

하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴인성치에 관한 연구

김형진* · 박명일** · 곽대원** · 김재동* · 고성위***

*경상대학교 수송기계공학부/해양산업연구소 **경상대학교 수송기계공학부 대학원

***부경대학교 기계공학부

A Study on Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites

HYUNG-JIN KIM*, MYUNG-ILL PARK**, DAE-WON GWARK** JAE-DONG KIM* AND SUNG-WI KOH***

*School of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University Tongyeong, Korea

**School of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University Tongyeong, Korea

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Loading Rate 하중률, Hybrid Composite, 하이브리드 복합재료, Interlaminar Fracture Toughness 층간파괴인성치, Initial Crack Length 초기크랙길이

ABSTRACT: This paper describes the effect of loading rate, specimen geometries and material properties for Mode II interlaminar fracture toughness of hybrid composite by using end notched flexure(ENF) specimen. In the range of loading rate 0.5~2mm/min, there is found to be no significant effect of loading rate with the value of critical energy release rate(G_{IIC}). There is no dependence of the interlaminar fracture energy upon the specimen width over the specimen widths examined. The value of G_{IIC} for variation of initial crack length are nearly similiar values when material properties are CF/CF and GF/GF, however, the value of G_{IIC} are highest with the increasing initial crack length at CF/GF. The values of G_{IIC} for variation material properties are higher with the increasing moulding pressure when moulding pressures are 307, 431, 585kPa. The SEM photographs show good fiber distribution and interfacial bonding of hybrid composites when the moulding is the CF/GF.

1. 서 론

하이브리드(Hybrid) 복합재료는 2종류의 이상의 섬유 또는 2종류의 이상의 기지로 되어진 복합재료이다. 보통 CF/GF(탄소/유리) 또는 CF/ArF(탄소/아라미드)와 같은 2종류의 섬유를 이용하며, 최근에는 하이브리드 기지라 하여 두 가지 기지를 사용하기도 한다. 이러한 하이브리드 복합재료는 항공기, 우주선, 자동차, 선박 및 각종의 스포츠 용품에 이르기까지 광범위하게 사용된다. 또한 섬유가 고성능화 되면서 섬유강화복합재료가 단순한 대체재료가 아니라 종래의 재료에서는 도저히 불가능한 극한 환경에도 견딜 수 있는 재료라는 것이 널리 인식되자 그 사용환경의 확대를 위해 기지의 개량에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

하이브리드 복합재료는 적층형 구조재로 제작되는 경우가 대부분이고, 적층형 복합재료의 가장 일반적인 수명 한계 손상 모드(Mode)는 층간분리이며, 이것은 층과 층 사이의 기지 층

에서 성장한다. 일반 구조물에서 층간분리는 제조 중이나 실제 구조물 사용 시 정적 혹은 피로 부하에 의해서 일어나고, 이곳에 응력집중이 발생한다. 이러한 현상은 재료의 강성, 강도저하의 원인이 되고 구조물의 급격한 파손을 야기한다. 따라서 섬유강화 복합재료의 층간분리저항의 신뢰성 있는 값을 얻는 것은 복합재료의 구조물 설계 시 가장 중요한 부분이며, 층간결합의 파괴현상을 규명하기 위한 모드(Mode) I 과 모드 II 임계에너지 방출률에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Davies, 1991; 김형진 등 1996).

본 연구에서는 하이브리드복합재료의 층간파괴인성치 G_{IIC} 에 대한 종합적인 연구의 일환(이정규 등, 1995; 김형진 등, 1998)으로 모드 II의 하중을 받는 ENF(end notched flexures) 시험편을 이용하여 압력을 일정하게 유지하고 CF/GF의 복합화된 프리프레그를 이용하여 16플라이와 17플라이 사이의 계면을 CF/GF, CF/CF, GF/GF로 적층순서를 변화시키는 방법, 각각의 적층조건에서 시험편 폭, 하중점변위를, 초기크랙길이, 성형 압력 등이 층간파괴인성치 G_{IIC} 에 미치는 영향을 상호비교 검토하였다. 또한 파단실험시 파단면의 양쪽을 주사현미경 사진을 통하여 적층면의 파단현상과 적층순서의 변화에 따른 영향을 정성적으로 고찰하였다.

