

## 부직포가 예각 적층판의 기계적 거동에 미치는 효과

정성균\*

### Effects of Non-Woven Tissue on the Mechanical Behavior of Angle-Ply Laminates

Seong Kyun Cheong\*

#### Abstract

This paper investigates the mechanical characteristics of angle-ply laminates with non-woven carbon tissue. The laminates were made by inserting non-woven carbon tissue at the interface. Specimens were rounded near the tabs by grinding and polishing to reduce the stress concentration. Cyclic loads were applied to the specimens and the stress and fatigue life curves were obtained. The matrix crack density was also evaluated to check the effects of non-woven carbon tissue on the fracture resistance of composite laminates. C-Scan technique was used to evaluate the delamination, and SEM was used to understand the fracture mechanisms of the laminates.

Experimental results show that the fatigue strength and life of composite laminates were increased by inserting non-woven carbon tissues. The results also show that the matrix crack density and delamination area were reduced by inserting non-woven carbon tissues.

**Key Words :** Non-woven carbon tissue(탄소 부직포), Angle-ply laminate(예각적층판), Matrix crack density(모재균열밀도), Fatigue life(피로수명), Fatigue strength(피로강도), Delamination(층간분리), Fracture toughness(파괴인성)

#### 1. 서론

복합재료는 높은 비강성(specific stiffness)과 비강도(specific strength)를 가지고 있기 때문에 그 사용 영역이

점점 넓어지고 있다. 여러 가지 복합재료 중에서 섬유강화 복합재료(FRP, fiber reinforced plastic)는 항공우주, 각종 방위산업, 토목, 건축 및 스포츠용품 등에 사용되고 있으며 각각의 구조물에 적합한 복합재료도 늘 새롭게 개발되

\* 서울산업대학교 기계공학과  
(skjung@plaza1.snut.ac.kr)

고 있다. 섬유강화 복합재료는 보통 적층 형태로 많이 쓰이는데 이와 같은 적층복합재료(laminated composite)는 몇 가지 단점을 가지고 있다. 단점 중에서도 낮은 층간 파괴인성(interlaminar fracture toughness)을 그 예로 들 수 있다.

섬유강화 적층 복합재료는 등방성 재료와 달리 평면내(in-plane)의 인장시에도 자유단(free edge)에서 층간응력(interlaminar stress)이 발생하여 예상하지 못한 파괴에 이를 수 있다. 따라서 구조물을 설계할 때에 층간응력을 줄이기 위한 방법은 매우 중요한 설계변수 중의 하나이다. 층간응력을 줄이기 위해 많이 쓰이는 방법 중의 하나가 적층 순서를 조절하는 것이다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 적층 순서를 아무리 잘 조절할지라도 층간응력을 완전히 제거하는 것은 불가능하다. 따라서 구조물의 강도를 증가시키기 위한 또 다른 방법은 층간 강도 또는 층간 파괴 인성치를 증가시키는 것이며, 이와 관련한 연구는 많이 발표되었다<sup>(3,5)</sup>. 그러나 층간 강도 또는 층간 파괴 인성을 개선하기 위해 지금까지 개발된 방법들은 학문적으로는 매우 의미가 있을 지라도 실제 구조물의 생산성을 고려하면 크게 유익한 방법은 아니라고 본다. 따라서 보다 실용적이고 생산적인 복합재료의 층간특성 개선 법이 필요하다. 이러한 방법으로 부직포(non-woven tissue)를 사용해서 층간파괴 인성에 관한 연구를 발표한 바 있다<sup>(6,7)</sup>.

부직포를 사용한 적층판의 생산은 간단하고 경제적이며, 부직포가 모우드II의 층간파괴인성치를 상당히 많이 증가시킬 수 있었으며, 모우드I의 층간파괴인성치는

큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

그러나 부직포가 모우드III의 층간파괴인성치에 어떠한 영향을 주는지 기존의 방법으로는 평가가 어려워서 비교 분석할 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 부직포가 모우드III의 층간파괴인성치에 어떠한 영향을 주는지를 연구하기 위하여 간접적인 방법을 택하였다. 즉, Fig. 1처럼 모우드III와 관련된 층간응력  $\tau_{xz}$ 가 지배적인 예상적층판(+30<sub>2</sub>/-30<sub>2</sub>)s을 만들어<sup>(8)</sup> 피로시험을 하고, 피로강도 및 피로수명이 얼마나 증가하는지, 그리고 현미경, C-스캔, SEM사진의 관찰을 통해 층간파괴와 관련된 기구(mechanism)를 분석해서 높은 층간파괴인성을 갖는 복합재료를 개발하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에서는 에폭시 수지계에 탄소섬유를 함침시킨 탄소섬유 복합재료를 사용하였으며, 탄소 부직포(non-woven carbon tissue)를 삽입한 것과 삽입하지 않은 것 각각 두 종류의 적층판을 제작하였다. 적층순서는 Fig. 2와 같으며, 부직포를 삽입하지 않은 시험편을 제작하기 위해서 [+30<sub>2</sub>/-30<sub>2</sub>]<sub>s</sub>로 적층하였다. 부직포를 삽입한 시험편을 제작하기 위해서 적층판의 각 계면에 부직포를 삽입하여 적층하였으며, 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 구별하기 위해서 [+30<sub>2</sub>//-30<sub>2</sub>]<sub>s</sub>로 표기한다. 적층판은 Fig. 3과 같은 사이클로 성형하였으며, 다이아몬드 절단기(diamond

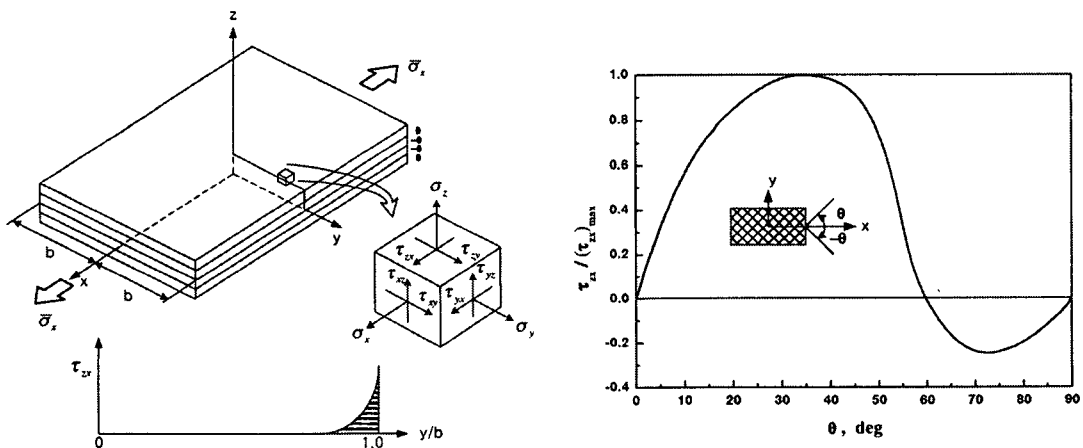


Fig. 1 Distribution of interlaminar shear stress( $\tau_{xz}$ ) of ( $\pm\theta$ )s angle-ply laminate under axial tension

