

# CFRP 복합재료의 혼합모드 I/II 층간파괴인성치에 관한 연구

## A Study on Mixed Mode I/II Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites

김형진 · 박명일 · 김재동 · 고성위

H. J. Kim, M. I. Park, J. D. Kim and S. W. Koh

**Key Words** : Mixed Mode(혼합모드), Interlaminar Fracture Toughness(층간파괴인성치), Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP), Molding Pressure(성형압력), R-curves(R-곡선)

**Abstract** : This paper describes the effect of molding pressure, specimen geometries for Mixed Mode I/II interlaminar fracture toughness of carbon fiber reinforced plastic composites by using asymmetrical double cantilever beam(ADCB) specimen. The value of  $G_{IIIC}$  as a function of various molding pressure is almost same at 307, 431, 585 kPa. However it shows the highest value under 307 kPa molding pressure. The effect of  $G_{IIIC}$  due to the change of initial crack length of ADCB specimen was almost negligible in this study. It turns out that the condition for mix mode quasi-static crack growth in ADCB specimen is the ratio of the crack length to that of the specimen, i.e.,  $a/L < 0.4$ .

### 1. 서론

적층형 복합재료의 가장 일반적인 수명한계 손상 모드는 층간 분리이며, 이것은 층과 층 사이의 기지층에서 성장한다. 일반 구조물에서 층간분리는 제조중이나 실제 구조물 사용시 정적 혹은 피로부하에 의해서 일어나며, 이러한 현상은 재료의 강성, 강도 저하의 원인이 되고 구조물의 급격한 파손을 야기한다. 따라서 섬유강화 복합재료의 층간분리 저항의 신뢰성 있는 값을 얻는 것은 복합재료의 구조물 설계 시 가장 중요한 부분이며, 그동안 층간결합의 파괴현상을 규명하기 위하여 모드 I 과 모드 II 임계에너지 방출률에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

층간파괴현상 중 모드 I 임계에너지 방출률은 대부분 DCB(double cantilevers beam) 시험편<sup>1)</sup>를 이용하고 있으며, 모드 II 임계에너지 방출률은 ENF(end notched flexures) 시험편<sup>2)</sup> 과 ELS(end loaded split) 시험편<sup>3)</sup>이 이용되고 있다. 또한 혼합모드 임계에너지 방출률에는 ADCB(asymmetrical

double cantilevers beam) 시험편이 제시되고 있다.

이러한 다양한 시험법들은 ASTM<sup>4)</sup>, EFG(Polymer and Composite task Group of the European Group on Fracture)<sup>5)</sup> 등에 의하여 규격화가 진전되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국산 CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 관한 종합적인 연구의 일환으로 모드 I 층간파괴인성치<sup>6)</sup>, 모드 II의 하중을 받는 ENF 시험편<sup>7)</sup> 및 ELS 시험편<sup>8)</sup>에 이어서 혼합모드 하중을 받는 ADCB 시험편을 이용하여 초기크랙길이 및 성형압력 변화에 따른 층간파괴인성치  $G_{IIIC}$ 를 상호비교 검토하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

#### 2.1 재료

실험에 사용한 재료는 일방향 Carbon fiber/epoxy 프리프레그(한국화이버(주) HCU 100NS)를 실험실에서 24플라이(ply)로 적층성형하여 제작하였으며, 일정한 섬유함유율과 제품치수의 변동을 억제하며 필요 이상의 수지가 낭비되지 않도록 제작한 금형(250mm×250mm)을 사용하여 복합재료판을 성형하였다. 경화온도는 130℃ 경화시간은 90분으로 하였고 성형압력은 307, 431, 585 kPa로 변화

접수일 : 2000년 6월 14일  
김형진 : 경상대학교 수송기계공학부/해양산업연구소  
박명일 : 경상대학교 대학원  
김재동 : 경상대학교 해양산업연구소  
고성위 : 부경대학교 기계공학부

시켰으며, 적층시 알루미늄 포일 (Al foil : 두께 30  $\mu\text{m}$ )을 12플라이와 13 플라이 중간에 삽입하여 초기 크랙을 형성하였다.

