

◎ 論 文

층간파괴인성치에 대한 섬유방향의 영향에 관한 연구+

이 정 규* · 엄 윤 성** · 김 형 진*** · 고 성 위****
(95년 7월 24일 접수)

A Study on the Effect of Fiber Orientation on the Interlaminar Fracture Toughness

Jung-Kyu Lee* · Yoon-Sung Um** · Hyung-Jin Kim*** · Sung-Wi Koh****

Key Words : Interlaminar Fracture Toughness(층간 파괴인성치), Fracture Mechanisms (파괴기구), Fiber Orientation(섬유방향), Critical Energy Release Rate(임계 에너지 방출률), Cross-Ply Laminate(사교적층판)

Abstract

To investigate the effect of fiber orientation on the interlaminar fracture toughness of carbon fiber reinforced plastics three prepregs which are domestic products are used in this paper. 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 specimens used for the mode I and mode II tests are DCB and ENF configurations, respectively. The fractured surface of the DCB and ENF samples are examined by scanning electron microscope(SEM). 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. The highest value of G_{IIC} at crack initiation, however, is obtained at the [0/90]_{6s} interlaminar and the lowest one is at the [0/45]_{6s}. The photographs of SEM show a difference behaviour between mode I and mode II fracture surface.

+ 1995년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 발표(1995. 6)

* 부산수산대학교 산업대학원

** 부산수산대학교 대학원

*** 경상대학교 기관공학과

**** 부산수산대학교 기관공학과

1. 서 론

섬유강화 복합재료의 파괴거동 중의 하나인 층간파괴(interlaminar fracture)는 층간분리이며, 이 현상은 가장 취약한 층 사이의 면에서 발생된다. 이것은 성형, 가공, 그리고 실제 구조물에 사용시 발생하는 층간결합으로 나타나게 된다. 층간결합은 재료의 취성 등의 원인과 결합하여 구조물의 강성저하, 층간박리의 요인이 되어 최종 파단을 초래하므로 매우 중요하다. 층간결합에 의한 파괴현상은 모드 I이 지배적이거나¹⁾ 실제 구조물에서는 모드 I과 모드 II가 결합된 혼합모드에 의해 발생하게 된다. 그러나 혼합모드^{2),3)}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 II에 대한 층간 파괴인성치에 영향을 주는 인자들 중에서 시험편 두께^{4)~7)}, 시험편 폭과 길이^{7),8)}, 초기크랙의 길이^{3),4)}, 하중률(loading rate)^{1),8),9)}, 성형조건^{10),11)} 등에 관하여 연구가 다량 진행되었다. 또한 섬유방향에 따른 여러가지 성질에 관한 연구는 인장강도¹²⁾, 굽힘강도¹³⁾, 피로강도¹⁴⁾, 충격손상¹⁵⁾ 등 많은 연구결과가 있으나 층간 파괴인성치에 관한 연구는 매우 적으므로 이에 대한 많은 연구가 요망된다.

따라서 본 연구에서는 국산 CFRP 복합재료의 층간 파괴인성치에 관한 종합적인 연구^{8),11),16)}의 일환으로 국내에서 강도별로 생산하고 있는 3종류의 탄소섬유 프리프레그를 시험재료로 사용하여 섬유 방향을 일방향, [0/45], [0/90], [0/45/90]으로 변화시켜 적층하여 모드 I과 모드 II 층간 파괴실험을 통하여 임계에너지 방출률 G_{IC} 와 G_{IIC} 에 관하여 고찰하였다. 임계에너지 방출률 G_{IC} 와 G_{IIC} 의 계산을 여러가지 식으로 계산하여 각각 비교 검토하였으며, 또한 일방향과 사교적층판의 G_{IC} 와 G_{IIC} 를 상호 비교검토 하였다. 그리고 모드 I과 모드 II 층간 파괴실험시의 파단면을 주사현미경 사진을 통하여 정성적으로 고찰하였다.

2. 평가 방법에 대한 이론적 고찰

2.1 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 P는 하중, δ 는 변위, W는 시험편 폭 그리고 a는 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 a와의 관계를 최소자승법에 의해 절편 Δ 를 구하여 이를 크랙길이에 더해서 수정하면 다음과 같다¹⁷⁾.

