

부직포가 복합적층판의 층간파괴인성에 미치는 효과

김영배*, 정성균**, 강진식*, 김태형*

Effect of non-woven tissues on interlaminar fracture toughness of composite laminate

Young-Bae Kim*, Seong-Kyun Cheong**, Jin-shik Kang* and Tae-Hyung Kim*

ABSTRACT

The Interlaminar fracture behavior of hybrid composite with non-woven carbon tissue was investigated under Mode I (DCB) and Mode II (ENF) loading condition. Hybrid composites were manufactured by means of inserting a non-woven tissue between prepreg layers. Two kinds of specimens were prepared from $[0]_{24}$ and $[0_{12}/0_{12}]$. Where, the symbol “/” means that a non-woven carbon tissue was located at 0/0 mid-plane of the specimen. The interlaminar fracture toughness of hybrid composites was compared with that of CFRP. The fracture surfaces of the specimens were observed using optical microscope and SEM, and the failure mechanism was discussed. The hybrid laminates, which are made by inserting non-woven carbon tissue between layers, were shown to be effective to remarkably improve Mode II fracture toughness.

KEY WORDS : CFRP, Mode I, Mode II, Fracture toughness, Hybrid composite, Non-woven tissue

기호설명

- L 시험편의 길이
- b 시험편의 폭
- P_c 임계하중
- δ_c 임계변위
- F 변위에 대한 보정계수
- N 블록에 대한 보정계수
- C 컴플라이언스(compliance)
- Δ 크랙길이에 대한 보정계수
- $2L^*$ 스패(span)의 길이

1. 서론

섬유강화복합재료(CFRP)는 비강성과 비강도가 우수하다는 특성때문에 많은 분야에서 사용되고 있다. 하지만 이런 장점을 가진 반면 층간 파괴인

성이 약하다는 단점 또한 가지고 있다. 복합재료가 가지는 위와 같은 단점을 보강하기 위한 연구가^{1),2),3)} 진행되었지만 이런 방법을 현장에 적용하기에는 여러가지 시공상이나 경제적인 문제로 인하여 어려움을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 부직포를 사용하여, CFRP의 Mode I 과 Mode II 의 층간파괴인성에 미치는 부직포의 효과에 대하여 연구하고자 한다.

2. 실험방법

사용된 재료의 성형

본 연구에서는 (주)SK-Chemical 에서 생산되는 USN125 계열의 CFRP 와 TFP 사에서 제작된 Optimat@203 계열의 탄소부직포를 사용하였다. Table 1 은 CFRP 와 탄소부직포의 기계적성질을 나타낸다.⁴⁾

* 서울산업대학교 대학원

** 서울산업대학교 기계공학과

Table 1 Mechanical properties

| Mechanical Properties | USN125 | Non-woven tissue |
|------------------------------------------------|--------|------------------|
| Longitudinal Young's Modulus E_1 (GPa) | 128.0 | 14.0 |
| Transverse Young's Modulus E_2 (GPa) | 8.5 | |
| Longitudinal Tensile Strength σ_1 (MPa) | 2200.0 | 220.0 |
| Transverse Tensile Strength σ_2 (MPa) | 75.0 | |
| Fiber Volume Fraction V_f (%) | 58.0 | 8.0 |
| Poisson's Ratio ν_{12} | 0.32 | 0.41 |

일반시험편의 적층순서는 $[0]_{24}$ 였고, 부직포를 삽입한 시험편의 적층순서는 $[0_{12}/0_{12}]$ 였다. "r" 기호는 부직포의 삽입위치를 의미한다. (Fig.1) 인위결합을 유도하기 위해 테프론 필름(Teflon, 두께: 25.4 μm)을 삽입하였다. 이렇게 적층된 적층판은 제작사에서 추천하는 성형사이클로 오토클래브에서 성형되었다.

