

## GFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 관한 연구

박기호 · 고성위 · 김형진\*  
부경대학교, \*경상대학교 해양산업연구소  
(1999년 8월 3일 접수)

### A Study on the Interlaminar Fracture Toughness of Glass Fiber Reinforced Plastic Composites

**Ki-Ho Park, Sung-Wi Koh and Hyung-Jin Kim\***

Pukyong National University,  
\*The Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University  
(Received August 3, 1999)

#### Abstract

The value of the mode I interlamina fracture toughness,  $G_{IC}$ , is calculated by experimental compliance method, modified compliance method and beam theory. The value of the mode II interlamina fracture toughness,  $G_{IIIC}$ , is evaluated by beam method, theory beam theory and compliance method.

This paper describes the effect of load point displacement rate and specimen geometries for mode I and II interlaminar fracture toughness of glass fiber reinforced plastic composites by using double cantilever beam(DCB) and end notched flexure(ENF) specimen. For the load point displacement rate of 2, 6 and 10 mm/min the value of  $G_{IC}$  decreases as load point displacement rate increases whereas the value of  $G_{IIIC}$  is found to be no significant effect. The value of  $G_{IIIC}$  decreases as initial crack length increases. The fractured surface of the DCB and ENF samples are examined by scanning electron microscopy (SEM).

#### 서 론

최근 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 재료의 강도, 경량성, 내열성 등의 고기능성을 구비한 재료의 개발이 활발히 추진되고 있으며, 이러한 새로운 특성을 개발하는 면에서 복합재료는 그 경량성, 내식성, 절연성 등으로 인해 크게 각광을 받고 있다.

현재 널리 사용되고 있는 섬유강화 복합재료는 플라스틱 재료가 갖고 있는 가공성의 장점을 충분

히 발휘한 것으로 모재(matrix)와 강화섬유(reinforced fiber)로 구성된다. 섬유강화 복합재료의 구성요소 중 기지는 열에 대한 수지의 가공성에 따라 열경화성수지와 열가소성수지로 대별되며, 이 중 열경화성수지를 사용한 복합재료가 건설, 선박, 자동차 그리고 우주항공분야에 이르기까지 거의 모든 산업에서 다양하게 이용되고 있다.

이러한 열경화성 복합재료는 주로 유리섬유를 이용한 유리섬유강화 플라스틱(GFRP : glass

fiber reinforced plastic)과 탄소섬유를 이용한 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP : carbon fiber reinforced plastic)이 보급되고 있다. 이들 대부분은 적층형 복합재료의 형태로서 제작된다. 따라서 이 적층형 복합재료의 형태는 많은 층으로 구성된 다층구조이면서 이방성의 특징을 가지고 있으므로 구조해석시 많은 주의와 역학적 고찰이 요구된다.

적층형 복합재료의 파괴거동은 크랙이 섬유를 절단하는 방향으로 진행되는 횡방향 파괴(translaminar fracture), 크랙이 섬유방향을 따라 진행되는 층내파괴(intralaminar fracture) 그리고 층과 층 사이가 분리되는 층간분리가 일어나는 층간파괴(interlaminar fracture)로 구분되며 이들 세 가지 파괴거동 중 층간분리는 가장 취약한 층 사이의 면에서 발생되며 이러한 층간결합은 구조물의 강성저하의 요인이 되므로 지난 수년간 섬유강화 복합재료의 층간파괴 인성치를 하중의 적용형태를 달리한 모드 I 과 모드 II 시험법을 사용하여 정량적으로 조사하였다.

Harris 등<sup>1)</sup>은 CF/EP복합재료를 이용하여 모드 I과 모드 II 실험을 행하여  $G_{IC}$ 와  $G_{IIC}$ 의 값은 크랙 길이에 영향을 받는다고 하였으며, Carlson 등<sup>2)</sup>은 일방향 ENF시험편의 안정파괴는 크랙길이의 비가 0.69보다 작을 때라고 하였으며, Davies 등<sup>3)</sup>은 일방향 복합재료에서 시험편의 폭의 영향은 없다고 하였다.

Zhou 등<sup>4)</sup>은 세 가지의 탄소섬유-열가소성수지 복합재료의 층간파괴 인성치 실험에서 초기값들은 거의 유사하다고 하였고, Tanaka 등<sup>5)</sup>은 CFRP의 섬유의 브리징 효과에 대하여 보고하였으며, Cantwell<sup>6)</sup>은 모드 II 실험으로 섬유의 bridging과 크랙특성과의 관계를 연구하였다. Carlsson 등<sup>7)</sup>은 인성이 강한 수지의 복합재료에 대한 층간전단응력의 영향에 대하여, 그리고 한 등<sup>8)</sup>은 온도의 변화에 따른 유리섬유강화 폴리에스테르 복합재료의 층간파괴 인성치 실험은 저온특성에 영향을 받는다고 하였다.

Aliyu 등<sup>9)</sup>은 일방향 CF/Epoxy복합재료의 하중점 변위율의 변화에 따른 파괴인성치와 크랙진전속도의 관계를 규명하였으며, Mall 등<sup>10)</sup>은 열가소성수지 복합재료의 층간파괴 인성치는 하중점 변

위율이 증가할수록 감소한다고 하였다. 그리고 Sue 등<sup>11)</sup>은 인성이 강한 복합재료의  $G_{IC}$ 와  $G_{IIC}$ 는 초기크랙이 형성되는 끝단의 수지의 두께에 영향을 받지 않는다고 하였으며, Davies 등<sup>12)</sup>은 모드 I 과 모드 II 실험을 위한 DCB와 ENF시험편의 초기 크랙 형성을 위해 사용되는 얇은 필름의 영향을 연구하였다. 최근까지 섬유강화 복합재료의 파괴인성과 파괴거동에 영향을 주는 이들 인자인 시험편 형상, 하중점 변위율, 성형조건 및 환경요인 등에 대한 연구<sup>13)~20)</sup>가 보고되고 있다.

