

# 탄소섬유 복합재료의 모드 I 및 모드 II 층간파괴인성치에 관한 연구

김 재 동\* · 고 성 위\*\*

\*동서산업(주), \*\*부산수산대학교

(1995년 5월 15일 접수)

## A Study on Mode I and Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics

Jae - Dong, KIM and Sung - Wi KOH

\*Dong Suh Industrial Co. and \*\*National Fisheries University of Pusan

(Received May 15, 1995)

### Abstract

In this paper to investigate mode I and mode II critical energy release rates,  $G_{IC}$  and  $G_{IIC}$ , three prepregs which are domestic products are used. Those are used for the unidirectional composites, but only one is used for the cross - ply laminate composites which is molded  $[0/90]_{6s}$ ,  $[0/45]_{6s}$  and  $[0/45/90]_{4s}$ . The value of  $G_{IC}$  is almost same when modified three calculating methods are applied. The highest value of  $G_{IC}$  at crack initiation is obtained at the  $[0/90]_{6s}$  interlaminar and the lowest one is at the  $[0/45/90]_{4s}$  interlaminar.

### 서 론

1970년대의 석유파동 이후 에너지 절약이 산업계에 커다란 문제로 등장함에 따라 구조용 재료의 경량화가 요구되었고, 이에 부응하여 복합재료의 발전은 매우 급속히 이루어지고 있으며, 그 용도도 초기에는 우주, 항공, 방위산업 등의 전략산업에만 국한되었으나, 현재에는 조선, 자동차산업, 레저산업, 일반 구조물, 의료용 소재, 내식용 소재 등에 그 응용 범위가 확대되고 있다.

섬유강화 복합재료의 파괴거동 중의 하나인 층간파괴(interlaminar fracture)는 층간분리이며, 이 현상은 가장 취약한 층 사이의 면에서 발생된다. 이것은 성형, 가공, 그리고 실제 구조물에 사용

시 발생하는 층간결합으로 나타나게 된다. 층간결합은 재료의 취성 등의 원인과 결합하여 구조물의 강성저하, 층간바리의 요인이 되어 최종파단을 초래하므로 매우 중요하다. 층간결합에 의한 파괴현상은 모드 I 이 지배적이거나<sup>1)</sup> 실제 구조물에서는 모드 I 과 모드 II 가 결합된 혼합모드에 의해 발생하게 된다. 그러나 혼합모드<sup>2),3)</sup>는 계산과 시험편 제작이 용이하지 않으므로 최근에는 DCB (double cantilever beam)와 ENF(edge notched flexure) 시험편을 이용한 임계에너지 방출률  $G_{IC}$ 와  $G_{IIC}$ 에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

모드 I 및 모드 II 에 대한 층간 파괴인성치에 영향을 주는 인자들 중에서 시험편 두께<sup>4)~7)</sup>, 시험편 폭과 길이<sup>7),8)</sup>, 초기크랙의 길이<sup>9),10)</sup>, 하중률(load-

ing rate)<sup>11,9)</sup>, 성형조건<sup>10,11)</sup> 등에 관하여 연구가 다량 진행되었다. 또한 섬유방향에 따른 여러가지 성질에 관한 연구는 인장강도<sup>12)</sup>, 굽힘강도<sup>13)</sup>, 피로강도<sup>14)</sup>, 충격손상<sup>15)</sup> 등 많은 연구결과가 있으나 층간 파괴인성치에 관한 연구는 매우 적으므로 이에 대한 많은 연구가 요망된다.

따라서 본 연구에서는 국산 CFRP 복합재료의 층간 파괴인성치에 관한 연구의 일환<sup>6,11,16)</sup>으로 국내에서 강도별로 생산하고 있는 3종류의 탄소섬유 프리프레그를 시험재료로 사용하여 섬유방향을 일방향과 사교적층판으로 변화시켜 적층하여 모드 I 과 모드 II 층간 파괴실험을 통하여 임계에너지 방출률  $G_{IC}$ 와  $G_{IIC}$ 에 관하여 고찰하였다.

## 평가 방법에 대한 이론적 고찰

### 1. 모드 I 층간 파괴인성치

단순보 이론에 의한 모드 I 임계에너지 방출률  $G_{IC}$ 는 다음과 같다.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2Wa} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 하중,  $\delta$ 는 변위,  $W$ 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 절편을 구하여 이를 크랙길이에 더해 수정하면 다음과 같다<sup>17)</sup>.