성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 Fig. 1과 같이 소요의 시험편 모양으로 가공하였다. 가공이 끝난 ADCB 시험편은 만능시험기 (Instron, 용량 5ton)를 사용하여 실험을 행하였다. 크랙길이는 시험편 양면에 수정액을 칠한 후 4mm마다 눈금을 표시하고 각 표시점에 도달할 때 마다 부하와 제하를 되풀이 하였고 이때 이동 측정현미경을 사용하여 초기크랙에서 균열선단까지 직선거리를 양면에서 측정하여 평균길이를 크랙길이라고 하였다. 초기크랙길이의 영향을 조사하기 위하여 시험편길이 100mm, 시험편 폭 20mm로 고정하고 초기크랙길이를 25, 30, 40, 50mm로 변화시켜 파괴인성치에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 성형압력의 영향은 307, 431, 585 kPa의 성형압력으로 제작된 시험편을 시험편길이 100mm, 시험편 폭 20mm, 초기크랙길이 50mm의 동일조건에서 시험하였다.

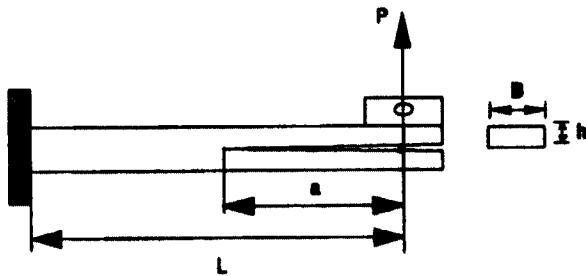


Fig. 1 Specimen geometry(B=20mm, L=100mm, h=2.6mm)

## 2.2 층간파괴인성치 계산 방법

### 2.2.1 단순보 이론에 의한 방법

단순 보 이론에 의하여 모드 I과 모드 II의 에너지 방출률,  $G_{IC}^m$ 와  $G_{IIc}^m$  를 쓰면 다음과 같다<sup>5)</sup>

$$G_{IC}^m = \frac{P^2 a^2}{4BE_f I} = \frac{3P^2 a^2}{B^2 E_f h^3} \quad (1)$$

$$G_{IIc}^m = \frac{3P^2 a^2}{16BE_f I} = \frac{9P^2 a^2}{4B^2 E_f h^3} \quad (2)$$

따라서

$$G_{I/IIc} = G_{IC}^m + G_{IIc}^m \quad (3)$$

여기서  $G_{IC}^m$  과  $G_{IIc}^m$ 은 각각 혼합모드 층간파괴

인성치  $G_{I/IIc}$ 의 모드 I과 모드II의 분할 값이다. 한편 E의 값은 시험편길이 100mm, 두께 2.6mm 초기크랙이 없는 시험편에 3점 굽힘시험을 실시하여 부하 P와 변위  $\delta$ 를 탄성하중변위 안에서 측정하여 계산하였다.

### 2.2.2 컴플라이언스법

컴플라이언스법은 층간파괴인성치를 구하는 실험적인 방법으로서 여러 가지 크랙길이에 대응하는 컴플라이언스를 구하고 이들의 관계를 구하기 위하여 다항식으로 나타내는 방법이다. 실험결과로 나타난 C와 a를 다항식으로 이용하여 고전적인 보 이론에서 3차항으로 한다<sup>9)</sup>. 실험에서 크랙길이를 측정하고 그에 상응하는 컴플라이언스를 구하여 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$C = C_0 + ma^3 \quad (4)$$

여기서  $C_0$ 은 정수이고, m은 C와  $a^3$ 의 기울기이다. 따라서 에너지 방출률  $G_{I/IIc}$ 는 다음과 같다

$$G_{I/IIc} = \frac{3P^2 ma^2}{2B} \quad (5)$$

Fig. 2는 시험편길이 100mm, 초기크랙길이 50mm, 폭 20mm, 두께 2.6mm, 하중점 변위를 2mm/min의 ADCB 시험편에서 얻어진 컴플라이언스  $C^{1/3}$ 와 크랙길이 a의 관계를 나타낸 것이다. ADCB 시험편은 일반적으로 안정적인 파괴형태를 나타내기 때문에 일정한 크랙길이에 따라 제하와 부하를 반복하므로써 하나의 시험편에서 연속적인 P- $\delta$ 를 구할 수 있다.