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

또한 G_{IC} 는 컴플라이언스의 증분 dC를 이용하여 표시하면 다음과 같다.

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

식 (3)을 양대수 좌표에 기울기 n을 이용하여 실험적으로 컴플라이언스를 수정하는 방법으로는 식 (4)와 같다¹⁸⁾.

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

한편 Chou 등¹⁹⁾은 a/h 와 $C^{1/3}$ 과의 기울기 A_1 을 이용하는 다음과 같은 수정식을 제안하였다.

$$G_{IC} = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2WA_1 h} \quad (5)$$

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

여기서 h는 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.

2.2 모드 II 층간 파괴인성치

보이론에 의한 모드 II 임계에너지 방출률 $G_{IIC}^{(2)}$ 는 다음과 같다.

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

여기서 L은 전체 시험편 길이의 1/2이고, a는 크랙길이를 나타낸다.

또한 탄성계수 E를 이용한 다음 식이 있다.

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

여기서 E는 a=0일 때 측정된 탄성계수로서 다음과 같다.

$$E = \frac{L^3}{4 W C h^3} \quad (9)$$

또 다른 방법은 컴플라이언스 C와 크랙길이 a를 무차원화시켜 계산하는 식(11)이 있다.

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

여기서 m은 C/C₁와 (a/L)³의 기울기이다.

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

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

3. 시험편 및 실험방법

3.1 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(한국화이버)로서 Table 1과 같으며, 각 재료를 A재, B재 그리고 C재로 호칭한다. 국산 프리프레그를 일방향과 섬유의 방향을 달리하여 적층하였으며, 각각 24플라이(ply)로 적층 성형하였다. 일방향 적층은 하중에 직각방향으로 섬유가 배향하도록 적층하였으며, 알루미늄 호일(Al foil, 두께 30

μm)을 12플라이와 13플라이 중간에 삽입하여 초기 크랙으로 형성하였다. 섬유의 방향을 달리하여 적층한 경우에는 C재의 프리프레그를 사용하였으며, [0/45]_{6s}, [0/90]_{6s}, [0/45/90]_{4s}의 3종류로 적층하여 일방향과 동일하게 초기크랙을 형성하여 성형하였다. 그리고 성형시에는 섬유 함유율 50 vol%와 제품치수의 변동을 억제하며 필요이상의 수지가 낭비되지 않도록 제작한 금형(250mm×250mm)을 사용하여 복합재료판을 성형하였다. 경화온도는 130 °C, 압력은 3.77 kgf/cm², 경화시간은 90분으로 하였다.

성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 모드 I은 Fig. 1(a)와 모드 II는 Fig. 1(b)와 같은 시험편으로 가공하였다.

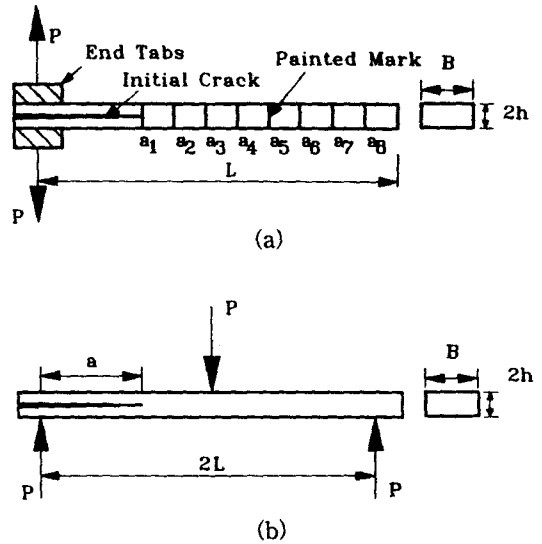


Fig. 1 The geometries of specimens. (a) DCB specimen (Mode I), (b) ENF specimen (Mode II)

Table 1. The kinds of used materials.

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

Nate) CU : carbon fiber Unidirection
 M : middle
 H : high

3.2 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 크랙개구변위 변화에 따라 시험편 양단이 균일한 하중을 받고 시험편 축 방향의 전단력을 최소화하기 위하여 장쇠를 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 측정한 후 평균하여 크랙길이로 하였다.