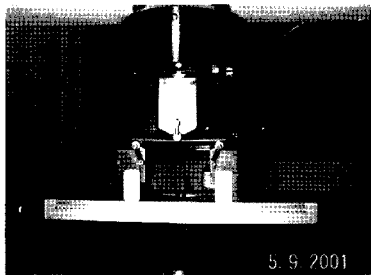
제1저자 김형진 연락처: 경상남도 통영시 인평동 445

055-640-3124 gjkim@gaechuk.gsnu.ac.kr

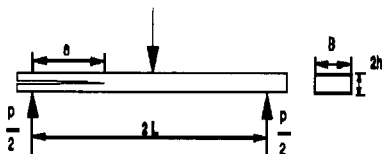
2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 실험에 사용된 실험재료는 하이브리드 복합재료(Hybrid Composite)로서 일방향 탄소/유리섬유 프리프레그((주)한국화이바 CG5010)를 실험실에서 32플라이(ply)로 적층하여 성형하였으며, 일정한 섬유함유율과 제품치수의 변동을 억제하며 필요이상의 수지가 낭비되지 않도록 제작한 금형(250×250mm)을 사용하여 재료를 성형하였다. 경화온도는 130℃, 경화시간은 90분으로 하였으며, 성형압력은 307, 431, 585kPa로 변화시켰으며, 적층시 알루미늄 포일(두께 30μm)을 16플라이와 17플라이 사이에 삽입하여 초기크랙을 형성하였다. 성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 Fig. 1(b)와 같이 소요의 시험편 모양으로 가공하였으며, 가공이 끝난 시험편은 만능시험기를 이용하여 Fig. 1의 방법으로 실험을 행하였다.



(a) Test apparatus



(b) ENF specimen

Fig. 1 Specimen geometries

하중점변위율을 고찰하기 위하여 적층순서(CF/GF, CF/CF, GF/GF)에 따라 각각 시험편 폭(B) 20mm, 스패ん길이(2L) 100mm, 초기크랙(a) 25mm의 시험편을 사용하였고 하중점변위율은 0.5, 1, 1.5, 2mm/min으로 변화시켰으며, 초기크랙의 영향을 고찰하기 위해서 적층순서(CF/GF, CF/CF, GF/GF)의 변화에 따라 시험편 폭(B) 20mm, 스패ん길이(2L) 100mm, 하중점변위율을 1mm/min로 일정하게 하고 초기크랙을 25, 30, 35, 40로 변화시켰다.

시험편 폭의 영향을 고찰하기 위해서는 적층순서(CF/GF, CF/CF, GF/GF)의 변화에 따라 스패ん길이(2L) 100mm, 초기크랙길이(a) 25mm, 하중점변위율을 1mm/min로 일정하게 유지하고 시험편 폭을 10, 15, 20, 25mm로 변화 시켰으며, 성형압력의 영향을 고찰하기 위해서 적층순서(CF/GF, CF/CF, GF/GF)의 변화에 따라 스패ん길이(2L) 100mm, 시험편 폭(B) 20mm, 하중점변위율 1mm/min로 하고 초기크랙길이(a)를 25,

30, 35, 40으로 변화시켰다.

각 조건에서 실험된 시험편의 파단면은 SEM을 이용하여 파면을 촬영하여 고찰하였다.

2.1 층간파괴인성치의 계산방법

보 이론에 의한 모드 II 임계에너지방출률 G_{IIc} 는 다음과 같다.

$$G_{IIc} = \frac{9a^2 P \delta}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (1)$$

여기서 L 은 시험편 스패ん(span)길이의 1/2이다.