본 실험에서 얻어진 결과는 그림에서 보는 바와 같이 비교적 선형화가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 따라서 여기에서 구한 기울기 m을 식 (5)의 값으로 적용할 수 있다. 이러한 방법으로 각 시험편 마다 m의 값을 구할 수 있다.

식(5)에서 얻어진 값은 혼합모드 에너지 해방률 전체의 값이다. 따라서 모드 I, 모드 II의 값으로 나눌 수 있고, 이 비율은  $G_{IC}/G_{IIc} = 4/3$ 이다<sup>5)</sup>.

따라서

$$G_{IC}^m = 0.57 (G_{I/IIc}) \quad (6)$$

$$G_{IIc}^m = 0.43 (G_{I/IIc}) \quad (7)$$

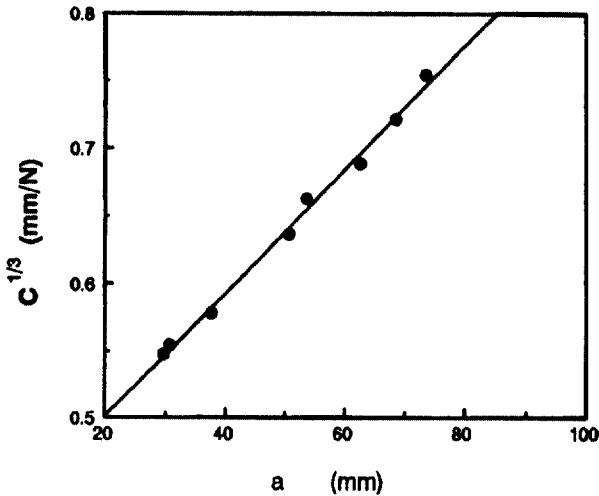


Fig. 2  $C^{1/3}$  versus  $a$  for the ADCB specimen  $B=20\text{mm}$ ,  $L=100\text{mm}$ ,  $a_0=50\text{mm}$ , loading rate= $2\text{mm/min}$ )

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 하중-변위선도

Fig. 3은 전형적인 혼합모드 I/II ADCB 시험편에 대한 하중-변위 선도이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 거의 최대 하중에서 크랙이 시작되고 초기 노치에서 갑작스러운 국부적 불안정 균열발생에 해당하는 pop-in 발생 후 대체로 준 안정균열성장(quasi-static crack growth)이 지속되다 최종 파단에 이르는 거동을 보이고 있다. 이러한 파괴거동은 참고문헌(6)에서 초기크랙길이/리가먼트가 25/75의 시험편에서 나타나는 준 안정균열성장과 동일한 결과로서 본 실험에서는 대체로  $a_0/L < 0.4$ 에서 일어났다.  $a_0/L > 0.4$ 의 시험편에서는 대부분 안정균열 성장을 나타내었으며 하중-변위곡선은 대부분 선형을 나타내었고 하중-제하 거동도 탄성범위내의 형태이며 시험이 끝난 시험편에서 소성변형의 흔적도 찾을 수 없었다. 따라서 하중  $P$ 와 여기에 해당하는 크랙길이  $a$ 의 측정으로 혼합모드 층간파괴인성치에서 나누어진 모드 I과 모드 II, 즉  $G_{IC}^m$  과  $G_{IIC}^m$  으로 각각 나눌 수 있고, 식(1)와 식(2)를 이용하여 계산한다. 혼합 모드 층간파괴인성치  $G_{IIIC}$ 는 식(1)과 식(2)의 합으로 구할 수 있다.

한편 실험적 컴플라이언스법은 컴플라이언스  $C$ 와 크랙길이  $a^3$ 의 경사도를 최소자승법으로 구하고, 이들의 기울기  $m$ 을 식(5)에 대입하는 방법을 사용하였다. 여기서 얻은 값은 에너지 해방률 전체의

값이므로  $G_{IC}^m$ 과  $G_{IIC}^m$ 으로 나누기 위하여 식(6), 식(7)을 사용하였다.

