

## 論文

## 무게가 상이한 탄소부직포가 삽입된 CFRP적층판의 층간파괴인성

정성균\*

## Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Laminates with Carbon Non-Woven Tissue Having Different Weights

Seong-Kyun Cheong\*

## ABSTRACT

For the practical use of improved interlaminar fracture toughness by interleaving carbon non-woven tissue (CNWT), interlaminar fracture toughnesses of CFRP laminates with CNWT having different weights were experimentally investigated. A suitable weight of interleaved CNWT in CFRP laminates was discussed with Mode I and Mode II tests.

Mode I and Mode II interlaminar fracture toughnesses (GIC and GIIC) were obtained by DCB and ENF tests. Six kinds of specimens with CNWT were prepared. The weights of CNWT per square meter for six types of specimens are  $8\text{g/m}^2$ ,  $10\text{g/m}^2$ ,  $12\text{g/m}^2$ ,  $16\text{g/m}^2$ ,  $20\text{g/m}^2$ , and  $24\text{g/m}^2$ , respectively.

The mean GIC and GIIC values of six kinds of specimens were not substantially different from one another. Compared with the CFRP specimen, the mean GIC values of six kinds of specimens were slightly decreased. But the mean GIIC values increased tremendously at least twice by interleaving CNWT. It seems that there is no interrelationship between the interlaminar fracture toughnesses (GIC and GIIC) and the interleaving CNWT weights. Consequently, it would be desirable to use the CNWT of  $8\text{g/m}^2$  among the six kinds of CNWTs to take advantage of the interlaminar fracture toughness improved by interleaving CNWT, because the CNWT of  $8\text{g/m}^2$  is a lightweight and low-priced material.

## 초 록

탄소부직포(CNWT)의 삽입에 의해 개선되는 층간파괴특성을 활용하기 위하여, CNWT의 무게에 대한 층간파괴인성값(GIC 및 GIIC)의 변화를 비교함으로써 CFRP적층판에 삽입되는 적절한 CNWT의 무게를 제안하고자 실험적으로 검토하였다.

Mode I 및 Mode II 층간파괴인성값(GIC 및 GIIC)은 DCB실험과 ENF실험에 의하여 얻어졌으며, 6종류( $8\text{g/m}^2$ ,  $10\text{g/m}^2$ ,  $12\text{g/m}^2$ ,  $16\text{g/m}^2$ ,  $20\text{g/m}^2$  및  $24\text{g/m}^2$ )의 CNWT가 각각 삽입된 6종류의 시험편들이 준비되었다.

6종류의 CNWT가 삽입된 시험편들에 대하여, 평균적인 GIC는 거의 비슷하였고 CFRP시험편과 비교하여 약간 감소하였다. 무게가 다른 CNWT가 삽입된 시험편들의 Mode II 층간파괴인성값(GIIC) 역시 서로 비슷하였으나, CFRP 시험편의 Mode II 층간파괴인성값에 비해서는 약 2배 이상 크게 증가하였다. 탄소부직포의 무게에 따른 층간파괴인성값(GIC 및 GIIC)들 사이에는 각별한 상관관계가 보이지 않았으며, CNWT의 삽입에 의해 개선되는 층간파괴특성을 활용하기 위해서는 6종류의 CNWT 중에 경제적이고 무게가 가벼운  $8\text{g/m}^2$ 의 CNWT를 선택하는 것이 바람직하다고 제안한다.

**Key Words** : CFRP 적층판(CFRP laminates), 층간파괴인성(interlaminar fracture toughness), 탄소부직포(carbon non-woven tissue), 정규확률지(normal probability paper)

\* 서울산업대학교 기계공학과 교수, 교신저자(E-mail:skjung@snut.ac.kr)

## 1. 서론

최근 들어 화석에너지의 사용이 급증함에 따라서 구조물을 설계 및 제작 시에 경량화 및 고 내구화가 매우 중요시되고 있다. 특히 우리나라와 같이 석유자원이 부재한 나라에서는 전적으로 수입에 의존하고 있기 때문에 더욱 화석에너지의 소비를 줄일수록 국가경쟁력은 높아질 것이다. 따라서 기존의 무거운 금속 구조물을 대체하기 위한 꾸준한 연구가 세계적으로 진행되고 있으며, 이에 대한 대체 재료로서 각광을 받고 있는 고분자 복합재료는 매우 인기가 높은 재료로 자리매김을 하고 있다. 특히, 섬유강화 복합재료는 비강성과 비강도가 우수하다는 특성 때문에 많은 분야에서 사용되고 있다. 섬유강화 복합재료는 항공기, 우주선, 미사일, 자동차 등과 같은 운반체에 다량 사용되고 있으며, 최근 들어 스포츠용품에 그 사용이 급증하고 있다. 선진국에서는 이미 섬유강화 복합재료가 대규모로 사용되고 있으며, 더욱이 사용되고 있는 복합재료의 기계적 특성을 개선하기 위하여 복합재료의 제작공정 및 설계기법이 연구되고 있다. 따라서 복합재료를 단순히 사용하기 보다는 구조물의 신뢰성 확보는 물론 경량화로 인한 에너지 절약을 위해 효과적인 복합재료의 제작공정 및 설계기법이 요구되고 있다[1-7].