컴플라이언스법(compliance method)은 층간파괴인성치를 구하는 실험적인 방법으로서 여러 가지 크랙길이에 대응하는 컴플라이언스를 구하고 이들의 관계를 구하기 위하여 다항식으로 나타내는 방법이다. 실험결과로 나타난 C 와 a 를 다항식으로 이용하여 고전적인 보이론에서 3차항으로 한다. 실험에서 크랙길이를 측정하고 그에 상응하는 컴플라이언스를 구하여 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$C = C_0 + ma^3 \quad (2)$$

여기서 C_0 는 정수이고 m 은 C 와 a^3 의 기울기이다.

따라서 임계에너지방출률 G_{IIc} 는 다음과 같다.

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

또 다른 방법은 크랙이 없는 보에 대한 컴플라이언스 C 를 표준화하는 방법이 있다(Williams, 1990).

$$C/C_0 = 1 + m(a/L)^3 \quad (4)$$

여기서 m 은 C/C_0 와 $(a/L)^3$ 의 기울기이고 C_0 는 초기 컴플라이언스의 값이다.

식(4)를 a 에 대하여 미분하여 식(1)에 대입하면 모드 II 임계에너지방출률 G_{IIc} 는 다음과 같다.

$$G_{IIc} = \frac{3mP^2 a^2 C_0}{2BL^3} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

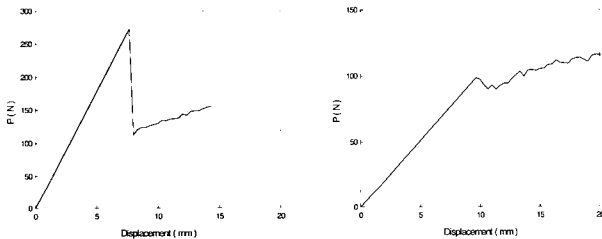
3.1 하중변위선도

모드 II 시험편인 ENF시험편의 하중-변위선도 양상은 대부분이 불안정한 크랙성장으로 나타난다. Fig. 2(a)의 $a/L=0.6$ 인 경우 대표적으로 나타날 수 있는 ENF시험편의 하중-변위선도를 나타낸 것이다. 모드 II시험에서 대부분이 이러한 형태로 파손되는 것을 보여 주고 있다. 즉, 초기값과 최대값이 동일한 경우가 대부분이지만 가끔은 최대하중에 도달하기 전에 아주 작은 비선형을 나타내며 진전하다가, 갑자기 변위는 일정하고 하중만 급격히 떨어지는 모습을 보여주고 있다. 이와 같은 불

안정 크랙성장은 시험편에 가하는 압축하중이 중앙하중점에 도달하여 크랙이 정지할 때까지 진행된다. 이 지점에 도달하였을 때 제하를 한 후 다시 하중을 가하는 방법을 이용하였으나, 이후는 Fig. 2(a)에서 보여지는 바와 같이 크랙은 정지하고 변위만 급속히 증가하는 모습을 볼 수 있었다.

Fig. 2(b)는 a/L=0.8인 하중-변위선도로서 정확한 불안정 크랙성장이라고 정의할 수 없는 비교적 안정크랙(stable crack)이라고 정의할 수 있다. 이 경우는 a/L이 비교적 높은 경우에 나타날 수 있는 현상이다. 이러한 현상이 일어나는 이유는 중앙하중점에 근접한 상태에서 일어나는 파괴현상으로 크랙시작점과 하중의 위치에 따른 영향으로 판단되어지므로 ENF 시험의 정확한 값을 나타내지 못한다고 생각된다. 특히 크랙진전저항 값과 중앙하중점의 압축 응력장의 영향이 크랙을 저지하는 값으로 합산되므로 하중-변위선도에 영향을 주어 비교적 안정적인 크랙현상을 보이며, 층간파괴인성치를 상승시킨다고 생각된다. CFRP 시험편에서 양단지지거리의 1/2에 대한 초기크랙 길이의 비 a/L≥0.69일 때 안정파괴를 나타낸다고 하였으나(Carlsson et al, 1986), 유리섬유/페놀 시험편인 경우 a/L의 값이 높아도 안정크랙성장 현상을 발견할 수 없다는 연구도 있다(Charalambides and Williams, 1995).

