

하이브리드 복합재료의 모드 I 층간파괴인성치에 관한 연구*

김형진[†] · 박대원 · 김재동 · 고성위^{**}

경상대학교 · ^{**}부경대학교

A Study on Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites

Hyung-Jin KIM[†], Dae-Won GWARK, Jae-Dong KIM and Sung-Wi KOH^{**}

Gyeongsang National University, ^{**}Pukyong National University

Abstract

This paper describes the effect of loading rate, specimen geometries and material properties for Mode I interlaminar fracture toughness of hybrid composite by using double cantilever beam (DCB) specimen. In the range of loading rate 0.2~20mm/min, there is found to be no significant effect of loading rate with the value of critical energy release rate(G_{IC}).

The value of G_{IC} for variation of initial crack length are nearly similar values when material properties are CF/CF and GF/GF, however, the value of G_{IC} are highest with the increasing initial crack length at CF/GF.

The SEM photographs show good fiber distribution and interfacial bonding of hybrid composites when the moulding is the CF/GF

Key Words : loading rate(하중점변위율), hybrid composite(하이브리드 복합재료), interlaminar fracture toughness(층간파괴인성치), initial crack length(초기크랙길이)

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 사용 환경의 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, 이

* 이 논문은 2003년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

[†]Corresponding author : gjkim@gaechuk.gsnu.ac.kr

것은 층과 층 사이의 기지층에서 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 있다¹⁾.

본 연구에서는 하이브리드복합재료의 층간파괴인성치 G_{IC} 에 대한 종합적인 연구의 일환으로 모드 II의 하중을 받는 ENF(end notched flexure) 시험에 이어서 모드 I의 하중을 받는 DCB(double cantilever beam) 시험편을 이용한 층간파괴인성치에 관하여 검토하였다. 전보²⁾와 마찬가지로 CF/GF로 복합화된 프리프레그를 이용하여 16플라이와 17플라이 사이의 계면을 CF/CF, CF/GF, GF/GF로 적층순서를 변화시키는 방법, 각각의 적층조건에서 하중점변위를, 초기크랙길이 등이 층간파괴인성치 G_{IC} 에 미치는 영향을 상호비교 검토하였다. 또한 주사현미경 사진을 통하여 적층순서의 변화에 따른 적층면의 파단현상을 정성적으로 고찰하였다.

재료 및 실험 방법

1. 재료

본 실험에 사용된 실험재료는 하이브리드 복합재료(Hybrid Composite)로서 탄소/유리섬유 프리프레그(주) 한국화이버 CG5010)로서 탄소섬유는 일방향, 유리섬유는 직조형태이다. 이러한 복합프리프레그를 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, 적층시 알루미늄 포일(Al foil:두께 30μm)을 16플라이와 17플라이 사이에 삽입하여 초기크랙을 형성하였다. 성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 Fig. 1(a)와 같이 소요의 시험편 모양으로 가공하였으며, 크랙길이는 그림과 같이 양면에 수정액을 칠한 후 4mm마다 눈금을 표시하고 실험시 이동 측정현미경을 사용하여 초기크랙에서 균열선단까지의 직선

거리가 4mm가 되는 점에서 부하와 제하를 반복하는 방법으로 만능시험기 Fig. 1(b)의 출력을 얻어 하중-변위선도를 그렸다.

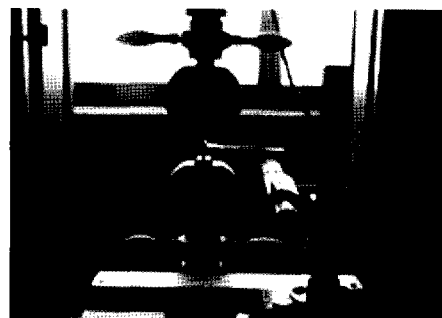
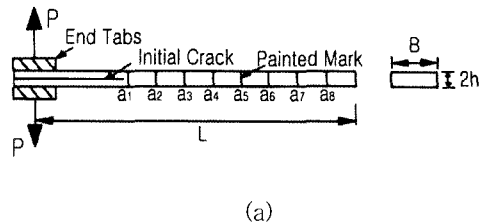


Fig. 1. Specimen geometries.