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

4. 결과 및 고찰

4.1 일방향 CFRP의 층간 파괴인성치

Fig. 2는 일방향 CFRP의 모드 I 층간 파괴인성치를 고찰하기 위하여 얻은 대표적인 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 프리프레그는 C재를 사용하였으며, 전형적으로 안정크랙성장의 경향을 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 입계 에너지 방출률 G_I 를 2장에서 기술한 여러가지 방법으로 계산하여 그 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 단순보 이론이나 콤파라이언스 법인 식 (1)이나 식 (3)으로 계산된 결과치는 수정식으로 계

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

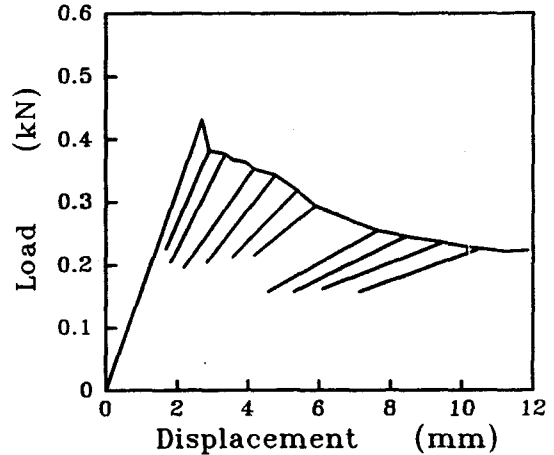


Fig. 2 The typical load-displacement curve for material C of unidirectional CFRP.

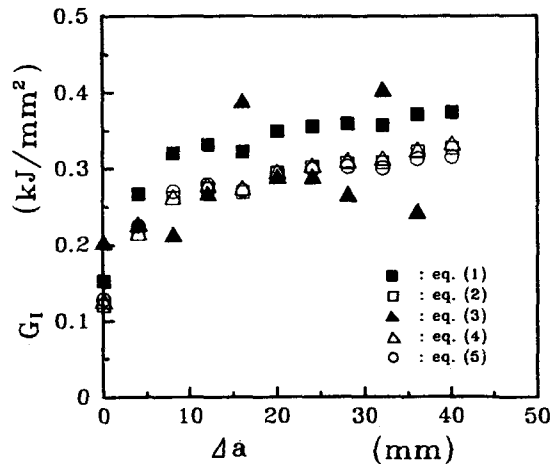


Fig. 3 G_I as a function of crack length, a , for each method, $\dot{\gamma} = 2$ mm/min, $W = 20$ mm and $a_0 = 50$ mm.

Fig. 4는 프리프레그가 A재인 경우에 일방향 CFRP의 에너지 방출률 G_I 를 수정식들인 식 (2), (4), (5)에 의하여 계산된 값을 나타낸 것이다. 각 식들에 의한 G_{IC} 의 값들은 거의 일정하고, 이 값에 의하여 구성되는 R-곡선은 비교적 안정된 경향을

보여 주고 있음을 알 수 있다. 재료를 달리하는 경우 즉 B재나 C재의 경우에도 R-곡선은 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 5는 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.

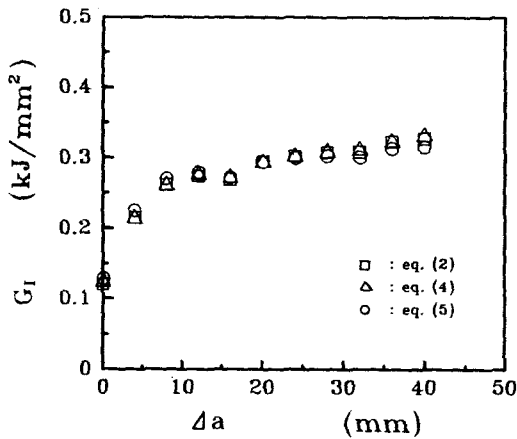


Fig. 4 G_I as a function of crack length, a , for material A, $\dot{\gamma} = 2\text{mm/min}$, $W = 20\text{ mm}$ and $a_0 = 50\text{ mm}$.