본 연구에서 사용한 하이브리드재료에서는 안정파괴 현상을 찾기는 힘들었고 다만 Fig. 2(b)와 같은 현상을 볼 수 있었다.



(a) unstable crack(a/L=0.6) (b)relatively stable (a/L=0.8)

Fig. 2 Typical load displacement curves.

3.2 적층순서의 영향

Fig. 3은 성형압력을 431kPa로 일정하게 하고 적층순서(CF/CF, CF/GF, GF/GF)를 다르게 성형하여, 시험편 폭(B) 20mm, 스패ん길이(2L)100mm, 하중점변위를 1mm/min, 초기크랙길이(a) 30mm으로 하였을 때 각 적층순서의 변화에 대한 층간파괴인성치의 영향을 고찰하였다. 그림에서 보는 바와 같이 적층순서가 CF/CF, GF/GF와 같이 서로 같은 계면이 서로 접착하여 성형된 것은 비교 안정크랙(stable crack)과 같은 유사한 형태의 곡선을 볼 수 있다. 반면에 계면이 서로 다른 CF/GF의 경우에는 월등하게 층간파괴 인성치가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 서로 다른 계면을 적층하여 성형하는 과정에서 섬유와 기지(matrix)간의 계면 접착력이 증가되었기 때문이라 생각된다.

Fig. 4는 시험편 스패ん길이(2L) 100mm, 시험편 폭(B) 20mm,

초기크랙길이(a) 25mm, 하중점 변위를 1mm/min로 고정하고 적층순서(CF/CF, CF/GF, GF/GF)의 변화에 따른 입계에너지 방출률 G_{IIC}의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 컴플라이언스법에 의한 식(3)과 식(5)와 단순보 이론에 의한 식(1)의 결과는 어느 정도 비슷한 양상의 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서도 Fig. 3과 같이 서로 다른 계면을 적층한 CF/GF의 경우가 동일한 계면을 적층한 것 보다 층간파괴인성치가 높다는 것을 알 수 있다.

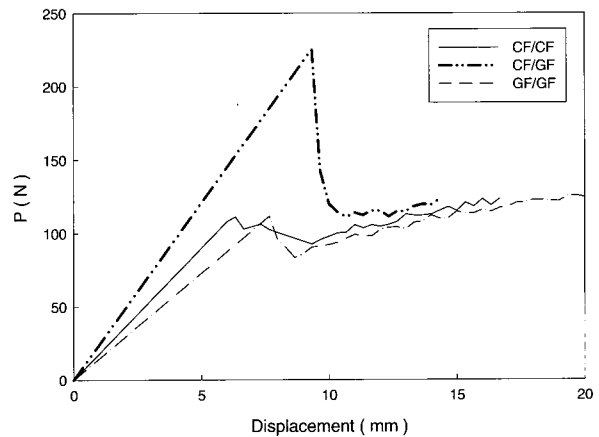


Fig. 3 The typical load-displacement curves for various methods(B=20, a/L=30/50, loading rate=1mm/min).

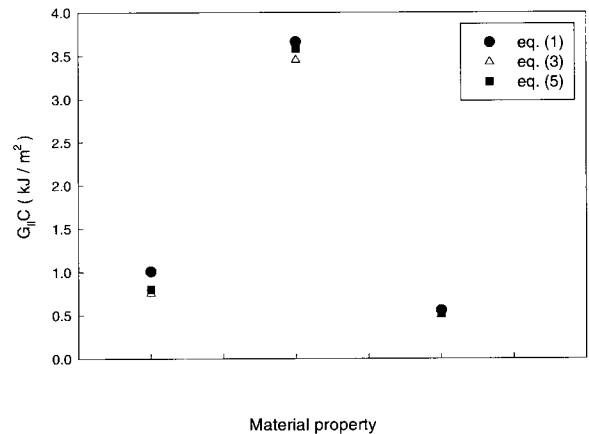


Fig. 4 G_{IIC} as a function of material properties for each method (B=20, a/L=25/50, loading rate=1mm/min).