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

또한  $G_{IC}$ 는 컴플라이언스의 증분  $dC$ 를 이용하여 표시하면 다음과 같다.

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

식 (3)을 양대수 좌표에 기울기  $n$ 을 이용하여 실험적으로 컴플라이언스를 수정하는 방법으로는 식(4)와 같다<sup>18)</sup>.

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

한편  $a/h$ 와  $C^{1/3}$ 과의 기울기  $A_1$ 을 이용하는 다음과 같은 수정식도 있다.

$$G_{IC} = \frac{3P^2C^{2/3}}{2WA_1h} \quad (5)$$

$$\frac{a}{h} = A_0 + A_1C^{1/3} \quad (6)$$

여기서  $h$ 는 시험편 두께의 1/2이고,  $A_0$ 는 상수이다.

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

### 2. 모드 II 층간 파괴인성치

보이론에 의한 모드 II 임계에너지 방출률  $G_{IIC}$ <sup>17)</sup>는 다음과 같다.

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

여기서  $L$ 은 전체 시험편 길이의 1/2이고,  $a$ 는 크랙길이를 나타낸다.

또한 탄성계수  $E$ 를 이용한 다음 식이 있다.

$$G_{IIC} = \frac{9P^2a^2}{16W^2Eh^3} \quad (8)$$

여기서  $E$ 는  $a=0$ 일 때 측정된 탄성계수로서 다음과 같다.

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

또 다른 방법은 컴플라이언스  $C$ 와 크랙길이  $a$ 를 무차원화시켜 계산하는 식(11)이 있다.

$$C/C_1 = 1 + m(a/L)^3 \quad (10)$$

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

$$G_{IIC} = \frac{3mp^2a^2C_1}{2WL^3} \quad (11)$$

따라서 본 연구에서는 임계에너지 방출률  $G_{IC}$ 를 식 (7), (8), (11)을 이용하여 구한 후 상호 비교

검토하였다.

## 시험편 및 실험방법

### 1. 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 Table 1과 같으며, 각 재료를 A재, B재 그리고 C재로 호칭한다. 국산 프리프레그를 일방향과 섬유 방향을 달리하여 적층하였으며, 각각 24플라이(ply)로 적층 성형하였다. 일방향 적층은 하중에 직각방향으로 섬유가 배향하도록 적층하였으며, 알루미늄 호일(Al foil, 두께 30 $\mu$ m)을 12플라이와 13플라이 중간에 삽입하여 초기크랙으로 형성하였다. 섬유의 방향을 달리하여 적층한 경우에는 C재의 프리프레그를 사용하였으며, [0/45]<sub>6s</sub>, [0/90]<sub>6s</sub>, [0/45/90]<sub>4s</sub>의 3종류로 적층하여 일방향과 동일하게 12플라이와 13플라이 사이에 알루미늄 호일을 삽입하여 초기크랙으로 형성하여 성형하였다. 그리고 성형시에는 섬유

Table 1. The kinds of used materials.

symbol	material
Mat. A	100NS CU
Mat. B	100NS MCU
Mat. C	100NS HCU

Note) CU : carbon fiber unidirection

H : middle

H : high

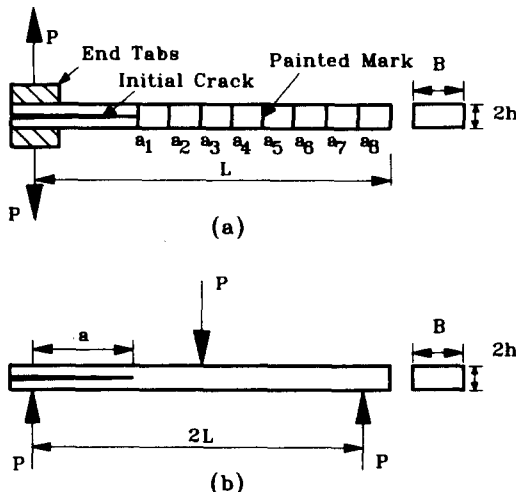


Fig. 1 The geometries of specimens. (a) DCB specimen (Mode I), (b) ENF specimen (Mode II)

함유율 50 vol.%와 제품치수의 변동을 억제하며 필요이상의 수지가 낭비되지 않도록 제작한 금형(250mm×250mm)를 사용하여 복합재료판을 성형하였다. 경화온도는 130 $^{\circ}$ C, 압력은 3.84kgf/cm<sup>2</sup>, 경화시간은 90분으로 하였다.

