

論文

Textile Composite의 구조와 물성(III)
 - 부직포 복합재료의 Mode I 층간 파괴 인성에 관한 연구 -

이승호* · 강태진*

Mechanical Properties of Textile Composite(III)
 - Mode I Interlaminar Fracture Toughness of
 Nonwoven Glass Fiber Composite -

Sung Ho Lee* and Tae Jin Kang*

ABSTRACT

The mode I interlaminar fracture toughness of needle punched nonwoven composite have been studied. The mode I interlaminar fracture toughness was calculated by the compliance method using double cantilever beam(DCB) specimen. The interfacial adhesion strength of nonwoven composite was increased with increasing punching density due to the through-the-thickness reinforced fibers. The crack propagation of nonwoven composite was restricted by the needle punching. The mode I interlaminar fracture toughness of nonwoven composite was also increased with increasing punching density and it was three times higher than that of the woven laminate composite. From the observation of the fractured surface, the woven laminate composite was fractured in the matrix, or in the matrix-fiber interface. However, the fracture mode of needle-punched nonwoven composite was mainly the fracture of z-axis reinforcing fibers.

초 록

펀칭밀도에 따른 부직포 복합재료의 모드 I 층간 파괴 인성의 변화에 관하여 고찰하였다. 부직포 복합재료와 적층 복합재료의 double cantilever beam(DCB) 시편을 제작하여 컴플라이언스 방법에 의해 층간 파괴 에너지를 구하였다. 부직포 복합재료는 펀칭밀도가 증가할수록 두께방향의 보강사가 증가하여 층간 결합력이 향상되며 크랙의 전파가 억제됨을 알 수 있었다. 부직포 복합재료의 모드 I 층간 파괴 인성 또한 펀칭밀도에 따라 증가하였으며 적층 복합재료 보다 3배 정도 높은 값을 보였다. SEM을 통하여 파괴 단면을 관찰한 결과, 적층 복합재료의 층간 파괴는 matrix 내에서, 또는 matrix와 섬유 사이의 계면에서 일어남을 알 수 있었으며 부직포 복합재료는 웹 층을 연결하는 3축 보강 섬유의 파단이 주요한 파괴 모드임을 알 수 있었다.

* 서울대학교 섬유고분자공학과

1. 서 론

복합재료의 층간 분리 현상은 구조물의 물성을 떨어뜨리고 피로 수명을 짧게 하기 때문에 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 층간 분리는 외부 충격 하중이 가해지거나 복합재료의 제작 공정 중의 결함에 의해서 생기게 되며 층간 파괴 인성이 낮을수록 더 넓은 영역으로 쉽게 전파되어 복합재료의 강도를 저하시키는 주요 원인이 된다.

층간 파괴 현상은 모드 I 파괴와 모드 II 파괴가 혼합[1~4] 되어 일어나는 것이 일반적이다. Kinloch등[2]은 double-cantilever-beam(DCB), end-loaded-split(ELS), fixed-ratio mixed-mode(FRMM) mixed-mode bending(MMB), modified MMB test 등의 혼합 모드 실험에 관하여 연구하였다. 혼합 모드 실험에서는 모드 I 파괴와 모드 II 파괴를 분리하기가 어렵고 시편의 제작도 용이하지 않다. 반면에 DCB 시편은 순수한 모드 I 층간 파괴 인성을 나타낸다고 발표되고 있으며 많은 연구에서 DCB 시편을 이용하여 모드 I 층간 파괴 인성을 구하고 있다[3~4]. 층간 파괴 인성을 나타내는데 있어서는 일반적으로 변형률 에너지 방출률(G)을 많이 사용하며 면적법, 선형보 이론, 일반 케적법 등을 이용하여 구하고 있다.

복합재료의 층간 분리를 억제하여 구조 보지성을 증가시키려고 하는 많은 방법이 연구되고 있다. 복합재료에 사용되는 수지를 강인화하거나 수지와 섬유간의 계면 결합력을 향상시켜서 층간 파괴 인성을 증가시키는 방법[5]등이 개발되고 있으며 복합재료의 두께 방향으로 섬유를 보강하는 방법[6]이 층간 파괴 인성의 향상에 가장 효과적이라고 보고되고 있다. 3차원 브레이딩[7], 3차원 위빙, 스티칭[8~9], 부직포 등의 textile composite은 3축 방향으로 섬유가 보강되어 있기 때문에 두께 방향으로의 파괴 인성이 크고 우수한 구조 보지성을 보여준다.