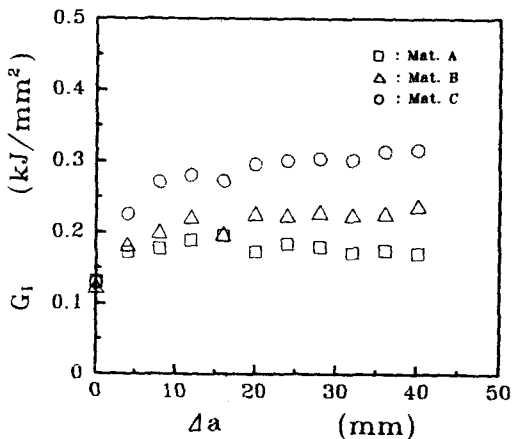


Fig. 5 G_I as a function of crack length, a , for different materials.

Fig. 6은 각각의 프리프레그를 사용한 일방향

CFRP의 모드 I 임계에너지 방출률 G_{Ic} 를 2장에서 기술한 식 (2)와 식 (4) 그리고, 식 (5)로 계산한 값을 나타낸 것이다. G_{Ic} 의 값은 초기치만을 나타낸 것이며, 각 식에 의한 그 값은 서로 비슷하고 세가지 재료 중에서 A재가 높고 C재가 가장 낮게됨을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 국산 CFRP의 층간 파괴인성치에 대한 실험결과가 희박하여 직접적으로 비교할 수는 없지만 생사회사인 한국화이버(주)에서 제시하는 탄성계수가 A재가 가장 낮고, C재가 가장 높다는 것을 참조하면 유추할 수 있는 결과라 생각된다.

Fig. 7은 각각의 프리프레그를 사용한 일방향 CFRP의 모드 II 임계에너지 방출률 G_{IIc} 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 크랙중분에 대한 R-곡선을 나타내지 못하였고 모드 II 임계에너지 방출률 G_{IIc} 값들은 초기 값만을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 A재의 경우에 각 식에 의한 G_{IIc} 값들은 거의 일정하며, 이러한 결과는 B재와 C재의 경우에도 동일한 경향을 나타내었다. G_{IIc} 의 값은 A재가 높고 그다음 B, C재의 순서로 낮게됨을 알 수 있다.

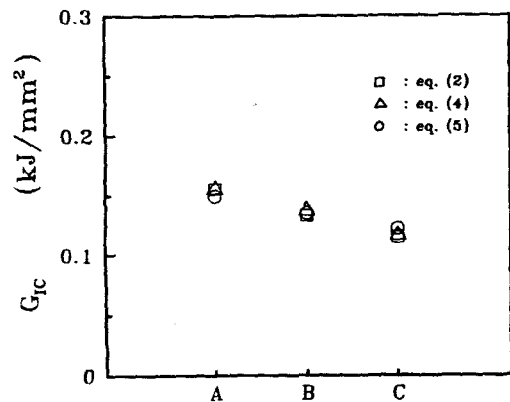


Fig. 6 G_{Ic} as a function of crack length, a , for different materials, $\dot{\gamma} = 2\text{mm/min}$, $W = 20\text{mm}$ and $a_0 = 50\text{mm}$.

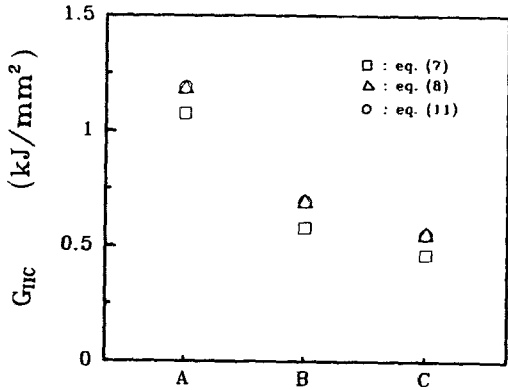


Fig. 7 G_{IIc} as a function of different material, $\dot{\gamma} = 1\text{mm/min}$, $W = 20\text{mm}$ and $a_0 = 25\text{mm}$.

4.2 사교적층판 CFRP의 층간 파괴인성치

Fig. 8은 CFRP의 적층시 섬유방향을 [0/90]로 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 적층 성형한 CFRP의 경우에는 비교적 안정크랙성장의 경향을 나타내었다.