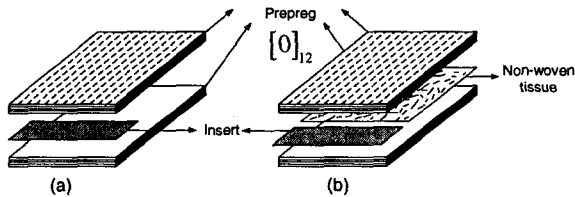


Fig. 1 Configuration of the laminates; (a) Normal laminate (b) Hybrid laminate

Mode I

Mode I의 임계에너지해방률(critical energy release rate, G_{Ic})을 측정하기 위해 DCB(Double Cantilever Beam) 시험법을 사용하였다. ASTM 규격을⁵⁾ 참고하여 Mode I 시험편을 제작하였다. 시험편의 길이(L)는 160mm 이고, 폭(b)은 25mm, 삽입된 인위결합의 길이는 63mm 이다. Fig. 2에 전반적인 시험편의 형상을 나타냈다.

인위결합을 삽입함으로써 발생하는 레진(resin)의 밀집지역의 영향을 피하기 위해 Mode I 시험편과 Mode II 시험편 모두 인위결합의 끝단으로부터 2mm 떨어진 곳을 클램핑(clamping)하고 Mode I의 하중을 가하여 초기크랙을 만들었다.

1mm/min 속도의 일정 변위제어로 인장하였으며 크랙이 진전하였을때 시험기(Instron4467)을 멈추어 측면에서 크랙의 위치를 표시하고, 하중을 제거하였다. 이와 같은 방법을 반복하여 크랙이 진전하기 이전의 하중과 변위를 기록하였다.

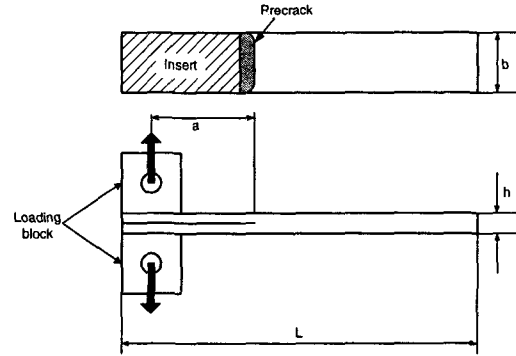


Fig. 2 The configuration of a double cantilever beam specimen

여기서 측정된 크랙의 길이와 하중, 변위를 가지고 식(1)을 이용하여 Mode I의 임계에너지해방률을 측정하였다.⁵⁾

$$G_{Ic} = \frac{F}{N} \frac{3P_c \delta_c}{2b(a+|\Delta|)} \quad (1)$$

여기서 P_c 는 임계하중이고 δ_c 는 그 때의 변위이다. F는 시험편이 큰 변위를 일으킬 때의 보정계수이다. N은 하중을 전달하는데 사용한 블록의 영향을 고려한 보정계수이다. 마지막으로 Δ 는 실험적으로 구해지는데, 컴플라이언스($C = \delta/P$)의 1/3 계수($C^{1/3}$)과 균열길이에 관한 데이터를 최소자승법(least square method)을 적용하여 구해졌다.

Mode II

Mode II의 임계에너지해방률을 측정하기 위해 ENF(End Notched Flexure)시험법을 이용하였다. 시험편의 형상은 Mode I 시험편과 같고 3점굽힘 치구에 의해 하중을 가하였다. 아래에 있는 두 지지점의 거리($2L''$)는 100mm로 하였고, 크랙길이에 따른 임계에너지 값을 측정하기 위해 크랙길이를 변화시켜 시험하였다. 이때 시험한 속도는 0.5 mm/min 이다.

임계하중(P_c)과 임계변위(δ_c)는 실험으로부터 구해지는 하중-변위 선도에서 선형적인 곡선에서 비선형으로 변하는 점을 택하여 식(2)를 이용하여 Mode II의 임계에너지해방률(G_{IIc})을 계산하였다.⁶⁾

$$G_{IIc} = \frac{9a^2 P_c \delta_c}{2b(2L''^3 + 3a^3)} \quad (2)$$

3. 실험결과

Mode I

Fig. 3 은 DCB 실험에 의한 정확한 균열길이의 측정을 위해서 실험이 끝난 후, 시험편을 분리하여 칼라스캐너를 이용하여 균열길이를 측정하였다. 균열이 포물선형태로 진행하므로 테프론의 끝단에서부터 균열선단까지 길이를 5 군데에서 측정하여 평균값을 사용하였다.