Textile composite의 구조와 물성에 관한 연구로 스티칭 복합재료의 충격 손상거동[10]과 펀칭밀도에 따른 부직포 복합재료의 기계적 물성과 충격 특성에 관한 연구[11]에 이어서 본 연구에서는 부

직포 복합재료 물성의 변화를 가져오는 모드 I 층간 파괴 인성에 관하여 고찰하고 적층 복합재료의 층간 파괴 현상과 비교하였다.

2. 실험재료 및 방법

펀칭밀도를 30, 60, 90 penetrations/cm²의 세 가지로 달린 부직포를 보강재로 사용하고 불포화 폴리에스터 수지(내쇼날 합성 S-800 grade)를 기지물질로 사용하여 복합재료 시편을 제작하였다. 폴리에스터 수지의 개시제로는 benzoyl peroxide(BPO)를 사용하였고 경화제로는 diallyl phthalate(DAP)를 사용하였으며 개시제, 경화제, 폴리에스터 수지의 혼합 비율은 1 : 7 : 100으로 하였다. 경화 온도는 140℃, 경화 시간은 60분으로 하여 hot press에서 경화시켰으며 초기 크랙을 주기 위하여 0.05 mm 두께의 이형 필름을 중간에 삽입시키고 성형하였다. 성형 후 부직포 복합재료의 수지 함량은 약 45 wt %, 두께는 2.8 mm였다. 적층 복합재료는 18×18 count/in²의 plain weave E glass 섬유 직물을 보강재로 사용하여 8ply를 적층한 후 동일 수지로 경화시켰다. 적층 복합재료의 수지함량은 40 wt %, 두께는 2.7 mm였다.

성형 후 에폭시 접착제로 부직포 복합재료의 양면에 glass/epoxy 탭을 붙이고 다이아몬드 커터로 절단한 후 Fig.1과 같이 loading 탭을 접착하여 double cantilever beam(DCB) 시편을 준비하였다. 시편의 폭은 20 mm였으며 초기 크랙의 길이는 20

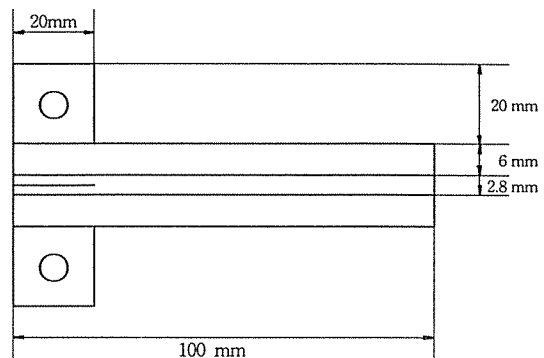


Fig. 1. Configuration of double cantilever beam (DCB) specimen

mm로 하였다. 하중이 가해질때 전파되는 크랙의 길이를 측정하기 위하여 DCB 시편의 양 측면에 수정액을 회색하여 바른 후 건조시켰다. 실험은 Instron에서 0.5 mm/min의 속도로 하중을 가하면서 행하였으며 매 30초 마다 균열 길이와 하중을 측정하였다.

3. 이론적 해석

변형률 에너지 방출률(strain energy release rate, G_I)은 컴플라이언스 방법을 이용하여 구하였으며 변형률 에너지 방출률은 다음과 같이 표시된다.

$$G_I = - \frac{dU}{dA} = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{dA} \quad \dots\dots\dots (1)$$

where

P : load U : potential energy
A : area C : compliance

DCB 시편의 폭이 일정하므로 파괴된 면적은 다음과 같다.

$$dA = b \, da \quad \dots\dots\dots (2)$$

where

b : width a : crack length

또한 컴플라이언스 C는 선형보 이론에 의하면 다음과 같다.

$$C = \frac{2a^3}{3E_x^b I} \quad \dots\dots\dots (3)$$

where

E_x^b : bending modulus in x-direction
I : moment of inertia

컴플라이언스 C는 하중-균열 열림 길이 곡선으로부터 구할 수 있다. 한편 컴플라이언스 방법에서 컴플라이언스 C는 다음과 같이 표시된다.

$$C = m_1 a^3 + m_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

where

m_1, m_2 : constant

여기에서 상수 m_1 과 m_2 는 실험으로 부터 구한 컴플라이언스(C)와 균열길이(a)의 관계로부터 선형 최소 자승법을 이용하여 구하면 된다. 이 방법을

통해 구해지는 최종 변형률 에너지 방출율, G_I 는 다음과 같이 표시된다.