이상과 같이 일방향 복합재료의 연구결과들은 많으나, 특히 유리섬유가 직조의 형태(woven type)로 성형된 복합재료에 대한 모드 I 과 모드 II 층간파괴 인성치에 대한 연구결과는 희박한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 (주)Fiberite에서 생산하는 직조형태의 유리섬유 프리프레그를 사용하여 모드 I 과 모드 II 층간파괴 인성치  $G_{IC}$ 와  $G_{IIC}$ 를 구하였다. 임계에너지 해방률  $G_{IC}$  산출을 위하여 면적법, 단순보 이론, 컴플라이언스법 그리고 수정보 이론을 이용하였으며,  $G_{IIC}$  계산에는 변위법, 하중법, 단순보이론과 컴플라이언스법을 사용하여 계산된 결과를 각각 비교 검토하였다. 그리고 모드 I 과 모드 II 층간파괴인성치 실험시 하중점 변위율과 초기크랙길이를 변화시켜 하중점 변위율과 초기크랙길이의 변화에 따른  $G_{IC}$ 와  $G_{IIC}$ 를 상호 비교 검토하였으며, SEM사진을 통하여 모드 I 과 모드 II 층간파괴 인성치 실험시의 파단면을 비교 검토하였다.

## 재료 및 실험방법

### 1. 재료

실험에 사용된 재료는 직조형태의 유리섬유를 사용한 KRM 928-001 ((주) Fiberite) 프리프레그(prepreg)를 이용하였으며, 복합재료로서 성형하기 위하여 프리프레그를 24플라이(ply)로 적층하였다. 적층시 초기크랙을 형성하기 위하여 알루미늄 포일(Al foil: 두께 15 $\mu$ m)을 12플라이와 13플라이 층간에 삽입하여 초기크랙으로 형성하였다.

위와 같이 적층한 프리프레그를 성형시 섬유함유율(40vol.%)과 제품치수의 변동을 억제하며 필요이상의 수지가 낭비되지 않도록 제작된 금형(250mm×250mm)을 사용하였고, 적층된 프리프레그를 핫 프레스(hot press)를 이용하여 성형하였다. 핫 프레스로 성형할 때 성형온도는 130℃, 성형압력은 3.77kgf/cm<sup>2</sup> 그리고 경화시간은 90분으로 하였다.

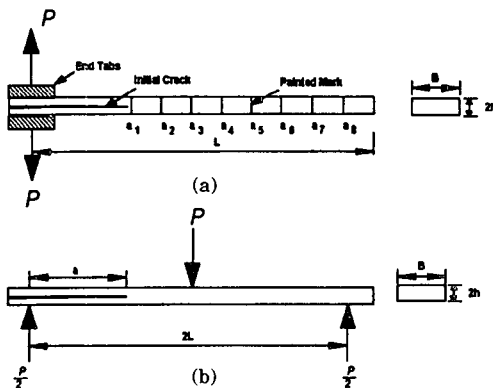
성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 Fig.1(a) DCB 시험편과 Fig.1(b) ENF 시험편 모양으로 가공하였다. 특히 다이아몬드 커터로 가공이 완료된 DCB 시험편은 크랙개구변위 변화에 따라 시험편 양단이 균일한 하중을 받고 시험편 축 방향의 전단력을 최소화하기 위하여 DCB 시험편 끝단에 에폭시 접착제를 사용하여 장치를 접착한 후 만능시험기(Shimadzu 82371, 용량 1tonf)를 사용하여 모드 I 실험을 행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 모드 I

모드 I 층간파괴 인성치에 미치는 하중점 변위율과 초기크랙길이의 영향을 조사하기 위하여 Fig.1(a)와 같은 DCB 시험편을 사용하여 하중점 변위율, 초기크랙길이를 변화시키면서 층간파괴 인성치를 측정하였다.

하중점 변위율의 영향을 조사하기 위하여 시험



(a) DCB specimen (Mode I)  
(b) ENF specimen (Mode II)

Fig. 1. The geometries of specimens.

편 폭 20mm, 시험편길이 100mm, 초기크랙길이 25, 30, 35, 40mm의 시험편을 준비하였으며, 이들 초기크랙길이를 가지는 각각의 시험편에 대하여 하중점 변위율을 2, 6, 10mm/min로 변화시켜 실험을 행하였다.

초기크랙길이의 영향은 시험편 폭 20mm, 하중점 변위율 2, 6, 10mm/min의 조건하에서 각각의 하중점 변위율에 대하여 초기크랙길이/리가먼트(ligament)를 25/75, 30/70, 35/65, 40/60으로 변화시켜 실험하였으며 각각의 경우에 대하여 시험편은 최소 5개 이상의 실험하여 실험값의 평균을 취하였다.

크랙길이는 Fig.1(a)와 같이 시험편 측면에 수정액을 칠한 후 4mm마다 눈금을 표시하고 각 표시점에 크랙선단이 도달할 때마다 부하와 제하를 되풀이하였다. 그리고 크랙길이를 측정하기 위하여 이동현미경을 사용하여 초기크랙에서 균열선단까지의 직선거리를 양면에서 측정하였으며 평균길이를 크랙길이라고 하였다. 하중변위선도와 임계에너지  $G_{IC}$ 는 만능시험기의 출력과 크랙길이를 AD변환기와 컴퓨터를 사용하여 구하였다.

Fig.2는 본 연구의 모드 I 실험을 보여주고 있다.

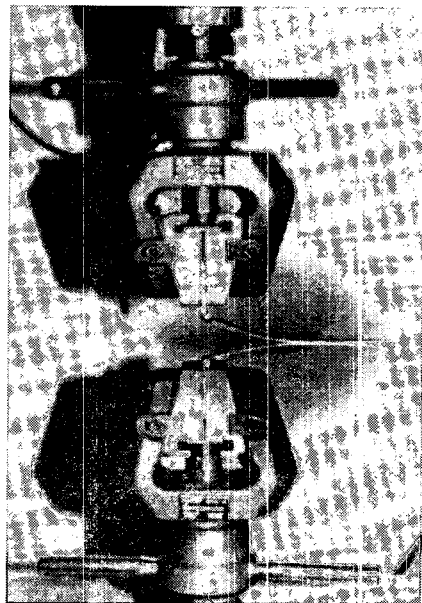


Fig. 2. Photograph of experiential apparatus for DCB specimen.

