬유에 나란한 기지의 벽개현상이 지배적으로 나타나며 대체로 평탄한 기지의 파괴가 주를 이룬다. 또한 적층판의 성형시에 발




(H) : Hackles (S) : Scallops

Fig. 7 Schematic illustration of hackle formation mechanisms

생한 fiber-bridging 현상에 의한 섬유의 파단도 관찰된다.

그림 10은 하중각도가 10°인 혼합모우드 변형을 받을 때의 파단면 양상으로 전체 에너지방출율은 151.26J/m²으로 평가되었다. 이 경우도 작용된 전단응력 성분에 의해 균일한 경사방향을 갖는 hackle을 관찰할 수 있지만 수직응력 성분과의 복합적 작용으로 인해 모우드II 변형하에서 보다 비교적 완만한 hackle 경사각도를 갖는다. 따라서 hackle의 경사각도는 파단을 유발시키는데 기여한 전체 응력에 대한 전단응력 성분의 크기를 판단할 수 있는 정보를 제공해 준다.

그림 11은 하중각도가 45°인 혼합모우드 변형을 받을 때의 파단면 양상으로 평가된 전체 에너지방출율은 68.89J/m² 이다. 여기에서는 모우드 I 변형 성분에 의한 기지의 벽개현상이 관찰되며 성형시에 발생한 fiber-bridging 현상에 의한 섬유의 파단 양상도 관찰된다. 특히 섬유와 기지의 경계면에서 관찰되는 미세균열 응집현상은 섬유와 기지의 경계면에서의 접착상태가 양호한 경우에 주로 발생하며 접

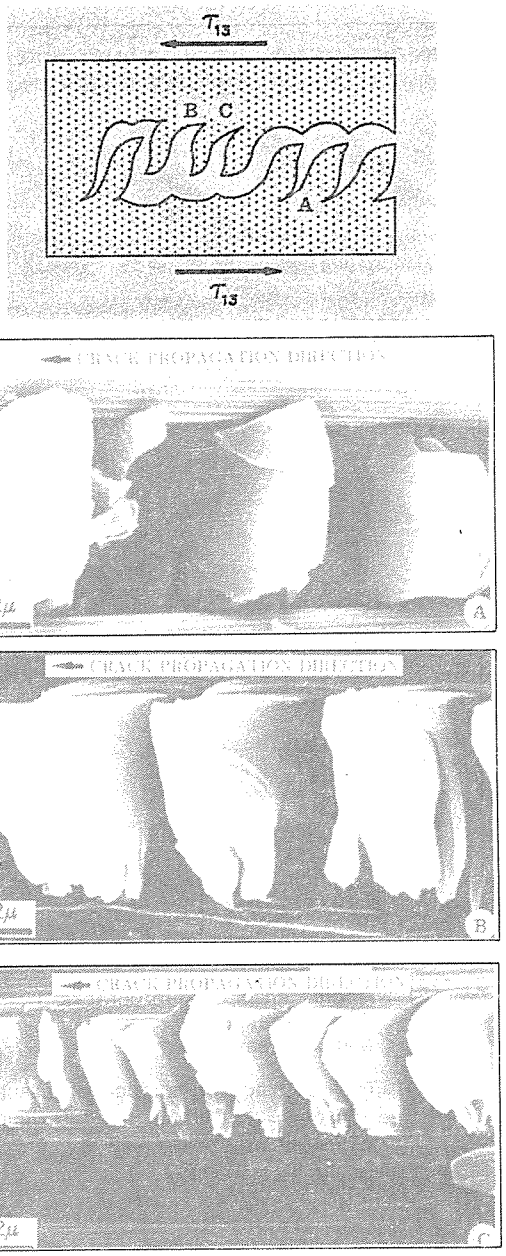
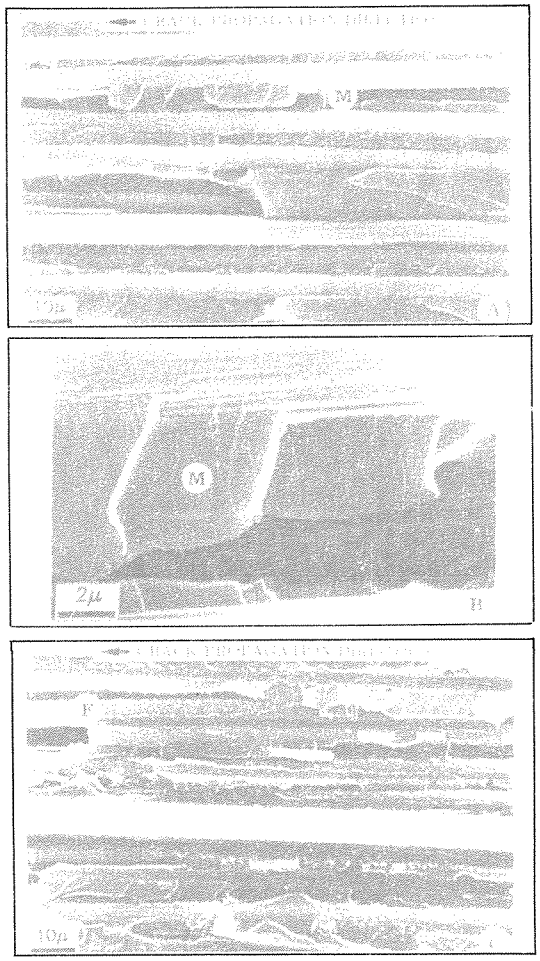