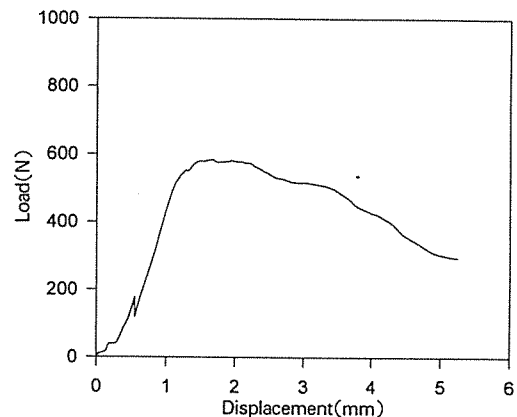
$$G_I = \frac{3 P^2 a^2 m_1}{2b} \quad \dots\dots\dots (5)$$

본 연구에서는 컴플라이언스 방법을 통해 최종적으로 얻어진 식 (5)를 이용하여 부직포 복합재료와 적층복합재료의 변형률 에너지 방출율, G_I 를 구하여 상호 비교 분석하였다.

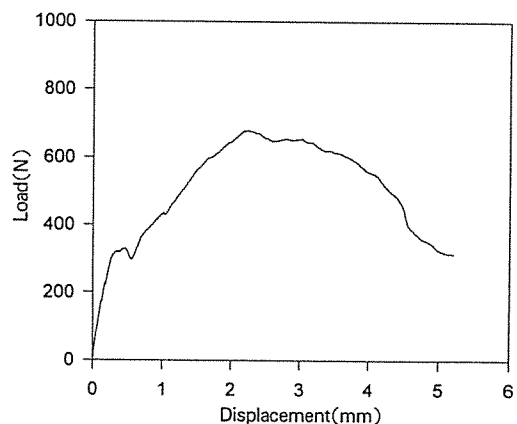
4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 모드 I 층간 파괴 인성

Fig.2에 세 가지 서로 다른 편칭밀도를 갖는 부



(a) 30 ppsc



(b) 60 ppsc

Fig.2. Load-crack opening displacement curves of nonwoven and woven laminate composites.

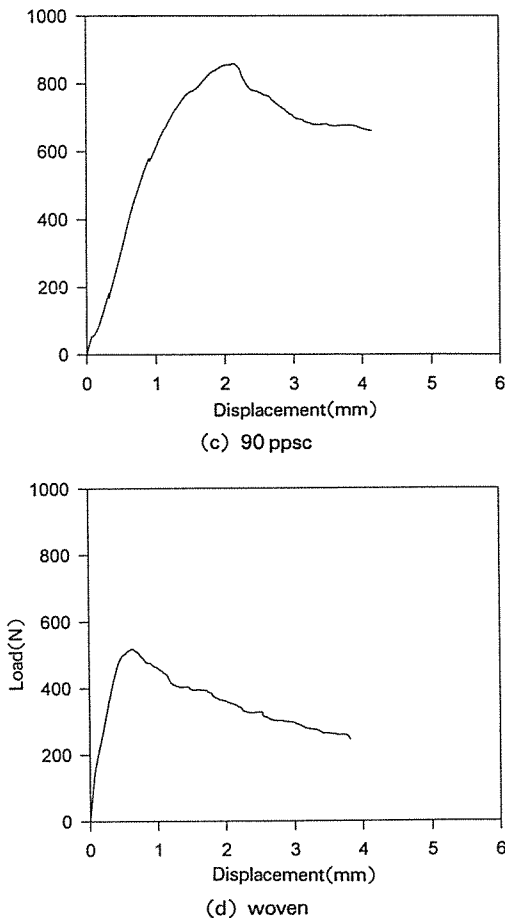


Fig. 2. Continued

직포 복합재료와 적층 복합재료의 균열 열림 길이와 하중간의 관계를 나타내었다. 균열 열림 길이는 시편의 변형이 작기 때문에 하중이 가해진 지점에서의 변위와 같다고 가정하였다. 부직포 복합재료의 펀칭 밀도가 증가할수록 두께 방향의 보강사가 증가하여 시편에 걸리는 최대 하중도 증가하는 것을 알 수 있었다. 부직포 복합재료는 적층 복합재료와 비교해서 층간분리시 최고 1.8배의 더 많은 하중이 걸림을 알 수 있었다. 적층 복합재료의 경우 최대 하중을 지나면 층간 분리에 대한 저항력이 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 이에 반하여 부직포 복합재료는 두께 방향 보강사에 의하여 최대 하중을 지나서도 층간 결합력을 어느 정도 계속 유지함을 보였다.