단순보 이론에 의한 모드 I 임계에너지 해방을  $G_{IC}$ 는 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{Ba} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 하중,  $\delta$ 는 변위,  $B$ 는 시험편 폭 그리고  $a$ 는 크랙길이이다.

그러나 실제적으로 식(1)은 보가 크랙이 진전함에 따라 고정점이 이동하는 형태가 되어 컴플라이언스를 과소평가하게 되므로 이 컴플라이언스  $C(C = \delta/P)$ 의  $C^{1/3}$ 과 크랙길이  $a$ 와의 관계를 최소자승법에 의해 절편  $\Delta$ 를 구하여 이를 크랙길이에 더해 수정하면 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{B(a+\Delta)} \quad (2)$$

모드 I 임계에너지 해방을  $G_{IC}$ 를 컴플라이언스  $C$ 를 증분  $dC$ 를 이용하여 표시하면 다음과 같다<sup>14)</sup>.

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (3)$$

식 (3)을 양대수 좌표에 기울기  $n$ 을 이용하여 실험적으로 컴플라이언스를 수정하는 방법으로는 식 (4)와 같다<sup>15)</sup>.

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2Ba} \quad (4)$$

한편 Chou 등<sup>16)</sup>은 시험편 두께의 반  $h$ 와 크랙길이  $a$ 의 비  $a/h$ 와  $C^{1/3}$ 과의 기울기  $A_1$ 을 이용하는 다음과 같은 수정식을 제안하였다.

$$G_{IC} = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2BA_1 h} \quad (5)$$

$$\frac{a}{h} = A_0 + A_1 C^{1/3} \quad (6)$$

여기서  $A_0$ 는 상수이다.

따라서 모드 I 임계에너지 해방을  $G_{IC}$ 는 식(1)~(5)를 이용하여 구한 후 상호비교 검토하였다.

## 2.2 모드 II

모드 II 층간파괴 인성치 실험을 위하여

Fig.1(b)와 같은 ENF 시험편을 사용하였으며, 하중점 변위율과 초기크랙길이가 층간파괴 인성치에 미치는 영향을 조사하였다. 하중점 변위율의 영향을 고찰하기 위하여 시험편 폭 20mm, 시험편 길이 120mm, 초기크랙길이 25, 30, 35, 40mm의 시험편을 사용하였고, 이들 초기크랙길이를 가지는 각각의 시험편에 대하여 하중점 변위율을 2, 6, 10mm/min으로 변화시켰다. 초기크랙길이의 영향은 시험편 폭 20mm, 하중점 변위율 2, 6, 10mm/min의 조건에서 각각의 하중점 변위율에 대하여 초기크랙길이/리가먼트(ligament)를 25/75, 30/70, 35/65, 40/60으로 변화시켜 실험하였다.

Fig.3는 본 연구의 모드 II 실험을 보여주고 있다.

보 이론에 의한 모드 II 임계에너지 해방을  $G_{IIC}$ <sup>13)</sup>는 다음과 같다.

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P\delta}{2W(2L^3 + 3a^3)} \quad (7)$$

여기서  $\delta$ 는 변위,  $P$ 는 하중,  $W$ 는 시험편 폭,  $L$ 은 전체 시험편 길이의 1/2,  $a$ 는 크랙길이를 나타낸다.

또한 탄성계수  $E$ 를 이용한 다음 식이 있다.

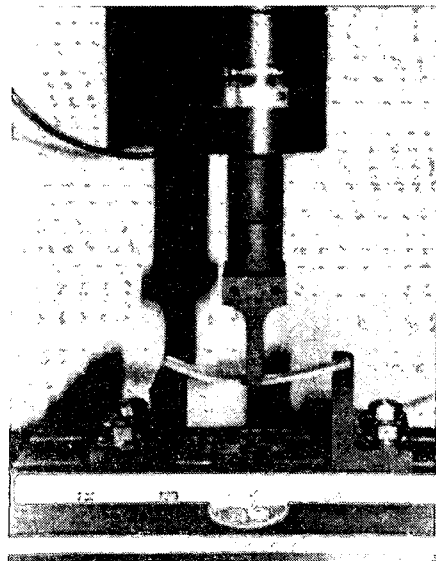


Fig. 3. Photograph of experimental apparatus for ENF specimen.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a^2}{16W^2 E h^3} \quad (8)$$

여기서  $E$ 는  $a=0$ 일 때 측정된 탄성계수이다.

$$E = \frac{L^3}{4WCh^3} \quad (9)$$

컴플라이언스법에 의한 방법은 여러개의 크랙 길이에 대한 컴플라이언스를 우선 측정한다. 컴플라이언스는 크랙길이의 함수이므로 다음과 같은 식을 사용하여 최소자승법으로 구한다.

$$C = C_1 + ma^3 \quad (10)$$

여기서  $C_1$ 은  $a=0$ 일 때의 컴플라이언스이고,  $m$ 은 선  $C$ 와  $a^3$ 의 기울기이다. 따라서 모드 II 층간파괴인성치  $G_{IIc}$ 는 다음 식과 같다.

$$G_{IIc} = \frac{3ma^2 P^2}{2W} \quad (11)$$

또 다른 방법은 컴플라이언스  $C$ 와 크랙길이를 무차원화 시킨 식(12)를 이용하여 계산하는 식(13)이 있다.

$$C/C_1 = 1 + m(a/L)^3 \quad (12)$$

여기서  $m_1$ 은  $C/C_1$ 와  $(a/L)^3$ 의 기울기이다.

$$G_{IIc} = \frac{3m_1 P^2 a^2 C_1}{2WL} \quad (13)$$

따라서 본 연구에서는 임계에너지 해방을  $G_{IIc}$ 를 식(7)~(13)을 이용하여 구한 후 상호비교 검토하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 모드 I 층간파괴 인성치

#### 1.1. 하중변위선도

모드 I 층간파괴인성 실험에서 나타나는 하중-변위선도의 양상은 크게 분류하면 두 가지 형태, 즉 전형적인 안정 크랙성장과 불안정 크랙성장이 혼합된 양상을 보이고 있다.