위와 같은 목적을 달성하기 위하여 저자는 부직포(non-woven tissue)를 활용한 다양한 연구를 수행하여 왔다[8-15]. 섬유강화 적층복합재료구조물은 비강성 및 비강도 등의 우수한 특성이 있는 반면에 외부의 충격에 의한 층간파괴(interlaminar fracture)가 일어나는 단점도 있다. 이러한 단점을 개선하는 방법으로 저자는 부직포를 활용한 하이브리드 복합재료를 제안하였고, 이에 대한 연구성과를 발표한 바가 있다[9-15]. 부직포를 활용한 하이브리드 복합재료의 여러 가지 기계적 특성에 대한 연구성과[9-15]로부터 부직포 하이브리드 복합재료는 종래의 복합재료의 기계적 특성을 개선하고 그 응용분야에 적용할 수 있는 재료로서의 가능성을 제시하였다.

본 연구는 탄소부직포에 의해 개선되는 층간파괴특성의 활용을 위하여, 탄소부직포의 무게의 변화에 따른 층간파괴인성값을 비교하여 CFRP적층판에 삽입되는 적절한 탄소부직포의 무게를 제안하고자 한다.

## 2. 층간파괴인성 실험

### 2.1 재료 및 시험편

무게가 상이한 탄소부직포(CNWT: carbon non-woven tissue)가 삽입된 CFRP적층판의 Mode I 및 Mode II 층간파괴인성의 평가를 위하여, CFRP 프리프레그(탄소섬유에폭시수지강화 일방향 프리프레그 : SK-Chemicals, USN125 series)를 사용한 CFRP

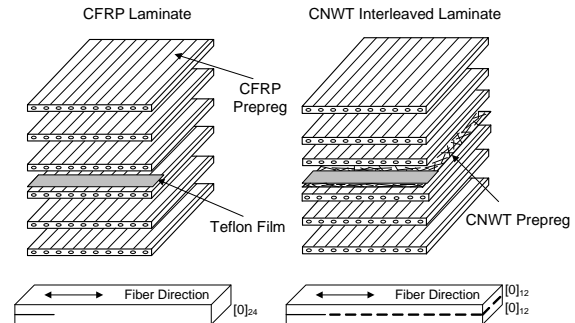


Fig. 1 Lay-ups of CFRP and CNWT interleaved laminates.

적층판과 6종류의 CNWT 프리프레그가 삽입된 각각의 CNWT삽입적층판(CFRP 프리프레그의 층간에 CNWT 프리프레그를 삽입시킨 적층판)을 Fig. 1과 같이 제작하였다. CFRP적층판은 CFRP 프리프레그를  $[0]_{24}$  적층하였으며, CNWT삽입적층판은  $0_{12}$ 층과  $0_{12}$ 층의 CFRP 프리프레그 사이에 CNWT 프리프레그를 삽입하여  $[0]_{12}/\text{CNWT}/[0]_{12}$ 로 적층하였다. Fig. 2는 CNWT와 에폭시수지를 조합시킨 CNWT 프리프레그[9]를 나타낸다. CNWT 프리프레그에 사용되는 수지는 CFRP 프리프레그에 사용된 수지와 같은 것이 사용되었다.  $8\text{g/m}^2$ 의 CNWT 프리프레그란  $8\text{g/m}^2$ 의 CNWT와 에폭시 수지를 조합한 것을 의미한다. CNWT는 단섬유가 평면상에 불규칙적으로 분산되어 배치된 시트형상으로, 단위면적당 무게(FAW: Fiber Aerial Weight)가 각각 상이한 6종류( $8\text{g/m}^2$ ,  $10\text{g/m}^2$ ,  $12\text{g/m}^2$ ,  $16\text{g/m}^2$ ,  $20\text{g/m}^2$  및  $24\text{g/m}^2$ )의 CNWT가 사용되었다. 여기서,  $16\text{g/m}^2$ 은  $8\text{g/m}^2$ 의 CNWT를 2층,  $20\text{g/m}^2$ 은  $10\text{g/m}^2$ 의 CNWT를 2층,  $24\text{g/m}^2$ 은  $8\text{g/m}^2$ 의 CNWT를 3층씩 각각 겹친 것이다.