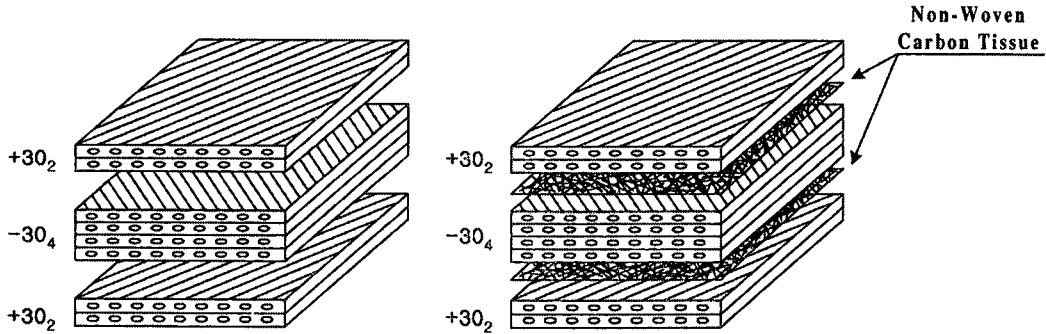


Fig. 2 Lay-ups of laminates without and with non-woven carbon tissue

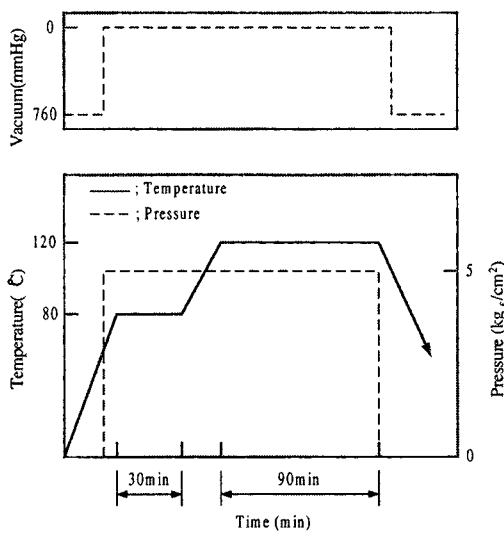


Fig. 3 Curing cycle (autoclave process)

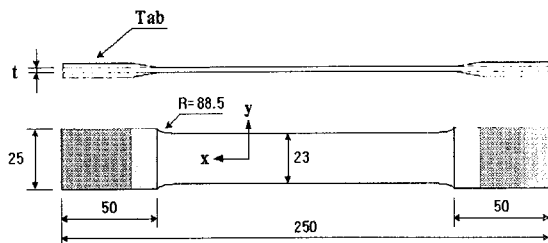


Fig. 4 Fatigue test specimen

cutter)를 사용해서 절단하고 절단면을 사포(sand paper)로 연마하였다. 시험편의 제작과 가공 과정에 의한 결함발생 유무를 확인하기 위하여 C-Scan을 사용하여 확인하였다. 피로시험에 사용된 시험편은 탭 부분의 응력 집중을 방지하기 위하여 Fig. 4와 같이 시험편의 양 옆을 연삭기를 사용해서 가공하였다.

### 2.2 피로시험

피로 시험은 ASTM D3479<sup>(10)</sup>에 의거하여 상온의 대기 중에서 수행하였다. 피로시험은 INSTRON 8516 유압서보식 시험기를 이용하여 일정 진폭하중하에서 행하였다. 사용된 하중 파형은 응력비 ( $\sigma_{min} / \sigma_{max}$ )가 0.1이고, 주파수 10Hz인 정현파이다. 피로강도와 피로수명을 얻기 위해 인장시험을 통해 얻은 인장강도(tensile strength)를 바탕으로 응력을 결정하여 시험하였다.

### 2.3 현미경/C-Scan관찰

모재균열(matrix crack)과 층간분리(delaminatin)의 발생 및 진전을 관찰하기 위하여 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 삽입한 시험편을 250MPa의 응력하에서 피로시험을 하였다. 일정 사이클마다 시험편 옆 단면을 광학 현미경을 이용하여 관찰하였으며, C-Scan을 이용하여 층간분리(delamination)을 관찰하였다. 사용된 C-Scan 장비는 HITACHI사의 mi-ScopExla이며 탐촉자의 주파수는 25MHz이다.

### 2.4 파단면 관찰

SEM을 사용해서 부직포를 삽입한 시험편과 삽입하지

않은 시험편의 피로시험에 의한 층간분리 파단면을 관찰하였다. 층간분리 파단면을 관찰함으로써 부직포가 적층판의 피로파괴에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로시험

부직포를 삽입하지 않은 경우와 부직포를 삽입한 경우에 대하여 피로시험을 수행한 결과 Fig. 5와 같은 S-N 곡선을 얻었으며,  $10^6$  사이클을 기준으로 할 때 부직포를 삽입한 경우가 삽입하지 않은 경우에 비하여 피로강도 (fatigue strength)는 약 21% 증가하였고, 응력 215MPa에 대해 피로수명(fatigue life)은 약 1846% 증가하였다.