Fig. 3은 모드 I 하중이 가해졌을 때 균열 열림 길이(변위)와 균열 길이와의 관계를 나타낸 것이다. 그림은 변위에 따른 균열의 길이를 나타낸 것으로 기울기가 클수록 균열 전파 속도가 빠른 것이다. 섬유 연계 현상 때문에 균열이 진전하면서 점차 균열 전파 속도가 늦어지는 것을 알 수 있다. 부직포 복합재료의 펀칭 밀도가 증가할수록 균열의 진전이 느려지는 현상을 보이는데 이는 두께방향으로 보강된 섬유가 층간분리를 억제하기 때문임을 알 수 있다. 층간 결합력이 약한 적층 복합재료는 부직포 복합재료에 비하여 훨씬 빠른 균열 전파를 보였다. 3차원 구조를 갖는 부직포 복합재료가 적층 복합재료 보다 층간분리에 대한 저항력이 월등히 우수함을 알 수 있었다.

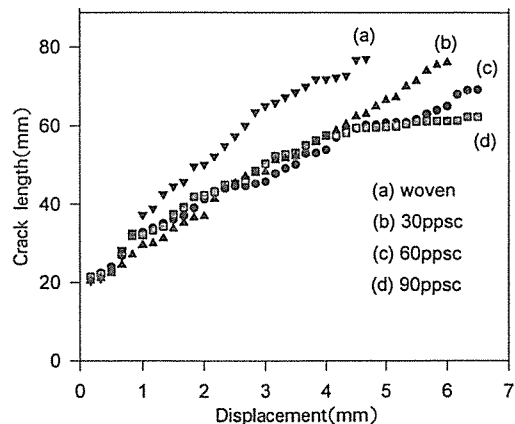


Fig. 3. Crack propagation curves of nonwoven and woven laminate composites.

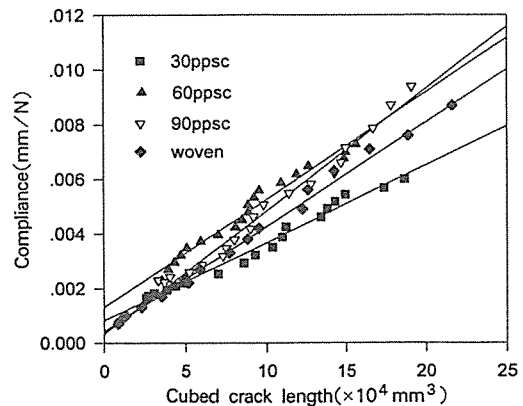


Fig. 4. Relationship between compliance and cubed crack length.

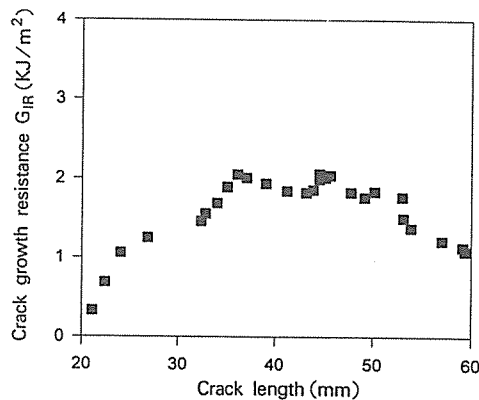
Fig. 4는 컴플라이언스와 균열 길이와의 관계를 나타낸 것이다. 두꺼운 부직포 복합재료의 제작이 불가능하여 Glass/Epoxy Tab을 시편의 양면에 붙여 실험하였기 때문에 컴플라이언스 값이 실제 값과는 많은 차이가 나지만 부직포 복합재료와 적층 복합재료의 파괴에너지를 상호 비교하는데는 큰 무리가 없다. 상수 m_1 과 m_2 는 컴플라이언스와 균열 길이와의 관계식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

Fig. 4로 부터 구한 부직포 복합재료와 적층 복합재료의 컴플라이언스는 다음과 같다.