성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 모드 I 은 Fig. 1(a)와 모드 II 는 Fig. 1(b)와 같은 시험편으로 가공하였다.

### 2. 실험방법

모드 I 층간 파괴인성치를 구하기 위하여 시험편 폭은 20mm, 시험편 길이는 100mm, 초기크랙 길이를 50mm, 하중률을 2mm/min으로 하였다. 모드 II 층간 파괴 실험은 시험편 폭은 20mm, 시험편 길이는 100mm, 초기크랙 길이는 25mm, 하중률은 1mm/min으로 하였으며, 두 실험에 사용된 시험편은 최소 5개 이상으로 하여 실험을 행하였다.

모드 I 층간 파괴인성치 시험편은 크랙개구면 위 변화에 따라 시험편 양단이 균일한 하중을 받고 시험편 축 방향의 전단력을 최소화하기 위하여 장식을 시험편 선단에 에폭시 접착제를 사용하여 접착하였다. 모드 I 층간 파괴실험시 크랙길이는 Fig. 1(a)처럼 시험편 양면에 수정액을 칠한 후 4mm마다 눈금을 표시하고 이동현미경을 이용하여 측정하였다.

모드 II 층간 파괴인성치 시험편은 3점굽힘 실험을 행하였고, 모드 II 층간 파괴인성시험 때의 크랙 길이는 모드 I 시험과는 달리 크랙진전 속도가 빠르기 때문에 시험편 양면에 수정액을 칠하여 이동현미경으로 크랙길이를 측정하는 방법대신에 파괴되었을 때 파단면의 양단, 중앙의 세지점에서 크랙 길이를 측정 후 평균하여 크랙길이라고 하였다.

가공이 끝난 모드 I 과 모드 II 시험편을 만능시험기(Instron, 용량 5ton)를 사용하여 실험을 행하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 일방향 CFRP의 층간 파괴인성치

Fig. 2는 일방향 CFRP의 모드 I 층간 파괴인

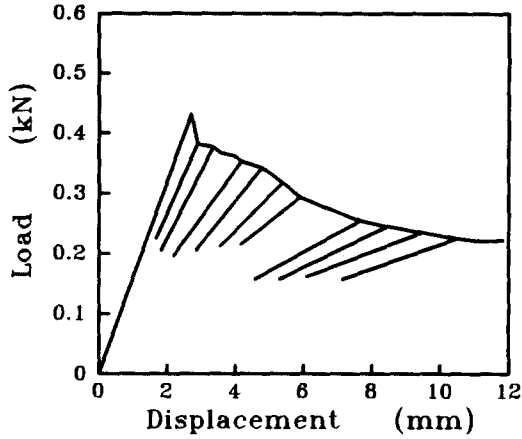


Fig. 2 The typical load - displacement curve for material C of unidirectional CFRP.

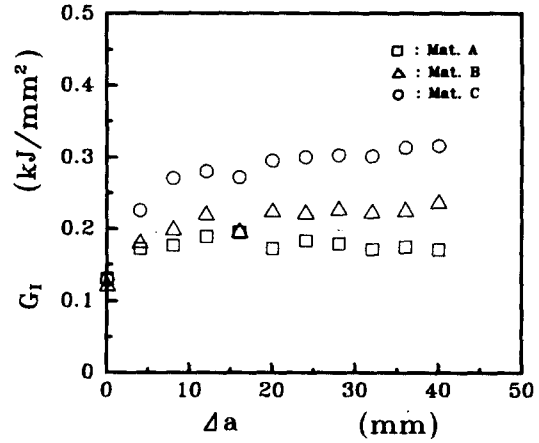


Fig. 4  $G_I$  as a function of crack length,  $a$ , for different materials.

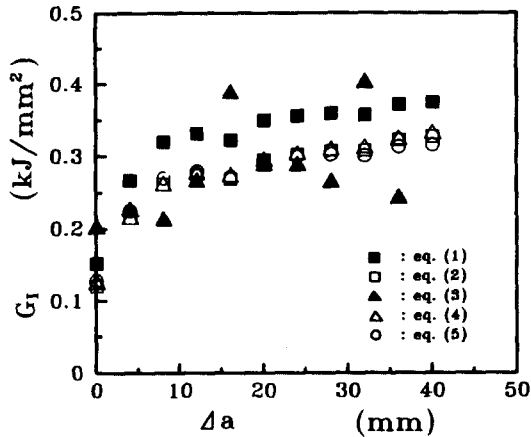


Fig. 3  $G_I$  as a function of crack length,  $a$ , for each method,  $\dot{Y}=2\text{mm/min}$ ,  $W=20\text{mm}$  and  $a_0=50\text{mm}$ .