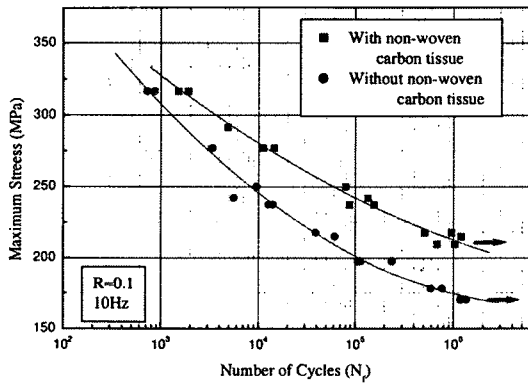


Fig. 5 S-N curves for the specimens without and with non-woven carbon tissue

#### 3.2 현미경/C-Scan관찰

Fig. 6은 215MPa과 250MPa의 응력 하에서 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 삽입한 시험편의 모재균열밀도 (matrix crack density)를 나타낸 그래프이다. 모재균열밀도는 시험편의 옆 단면에 5cm영역에서 발생되는 모재균열의 수를 광학현미경으로 측정된 것이다. 그래프에서 보듯이 부직포를 삽입하지 않은 시험편에 비하여 부직포를 삽입한 시험편이 크랙의 발생이 더딜 수 있다. 또한, 부직포를 삽입한 시험편의 경우 일정 사이클 수까지는 크랙 수가 증가하지 않다가 일정 사이클 수 후에 급격히 크랙 수가 증가하는데 이는 시험편에 삽입된 부직포가 크랙의 발생을 지연시키기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 부직포를 삽입하지 않은 시험편의 단면을 관찰

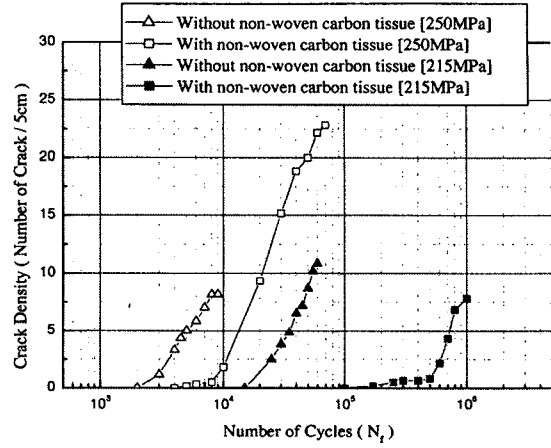


Fig. 6 Comparison of matrix crack density in the specimen without and with non-woven carbon tissue under cyclic stresses

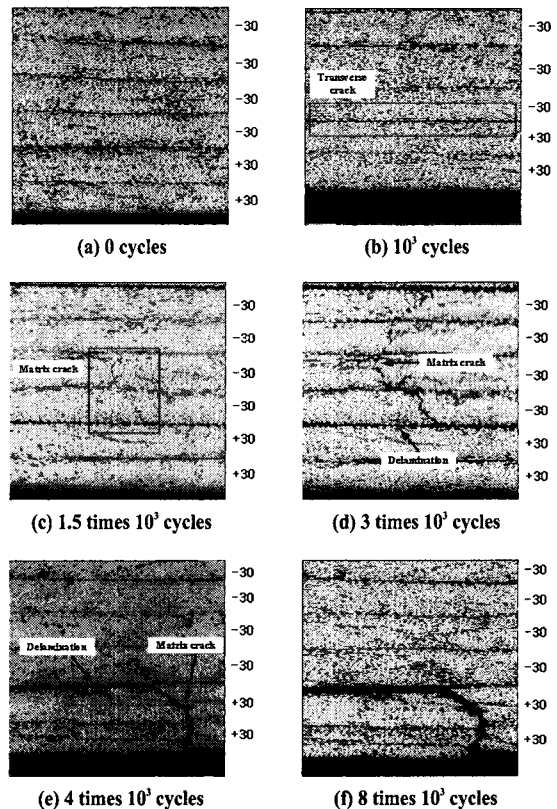


Fig. 7 The growth of matrix crack and delamination on the specimen without non-woven carbon tissue under maximum stress  $\sigma_{max} = 250\text{MPa}(x100)$

한 사진이다.  $10^3$  사이클에서 +30층과 -30층 사이에 횡 방향의 균열이 발생되었다. 이 균열을 시점으로 -30층에 모재균열이 발생되었다(Fig. 7(c)). 사이클의 증가에 따라 -30층의 모재균열의 성장과 +30층과 -30층에서 층간분리가 발생하였다(Fig. 7(d)). 또한 +30층에서도 모재균열을 관찰할 수 있었다. 사이클수가 증가함에 따라 -30층과 +30층에서 모재균열이 증가하였고 Fig. 7(e)에 서와 같이 +30층과 -30층 사이의 층간분리의 성장은 +30층의 모재균열로 전파됨으로서 멈추었다. 이와 같은 현상은 참고문헌<sup>(11,12)</sup>에서도 파악할 수 있었다.