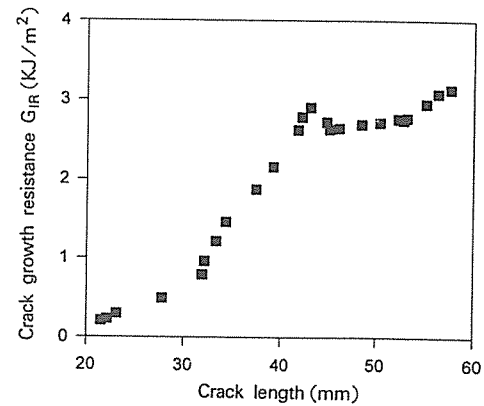
$$\begin{aligned} C(30\text{ppsc}) &= 2.85 \times 10^{-8} a^3 + 8.26 \times 10^{-4} \\ C(60\text{ppsc}) &= 3.94 \times 10^{-8} a^3 + 13.19 \times 10^{-4} \\ C(90\text{ppsc}) &= 4.50 \times 10^{-8} a^3 + 3.30 \times 10^{-4} \cdots (6) \\ C(\text{woven}) &= 3.84 \times 10^{-8} a^3 + 4.18 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

균열이 전파함에 따라 층간 분리에 의한 파단면이 증가하게 된다. 층간 파괴 에너지, 즉 변형률 에너지 방출률 G_I 는 하중-변위 곡선과 식(5), (6)을 이용하여 구할 수 있다. Fig. 5에 균열 길이에 대한 mode I 파괴 에너지를 나타내었다. 균열이 전파함에 따라 부직포 복합재료가 적층 복합재료보다 최고 3배 정도의 높은 층간 파괴 인성을 나타냄을 알 수 있었다.

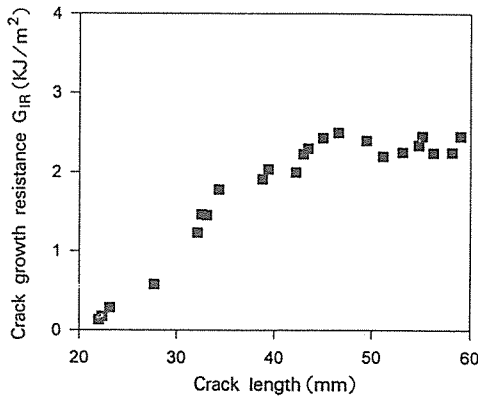
고온 고압에서 복합재료를 성형할 때 층간에 인접한 섬유들의 층간 유동이 발생하게 된다. 이와 같은 섬유 연계 현상(bridging)에 의하여 균열이 전파될 때 하나의 층간으로 전파되지 않고 인접한 다른 층으로 균열이 이동하거나 몇 개의 층으로 확대되는 현상이 발생하게 된다. 모드 I 하중이 가해질 때 최대 하중에 이르면 후 하중이 급격히 떨어