3.3 하중점변위율의 영향

Fig. 5는 시험편 폭(B)=20mm, 시험편 길이(2L)=100mm, 초기크랙길이 25mm로 일정하게 유지한 후 하중점변위율의 변화에 따른 층간파괴인성치 G_{IIC}값의 변화를 나타낸 것으로, 하중점변위율을 0.5, 1, 1.5, 2mm/min로 변화함에도 불구하고 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 CFRP 모드 I 실험과 모드 II 실험에서 2mm/min까지는 층간파괴인성치에 영향이 없다는 연구와 일치하고 있다(김형진 등, 1994, 1995). 또한 모드 I의 경우와 같은 20mm/min과 같은 고속에서 실험을 행

하려고 시도하였으나 횡전단이 너무 빠르게 진행되어 층간파괴를 발생시킬 수 없었다.

한편 적층순서가 CF/GF인 경우가 CF/CF, GF/GF인 경우보다 전반적으로 값이 높음을 알 수 있다. 이는 접착 순서를 서로 다른 계면끼리 접착하면 강도 면에서도 유리한 조건이라는 것을 알 수 있다. 성형조건에서 계면이 서로 다른 시험편이 G_{IIC} 값이 큰 것은 성형 중에 각 계면에서 기지와 섬유간의 접착력이 향상되기 때문이라 생각된다.

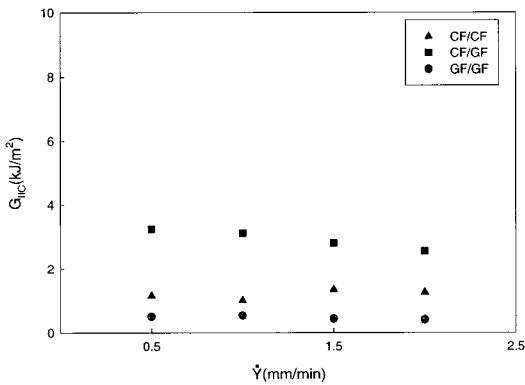


Fig. 5 G_{IIC} as a function of loading rate at material property of CF/CF, CF/GF, GF/GF.

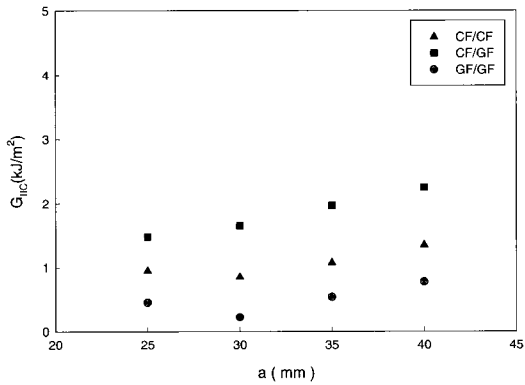


Fig. 6 G_{IIC} as a function of initial crack at material property of CF/CF, GF/GF and CF/GF.

3.4 초기크랙의 영향

Fig. 6은 시험편 폭20mm, 두께 1.8mm, 성형 압력을 431kPa, 스펠길이 2L=100m 하중점변위를 1mm/min로 일정하게 한 후 초기크랙길이를 25, 30, 35, 40mm(a/L=0.5, 0.6, 0.7, 0.8)로 변화시켰을 때 층간파괴인성치(G_{IIC})값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 층간파괴인성치(G_{IIC})값은 초기크랙길이에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 초기크랙길이가 30mm 인 경우 CF/CF, GF/GF의 경우는 도리어 낮은 값을 나타내고 있으며 초기크랙길이가 35, 40mm인 경우 높은 값이 나타나고 있다. 이는 CFRP 모드 II 층간파괴인성치에서 나타난 경향과 거의 일치하는데 초기크랙길이가 35mm이

상인 경우 a/L= 0.7 이상으로 중앙 압축하중에 따르는 압축응력의 영향을 받기 때문이라고 생각된다.