Fig. 8은 부직포를 삽입한 시험편의 사진이다. 부직포를 삽입한 시험편은 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 달리  $3 \times 10^3$  사이클까지 모재균열을 관찰할 수 없었다. Fig 8(b)에서 볼 수 있듯이 부직포 층의 단 섬유를 기점으로 하여 미소크랙(micro crack)들이 발생되었다. 이 미소크랙의 성

장과 함께 +30층과 -30층의 모재균열이 발생이 되었다 (Fig 8(c),(d)). 부직포를 삽입하지 않은 시험편의 경우 -30층에서부터 모재균열이 발생되었지만, 부직포를 삽입한 시험편에서는 부직포 층의 크랙에 의하여 +30층과 -30층

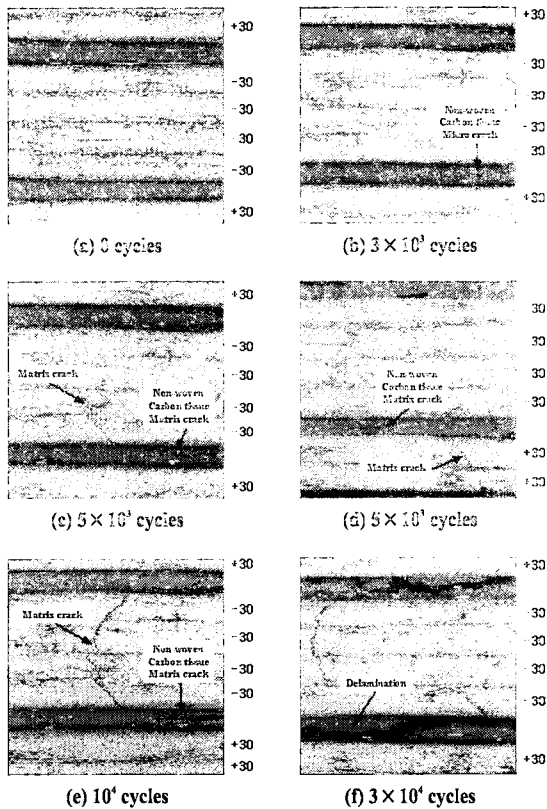


Fig. 8 The growth of matrix crack and delamination on specimen with non-woven carbon tissue under maximum stress  $\sigma_{max} = 250\text{MPa}$  (x100)