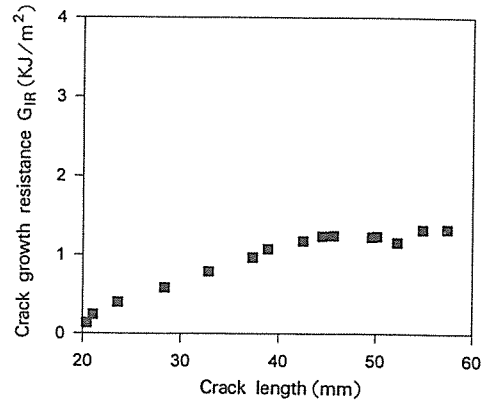
(a) 30 ppsc



(c) 90 ppsc



(b) 60 ppsc

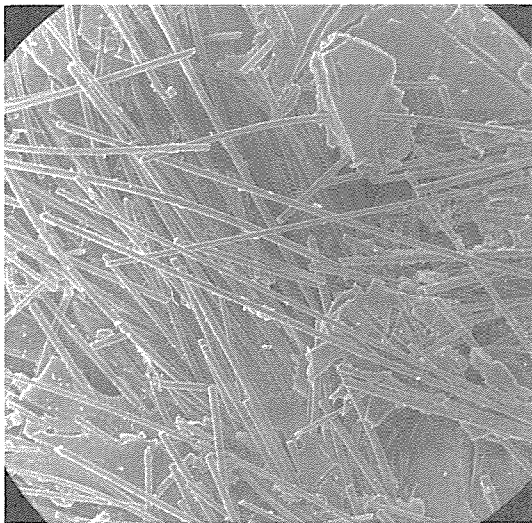


(d) woven

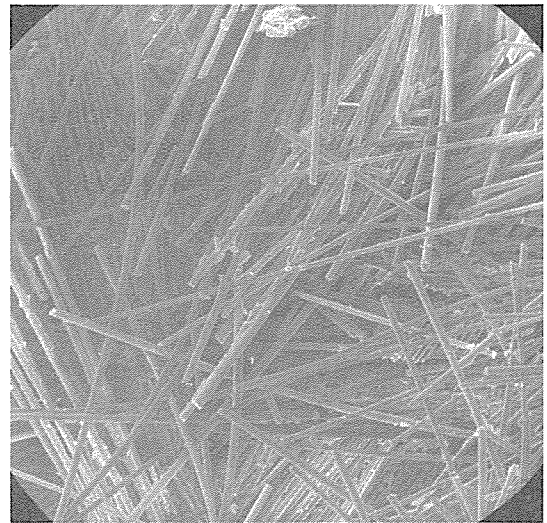
Fig. 5. Crack growth resistance, G_{IR} of nonwoven and woven laminate composites

어지게 되는데 이와 같은 섬유 연계 현상이 있을 경우에는 하중의 감소율이 줄어들게 된다. 이러한 이유로 적층 복합재료 보다 부직포 복합재료가 최대 하중 이후에 하중을 더 잘 유지하게 되고, 부직포 복합재료는 펀칭 밀도가 증가할수록 하중의 감소율이 줄어들게 되는 것을 알 수 있다. 또한 섬유 연계 현상이 없을 경우에는 변형률 에너지 방출률이 일정한 값을 나타내게 되는데 본 연구에서는

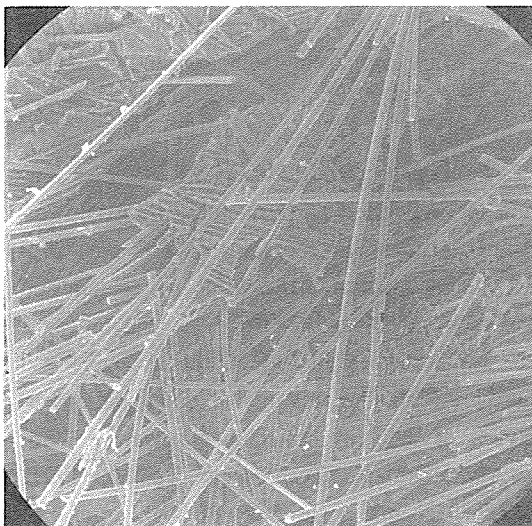
부직포 복합재료와 적층 복합재료 모두 변형률 에너지 방출률이 증가하는 것을 볼 수 있다. 부직포 복합재료가 적층 복합재료보다 에너지 방출률이 더 많이 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 섬유 연계 현상이 더 많이 발생하는 것으로 설명할 수 있다. 복합재료의 섬유 연계 현상은 균열의 전파를 억제하여 층간 파괴 인성을 향상시키는 역할을 한다. 따라서 섬유 연계 현상이 많은 부직포 복합재료의



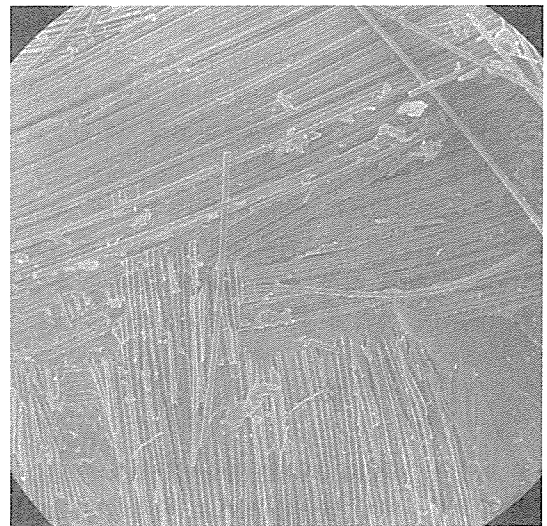
(a) 30 ppvc



(c) 90 ppvc



(b) 60 ppvc



(d) woven

Fig.6. Fractured surface of needle punched nonwoven and woven laminate composites after mode-I test.