Fig.4는 하중점 변위를  $2mm/min$ , 시험편 폭

$20mm$ , 초기크랙길이/리가먼트, 즉  $a_0/(L-a_0)$ 가  $25/75$ 인 시험편의 경우의 하중-변위선도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 것과 같이 하중(load)과 제하(unloading)를 최종과단까지 계속하였으며, 하중과 제하를 가하는 점으로 크랙시작점으로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 크랙성장의 양상은 안정된 크랙성장과 불안정 크랙성장이 혼합되어 나타나고 있다.

Fig.5는  $\dot{y}=10mm/min$ ,  $B=20mm$ ,  $a_0=25mm$ ,  $L=100mm$ 인 경우에 대하여 크랙길이의 증가에 대한  $G_{IIc}$ 의 변화, 즉 R-곡선을 나타낸 것으로  $G_{IIc}$  계산은 앞절에서 기술한 여러 가지 방법으로 계산

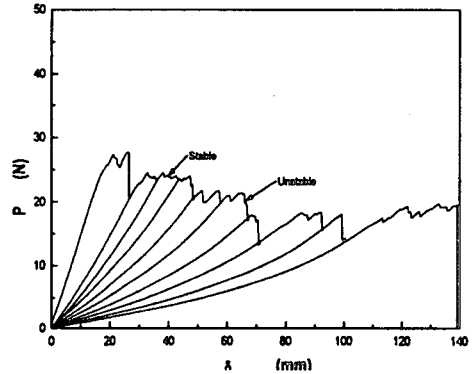


Fig. 4. Typical load displacement curve for unstable crack ( $\dot{y}=6mm/min$ ,  $B=20mm$ ,  $a_0=25mm$ ,  $L=100mm$ ).

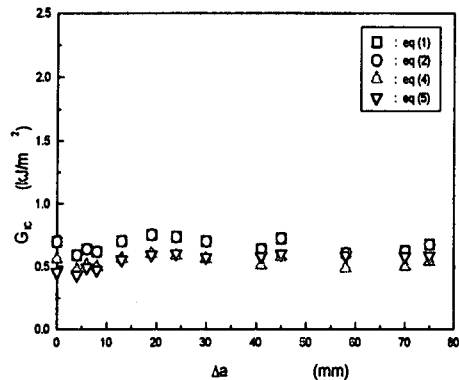


Fig. 5.  $G_{IIc}$  as a function of incremental crack length,  $a$ , for various equations ( $\dot{y}=10mm/min$ ,  $B=20mm$ ,  $a_0=25mm$ ,  $L=100mm$ ).

한 것이다.

단순보이론이나 컴플라이언스법인 식(1)과 식(2)로 계산한  $G_{IC}$ 값은 거의 유사한 값을 나타내고 있으나, 크랙길이가 증가함에 따라 안정된 R-곡선이 나타나지 않고 있으며, 단순보이론이나 컴플라이언스법의 수정식인 식(3)과 (4)에 의해 얻은  $G_{IC}$ 값은 크랙길이가 증가함에 따라 안정된 R-곡선을 나타내고 있으므로  $G_{IC}$ 의 계산은 수정식인 식(3)과 (4)에 의해 계산되어야 한다고 생각되며 이처럼 R-곡선이 거의 일정하게 나타나는 경향은 타 연구결과와 동일한 경향이다. 그리고 식(3)과 (4)식으로 계산된 결과에서 그 값들 사이에서 다소 차이가 발생하고 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 컴플라이언스-크랙길이의 관계식을 사용하는 식(3)에서 불안정 크랙성장시 크랙길이에 따르는 컴플라이언스의 변화의 폭이 확대되어 3차항의 다항식이 만족점을 이끌고 미분에 편차를 가져오기 때문이라고 생각된다.

1.2. 하중점 변위율의 영향

Fig.6은 B=20mm, L=100mm인 DCB시험편의 하중점 변위율의 변화에 대한 임계에너지 해방을  $G_{IC}$ 의 변화를 나타낸 것으로 하중-변위선도에서 선형에서 비선형으로 되는 점을 이용하여 구한 초기크랙길이 개시점에서의  $G_{IC}$ 이며, Fig.7은 크랙성장 개시점에서 5% 증가한 컴플라이언스와 하중-변위선도의 교점내에서 최대하중값에 대응하는  $G_{IC}$ 를 나타낸 것으로 각각 5개 이상의 시험편

으로부터 구한 평균값이다.

Fig.6에서 알 수 있듯이 초기크랙길이가 25, 30, 35 그리고 40mm일때 하중점 변위율이 2, 6 그리고 10mm/min에서 하중점 변위율 2mm/min일때 초기크랙길이 개시점에서의  $G_{IC}$ 값이 가장 높게 나타났으며, 하중점 변위율이 6과 10mm/min로 증가할수록 초기크랙길이 개시점의  $G_{IC}$ 값이 거의 유사한 값을 보이고 있으며, 초기크랙길이가 변하여도 앞서 설명과 유사하게 나타났다.

Fig.7은 DCB시험편의 초기크랙길이의 변화에 대한 하중점 변위율을 변화시켰을 때 최대하중값에 대응하는 임계에너지 해방을  $G_{IC}$ 값을 나타낸 것으로 Fig.6과 유사한 경향으로 하중점 변위율이 2, 6, 10mm/min로 증가함에 따라 최대하중값  $G_{IC}$ 값은 서서히 감소하는 경향을 보였다.

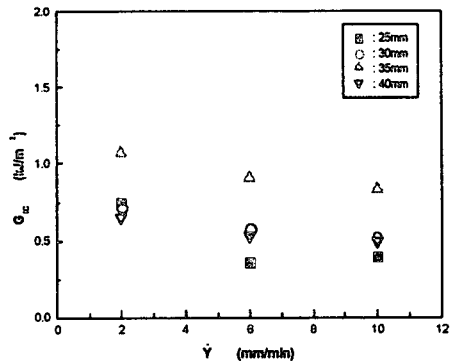


Fig. 7.  $G_{IC}$  as function of loading rate,  $\dot{y}$ , for various initial crack length.