적층순서의 영향을 고찰하기 위하여 CF/CF, CF/GF, GF/GF의 순서로 적층된 각 시험편을 폭(B) 20mm, 초기크랙길이(a_0) 40mm의 조건으로 제작하였고, 하중점변위율은 0.2, 2, 20mm/min으로 변화 시켰으며, 초기크랙의 영향을 고찰하기 위해서 적층순서(CF/GF, CF/CF, GF/GF)의 변화에 따라 시험편 폭(B) 20mm, 하중점변위율, 2mm/min로 일정하게 하고 초기크랙을 25, 30, 35, 40, 50으로 변화시켰다.

각 조건에서 실험된 시험편의 파단면은 SEM을 이용하여 파면을 촬영하여 고찰하였다.

2. 층간파괴인성치의 계산방법

단순 보 이론에 의한 모드 I 임계에너지 해방률 G_{IC} 는 다음과 같다.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2Ba} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 P 는 하중, δ 는 변위, B 는 시험편 폭, 그리고 a 는 크랙길이이다. 그러나 식(1)에서 DCB 시험편은 보의 끝단이 완전히 고정되어 있지 않으므로 보의 완전 고정을 전제로 한 상기 식은 컴플라이언스를 과소 평가하는 경향이 있다. 따라서 이 영향에 대한 보정방법은 컴플라이언스 $C^{1/3}$ 과 크랙길이 a 의 관계를 최소자승법에 의하여 기울기를 구하고 절편 Δ 를 구하여 이 값을 크랙길이에 더하여 수정한다³⁾.

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

한편, 컴플라이언스 증분으로 G_{IC} 를 표현하면 다음과 같다.

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

식(3)을 C 와 a 를 양대수인 좌표에서 기울기 n 을 이용하여 실험적으로 컴플라이언스를 수정하는 방법으로는 식(4)와 같다⁴⁾.

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

Kageyama⁵⁾ 등은 a/h 와 $C^{1/3}$ 과의 기울기 A_1 을 이용하는 다음과 같은 수정식을 제안하였다.

$$G_{IC} = \frac{3P^2C^{2/3}}{2BA_1H} \dots\dots\dots (5)$$

여기서

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

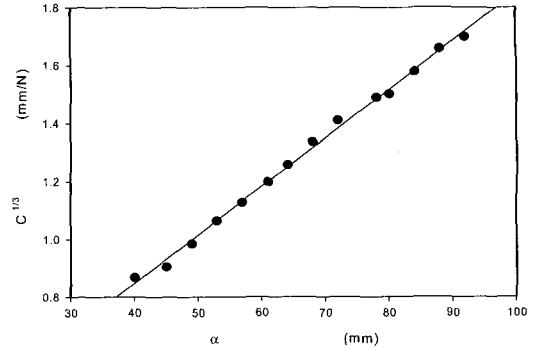
Fig. 2는 폭 20mm, 초기크랙길이 40mm, 하중점 변위를 2mm/min, 시험편길이 100mm인 시험편의 경우, 크랙길이와 컴플라이언스의 관계를 실험적인 값으로 나타낸 것이다. 그림(a)는 식(2), 그림(b)는 식(4), 그림(c)는 식(5)에서 Δ , n , A_1 의 값을 나타내는 기울기로서 각각 0.03451, 2.558, 28.882이다. 이러한 보정값은 실험에 사용된 각각의 시험편마다 실시하여 그 값을 가산하였다.

결과 및 고찰

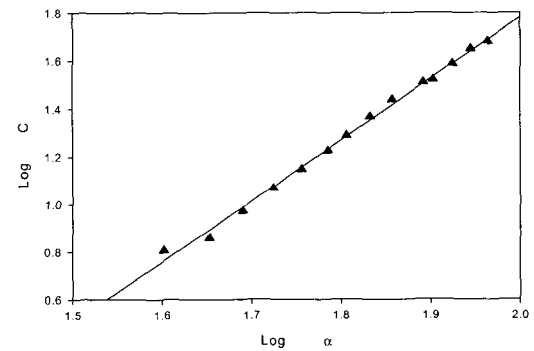
1 하중변위선도

모드 I 시험편인 DCB시험편의 하중 - 변위선도

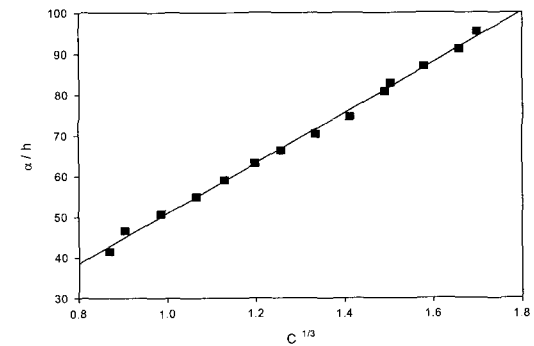
양상은 크게 분류하면 두가지 형태, 즉 전형적인 안정크랙성장과 불안정크랙성장이 혼합되어 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Experimental and analytical relationship between crack length and compliance.