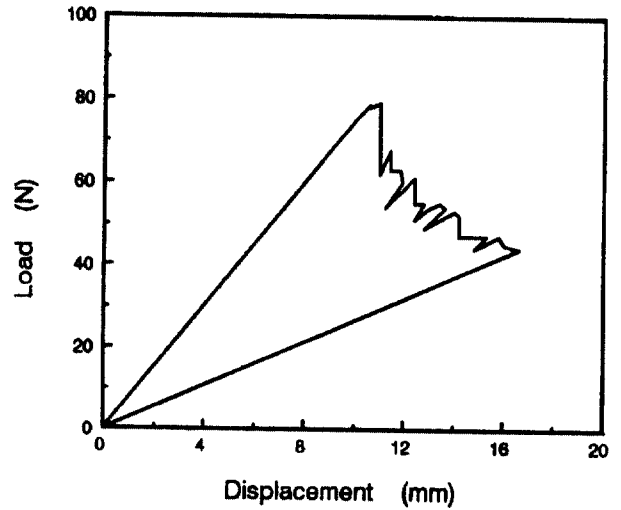


Fig. 3 Typical load - displacement curve for the mixed mode ADCB specimen ( $B=20\text{mm}$ ,  $L=100\text{mm}$ ,  $a_0=30\text{mm}$ , loading rate  $2\text{mm/min}$ )

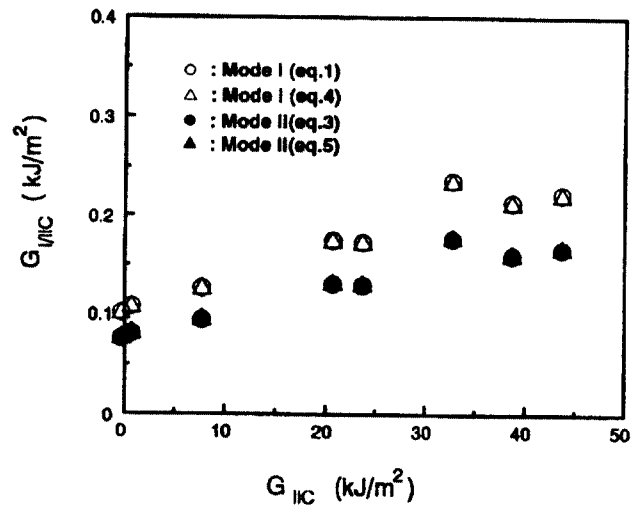


Fig. 4  $G_{IIIC}$  as function of crack length increment,  $\Delta a$ , for each method according to Fig. 2

Fig. 4는 시험편길이 100mm, 폭 20mm, 초기크랙 길이 30mm의 시험편인 Fig. 2에서 얻은 혼합모드 층간파괴 에너지의 값  $G_{IIIC}$ 을 위의 방법에 따라 표시한 것이다. 실험적인 컴플라이언스의 값은 단순 보 이론에서 얻은 값과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 그림에서 보여지는 것과 같이 R-곡선의 생성을 혼합모드에서 관찰할 수 있고 따라서 혼합모드의

초기치와 전파값을 나누어서 정의 할 수 있다.

3.2 초기크랙길이의 영향

Fig. 5는 초기크랙의 영향을 고찰하기 위하여 시험편 폭 20mm, 두께 2.6mm, 시험편 길이 100mm, 하중점 변위를 2mm/min으로 일정하게 한 후 초기 크랙길이를 25, 30, 40, 50mm( $a/L = 0.25, 0.3, 0.4, 0.5$ )로 변화시켜 각각의 혼합모드 임계에너지 방출을  $G_{I/IIc}$ 를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대부분 초기에 강한 R-곡선을 나타내고 있지만 곧 안정적인 평탄한 곡선을 나타내고 있다. 이러한 R-곡선의 존재는 섬유브릿징이 그 원인으로, 일반적으로 모드 I 에서 나타나는 현상이지만 혼합모드에서도 볼 수 있었다. 초기크랙길이의 영향은 초기치에서는 약간 차이를 보이고 있으나, 안정적인 전파값에서는 그 값들이 혼재되어 있어 뚜렷한 차이를 찾을 수 없었다. 다만 Hashemi<sup>10)</sup> 등은 혼합모드 ADCB 시험편에서  $a/L = 0.40$ 에서 안정과 불안정의 변화를 얻을 수 있다고 하였지만, 본 실험에서는  $a/L = 0.3$ 에서도 준안정균열성장이 일어나고 있음을 알 수 있었다.