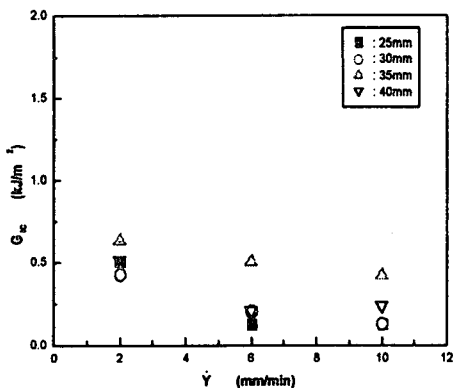


Fig. 6.  $G_{IC}$  as function of loading rate,  $\dot{y}$ , for various initial crack length.

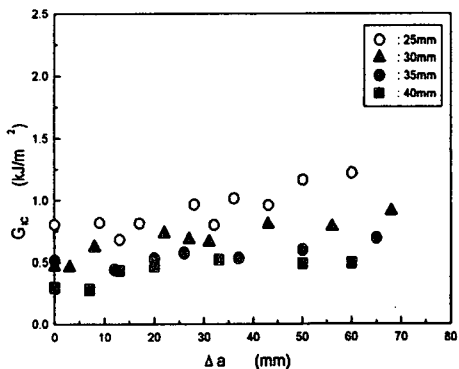


Fig. 8. R-curves for various initial crack length ( $\dot{y}=2\text{mm/min}$ , B=20mm, L=100mm).

1.3. 초기크랙길이의 영향

Fig.10은 하중점 변위율이 2mm/min로 일정하게 하고 초기크랙길이를 변화시켰을때  $G_{IC}$ 값들의 R곡선을 나타낸 것으로 크랙성장은 앞서 기술한 방법과 같이 안정과 불안정 크랙성장이 혼합된 형태를 보이고 있다.

Fig.11은 DCB시험편의 하중점 변위율을 2, 6 그리고 10mm/min로 한 후 초기크랙길이를 25, 30, 35 그리고 40mm로 변화시켰을때의 초기크랙 길이 개시점에서의  $G_{IC}$ 값을 나타내고 있다.

그림에서의 알 수 있듯이 하중점 변위율이 2mm/min일때 초기크랙 개시점에서의  $G_{IC}$ 값이 초기크랙길이가 25mm일 때 가장 높게 나타나며, 초기크랙길이가 30, 35 그리고 40mm일 때의 값들은 거의 미시적으로 값이 감소하는 것을 알 수

있다. 하중점 변위율이 6, 10mm/min일때 초기크랙 개시점에서의  $G_{IC}$ 값이 초기크랙길이 변화에도 거의 유사한 값을 나타내고 있다.

Fig.12은 DCB시험편의 하중점 변위율을 2, 6 그리고 10mm/min로 한 후 초기크랙길이를 변화시켰을때의 임계에너지 해방율  $G_{IC}$ 의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 하중점 변위율이 2, 6, 10mm/min로 변화함에 따른 초기크랙 길이가 25, 30, 35 그리고 40mm로 증가함에 따라서 최대하중값  $G_{IC}$ 값이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

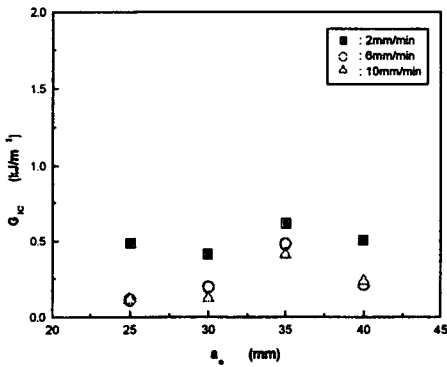


Fig. 9.  $G_{IC}$  as function of initial crack length,  $y$ , for various loading rate.

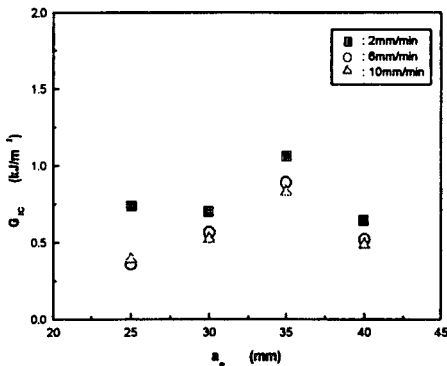


Fig.10.  $G_{IC}$  as function of initial crack length,  $y$ , for various loading rate.

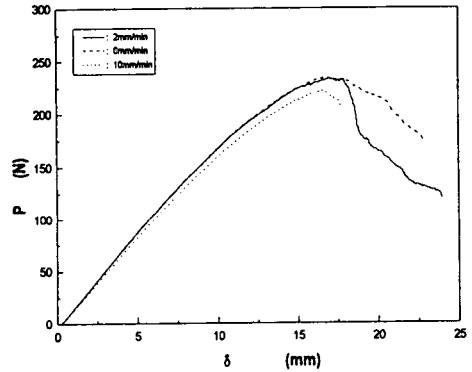


Fig.11. Typical load displacement curve ( $a_0=25mm, B=20mm, L=100mm$ ).

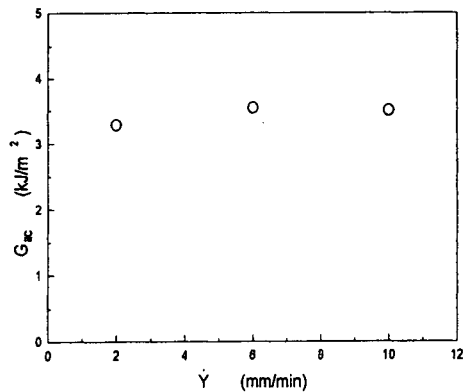


Fig.12.  $G_{IC}$  for different loading rate ( $a_0=25mm, B=20mm, L=100mm$ ).