3.4 시험편 폭의 영향

Fig. 7은 성형압력 431kPa, 하중점변위를 1mm/min, 시험편 스펠길이 2L=100mm, 초기크랙길이 25mm로 일정하게 유지한 시험편에 대하여 시험편 폭이 10, 15, 20, 25mm로 변화 할 때의 층간파괴인성치(G_{IIC})값을 나타낸 것으로 시험편 폭이 증가함에 따라 CF/CF의 경우와 CF/GF 인 경우에서 일부 흠어짐을 볼 수 있으나 시험편 폭의 영향에 대한 일정한 경향은 찾을 수 없었다.

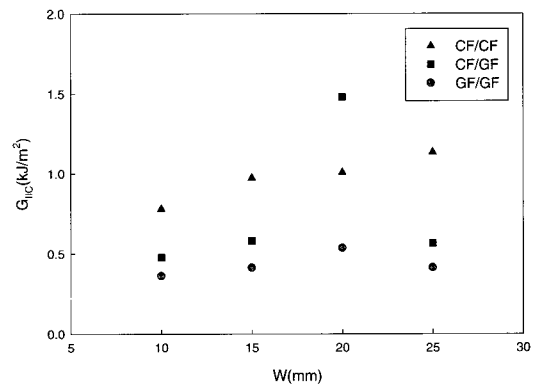


Fig. 7 G_{IIC} value by specimen width at material properties of CF/CF, GF/GF and CF/GF.

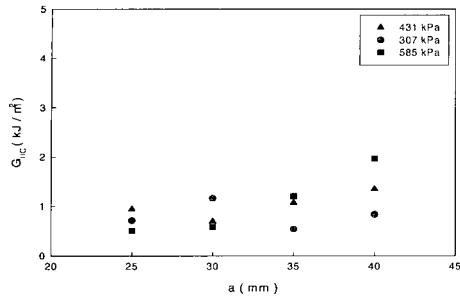
3.5 성형압력의 영향

Fig. 8의 (a)는 적층순서를 CF/CF로 제작하고 시험편 스펠길이 2L=100, 초기 크랙길이 25, 20, 35, 40mm, 하중점변위를 1mm/min로 일정하게 유지하고 성형압력을 307, 431, 585kPa로 변화했을 경우 층간파괴인성치 G_{IIC} 값의 변화를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 CF/CF의 경우에는 초기크랙길이 30mm인 경우에는 낮은 값을 나타내고 있지만 35mm인 경우부터 고압력인 경우 층간파괴인성치 G_{IIC} 값이 비교적 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다.

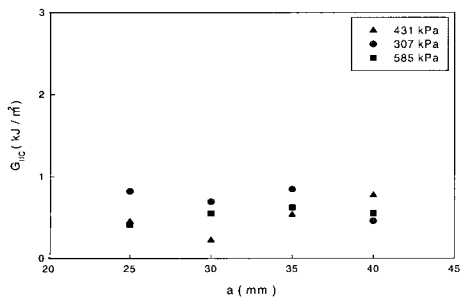
(b)는 적층순서를 GF/GF로 제작한 것으로 Fig. 20과 동일한 조건 하에서 실험한 것으로 CF/CF로 적층한 것과는 달리 GF/GF의 경우에는 전체적으로 압력의 변화에 따른 초기크랙길이의 영향이나 성형압력의 영향이 거의 없었다.