Fig. 8 Enlarged view of hackles in mode II loading condition showing sigmoidal shape of hackle formation (x5000)




(F) : Fiber breakage (M) : Matrix cleavage

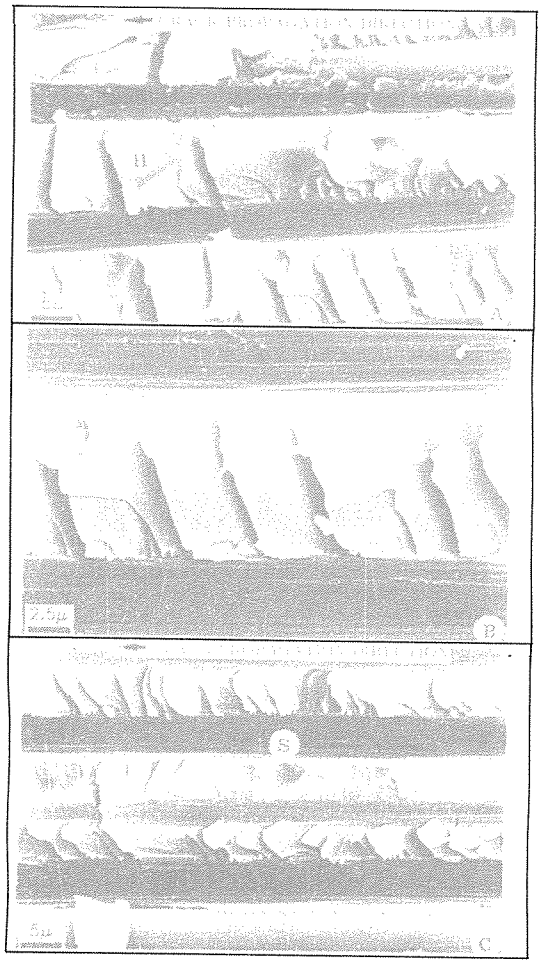
Fig. 9 Typical fracture surface of graphite/epoxy composite in mode I loading condition ($G_C$=60.02 J/m²)

착상태가 좋지 않은 경우에는 섬유와 기지 사이의 접착분리 현상으로 나타난다. 따라서 이와 같은 섬유와 기지의 경계면에서의 미세균열 현상은 섬유와 기지의 접착상태를 판단할 수 있는 정보를 제시하여 준다.

## 5. 결 론

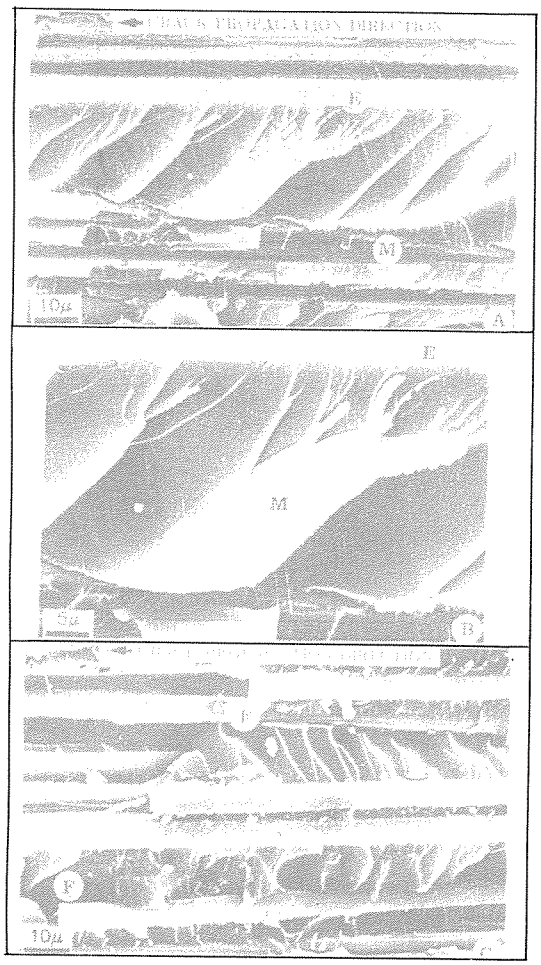
층간균열 시편이 부착된 비대칭 형상의 실험장치는 균열진전 방향과 파괴가 발생하였을 때의 하중상태가 잘 정의된 층간파괴를 제시해 주며 이를 이용한 층간파괴인성 평가와 파단면 고찰에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(a) 비대칭 형상의 실험장치는 하중각도에 따라