## 2. 모드 II 층간파괴 인성치

### 2.1. 하중점 변위율의 영향

모드 II 층간파괴 인성치를 실험하기 위하여 사용되어지는 ENF시험편은 에폭시와 같은 취성재료에서는 하나의 시험편에서 연속적으로 크랙길이의 변화가 나타나지 않으므로 연속된 크랙길이에 따르는 파괴인성치를 구하기가 용이하지 않다. 따라서 초기크랙을 일정한 길이로 미리 설정하여 그 상황에서 각각 하나의 실험값을 얻는 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 모드 II 층간파괴 인성치에 대한 하중점 변위율의 영향을 고찰하기 위하여 모드 II 실험을 위한 ENF시험편의 폭은 20mm, 시험편의 두께는 2.24mm, 시험편의 길이는 100mm 그리고 초기크랙길이는 25mm로 일정하게 하고 하중점 변위율을 2mm/min, 6mm/min 그리고 10mm/min로 각각 5개 이상의 시험편으로부터 구한 평균값을 구하여 하중점 변위율에 대한 하중변위선도와 에너지 해방률  $G_{IIC}$ 를 나타내었다.

Fig.11는 하중점 변위율이 각각 2mm/min, 6mm/min, 10mm/min으로 변화시켰을때의 하중 변위곡선을 나타낸 것으로  $\Delta a$ 가 17mm까지는 일제히 증가하다가 그 이후에는 감소하였다.

Fig.12는 하중점 변위율에 따른  $G_{IIC}$ 값으로 하중점 변위율이 2mm/min, 6mm/min 그리고 10mm/min인 경우 각 하중점 변위율의 따른  $G_{IIC}$  값이 거의 유사하게 나타남을 보여주고 있다.

### 2.2. 초기크랙길이의 영향

모드 II 층간파괴 인성치에 대한 초기크랙길이의 영향을 고찰하기 위하여 모드II실험을 위한 ENF시험편의 폭은 20mm, 시험편의 두께는 2.24mm, 시험편의 길이는 100mm 그리고 하중점 변위율은 2mm/min으로 일정하게 하고 초기크랙길이를 25, 30, 35 그리고 40mm로 변화시켜 각각 5개 이상의 시험편으로부터 구한 평균값을 구하여 초기크랙길이에 대한 하중변위선도와 에너지 해방률  $G_{IIC}$ 를 나타내었다.

Fig.13은 초기크랙길이가 25mm, 30mm, 35mm 그리고 40mm로 변화시켰을때에 따른 하중변위선도를 나타낸 것으로서 초기크랙길이가

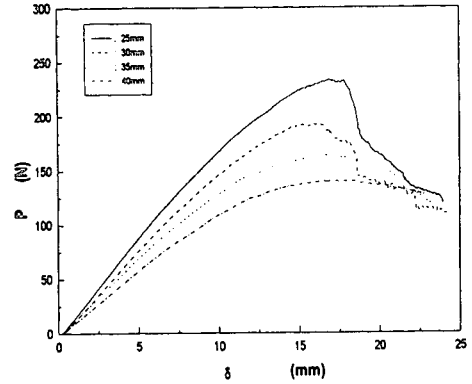


Fig.13. Typical load displacement curve ( $\dot{y}=2mm/min$ ,  $B=20mm$ ,  $L=100mm$ ).

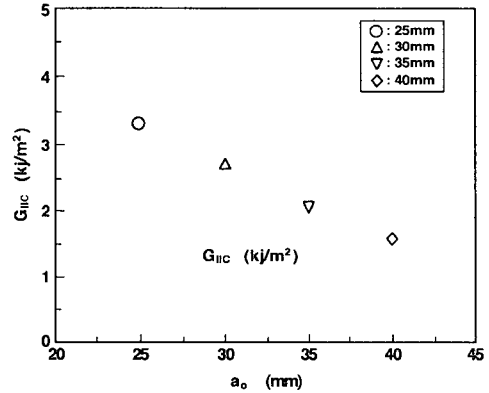


Fig.14.  $G_{IIC}$  for different loading rate ( $\dot{y}=2mm/min$ ,  $B=20mm$ ,  $L=100mm$ ).

25mm일때에 가장 높게 나타나며, 30mm, 35mm 그리고 40mm 순으로 높게 나타난다.

Fig.14은 초기크랙길이에 따른  $G_{IIC}$ 값으로 초기 크랙길이가 25mm, 30mm, 35mm 그리고 40mm 순으로 높게 나타난다.

## 3. 파면해석

### 3.1 모드 I

Fig.15~18은 모드 I 층간파괴실험에서 얻은 DCB 시험편의 파면사진을 나타낸 것으로 많은 섬유나 혹은 섬유다발의 부서러기가 파면에 나타나고 섬유브릿징의 절단 등을 볼 수 있다. 섬유 부서러기(fiber fragment)는 부서진 섬유나 섬유다발은 가끔 파면에 남아있다. Fig.15는 하중점 변위율이 2mm/min, Fig.16은 하중점 변위율 6mm/min



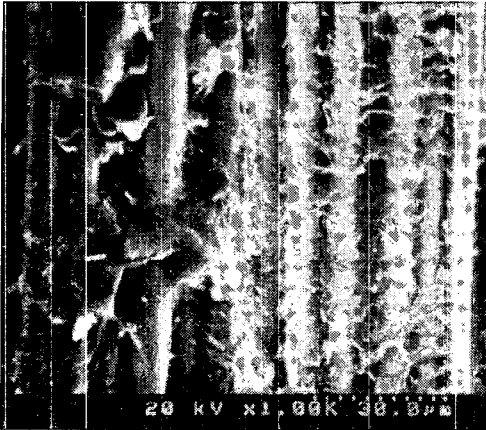


Fig.15. Fractograph of mode I test specimen ( $\dot{\gamma}=2mm/min$ , B=20mm, L=100mm).

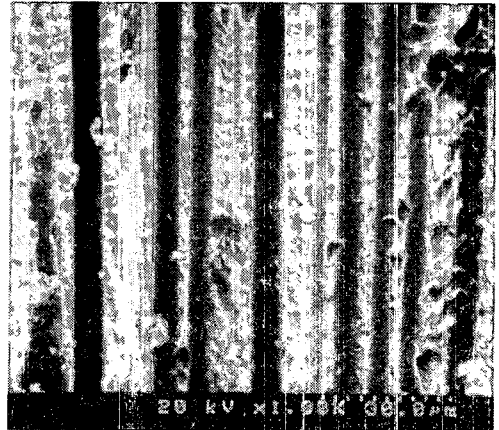


Fig.18. Fractograph of mode II test specimen ( $\dot{\gamma}=2mm/min$ , B=20mm, L=100mm).