Fig. 3은 본 연구에서 얻어진 대표적인 하중변위선 도로서 그림 (a)는 안정크랙성장, 그림 (b)는 불안정 크랙 성장을 나타낸 것으로, 각 선도는 크랙길이 4mm마다 하중을 가하고, 제하(unloading)를 반복하여 측정하였으며 최종 파단까지 계속 반복하였다.

불안정 크랙성장현상은 초기크랙 / 리가먼트가 25/75, 30/70 등의 시험편에서 나타났으며, 50/50 시험편에서는 대부분 안정크랙성장이 일어났다.

따라서 크랙의 안정 불안정은 여러 가지 요인 중 초기크랙길이/리가먼트의 변화에 영향을 받으며, 하중 집면위율과 시험편 폭의 영향은 없었다.

본 연구에서 사용한 하이브리드재료에서는 대부분 안정 파괴 현상을 나타냈으나 동일 조건에서 초기크랙이 짧은 경우에 일어나는 경향이 많았고, 부분적으로 불안정파괴현상을 나타내는 경우도 있었다.

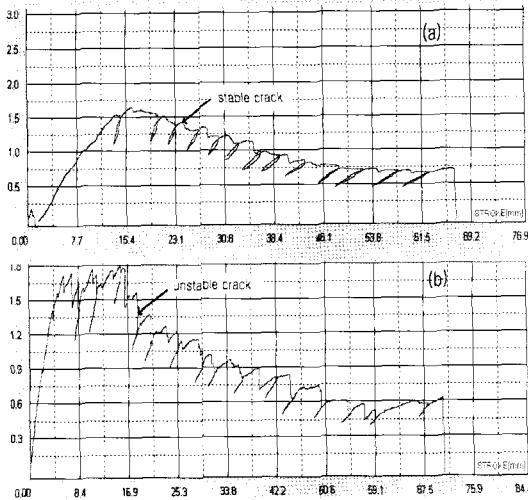


Fig. 3. Typical load displacement curves.

2. R-곡선

Fig. 4는 하중집면위율 2mm/min, 폭 20mm, 초기크랙길이 40mm, 시험편길이 100mm인 경우에 대하여 크랙길이의 증가에 대한 G_{IC} 의 변화, 즉 R-곡선을 나타낸 것으로 2절에서 기술한 여러 가지 방법으로 계산한 것이다. 단순보 이론이나 콤프라이언스의 수정식(2), (4), (5)에 의하여 얻은 값은 안정 크랙성장시에는 거의 일치함을 알 수 있다. 다만 콤프라이언스 증분으로 표현되는 식(3)은 흠어짐이 심하였으므로 반드시 보정계수를 구하여 사용하여야 한

다. 따라서 G_{IC} 는 수정식인 (2), (4), (5)에 의하여 계산되어야 한다고 생각된다. 또한 크랙길이가 증가함에 따라 G_{IC} 가 증가하는 R-곡선의 모습을 관찰할 수 있는 것은 타 연구와 일치하는 현상이다.⁽⁶⁾

다만, 이러한 R-곡선은 안정크랙성장시 보다 불안정 크랙성장시에 더 명확하게 되는 것을 알 수 있었다.

3. 적층순서의 영향

Fig. 5는 성형 압력을 431kPa로 일정하게 하고 층간파괴면, 즉 16플라이와 17플라이 사이에 적층순서(CF/CF, CF/GF, GF/GF)를 다르게 성형하여, 시험편 폭(B) 20mm, 시험편 길이 100mm, 하중집면위율 2mm/min, 초기크랙길이 40mm으로 하였을 때 각 적층순서의 변화에 대한 층간파괴인성치의 영향을 고찰하였다.

그림에서 보는 바와 같이 적층순서가 CF/CF, GF/GF와 같이 서로 같은 계면이 접착하여 성형된 것은 비교적 안정크랙(stable crack)과 같은 평활한 형태의 곡선을 볼 수 있다.