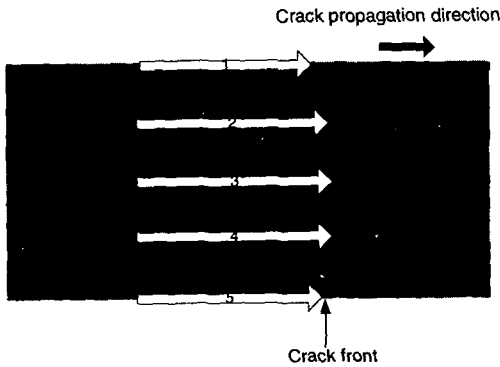


Fig. 3 Measurement of crack length after DCB test.

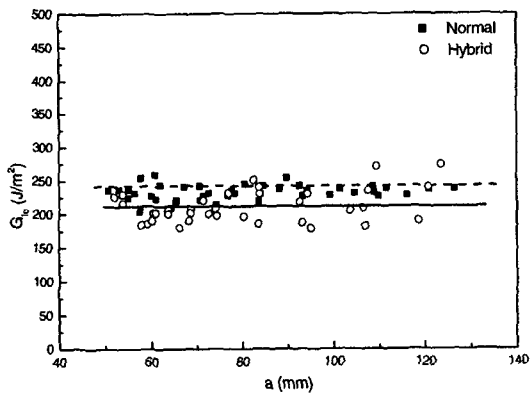


Fig. 4 Results of mode I fracture toughness for normal and hybrid specimen

Fig.4 는 Mode I 실험결과를 나타낸다. 부직포를 삽입하지 않은 시험편의 평균 G_{Ic} 값은 $233 J/m^2$ (17)였고, 부직포를 삽입한 시험편의 평균 G_{Ic} 값은 $211 J/m^2$ (24)이었다. 괄호안의 숫자는 표준편차를 의미한다. 부직포를 넣은 시험편이 넣지 않은 시험편에 비해 G_{Ic} 값이 약 10%정도 낮게 측정되었다. 부직포를 넣은 시험편이 일반시험편보다 큰 스캐터(Scatter)를 나타내고 있다. 그것은 탄소부직포를 구성하고 있는 단섬유로 인한 응력

집중의 발생이라는 단섬과 섬유가교(Fiber bridging)와 섬유파단(Fiber breakage)의 장점들이 관계에 기인하기 때문이라고 생각되어진다. 이러한 현상을 근거로 부직포층의 단섬유 함유율을 증가시킨다면 섬유가교(Fiber bridging)와 섬유파단(Fiber breakage)의 효과를 얻으므로써 층간파괴인성치를 높일수 있다는 가능성을 제시할 수 있다.

Fig. 5 은 Fig. 3 에 보이는 비치마크(Beach mark)의 부분을 주사형 현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 사진이다.

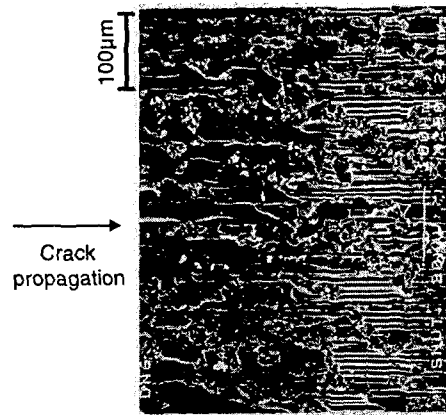


Fig. 5 Fracture graph of normal specimen

부직포를 삽입하지 않은 시험편의 파단면과 부직포를 삽입한 시험편의 파단면을 비교해 볼 때, 부직포를 삽입하지 않은 시험편(Fig. 5)의 검은 부분은 균열이 시작되는 부분으로, 처음에는 레진(resin)이 파괴하면서 안정적으로 진행하다가 하얀 부분부터는 섬유와 레진의 계면으로 균열이 진행되는 불안정한 파괴를 나타낸다. 부직포가 삽입된 시험편은 부직포층내의 단섬유와 레진과의 계면에서의 파괴와 레진의 파괴등으로 복잡한 파괴양상을 나타낸다. 또한, 이러한 파괴와 함께 단섬유들이 섬유가교(fiber bridging), 섬유파단(fiber breakage) 등을 일으킨다. (Fig. 6)