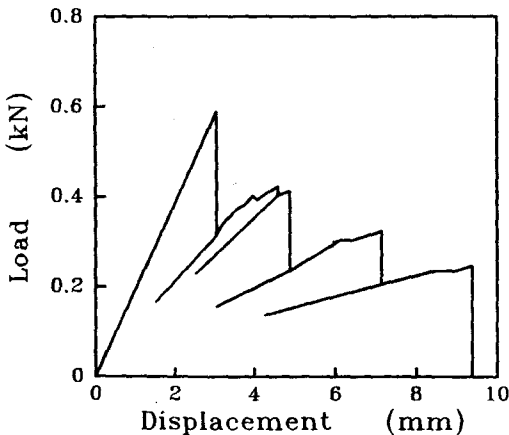


Fig. 8 The load-displacement curve of [0/90]_{6s}.

Fig. 9는 C재를 사용하여 적층방향을 [0/90]_{6s}로 적층 성형한 CFRP의 에너지 해방을 G_I 를 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 구성되는 R-곡선은 안정과 불안정 크랙성장이 혼재된 경향을 보이고 있다. 적층섬유방향이 [0/45]와 [0/45/90]인 경우의 R-곡선은 Fig. 4와 유사한 경향을 나타내었다.

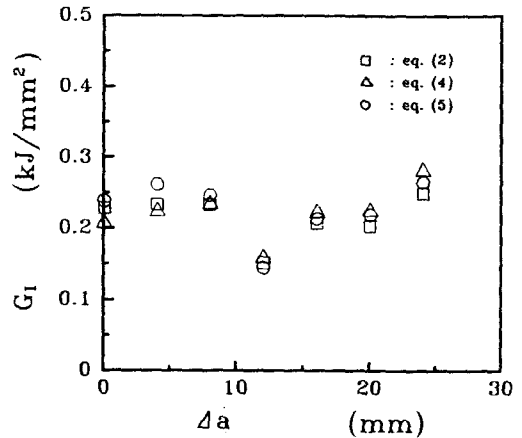


Fig. 9 G_I as a function of crack length, a , for [0/90]_{6s}, $\dot{\gamma} = 2\text{mm/min}$, $W = 20\text{mm}$ and $a_0 = 50\text{mm}$.

Fig. 10은 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. 11은 Fig. 7의 경우와 동일하게 C재를 사용한 서로 다른 적층방향을 가지는 CFRP의 G_{IIc} 를 식 (7), (8) 그리고 (11)로 계산하여 나타낸 것이다. 그 값들은 일방향 CFRP의 G_{IIc} 의 경우와 동일하게 빠른 크랙진전속도로 인하여 초기 값만을 나타내고 있으며, 각 식에 의한 값들도 거의 일정함을 알 수 있다. 그리고 섬유방향을 달리하였을 때의 G_{IIc} 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° 플라이의 삽

입 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.

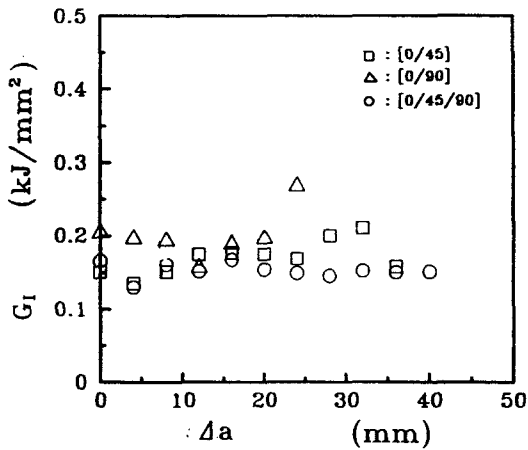


Fig. 10 G_I as a function of crack length, a , for different fiber orientation, $\dot{\gamma} = 2\text{mm/min}$, $W = 20\text{mm}$ and $a_0 = 50\text{mm}$.

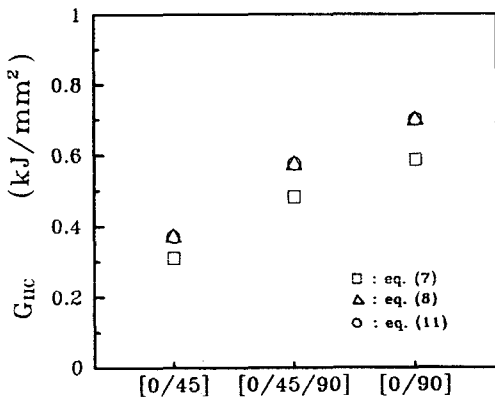


Fig. 11 G_{IC} as a function of crack length, a , for different fiber orientation, $\dot{\gamma} = 1\text{mm/min}$, $W = 20\text{mm}$ and $a_0 = 25\text{mm}$.