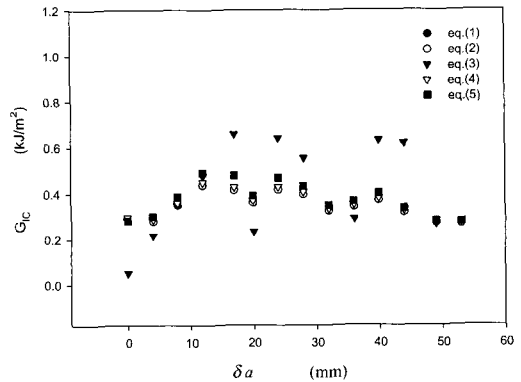


Fig. 4. G_{IC} as a function of crack length, δa , for each method ($B = 20$, $a_0 = 40$, and loading rate = 2mm/min).

반면에 계면이 서로 다른 CF/GF의 경우에는 명확한 R-곡선을 나타내며 층간파괴인성치도 다른 것과 비교하여 높다는 것을 알 수 있으며, 전 보⁽²⁾에서 발표한 모드II에서 나타나는 현상과 거의 같은 현상이다. 이것은 서로 다른 계면을 적층하여 성형하는 과정에서 섬유와 기지(matrix)간의 계면 접착력이 증가되

있기 때문이라 생각된다. 따라서 접착순서를 서로 다른 계면끼리 접착하면 강도면에서 유리한 조건이라는 것을 알 수 있다.

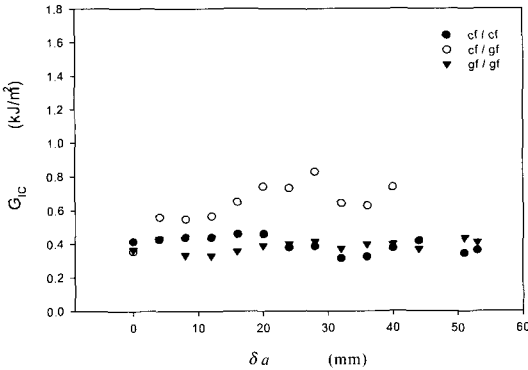


Fig. 5. G_{IC} as a function of crack length increment, δa , at material property of CF/CF, CF/GF, GF/GF ($B=20$, $a_0=40$, and loading rate= $2\text{mm}/\text{min}$).

4. 하중점변위율의 영향

Fig. 6은 CF/GF 적층재 시험편으로 폭 20mm, 시험편 길이 100mm, 초기크랙길이 40mm로 일정하게 유지한 후 하중점변위율의 변화에 따른 층간파괴인성치 G_{IC} 값의 변화를 나타낸 것으로, 하중점변위율을 0.2, 2, 20mm/min로 변화함에 불구하고 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 CFRP 모드 I 실험과 모드 II 실험에서 2mm/min까지는 층간파괴인성치에 영향이 없다는 연구와 일치하고 있다⁷⁾.

5. 초기크랙의 영향

Fig. 7은 시험편 폭20mm, 시험편길이 100mm, 하중점변위율을 2mm/min로 일정하게 한 후 초기크랙길이를 25, 30, 35, 40, 50mm로 변화시켰을 때 층간파괴인성치 G_{IC} 값의 변화를 나타낸 것이다.

그림 (a)는 CF/CF의 경우로서, 초기크랙의 길이가 짧은 경우인 25, 30mm인 경우가 50mm인 경우보다 높게 나타났다. 이것은 초기크랙이 짧은 경우 일어나기 쉬운 불안정 크랙과 관계가 있다고 생각된다. 이러한 현상은 일방향 CFRP복합재료에서 나타나는 현상과 비슷하다.

그림 (b)는 CF/GF인 경우로써 초기크랙이 40,

50mm로 높은 경우가 층간파괴인성치의 값이 커짐을 알 수 있다. 이것은 섬유 브릿지, 섬유 풀아웃(full out)과 같은 현상이 직조형태인 유리섬유에서 많이 일어나기 때문이라 생각된다.

그림 (c)는 GF/GF인 경우로써 그림 (b)와 같이 초기크랙길이가 긴 경우에 더 높은 값이 나타남을 알 수 있다.