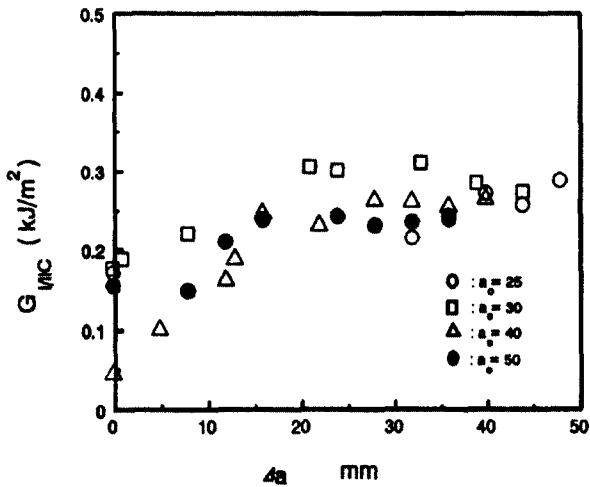


Fig. 5  $G_{I/IIc}$  as function of crack length Increment,  $\Delta a$ , for various initial crack lengths and uncracked ligaments

Fig. 6은 시험편길이 100mm, 폭 20mm, 초기크랙 길이가 50mm, 하중점 변위를 1mm/min의 시험편에서 얻은 혼합모드 층간파괴인성치의 초기값과 균열 전파값의 두 가지를 모드 I 과 모드 II로 나누어 나타내었다. 크랙 초기값이나 균열 전파값에 대한 이러한 표현방법은 시험편의 파손궤적을 재현하는데 편리하고 유용한 방법이다.

즉  $G_{IIc}^m = 0$  일 때  $G_{Ic}^m$ 의 값은 순수 모드 I ( $G_{Ic}$ )값이다. 또한  $G_{Ic}^m = 0$  일 때  $G_{IIc}^m$ 의 값은 순수 모드 II ( $G_{IIc}$ )값이다. 그림에서 주어진 하중 모드에 의한 초기값과 전파값 사이의 차이가 있다는 것은 해당하는 하중모드에서 상승하는 R-곡선의 존재가 있다는 것을 의미한다.

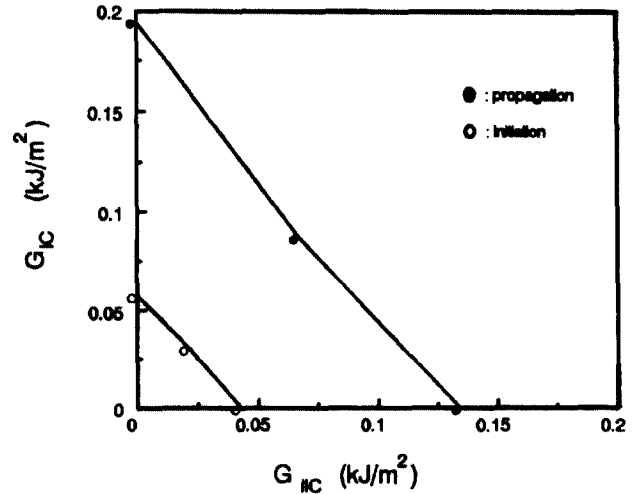


Fig. 6 Values of the interlaminar fracture energies for crack initiation and steady/state-propagation under the different modes