(H) : Hackles (S) : Scallops

Fig. 10 Typical fracture suface of graphite /epoxy composite in 10° loading condition ($G_C$=151.26 J/m²)




(E) : Coalescence of microcracks
(F) : Fiber breakage
(M) : Matrix cleavage

Fig. 11 Typical fracture surface of graphite /epoxy composite in 45° loading condition ($G_C$=68.82 J/m²)

모우드 II 층간파괴인성, 모우드 I 층간파괴인성 뿐 아니라 넓은 범위의 혼합모우드 층간파괴인성의 평가가 가능하였다.

(b) 전단변형의 대표적인 파단면 양상으로는 hackle과 조개껍질 형상의 오목한 파단면인 scallop이 관찰되며 이들은 한 쌍을 이루어 나타난다.

특히 hackle의 크기, 경사방향, 경사각도 등은 층간파괴 메카니즘에 대한 좋은 정보를 제시해 준다.

(c) 층간파단면 양상은 작용된 하중상태에 따라 민감하게 변하며 파괴가 발생하였을 때의 응력상태를 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1987년도 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업 "복합재료를 이용한 경량구조물의 강도설계기법 개발"의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 준 과학기술처 관계자 제위에게 감사드립니다.

## 참고문헌


1. Jurf, R.A. and Pipes, R.B., "Interlaminar Fracture of Composite Materials," J. Comp. Mat., Vol. 16, 1982, pp.386-394.
2. Hong, C.S. and Yoon, S.H., "Interlaminar Fracture Characteristics of Graphite/Epoxy Composite Materials," Proc. 2nd Conference of Asian-Pacific Congress on Strength Evaluation, Seoul, 1986, pp.149-154.
3. Hong, C.S. and Yoon, S.H., "Interlaminar Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composite under Mixed Mode Deformations," Proc. VI Int. Congress on Experimental Mechanics, Society for Experimental Mechanics, Portland, Oregon, 1988.
4. Wilkins, D.J., Eisenmann, J.R., Camin, R.A., Margolis, W.S., and Benson, R.A., "Characterizing Delamination Growth in Graphite-Epoxy," Damage in Composite Materials, ASTM STP 775, 1982, pp.168-183.
5. Johnson, W.S. and Mangalgiri, P.D., "Investigation of Fiber Bridging in Double Cantilever Beam Specimens," J. Comp. Tech. Res., Vol. 9, 1987, pp.10-13.
6. Russell, A.J. and Street, K.N., "Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy," Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, 1985, pp.349-370.
7. Carlsson, L.A., Gillespie, J.W.Jr., and Pipes, R.B., "On the Analysis and Design of the End Notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing," J. Comp. Mat., Vol. 20, 1986, pp.594-604.
8. Wu. E.M., "Application of Fracture Mechanics to Anisotropic Plates," J. Appl. Mech., Vol. 34, 1967, pp.967-974.
9. Hahn, H.T., "A Mixed-Mode Fracture Criterion for Composite Materials," Comp. Tech. Rev., Vol. 5, 1983, pp.26-29.
10. Liechti, K.M., Masters, J.E., Ulman, D.A., and Lehman, M.W., "SEM/TEM Fractography of Composite Materials," AFWAL-TR-82-4085, 1982.
11. Smith, B.W., Grove, R.A., and Munns, T.E., "Fractographic Analysis of Interlaminar Fractures in Graphite-Epoxy Material Structures," Proc. Inter. Conf.: Post Failure Analysis Techniques for Fiber Reinforced Composites, AFWAL/MLSE, Dayton, OH, 1985.
12. Arcan, L., Arcan, M., and Daniel, I.M., "SEM Fractography of Pure and Mixed-Mode Interlaminar Fractures in Graphite/Epoxy Composites," Fractography of Modern Engineering Materials, ASTM STP 948, 1987, pp.41-67.
13. Arcan, M., Hashin, Z., and Voloshin, A., "A Method to Produce Uniform Plane-Stress States with Applications to Fiber-Reinforced Materials," Experimental Mechanics, Vol. 18, 1978, pp.141-146.
14. Sih, G.C. and Liebowitz, H., "Mathematical Theories of Brittle Fracture," Fracture, An Advanced Treatise, II, Academic Press, New York, 1968.