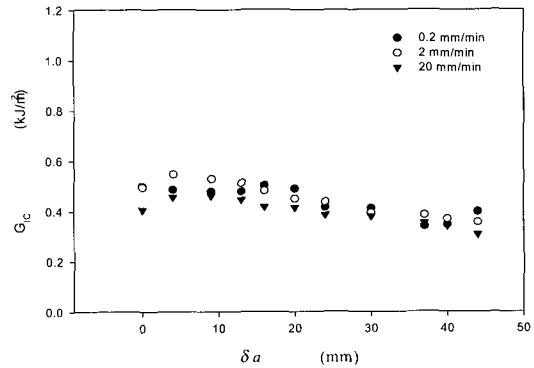


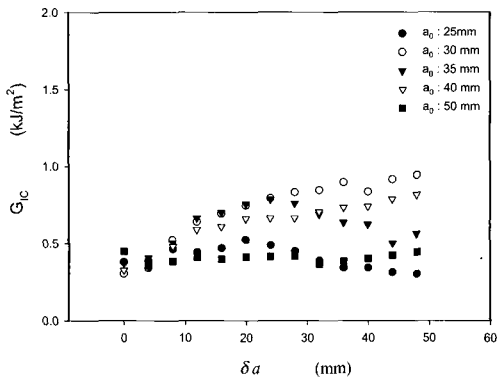
Fig. 6. G_{IC} as a function of loading rate at material property of CF/GF hybrid.

6. 파면해석

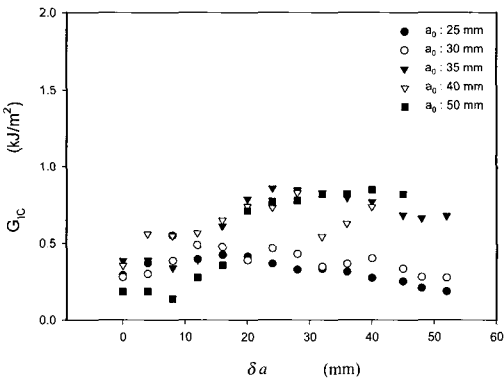
Photo. 1은 성형압력을 431kPa로 일정하게 하고 16플라이와 17플라이의 층간면을 CF/CF, CF/GF, GF/GF로 적층하여 성형한 시험편으로써 폭 20mm, 시험편길이 100mm, 하중점변위율 2mm/min일 때의 모드 I 파단 양면의 SEM사진이다.

그림 (a)와 (b)는 적층순서가 CF/CF 일 때 파단면 사진을 나타낸 것으로 CFRP 모드 I 시험편에서 일반적으로 일어나는 현상인 섬유절단(fiber breakage), 섬유부스러기(fiber fragment), 섬유의 늘어짐(loose), 섬유풀어냄(fiber full out) 등이 나타나고 있다. 특히 파단면 반대편과 이어지는 섬유브릿징(fiber bridging) 현상도 보인다.

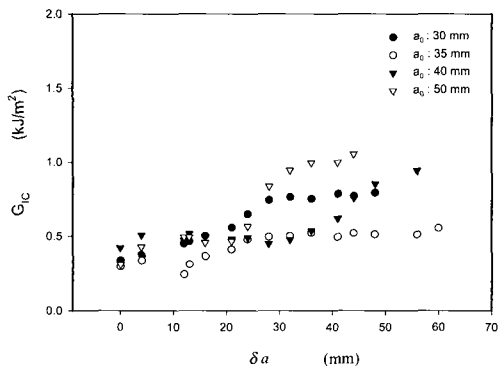
그림 (c)와 (d)는 적층순서가 CF/GF의 서로 다른 층에서의 파단면을 나타낸 것으로 CF/CF와 비교하여 섬유절단이 심하고, 섬유부스러기 규모도 크게 나타나고 있다. 또한 일방향 탄소섬유가 반대편의 유리섬유에 일부 묻어 있는 모습으로 보아 접착면의 파손형태가 불안정한 형태로 크랙이 진전된 것으로 보이며 이러한 파면형태가 높은 층간파괴인성치를 나타내는 원인이라고 생각된다.



(a) CF / CF



(b) CF / GF



(c) GF / GF

Fig. 7. G_{IC} as a function of corresponding increment of crack propagation δa , at material property of CF/CF, GF/GF and CF/GF.