Fig. 7은 동일한 시험편에 초기크랙길이를 25, 30, 40, 50mm로 변화시켰을 때 혼합모드의 층간파괴인

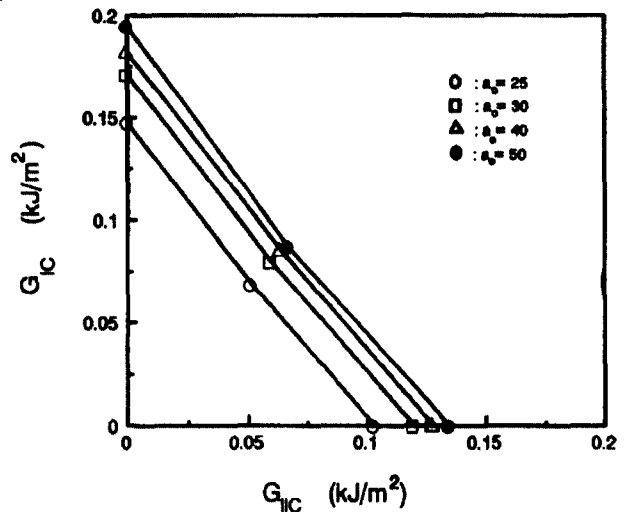


Fig. 7 Values of the interlaminar fracture energies for steady/state-propagation as a function of crack length under the different modes

성치를 균열 전파값으로 나타낸 것이다. 여기에서 초기크랙길이 25mm의 경우 다른 조건 보다 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 초기크랙길이 리가먼트에 비하여 적은 값을 가지는 경우, 즉  $a_0/(L - a_0) < 0.5$ 일 때 층간파괴인성치가 높아지는 경향이 있다는 모드 I의 결과<sup>6)</sup>와 다르고, 또한 초기크랙길이의 영향은 층간파괴인성치에 영향이 없다는 모드 II의 결과<sup>7)</sup>와도 서로 다른 현상을 나타내고 있다.

### 3.3 성형압력의 영향

Fig. 8은 시험편길이 100mm, 폭 20mm, 초기크랙길이 50mm, 하중점 변위를 1mm/min의 시험편에서 성형압력의 변화에 따른 층간파괴인성치를 나타낸 것이다.

성형압력 307 kPa의 경우 강한 R-곡선이 나타나지만 성형압력 431 kPa, 585 kPa의 경우 R-곡선이 나타나지 않고 거의 평탄한 곡선을 나타내고 있다. 이러한 현상은 성형압력이 저압인 경우 초기크랙선단에 기지풍부지역이 존재하여 이것이 R-곡선에 영향을 미치는데 비하여 성형압력이 비교적 고압인

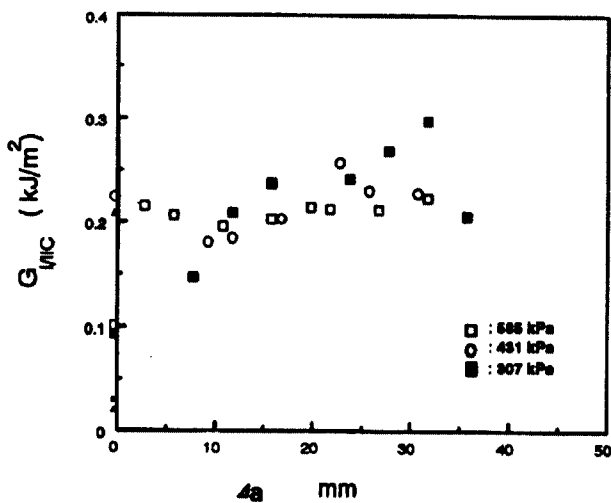


Fig. 8  $G_{IIIC}$  as function of crack length increment,  $\Delta a$ , for various molding pressure

경우 성형 중 높은 압력으로 초기크랙선단의 기지풍부지역의 상태가 전자와 다르기 때문이라고 생각된다. 성형압력에 따른 혼합모드 층간파괴인성치는 307 kPa의 경우가 가장 높은 값을 나타내었고, 431, 585 kPa의 순서로 그 값이 낮았다.

Fig. 9는 성형압력에 따른 영향을 고찰하기 위하여 혼합모드 층간파괴인성치를 Fig. 7과 동일한 방법으로 나타내었다. 여기서도 307 kPa의 경우가 가장 높고 다음으로 431, 585 kPa의 순서였다.