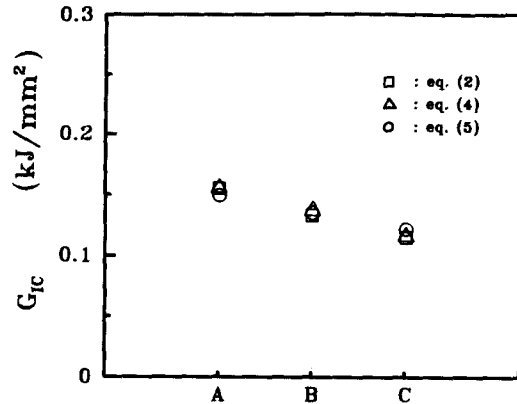


Fig. 5  $G_{IIc}$  as a function of crack length,  $a$ , for different materials,  $\dot{Y}=2\text{mm/min}$ ,  $W=20\text{mm}$  and  $a_0=50\text{mm}$ .

성치를 고찰하기 위하여 얻은 대표적인 하중 - 변위곡선을 나타낸 것이다. 프리프레그는 C재를 사용하였으며, 전형적으로 안정크랙성장의 경향임을 알 수 있다. 재료를 달리하는 경우 즉 A재와 B를 사용하는 경우에도 거의 동일한 경향을 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 C재의 경우에 대하여 Fig. 2의 하중 - 변위선도와 측정된 크랙길이를 이용하여 모드 I 임계에너지 방출률  $G_I$ 을 2장에서 기술한 여러가지 방법으로 계산하여 그 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 단순보 이론이나 콤플라이언스 법인 식 (1)이나 식 (3)으로 계산된 결과치는 수

정식으로 계산된 결과치와 일치하지 않으며, 흩어짐(scatter)이 발생하고 있다. 그러나 수정식인 식 (2), (4), (5)로 계산된 값은 세가지 모두 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4는 일방향 CFRP의 R - 곡선을 각 재료에 대하여 식 (4)로 계산한 결과만을 나타낸 것이다. 각 재료에 따라 R - 곡선이 다르게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 각 재료에 따라 R - 곡선이 다르게 되는 현상에 대하여 상세한 연구가 필요하다.

Fig. 5는 각각의 프리프레그를 사용한 일방향 CFRP의 모드 I 임계에너지 방출률  $G_{IIc}$ 를 2장에서 기술한 식 (2)과 식 (4) 그리고, 식 (5)로 계산한

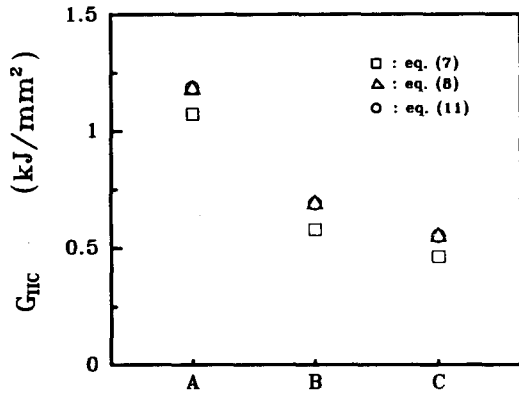


Fig. 6  $G_{1C}$  as a function of different material,  $\dot{Y} = 1\text{mm/min}$ ,  $W=20\text{mm}$  and  $a_0=25\text{mm}$ .

값을 나타낸 것이다.  $G_{1C}$ 의 값은 초기치만을 나타낸 것이며, 각 식에 의한 그 값은 서로 비슷하고 세 가지 재료 중에서 A재가 높고 C재가 가장 낮게됨을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 국산 CFRP의 층간 파괴인성치에 대한 실험결과가 회박하여 직접적으로 비교할 수는 없지만 생산회사인 한국화이버(주)에서 제시하는 탄성계수가 A재가 가장 낮고, C재가 가장 높다는 것을 참조하면 유추할 수 있는 결과라 생각된다.