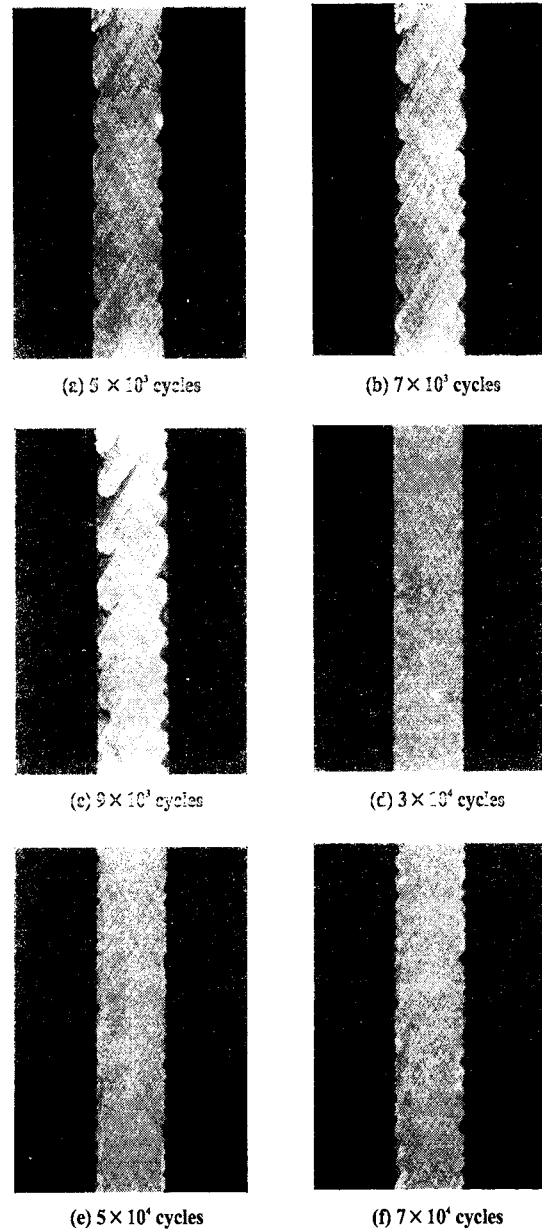


Fig. 9 C-scan images of specimen without and with non-woven carbon tissue

으로 모재균열이 거의 동시에 발생하는 것을 관찰할 수 있었고 층간분리의 발생은 없었다. 사이클 수가 증가함에 따라 부직포 층의 크랙과 +30, -30층의 모재균열이 계속 성장하였고 시험편 전체에 걸쳐 모재균열의 수도 증가하였다.  $3 \times 10^4$  cycles 이후 부직포 층의 크랙의 성장에 의한 층간분리가 관찰되었다.

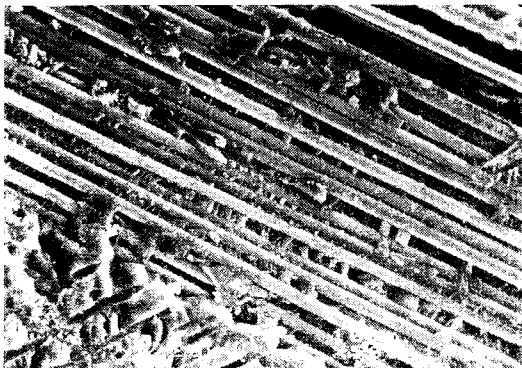
Fig. 9는 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 삽입한 시험편의 C-Scan결과를 비교한 것이다. Fig. 9(a),(b),(c)에서 보듯이 부직포를 삽입하지 않은 시험편의 양쪽 끝단(edge)부에서 층간분리가 관찰되었고, 사이클 수가 증가함에 따라서 그 면적이 증가하였으며,  $9.5 \times 10^3$  사이클에서 파단 되었다. Fig. 9(d),(e),(f)에서 보듯이 부직포를 삽입한 시험편은  $3 \times 10^4$  사이클에서 양쪽 끝단 부에 약간의 층간분리가 발생되었으나,  $7 \times 10^4$  이후 파단 시까지 층간분리 면적의 증가는 부직포를 삽입하지 않은 시험편에 비하여 매우 적었다.

### 3.3 파단면 관찰

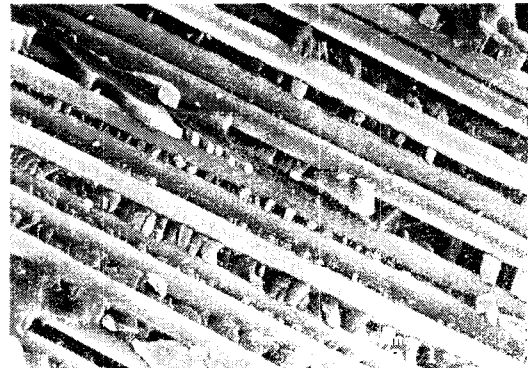
Fig. 10은 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 삽입한 시험편의 피로시험에 의한 층간분리 파단면을 관찰한 사진이다. 두 시험편의 파단면에서 헤클(heckle)들이 관찰되었는데 그 원인은 +30/-30 계면 사이에 층간전단응력(interlaminar shear stress)의 작용에 의한 것으로 보인다. 헤클들의 발생 정도를 비교하여보면 부직포를 삽입하지 않은 시험편에서 보다 부직포를 삽입한 시험편에서 더 많은 헤클들이 발생하였음을 관찰할 수 있었다. 이는 부직포를 삽입한 시험편의 계면에서 파괴가 일어나는데 더 많은 에너지가 소모된 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