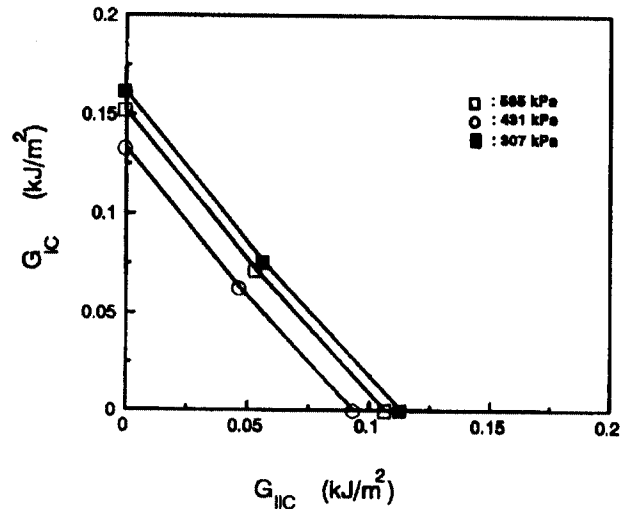


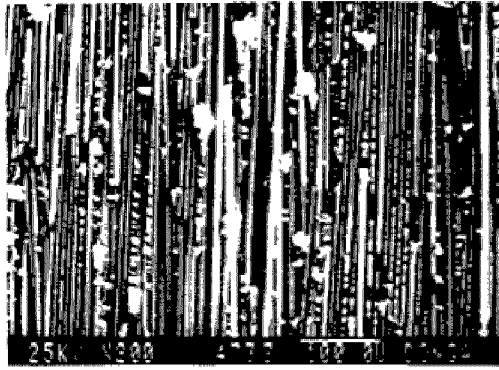
Fig. 9 Values of the interlaminar fracture energies for the different modes as a function of molding pressure

### 3.4 파면형태

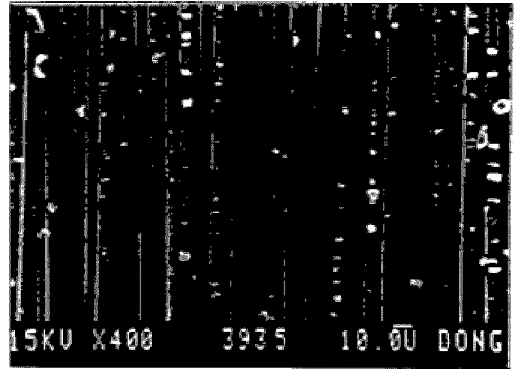
그림 (a)는 모드 I 층간 파괴시험에서 나타난 파면의 SEM(scanning electron microscope) 사진이다.

섬유절단(fiber breakage)과 섬유 브릿징(fiber bridging) 등 일반적인 모드 I 파면의 특성을 나타내고 있다. 그림 (b)와 (c)는 모드 II 층간파괴시험 파면의 SEM사진으로서 (b)는 ENF 시험편이고, (c)는 ELS시험편의 경우이다. 전형적인 모드 II의 파면 모습을 나타낸다. 즉 섬유절단을 거의 찾아볼 수 없고 섬유 브릿징도 발견할 수 없다.

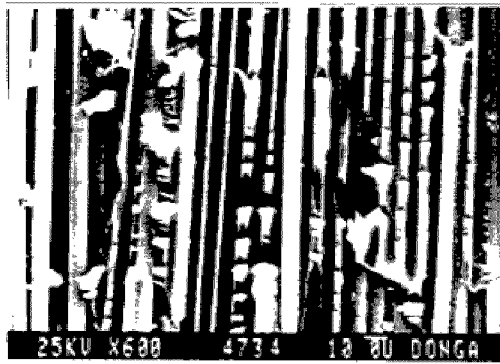
(d)는 혼합모드 ADCB 시험편의 파면모습이다. 섬유브릿징 일어나고 그 영향으로 섬유파손이 발견되지만 모드 I에 비하여 그 양은 적다. 일반적인 모습은 섬유가 매트릭스에 덮혀 있고 파면은 섬유의 방향을 따라 평평한 부분과 골을 만들고 있다. 해클은 골이 있는 섬유사이 부분에 나타나며 그 형태는 두껍고 불규칙적이다. 이것은 ENF 시험편에서 나타나는 것과 같이 섬유방향과 45° 방향에 주 인장 응력이 작용하는 것과 달리 ADCB 시험편에서는 섬유방향의 50° 각도에서 최대 인장응력이 가해지는 차이 때문이라고 생각된다.