Fig. 6은 각각의 프리프레그를 사용한 일방향 CFRP의 모드 II 임계에너지 방출률  $G_{1C}$ 를 2장에서 기술한 식 (7)과 식 (8) 그리고 식 (11)로 계산한 값을 나타낸 것이다. ENF 시험편을 사용하는 모드 II에서는 모드 I과는 하중상태가 다르므로 모드 I보다 크랙 진전 속도가 매우 빨라서 육안으로는 크랙길이의 측정이 불가능하였다. 따라서 모드 I에서와 같이 크랙증분에 대한 R-곡선을 나타내지 못하였고 모드 II 임계에너지 방출률  $G_{1C}$  값들은 초기 값만을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 A재의 경우에 각 식에 의한  $G_{1C}$  값들은 거의 일정하며, 이러한 결과는 B재와 C재의 경우에도 동일한 경향을 나타내었다.  $G_{1C}$ 의 값은 A재가 높고 그다음 B, C재의 순서로 낮게됨을 알 수 있다.

2. 사교적층판 CFRP의 층간 파괴인성치

Fig. 7은 CFRP의 적층시 섬유방향을  $[0/90]_{66}$ 로

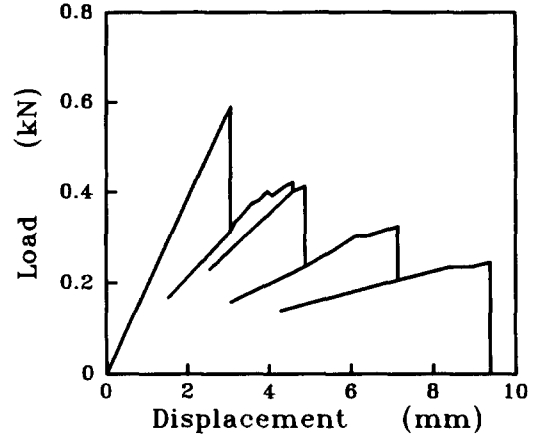


Fig. 7 The load - displacement curve of  $[0/90]_{66}$ .

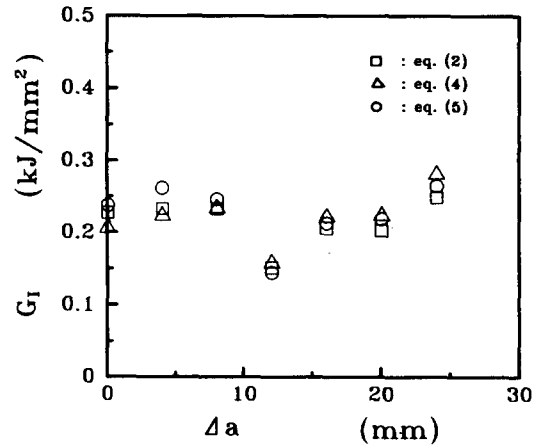


Fig. 8  $G_I$  as a function of crack length, a, for  $[0/90]_{66}$ ,  $\dot{Y} = 2\text{mm/min}$ ,  $W=20\text{mm}$  and  $a_0=50\text{mm}$ .

적층하여 성형한 CFRP의 모드 I 층간 파괴인성치의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 프리프레그는 C재를 사용하였으며, 불안정 크랙성장이 지배적인 경향을 보이고 있다. 그러나 동일한 프리프레그를 사용하여  $[0/45]$ 의 섬유방향으로 적층성형한 CFRP의 경우에는 비교적 안정크랙성장의 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 C재를 사용하여 적층방향을  $[0/90]_{66}$ 로 적층성형한 CFRP의 에너지 해방률  $G_I$ 을 Fig. 8의 하중-변위선도와 측정된 크랙길이를 이용하여 식 (2), (4) 그리고 (5)에 의하여 계산된 결과를 나타낸 것이다. 수정식들은 식 (2), (4) 그리고 (5)에 의해 계산된 값들이 일정하지 않았고 이 값들에 의해 구

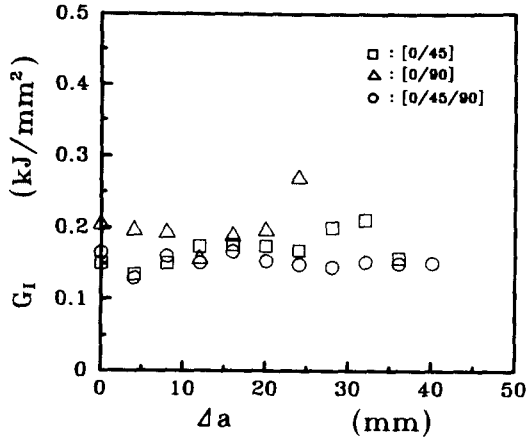


Fig. 9  $G_I$  as a function of crack length,  $a$ , for different fiber orientation,  $\dot{Y}=2\text{mm/min}$ ,  $W=20\text{mm}$  and  $a_0=50\text{mm}$ .