(c)는 적층순서를 CF/GF로 제작한 것으로 Fig. (a), (b)와 같이 서로 같은 계면을 적층한 시험편 보다 성형압력의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 성형압력이 585kPa인 경우가 다른 성형압력에 비하여 층간파괴인성치 G_{IIC} 값이 현저히 증가됨을 알 수 있다.

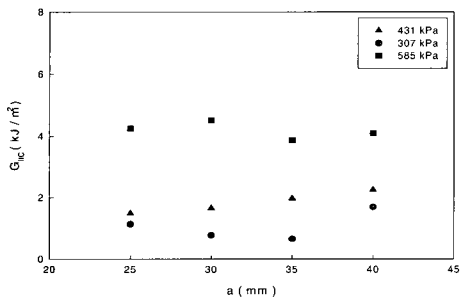
따라서 하이브리드 복합재료의 층간파괴인성치 G_{IIC} 값은 적층순서와 성형압력의 변화에 따라 그 값이 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 또한 성형압력이 증가함에 따라 층간파괴인성치 G_{IIC} 값은 현저히 증가함을 알 수 있다.



(a) CF/CF



(b) GF/GF



(c) CF/GF

Fig. 8 Comparison of G_{IC} value by initial crack for material properties at moulding pressure of 307, 431 and 585 kPa.

3.6 파면해석

Photo 1은 성형압력을 431kPa로 일정하게 하고 층간면을 CF/CF, GF/GF, CF/GF로 적층하여 성형한 시험편으로써 폭 20mm, a/L=0.6, 하중점변위율 1mm/min일 때의 모드 II 파단면의 SEM사진이다.

그림 (a)와 (b)는 적층순서가 CF/CF 일 때 파단면 사진을 나타낸 것으로 (a)는 ENF시험편에서 전형적으로 나타날 수 있는 해클 형태를 나타내며, 해클의 형상은 섬유방향에 45° 각도의 미세 크랙 형태를 나타내고 있다. 기지의 분포가 적으며, 소량의 섬유파단이 발생하는 것을 볼 수 있다.

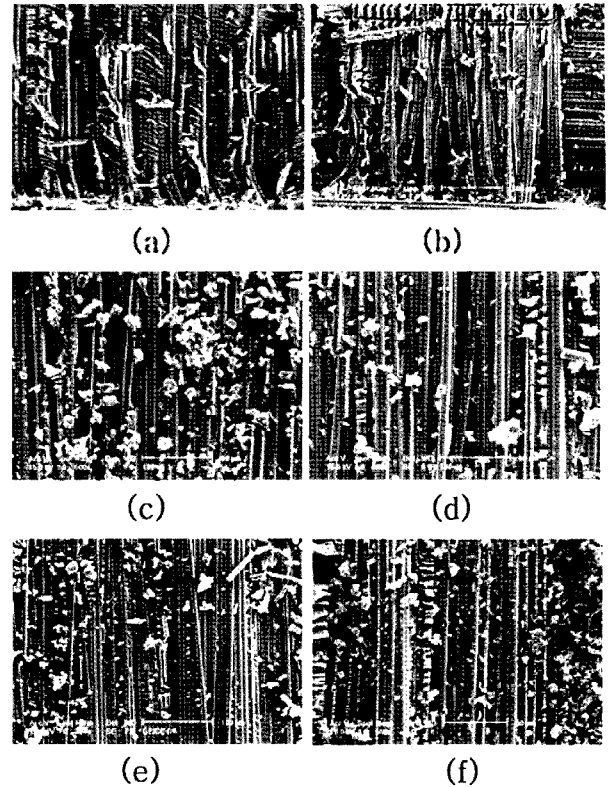


Photo 1 SEM photograph of fracture surface for material properties moulding pressure of 431kPa [(a, b) GF/GF, (c, d) CF/CF, (e, f) CF/GF].

그림 (c)와 (d)는 적층순서가 GF/GF의 동일한 층에서의 파단면을 나타낸 것으로 기지가 집중되어 있으며, 섬유 브릿징과 섬유파단을 볼 수 없으며, 섬유가 질서정연하게 나열된 것을 볼 수 있다.