층간 파괴 인성은 적층 복합재료 보다 월등히 우수하게 나타나게 된다.

4-2. 파단면 관찰

Fig. 6은 모드 I 파괴실험 후 층간분리가 일어난 파단면의 SEM 사진을 보여주고 있다. 적층 복합재료는 섬유와 기지물질사이의 계면에서의 분리와 기지물질내에서의 파괴가 주로 일어남을 관찰할 수 있었다. 이외는 달리 부직포 복합재료의 경우는 두께 방향 보강 섬유의 절단이나 pull-out 현상이 주요한 파괴 모드임을 알 수 있다. 부직포 복합재료는 두께 방향 보강에 의해 층간 분리에 대한 저항이 큰 구조를 이루고 있어서 우수한 구조보지성을 나타내게 됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

펀칭밀도에 따른 부직포 복합재료의 모드 I 층간 파괴 인성 변화를 고찰하고 적층 복합재료의 층간 파괴 인성과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부직포 복합재료의 층간 결합력은 펀칭 밀도가 증가할수록 증가하였다. 또한 펀칭 밀도가 증가할수록 균열의 전파속도가 감소하고 층간 분리 하중에 더 잘 저항하는 것으로 나타났다.

(2) 부직포 복합재료는 두께 방향 보강 섬유의 섬유 연계 현상으로 적층 복합재료 보다 3배 정도의 높은 층간 파괴 인성을 보였다.

(3) 적층 복합재료는 섬유와 기지물질 사이 계면에서 분리와 기지물질 내에서의 파괴가, 부직포 복합재료는 두께 방향 보강 섬유의 절단이 층간 분리가 일어날 때의 주 파괴 모드임을 확인하였다.

후 기

본 논문은 '95년도 교육부 학술연구조성비(신소재 분야)에 의하여 연구된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Singh and I.K. Partridge, "Mixed-mode fracture in an interleaved carbon-fiber/epoxy composite", *Composite Science and Technology*, Vol.55, 1995, pp.319-327.
2. A.J. Kinloch, Y. Wang, J.G. Williams and P. Yavla, "The mixed-mode delamination of fiber composite materials", *Composite Science and Technology*, Vol.47, 1993, pp.225-237.
3. Lin Ye, "Evaluation of mode- I interlaminar fracture toughness of fiber-reinforced composite materials", *Composite Science and Technology*, Vol.43, 1992, pp.49-54.
4. M.A. Solar and F.J. Belzunce, "Fracture toughness and R-curves of glass fibre reinforced polyester", *Composite*, Vol.20, No.2, 1989, pp.120-124.
5. Xiao-Zhi Hu and Yiu-Wing Mai, "Mode I delamination and fiber bridging in carbon/epoxy composites with and without PVAL coating", *Composite Science and Technology*, Vol.46, 1993, pp.147-156.
6. I. Verpoest, M. Wevers, P. De Meester and P. Declercq, "2.5D-and 3D-fabrics for delamination resistant composite laminates and sandwich structures", *SAMPE Journal*, Vol.25, No.3, 1989, pp.51-56.
7. P. Popper and R. McConell, "A new 3-D braid for integrated parts manufacturing and improved delamination resistance-The 2-step process", *32nd International SAMPE Symposium and Exhibition*, 1983, pp.92-97.
8. Kimberley Dransfield, Caroline Baillie and Yiu-Wing Mai, "Improving the delamination resistance of CFRP by stitching - a review", *Composite Science and Technology*, Vol.50, 1994, pp.305-317.
9. Lalit K. Jain and Yiu-Wing Mai, "On the effect of stitching on mode I delamination tou-

ghness of laminated composites", Composite Science and Technology, Vol.51, 1994, pp.331-344.

10. 이승호, 강태진, 김종섭, "Textile Composite의 구조와 물성(I)-스티칭 복합재료의 충격 손상 거동", 한국복합재료학회지, 제8권, 제1호,

1995, pp.58-65.

11. 이승호, 강태진, 김종섭, "Textile Composite의 구조와 물성(II)-부직포 복합재료의 물성과 충격 특성에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제9권, 제3호, pp.58-66.