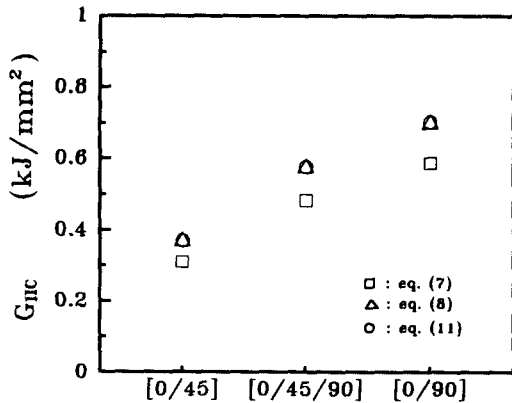


Fig. 10  $G_{IIc}$  as a function of crack length,  $a$ , for different fiber orientation,  $\dot{Y}=1\text{mm/min}$ ,  $W=20\text{mm}$  and  $a_0=25\text{mm}$ .

성되는 R-곡선은 안정과 불안정 크랙성장이 혼재된 경향을 보이고 있다. 적층섬유방향이 [0/45]와 [0/45/90]인 경우의 R-곡선은 Fig.8과 비교하여 비교적 안정크랙성장의 경향을 타내었다.

Fig. 9는 섬유방향을 다르게 적층한 세가지 CFRP의 R-곡선을 식 (4)로 계산한 결과만을 나타낸 것이다. 그 값은 [0/90]가 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 적층섬유방향이 [0/45/90]인 경우의 R-곡선을 제외하고는 대부분이 불안정 크랙성장이 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 6의 경우와 동일하게 C재를 사용

한 서로 다른 적층방향을 가지는 CFRP의  $G_{IC}$ 를 식 (7), (8), (11)로 계산하여 나타낸 것이다. 그 값들은 일방향 CFRP의  $G_{IC}$ 의 경우와 동일하게 빠른 크랙진전속도로 인하여 초기 값을 나타내고 있으며, 각 식에 의한 값들도 거의 일정함을 알 수 있다. 그리고 섬유방향을 달리하였을 때의  $G_{IC}$  값들은 모드 I에서의 결과와 동일하게 [0/90]가 가장 높고, [0/45/90], [0/45]의 순으로 낮게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 적층시 45°플라이를 삽입하기 때문이라고 생각되며, 이에 대한 상세한 연구가 요망된다. 그리고 Fig. 6의  $G_{IC}$ 와 비교하여 보면 [0/45]의  $G_{IC}$ 의 값은 일방향의  $G_{IC}$ 와 거의 일치하며 [0/90]와 [0/45/90]의  $G_{IC}$  값은 일방향의 그것보다 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 45°플라이의 삽입은  $G_{IC}$ 에 별다른 영향을 주지 않고, 90°플라이의 삽입은  $G_{IC}$ 의 개선에 유효한 것으로 생각된다.

## 결 론

강도가 각각 다른 세 종류의 프리프레그를 사용하여 일방향 CFRP를 적층하였으며, 모드 I과 모드 II 실험을 통하여 층간 파괴인성치를 고찰하였고, 또한 적층 섬유방향을 변화시킨 사교적층판의 그것도 함께 고찰하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

1) 임계에너지 방출률  $G_{IC}$ 의 값을 컴플라이언스 법, 수정 컴플라이언스 법, 그리고 보이론에 의해 계산하여 비교 검토한 결과 본 연구에서 사용한 수정식에 의한 값들이 거의 일치하였다.

2)  $G_{IC}$  값은 대체로 프리프레그의 C, B, A재의 순으로 높게 나타났으며,  $G_{IC}$ 의 값을 세가지 식에 의해 계산하여 비교 검토한 결과 거의 일치하였다.