4.3 파면해석

Fig. 12는 모드 I 층간 파괴시험을 행하여 얻은 파면 중에서 안정 크랙성장이 발생한 파면의 SEM 사진이다. 그 특성은 섬유절단(fiber breakage)이 보이고 있으며, 섬유 브리징(fiber bridging)이 많으며, 또한 섬유의 표면에 매트릭스가 균일하게 남아 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 Fig. 11과 동일한 조건이지만 불안정 크랙성장이 발생한 파면을 사진촬영한 것이다. 이 사진으로부터 섬유절단과 섬유 브리징을 볼 수 있으나 안정크랙성장과 달리 섬유의 표면에는 매트릭스가 균일하게 분포되어 있는 것이 아니고 불균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 모드 II 층간 파괴시험을 통하여 얻은 파면의 SEM사진이다. 섬유절단을 거의 찾아볼 수 없고 섬유 브리징도 발견할 수 없었다. 섬유의 표면에는 매트릭스가 거의 접촉되어 있지 않고 섬유 사이의 매트릭스가 해클 크랙(hackle crack)이 발생하여 전형적인 불안정 크랙이 발생함을 알 수 있었다²³⁾. 동일한 불안정 크랙성장의 경우에서 모드 I 파면의 사진인 Fig. 13과 비교하여 보면 모드 II의 경우에는 같은 불안정 크랙성장의 경우라 할지라도 섬유절단과 섬유 브리징이 거의 없으며, 또한 섬유표면에 매트릭스가 거의 접촉되어 있지 않음을 알 수 있다.

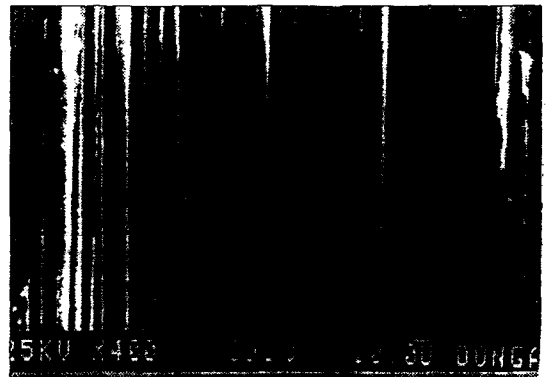


Fig. 12 The SEM photograph of stable crack growth for mode I test.

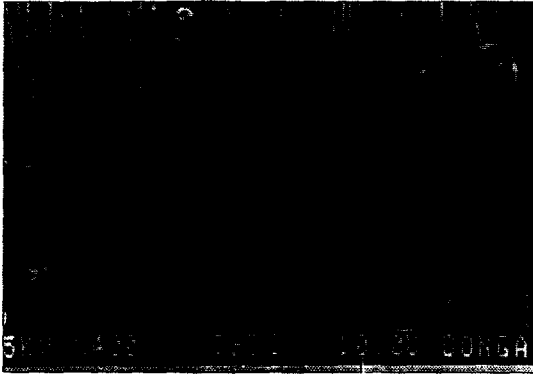


Fig. 13 The SEM photograph of unstable crack growth for mode I test.

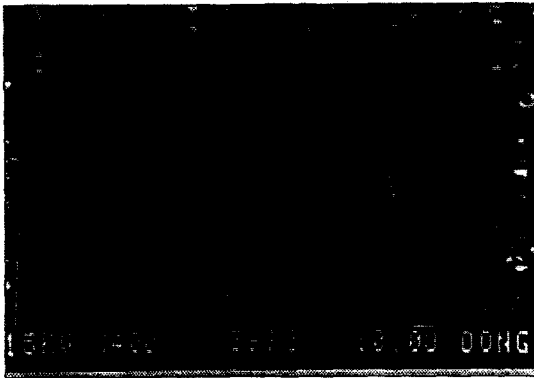


Fig. 14 The SEM photograph of unstable crack growth for mode II test.