부직포를 사용한 예각적층판의 기계적 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



(a) Fracture photograph of specimen without non-woven carbon tissue



(b) Fracture photograph of specimen with non-woven carbon tissue

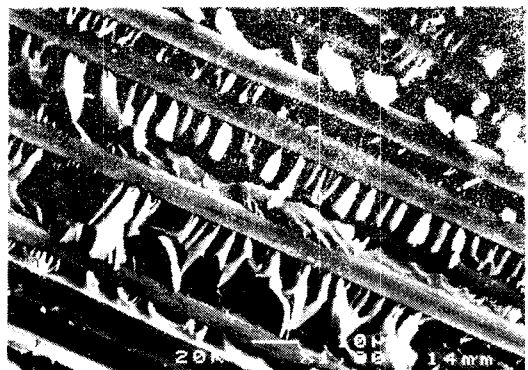


Fig. 10 Fracture photograph using SEM(x500 and x1000)

- (1) 부직포를 삽입한 결과 피로강도는 약21%, 피로수명은 약1848% 증가하였다. 이는 적층판에 부직포를 삽입함으로써 모우드III에 해당되는 파괴인성치가 증가하였음을 의미한다.
- (2) 피로하중을 가한 후에 부직포를 삽입하지 않은 시험편과 삽입한 시험편의 모재균열밀도(matrix crack density)를 점검한 결과, 부직포를 삽입하지 않은 시험편에 비하여 부직포를 삽입한 시험편에서 크랙의 발생이 더딤을 알 수 있었으며, 이는 시험편에 삽입된 부직포가 크랙의 발생을 지연시키는 것으로 판단된다.
- (3) C-Scan결과, 부직포를 삽입한 시험편의 층간분리면적의 증가는 부직포를 삽입하지 않은 시험편에 비하여 매우 적었다.
- (4) SEM 사진의 해석 결과, 헤كل의 발생 정도는 부직포를 삽입한 시험편에서 더 많이 발생하였음을 관찰할 수 있었으며, 이는 부직포를 삽입한 시험편의 계면에서 파괴가 일어나는데 더 많은 에너지가 소모되었음을 의미한다.

## 후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) N. J. Pagano and S. R. Soni, "Free Edge Delamination Prevention in Composite Laminates," Advisory Group for Aerospace Research & Development, pp.1-1~1-11.
- (2) C. S. Hong and D. M. Kim, "Stacking Method of Thick Composite Laminates Considering Interlaminar Normal Stress," "34th International SAMPE Symposium and Exhibition, Vol. 34, May 1989, pp.1010-1018.
- (3) R.Y.Kim, "Prevention of Free-Edge Delamination," 28th National SAMPE Symposium, April 12-14, 1983, pp.200-209.
- (4) L. A. Mignery, T. M. Tan and C. T. Sun, "The Use of Stitching to Suppress Delamination and Debonding in Laminated Composites," Delamination and Debonding, ASTM STP 876, 1985, pp.371-385.
- (5) W. R. Pogue and A. J. Vizzini, "Structural Tailoring Techniques to Prevent Delamination in Composite Laminates," Journal of the American Helicopter Society, Vol.35, No.4, October 1990, pp.38-45.
- (6) S. H. Lee, H. Noguchi, Y. B. Kim, and S. K. Cheong, "Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue; Part I-Mode II," Journal of Composite Materials. Submitted. (Aug. 15, 2001)
- (7) S. H. Lee, H. Noguchi, Y. B. Kim, and S. K. Cheong, "Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue; Part II-Mode I," Journal of Composite Materials. Submitted. (Aug. 15, 2001)
- (8) I. M. Daniel and O. Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, 1994, Oxford University Press, p.267
- (9) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM D3039-95.
- (10) Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM D3479-96.
- (11) T. K. O'Brien and Steven. J. Hooper, "Local Delamination in Laminates with Angle Ply Matrix Cracks, Part I : Tension Tests and Stress Analysis," Composite Materials : Fatigue and Fracture(4th Volume), ASTM STP 1156, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1993, pp. 491-506.
- (12) T. Kevin O'Brien, "Local Delamination in Laminates with Angle Ply Matrix Cracks, Part II : Delamination Fracture Analysis and Fatigue Characterization," Composite Materials : Fatigue and Fracture (4th Volume), ASTM STP 1156, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1993, pp. 507-537.