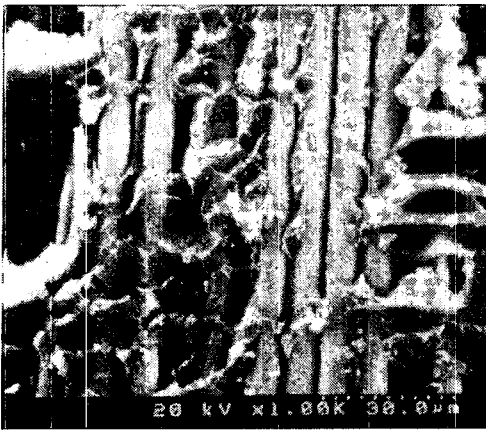


Fig.16. Fractograph of mode I test specimen ( $\dot{\gamma}=6mm/min$ , B=20mm, L=100mm).

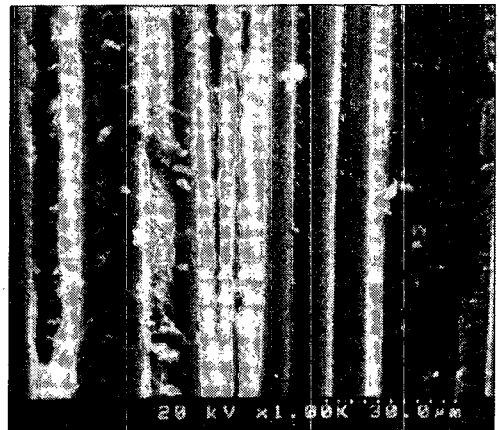


Fig.19. Fractograph of mode II test specimen ( $\dot{\gamma}=6mm/min$ , B=20mm, L=100mm).

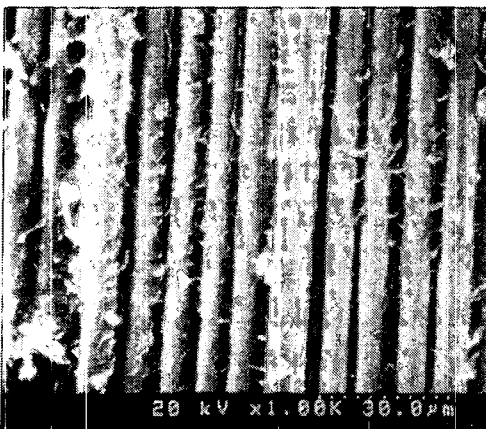


Fig.17. Fractograph of mode I test specimen ( $\dot{\gamma}=10mm/min$ , B=20mm, L=100mm).

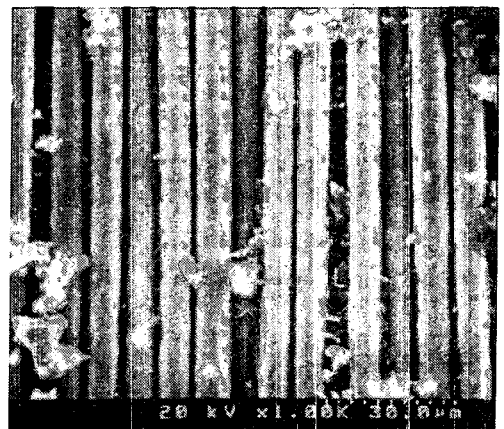


Fig.20. Fractograph of mode II test specimen ( $\dot{\gamma}=10mm/min$ , B=20mm, L=100mm).

그리고 Fig.17은 하중점 변위율이  $10\text{mm}/\text{min}$ 를 나타내고 있다. Fig.15는 하중점 변위율이  $2\text{mm}/\text{min}$ 인 경우의 파단면으로 섬유와 매트릭스의 접착을 보면 섬유의 표면에 수지가 많이 남아 있는 것을 알 수 있다. 하중점 변위율이  $6\text{mm}/\text{min}$ 인 Fig.16의 경우에는 섬유표면이 Fig.15인 경우보다 표면에 수지가 적게 남아있고 섬유와 수지 부스러기가 남아있는 것을 알 수 있다. 그리고 하중점 변위율이  $10\text{mm}/\text{min}$ 인 Fig.17의 경우에도 Fig.16와 유사한 현상을 보이며, 섬유표면에 수지의 양이 Fig.16에서 보다 적게 나타나고 수지 부스러기가 많이 남아 있음을 알 수 있다.

### 3.2 모드 II

모드 II 층간파괴의 미세기구를 보면 가장 특징적인 것으로 전단응력에 의하여 일어나는 해클(hackle)을 들 수 있다. 해클의 기구는 전단력이 두 적층재 사이에 가해졌을 때 초기에는 미세크랙형태로 나타나며 이 미세크랙은 전단응력의 증가로 인해 크랙의 증가로 나타난다.

Fig.18~20은 모드 II 층간파괴 실험한 ENF 시험편의 파단면을 보여주는 주사현미경 SEM사진을 나타낸 것으로 Fig.18은 하중점 변위율이  $2\text{mm}/\text{min}$ , Fig.19는 하중점 변위율이  $6\text{mm}/\text{min}$  그리고 Fig.20은 하중점 변위율  $10\text{mm}/\text{min}$ 을 나타내고 있다. Fig.18에서 알 수 있듯이 하중점 변위율이  $2\text{mm}/\text{min}$ 인 경우의 파단면에서는 섬유와 매트릭스의 접착에 의해서 해클크랙이 강하게 나타나고 있으며 섬유의 표면에 수지가 많이 남아 있는 것을 알 수 있다. 하중점 변위율이  $6\text{mm}/\text{min}$ 인 Fig.19의 경우에는 해클크랙이 약하게 나타나고 섬유표면이 Fig.18인 경우보다 매끄러우며 미세한 수지 부스러기가 남아있는 것을 알 수 있다. 그리고 하중점 변위율이  $10\text{mm}/\text{min}$ 인 Fig.20의 경우에도 Fig.19와 유사한 현상을 보이고 있거나 미세한 수지 부스러기가 더 많이 남아 있음을 알 수 있다.