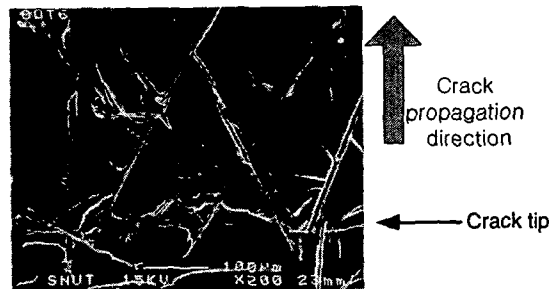


Fig. 6 Fracture graph of specimen with a tissue

Mode II

Fig. 7 은 부직포를 삽입한 시험편의 P- δ 곡선으로 크랙이 진전하기 직전에 비선형 거동을 보였다. 임계하중과 임계변위는 곡선이 선형에서 비선형으로 바뀌는 점을 선택하였다.

크랙길이를 더 정확히 측정하기 위해 시험이 끝난 후 Mode I 시험편과 같은 방법으로 측정하여 보정하였다.

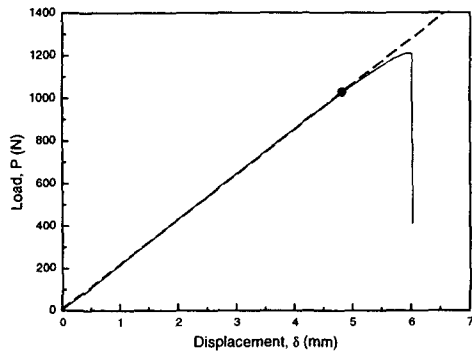


Fig. 7 P- δ curve of hybrid specimen

Fig. 8 은 크랙길이를 다르게 하여 G_{IIc} 를 평가한 그래프로 Mode II 의 평균 임계에너지해방률은 부직포를 삽입하지 않은 시편의 경우에 $575 J/m^2$ (111), 부직포를 삽입한 시편의 경우에 $1921 J/m^2$ (278)으로 평가 되었다. 부직포가 삽입된 시험편의 Mode II 파괴인성치는 약 230%증가하였다. 괄호안의 숫자는 표준편차를 의미한다.

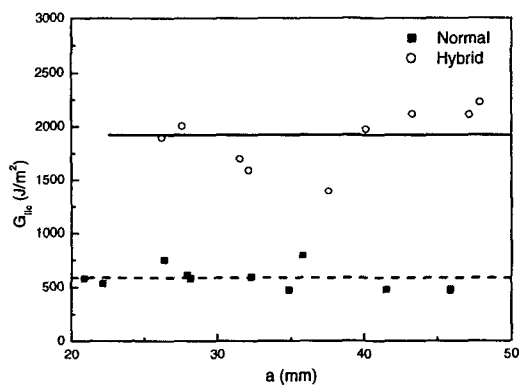
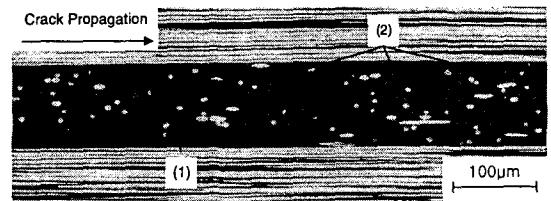


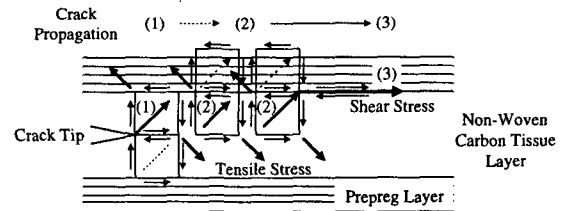
Fig. 8 Results of mode II fracture toughness for normal and hybrid specimen