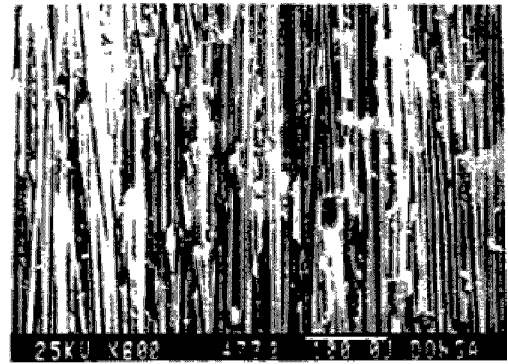
(a) DCB(×400)



(b) ENF(×400)



(c) ELS(×600)



(d) ABCD(×400)

Photo. 1 SEM fractographs of a various mode specimens

#### 4. 결 론

#### 참고문헌

CFRP의 혼합모드 I/II의 층간파괴인성치에 영향을 주는 인자 중 초기크랙길이, 성형압력의 변화 등을 ADCB 시험편에 따라 비교한 실험한 결과는 다음과 같다.

- 1) 단순보 이론에 의한 계산과 본 논문에서 적용한 실험적인 컴플라이언스법에 의한 값들은 거의 일치하였다.
- 2) 초기크랙길이와 시험편길이의 비  $a_0/L < 0.4$  인 경우, 준안정 균열현상이 일어났으며  $a_0/L > 0.4$ 인 경우 대부분 안정균열성장을 나타내었다.
- 3) ADCB 시험편의 혼합모드에서 초기크랙길이의 영향은 거의 없었다. 다만 대부분의 시험편은 균열 초기값과 전과값 사이에 상당한 차이를 보이며 강한 R-곡선을 나타내었다.
- 4) 성형압력에 따른 층간파괴인성치의 값은 성형압력 307 kPa의 경우가 가장 높았으며, 431 kPa, 585 kPa의 경우는 거의 평탄한 곡선을 나타내어 R-곡선을 나타내지 않았다.

1. Whitney. J. M., Browning. C. E. and Hoogsteden. W., "A Double Cantilever Beam Test for Characterizing Mode I Delamination of Composite Materials" J. Reinf. Plast. & Comp. 1. p. 297, 1982
2. Carlsson, L. A. Gillespie Jr, J. W. and Pipes, R. B., "On the Analysis and Design of notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing", J. of Comp. Mat., 20, p. 594, 1986
3. Bradley W. L. "Application of Fracture Mechanics to Composite Materials" ch-5, Elsevier Science Publishers, B. V, pp. 174~179, 1989
4. Arcan, L., Arcan, M. and Daniel, I. M., "SEM Fractography of Pure and Mixed Mode Interlaminar Fractures in Graphite/Epoxy Composites", ASTM. STP 948, pp. 41~67, 1987
5. Davies, P., "Polymers and Composite Task

Group Round Robin Protocol for Mode I, Mode II and Mixed Mode Testing", European Structural Integrity Society, 1991

6. 김형진, 엄윤성, 고성위, "CFRP 복합재료의 Mode I 층간파괴인성치에 관한 연구" 한국복합재료학회지, 7권 4호, pp. 65~73, 1994
7. 김형진, 엄윤성, 김엄기, 고성위, "CFRP 복합재료의 Mode II 층간파괴인성치에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 8권 4호, pp. 78~82, 1995
8. 김형진, 고성위, "ELS 시험편의 모드 II 층간 파괴인성치에 관한 연구", 한국어업기술학회지, 34권 4호, pp. 450~456, 1998
9. Gillespie Jr, J. W. Carlsson, L. A. Pipes. R. B., "Finite Element Analysis of the End Notched Flexure Specimen for Measuring Mode II Fracture Toughness" Comp. Sci. and Tech. 27, pp. 177~197, 1986
10. Hashemi, S., Kinloch, A. J. and Williams, J.G., "The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-Polymer Composites", Proc. Royal Soc. A427, pp. 173~199, 1990