그림 (e)와 (f)는 적층순서가 서로 다른 CF/GF의 경우의 파단면의 형상을 나타낸 것으로 섬유층이 비교적 얇으며, 기지의 분포가 적고 불규칙적인 해클 형태를 보여 주고 있으며, 섬유층의 골이 깊고 넓은 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

하이브리드 복합재료(Hybrid composite)의 모드 II 층간파괴인성치에 영향을 주는 인자 중 적층순서, 하중점변위율, 시험편 폭, 초기크랙길이와 특히 성형압력에 따른 적층순서를 변화시켰을 때의 실험결과는 다음과 같다.

- (1) CF/CF, GF/GF, CF/GF로 적층하였을 경우 층간파괴인성치값은 서로 같은 계면을 성형한 것보다 서로 다른 계면을 적층한 CF/GF의 경우가 강도 면에서 높게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (2) 하중점변위율을 0.5, 1, 1.5, 2mm/min로 변화하였을 때, 미세한 변동은 있었으나, 하중점변위율의 영향은 거의 받지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 시험편 폭의 영향도 미미하였다.

- (3) 초기크랙을 25, 30, 35, 40mm로 변화시켰을 때 초기크랙길이의 영향은 없는 것으로 나타났으나, 35mm부터 다른 경향을 보이는 것은 중앙 하중점 주위에서 나타나는 응력장의 영향이라고 판단된다.
- (4) 성형압력을 307, 431, 585kPa로 변화시켰을 때 각각의 적층 방법에도 불구하고 성형압력이 높은 경우 층간파괴인성치의 값이 높게 나타남을 알 수 있었고, 또한 CF/CF, CF/GF경우와 달리 GF/GF의 경우 성형압력에 따른 일정한 경향을 보이지 않는다는 것을 알 수 있었다.
- (5) 적층순서에 따라 파면의 섬유 분포 및 해클의 형태가 달랐으며, CF/GF인 경우가 동일 성형압력에서 해클의 형태가 규칙적이었으며, 가장 양호한 섬유분포와 접착상태를 나타내었다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌학국 21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 김형진, 엄윤성, 고성위 (1994). "CFRP 복합재료의 Mode I 층간 파괴인성치에 관한 연구" 한국복합재료학회지 제7권 제8호, pp 65-73.
- 김형진, 엄윤성, 김엄기, 고성위 (1995). "CFRP 복합재료의 Mode II 층간 파괴 인성치에 관한 연구", 한국복합재료학

- 회지, 제8권 제4호, pp 78-82.
- 김형진, 김종훈, 김엄기, 고성위 (1996). "CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 미치는 환경인자의 영향" 한국해양공학회지, 제10권 제4호, pp 75-83.
- 김형진, 고성위 (1998). "ELS 시험편의 모드II 층간파괴인성치에 관한 연구", 한국어업기술학회지, 제34권 제4호, pp 450-456.
- 이정규, 엄윤성, 김형진, 고성위 (1995). "층간파괴인성치에 대한 섬유방향에 관한 연구" 한국해양공학회지, 제9권 제2호, pp 89-97.
- Davies, P. (1991). Polymers and Composite Task Group Round Robin Protocol for Mode I, Mode II and Mixed Mode Testing, European Structural Integrity Society.
- Caralambides, M.N. and Williams, J.G. (1995). "Fracture Toughness Characterization of Phenolic Resin and its Composite", Polymer Comp. Vol 16, No 1.
- Carlsson, L.A., Gillespie Jr, J.W and Pipes, R.B. (1986). "On the Analysis and Design of Notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing", J. of Comp. Mat, Vol 20, pp 594-595.
- Williams, J.G. (1990). "A Note on Finite Displacement Correction Factor the ENF test" Comp. Sci. and Tec. Vol 39, pp 279-282.

2002년 5월 10일 원고 접수

2002년 7월 15일 최종 수정본 채택