5. 결 론

강도가 각각 다른 세 종류의 프리프레그를 사용하여 일방향 CFRP를 적층하였으며, 모드 I과 모드 II 실험을 통하여 층간 파괴인성치를 고찰하였고, 또한 적층섬유방향을 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 수

정식에 의한 값들이 거의 일치하였다.

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

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

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

참 고 문 헌

- 1) Smiley, A.J. and Pipes, R.B., "Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials", J. Comp. Mat. 21, 670-687, 1987.
- 2) Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G. "Corrections Needed in Double-Cantilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fiber-Composites", J. Mat. Sci. Letters 8, 125-129, 1989.
- 3) Davies, P., Cantwell, W.J. and Kausch, H.H., "Delamination from Thin Starter Films in Carbon Fiber/PEEK Composites", J. Mat. Sci. Letters 9, 1349-1350, 1990.
- 4) Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G., "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, 1990.
- 5) 정나현, 홍창선, "Graphite/peek 복합재료의 모드 I 파괴인성 특성 고찰", 한국복합재료학회 춘계 학술발표회 초록집, 23-29, 1992.
- 6) 심재열, 홍창선, "유한요소법에 의한 수정된 ENF 시험편의 에너지 방출을 해석", 한국복합재료학회지 5(1), 16-26, 1992.
- 7) Carlsson, L.A., Gillespie, Jr, J.W. and Pipes, R.B., "On the Analysis and Design of the

- End Notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing", *J. Comp. Mat.* 20, 594-604, 1986.
- 8) 김형진, 엄윤성, 고성위, "CFRP 복합재료의 Mode I 층간 파괴인성치에 관한 연구", *한국복합재료학회지* 7(4), 66-73, 1994.
 - 9) Aliyu, A.A. and Daniel, L.M., "Rate Effects on Delamination Fracture Toughness of a Toughened Graphite/Epoxy", *ASTM STP* 876, 336-348, 1985.
 - 10) Katz, D. and Bron, S., "Effect of Temperature and Superimposed Dynamic and Static Stress on Mechanical Properties of Epoxy-Bonded Joints", *J. Mat. Sci.* 26, 4733-4741, 1991.
 - 11) 정석곤, "성형조건에 따른 CFRP의 파괴거동에 관한 연구", 부산수산대학교 대학원 석사학위 논문, 1995.
 - 12) Carlsson, L.A., Aronsson, C.-G. and Backlund, "Notch Sensitivity of Thermoset and Thermoplastic Laminates Loaded in Tension", *J. Mat. Sci.* 24, 1670-1682, 1989.
 - 13) Whitney, J.M., Browning, C.E. and Mair, A., "Analysis of the Flexure Test for Laminated Composite Materials", *ASTM STP* 546, 30-45, 1974.
 - 14) 이창수, 황운봉, 한경섭, 윤병일, "탄소섬유강화 복합저층판의 피로특성에 관한 연구", *대한기계학회논문집* 15(1), 49-60, 1991.
 - 15) 裴泰聖, 笠野英秋, 梁東律, "CFRP 사교적층판의 충격손상에 관한 연구", *대한기계학회논문집* 17(2), 237-247, 1993.
 - 16) 김형진, 엄윤성, 김엄기, 고성위, "CFRP 복합재료의 모드 II 층간 파괴인성치에 관한 연구", *한국복합재료학회지* 심사중, 1995.
 - 17) Davies, P., "Polymers & Composites Task Group Round Robin Protocols for Mode I, Mode II and Mixed Mode Testing", *European Structural Integrity Society*, 1991.
 - 18) Davies, P., Moulin, C., Kausch, H.H. and Fisher, M.M., "Measurement of G_{Ic} and G_{IIc} in Carbon/Epoxy Composites", *Comp. Sci. Tech.* 39, 193-205, 1990.
 - 19) Chou, I., Kimpara, I., Kageyama, K. and Ohsawa, I., *J. Soc. Mat. Sci. Japan* 41, 1292-1298, 1992.
 - 20) Todoroki, A., Kobayashi, H. and Lee, J.G., "Micromechanism and Delamination Resistance of CF/PEEK", *Trans. JSME(A)*, 60(573), 1272-1279, 1994.