## 결 론

GFRP 복합재료의 적층판의 초기크랙길이의

변화와 하중점 변위율에 따른 모드 I과 모드 II 실험을 통하여 층간파괴 인성치를 고찰하고, 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모드 I 층간파괴 인성치에서 하중점 변위율이 2, 6,  $10\text{mm}/\text{min}$ 인 경우에 따른 초기크랙길이 개시점에서의 값과 최대하중값에서 하중점 변위율이 증가함에 따라  $G_{IC}$ 값은 감소하였다.
- 2) 하중점 변위율이  $2\text{mm}/\text{min}$ 에서 초기크랙길이가 25, 30, 35,  $40\text{mm}$ 인 경우에서 초기크랙길이가 증가함에 따라 초기크랙길이 개시점에서의 값과 최대하중값은 미시적으로 감소하는 경향을 보이며, 하중점 변위율이 6,  $10\text{mm}/\text{min}$ 인 경우에서는 초기크랙길이가 25, 30, 35,  $40\text{mm}$ 로 증가하여도 초기크랙길이 개시점에서의 값과 최대하중값은 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.
- 3) 모드 II 층간파괴 인성치에서 하중점 변위율이 2, 6,  $10\text{mm}/\text{min}$ 인 경우 임계에너지 해방을  $G_{IIC}$ 값이 거의 유사한 값을 나타내었으며, 초기크랙길이가 25, 30, 35,  $40\text{mm}$ 인 경우에서 초기크랙길이에 따른  $G_{IIC}$ 값은 초기크랙길이가  $25\text{mm}$ 일때 가장 높고 30, 35,  $40\text{mm}$ 로 변화함에 따라  $G_{IIC}$ 값은 감소한다.

## 참고문헌

- 1) Srivastava, S.K and Harris, B.(1994) : "Effect of particles on interlaminar crack growth in cross-ply carbon-fibre/epoxy laminates", J. Mat. Sci. 29, pp.548~553.
- 2) Carlsson, L.A., Gillespie Jr, J.W. and Trethewey, B.R. (1996) : " Mode II Interlaminar Fracture of Gra-phite/Epoxy and Graphite/PEEK", J. Reinf. Plast. Comp. 5, p.170.
- 3) Davies, P., Moulin, C., Kausch, H.H. and Fischer, M. (1990) : "Measurement of  $G_{IC}$  and  $G_{IIC}$  in Carbon/ Epoxy Composites", Comp. Sci. and Tech. 39, pp.193~205.
- 4) Zhou, Jiang., He, Tianbai., Zhang, Jin. and Ding, Mengxian.(1994) : "Interlaminar fracture of carbon-thermo-plastic polyimide composites",

- J. Mat. Sci. 29, pp.2916~2920.
- 5) Keisuke, T., Hiroshi, T. and Kenjiro, Y. (1994) : "Evaluation of Fiber-Bridging Effect on Model I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional CFRP Based on Measurements of Crack Opening Profiles", Trans. JSME(A) 60(573), pp.56~62.
  - 6) Cantwell, W.J. (1996) : "Loading rate effects in the mode II fracture of carbon fiber poly-ether-ether-ketone composites", J. Mat. Sci. Letter 15, pp.639~641.
  - 7) Carlsson, L.A., Gillespie Jr, J.W. and Pipes, R.B. (1986) : "On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing", J. Com. Mat. 20, pp.595~604.
  - 8) Han and Koutsky, J. (1981) : "The Interlaminar Fracture Energy of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites", J. Com. Mat. 15, pp.371~388.
  - 9) Aliyu, A.A. and Daniel, I.M. (1985) : " Effects of Strain Rate on Delamination Fracture Toughness of Graphite/Epoxy", ASTM STP 876, pp.336~578.
  - 10) Mall, S., Law, G.E. and Katouzian, M. (1987) : "Loading Rate Effect on Interlaminar Fracture Toughness of a Thermoplastic Composite", J. Com. Mat. 21, 1987, pp.569~579.
  - 11) Sue, H.J., Jones, R.E. and Garcia-Meitin, E.I. (1993) : "Fracture behaviour of model toughened composites under Mode I and Mode II delaminations", J. Mat. Sci. 28, pp.6381~6391.
  - 12) Davies, P., Cantwell, W.J. and Kausch, H.H. (1990) : "Delamination from thin starter films in carbon fibre/PEEK composites", J. Mat. Sci. Letter 9, pp.1349~1350.
  - 13) 김형진, 엄윤성, 고성위 (1994) : "CFRP 복합재료의 모드 I 층간파괴 인성치에 관한 연구", 한국복합재료학회지 제7권, 제4호, pp.66~73.
  - 14) 김형진, 엄윤성, 김엄기, 고성위 (1995) : "CFRP 복합재료의 모드 II 층간파괴 인성치에 관한 연구", 한국복합재료학회지 제 8권, 제4호, pp.78~82.
  - 15) 이정규, 엄윤성, 김형진, 고성위 (1995) : "층간파괴 인성치에 대한 섬유방향에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제9권, 제2호, pp.88~92.
  - 16) Chou, I., Kimpara, I., Kageyama, k. and Ohsawa, I. (1992) : " Effect of Fiber Orientation on the Mode I Interlaminar Fracture Behavior of CF/Epoxy Laminates", J.Soc. Mat. Sci., Japan, 41, pp.1292~1298.
  - 17) 고성위 (1993) : "온도변화에 따른 실리카 입자강화 복합재료의 기계적 성질 및 파괴기동", 한국복합재료학회지 제6권, 제2호, pp.52~60.
  - 18) 김엄기, 고성위, 정규동 (1996) : "불균질 취성재료 파괴인성에 미치는 두께효과의 확률적 연구", 대한기계학회논문집(A) 제20권, 제4호, pp.1356~1362.
  - 19) Russell, A.J. and Street, K.N. (1985) : "Moisture and Temperature Effects on the Mixed Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy", ASTM STP, pp.876~349.
  - 20) Davies, P., Moulin, C., Kausch, H.H. and Fisher, M.M. (1990) : "Measurement of  $G_{IC}$  and  $G_{IIC}$  in Carbon/Epoxy Composites", Comp. Sci. Tech. 38, pp.193~205.