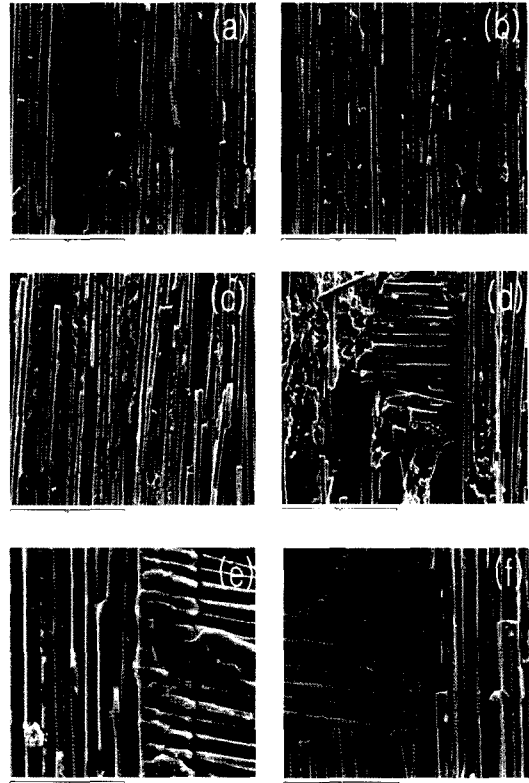


Photo. 1. SEM photograph of fracture surface for material properties moulding pressure of 431kPa [(a, b) CF/CF, (c, d) CF/GF, (e, f) GF/GF].

그림 (e)와 (f)는 적층순서가 동일한 GF/GF의 경우의 파단면의 형상을 나타낸 것으로 섬유 절단 등은 앞의 경우와 같으나 섬유부스러기가 비교적 규모가 큰 것은 CF/GF의 경우와 유사하다. 그러나 CF/GF와 달리 양쪽 파단면이 비교적 매끄럽고 섬유의 풀아웃이나 브릿징과 같은 현상이 보이지 않는다.

요 약

하이브리드 복합재료(Hybrid composite)의 모드 I 층간파괴인성치에 영향을 주는 인자 중 적층순서, 하중점변위율, 초기크랙길이를 변화 시켰을 때의 실험 결과는 다음과 같다.

(1) CF/CF, CF/GF, GF/GF로 적층하였을 경우

층간파괴인성치값은 서로 같은 계면을 성형한 것보다 서로 다른 계면을 적층한 CF/GF의 경우가 강도면에서 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

(2) 하중점변위율을 0.2, 2, 20mm/min로 변화하였을 때, 미세한 변동은 있었으나, 하중점변위율의 영향은 거의 받지 않는 것을 알 수 있었다.

(3) 초기크랙을 25, 30, 35, 40, 50mm로 변화시켰을 때 초기크랙길이의 영향은 일정하지 않았다. CF/GF인 경우는 초기크랙이 짧은 경우, CF/GF, GF/GF인 경우는 초기크랙이 긴 경우에 높은 값을 나타냈다. 이것은 GF 섬유가 직조형태의 프리프레그로 되어 있어 크랙의 진전에 따라 섬유부스러기 등의 생성에 따른 영향이라고 생각된다.

(4) 적층순서에 따라 파면의 섬유 분포 형태가 달랐으며, CF/GF인 경우가 섬유의 파손형태가 가장 복잡하게 나타났으며, 이것이 높은 층간파괴인성치를 나타내는 원인이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1) Davies, P. (1991) : Polymers and Composite Task Group Round Robin Protocol for Mode I, Mode II and Mixed Mode Testing, Euro-pean Structural Integrity Society.

2) 김형진 · 박명일 · 곽대원 · 김재동 · 고성위 (2002) : 하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴인성치에 관한 연구, 한국해양공학회지, 16(4), 42~47

3) Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J. G. (1989) : Corrections Needed in Double-Contilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fiber-Composites", J. Mat. Sci. Letters 8, 125~129.

4) Berry, J. P. (1983) : Determination of Fracture Surface Energies by Cleavage Technique, J. Appl. Phys., 34, 62~66.

5) Kageyama, K., Kobayashi, T. and Chou, T. W.(1987) : Analytical Compliance Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness Testing of Composites", Comp. 18, 393~399.

6) 김형진 · 엄윤성 · 고성위 (1994) : CFRP 복합재료의 Mode I 층간파괴인성치에 관한 연구, 한국복합재료학회지 7(4), 65-73.

7) 김형진 · 김재동 · 고성위 (2001) : 층간파괴인성치에 미치는 성형압력의 영향, 한국박용기관학회지, 25(5), 196~203.

2003년 9월 5일 접수
2003년 9월 22일 수리