3) 사교적층판의 경우  $G_{IC}$  값은 [0/90]<sub>6s</sub>, [0/45]<sub>6s</sub>, [0/45/90]<sub>4s</sub>의 순으로 높게 나타났으며,  $G_{IIc}$ 는 [0/90]<sub>6s</sub>, [0/45/90]<sub>4s</sub>, [0/45]<sub>6s</sub>의 순으로 높게 나타났다.

4) 사교적층판과 일방향의 임계에너지 방출률을 비교하였을 때, 모드 I의 경우 일방향의 결과가 다소 높았으며, 모드 II의 경우는 [0/45]<sub>6s</sub>의 결과는 거의 일치함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Smiley, A.J. and R.B. Pipes (1987) : Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials, *J. Comp. Mat.* 21, 670 - 687.
- 2) Hashemi, S., A.J. Kinloch and J.G. Williams (1989) : Corrections Needed in Double - Cantilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fiber - Composites, *J. Mat. Sci. Letters* 8, 125 - 129.
- 3) Davies, P., W.J. Cantwell and H.H. Kausch (1990) : Delamination from Thin Starter Films in Carbon Fiber/PEEK Composites, *J. Mat. Sci. Letters* 9, 1349 - 1350.
- 4) Hashemi, S., A.J. Kinloch and J.G. Williams (1990) : The Effects of Geometry, Rate and Temperature on the Mode I, Mode II and Mixed - Mode I/II Interlaminar Fracture of Carbon - Fiber/Poly(ether - ether ketone) Composites, *J. Comp. Mat.* 24, 918 - 956.
- 5) 정나현 · 홍창선 (1992) : Graphite/peek 복합재료의 모드 I 파괴인성 특성 고찰, 한국복합재료 학회 춘계 학술발표회 초록집, 23 - 29.
- 6) 심재열 · 홍창선(1992) : 유한요소법에 의한 수정된 ENF 시험편의 에너지 방출을 해석, 한국복합재료 학회지 5(1), 16 - 26.
- 7) Carlsson, L.A., J.W. Gillespie, Jr and R.B. Pipes (1986) : On the Analysis and Design of the End Notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing, *J. Comp. Mat.* 20, 594 - 604.
- 8) 김형진, 엄윤성, 고성위(1994) : CFRP 복합재료의 Mode I 층간 파괴인성치에 관한 연구, 한국복합재료 학회지 7(4), 66 - 73.
- 9) Aliyu, A.A. and L.M. Daniel (1985) : Rate Effects on Delamination Fracture Toughness of a Toughened Graphite/Epoxy, *ASTM STP* 876, 336 - 348.
- 10) Katz, D. and S. Bron (1991) : Effect of Temperature and Superimposed Dynamic and Static Stress on Mechanical Properties of Epoxy - Bonded Joints, *J. Mat. Sci.* 26, 4733 - 4741.
- 11) 정석곤 (1995) : 성형조건에 따른 CFRP의 파괴거동에 관한 연구, 부산수산대학교 대학원 석사학위논문.
- 12) Carlsson, L.A., C. - G. Aronsson and J. Backlund (1989) : Notch Sensitivity of Thermoset and Thermoplastic Laminates Loaded in Tension, *J. Mat. Sci.* 24, 1670 - 1682.
- 13) Whitney, J.M., C.E. Browning and A. Mair (1974) : Analysis of the Flexure Test for Laminated Composite Materials, *ASTM STP* 546, 30 - 45.
- 14) 이창수 · 황운봉 · 한경섭 · 윤병일( 1991) : 탄소섬유강화 복합적층판의 파괴특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집 15(1), 49 - 60.
- 15) 裴泰聖 · 笠野英秋 · 梁東律 (1993) : CFRP 사교적층판의 충격손상에 관한 연구, 대한기계학회논문집 17(2), 237 - 247.
- 16) 김형진 · 엄윤성 · 김엄기 · 고성위 (1995) : CFRP 복합재료의 모드 II 층간 파괴인성치에 관한 연구, 한국복합재료학회지 심사증.
- 17) Davies, P. (1991) : Polymers & Composites Task Group Round Robin Protocols for Mode I, Mode II and Mixed Mode Testing, European Structural Integrity Society.
- 18) Davies, P., C. Moulin, H.H. Kausch and M.M. Fisher (1990) : Measurement of  $G_{IC}$  and  $G_{IIC}$  in Carbon/Epoxy Composites, *Comp. Sci. Tech.* 39, 193 - 205.