Fig. 9(a)는 광학현미경에 의해 Mode II 하중을 받고 있는 부직포 층의 균열진전을 나타내고있다. Fig. 9(b)에서는 Mode II 하중에 의한 부직포층의 균

열진전을 설명하고있다. 균열선단에서는 굽힘모멘트(bending moment)에 의해 전단력이 발생한다. 주응력 방향(45°)의 인장력에 의해 (1)과 같이 균열이 진전하기 시작한다.⁷⁾ 인장력에 의해 성장하는 균열은 부직포층내의 탄소 단섬유에 의해 성장이 멈춘다. 하중이 계속 가해지면 (2)와 같이 하중이 작용하는 가운데 방향으로 또 다른 균열이 발생한다. 하중이 가해지는 부분으로 갈수록 전단력이 크게 작용하므로, 어느 한계점에 도달하면 균열은 (3)과같이 진전한다. 여기서, 부직포층이 있는 시험편의 층간파괴인성치가 높은 이유는 균열이 진전하면서 단섬유의 섬유가교와 섬유파단을 일으키면서 파괴되기 때문이라고 생각된다.



(a) Crack propagation of hybrid specimen by optical microscope under ENF test.



(b) Fracture mechanism of hybrid specimen under ENF test.

Fig. 9 Configuration drawing of crack path in hybrid specimen for ENF test.

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유강화복합재료(CFRP)의 층간파괴인성을 개선하기위해서 탄소 부직포를 사용하여 Mode I 과 Mode II 층간파괴인성 실험을 수행하였다. 부직포가 파괴인성치에 미치는 효과를 검토하여, 아래와 같이 정리하였다.

(1) DCB 실험에 의해 탄소부직포가 있는 시험편의 Mode I 층간파괴인성치(G_{Ic})는 일반 CFRP 시험편보다 약간 저하하였으나 부직포의 섬유 함유율을 높임으로서 Mode I 층간파괴인성치를 증가시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

- (2) ENF 실험에서는 탄소부직포가 있는 시험편의 Mode II 파괴인성치(G_{IIc})는 섬유 가교(fiber bridging)와 섬유파단(fiber breakage)에 의해 일반 CFRP 시험편보다 약 230% 증가하였다.
- (3) 이상의 결과로부터 부직포를 이용하여 충격특성을 개선할 수 있을 것으로 예측되며, 부직포의 개념을 다른 복합재료에 효과적으로 적용할 수 있는 가능성을 얻었다.

후 기

본 연구에 조언과 도움을 주신 ㈜SK-Chemicals의 임승규 박사님과 일본 큐슈대학의 이승환군에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Lalit K. Jain, "Effect of Reinforcing Tabs on the Mode I Delamination Toughness of Stitched CFRPs", *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, No. 22, 1998
- (2) Masaki Hojo and Takahira Aoki, "Thickness Effect of Double Cantilever Beam Specimen on Interlaminar Fracture Toughness of AS4/PEEK and T800/Epoxy Laminates", *Composite Materials*, 1993, pp. 281-298,
- (3) Eileen Armstrong-Carroll, Bassel Iskandarani, Ihab Kamel, and Thomas M. Donnellan, "The Influence of Interleaf Deformation Behavior and Film-Resin Adhesion on the Fracture Toughness of Interleaved Composites", *Composite Materials*, 1993, pp. 299-317
- (4) S.Cheong, S.Lee, S.Lim, "Mechanical Characteristics of Composite Laminates with Non-woven Mat", *Proceeding of the Korea Society of Mechanical Engineers for Material and Fracture Parts Annual Meeting*, 1998, pp. 66-73
- (5) Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM D5528-94a, 1994
- (6) A.J. Russell and K.N. Street, "Factors Affecting the Interlaminar Fracture Energy of Graphite/Epoxy Laminates", *Proc. 4th Int. Conf. on Composite Materials*, 1984, pp.279-286
- (7) T. Kevin O'Brien, "Interlaminar Fracture Toughness: the long and winding road to standardization", *Composite Part B 29B*, 1998