6종류의 CNWT 프리프레그가 삽입된 각각의 CNWT삽입적층판으로 Mode I 및 Mode II 층간파괴인성값을 평가하기 위하여 시험편은 ASTM(D5528-94)[16]에 따라서 제작되었으며, Mode I 시험편은 종류별로 각각 9~26개, Mode II 시험편은 종류별로 각각 6~16개를 사용하였다.

$8\text{g/m}^2$ ,  $10\text{g/m}^2$ ,  $12\text{g/m}^2$ ,  $16\text{g/m}^2$ ,  $20\text{g/m}^2$  및  $24\text{g/m}^2$ 의 CNWT 프리프레그가 각각 삽입된 시험편을 A-시험편, B-시험편, C-시험편, D-시험편, E-시험편 및 F-시험편으로 이름 붙인다. CFRP시험편 및  $12\text{g/m}^2$ 의 CNWT 프리프레그가 삽입된 C-시험편에 대한 Mode I 및 Mode II 층간파괴인성값( $G_{Ic}$  및  $G_{IIc}$ )은 Lee[9,10]의 데이터를 인용하였다.

Fig. 3에 6종류의 CNWT삽입 시험편에 대한 CNWT층의 측단면을 나타낸다. A-시험편의 CNWT층의 두께는 약  $80\mu\text{m}$ , B-시험편은 약  $90\mu\text{m}$ , C-시험편은 약  $100\mu\text{m}$ , D-시험편은 약  $130\mu\text{m}$ , E-시험편은 약  $160\mu\text{m}$ , 및 F-시험편의 CNWT층의 두께는 약  $200\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

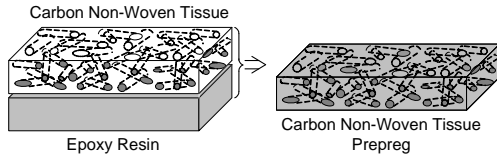


Fig. 2 Schematic of carbon non-woven tissue prepreg.

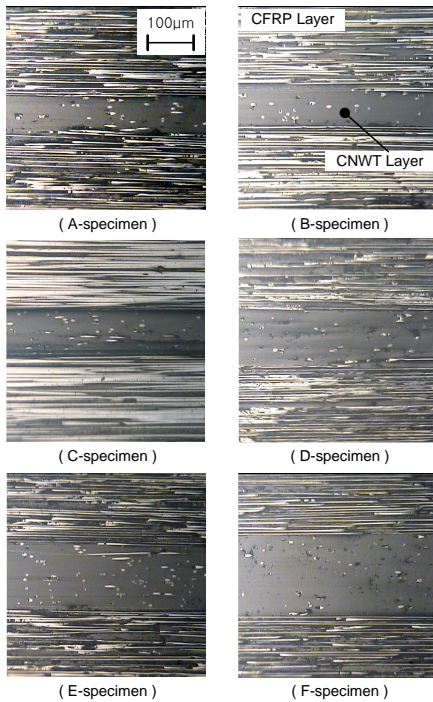


Fig. 3 Side-sections of CNWT interleaved specimens.

## 2.2 Mode I 층간파괴인성값의 산출

Mode I 층간파괴인성값( $G_{IC}$ )을 산출하기 위하여 DCB(double-cantilever beam) 시험법이 사용되었다. 시험은 2mm/min 속도의 일정 변위제어로 인장하였으며, 하중과 변위를 반복하여 기록하였다. 인위결함(두께 12  $\mu m$ 의 테프론 필름)을 삽입함으로써 발생하는 레진(resin)의 밀집지역의 영향을 피하기 위하여 Mode I 시험편과 Mode II 시험편에 대하여 Mode I의 하중을 가하여 초기크랙을 만들었다[10]. Mode I 시험 후, 측정된 크랙의 길이, 하중 및 변위를 식(1)에 대입하여  $G_{IC}$ 값을 산출하였다.

$$G_{IC} = \frac{3P_c \delta_c}{2Ba} \quad (1)$$

여기서,  $P_c$ 는 임계하중,  $\delta_c$ 는 임계변위,  $B$ 는 시험편의 폭,  $a$ 는 크랙길이 이다.

## 2.3 Mode II 층간파괴인성값의 산출

Mode II 층간파괴인성값( $G_{IIC}$ )을 산출하기 위해 ENF(end-notched flexure) 시험법이 사용되었다. 시험속도는 2mm/min이며, 일정 변위제어로 압축하였다. Mode II 시험 후, 측정된 크랙의 길이, 하중 및 변위를 식(2)에 대입하여  $G_{IIC}$ 값을 산출하였다.

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P_c \delta_c}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 크랙길이,  $P_c$ 는 임계하중,  $\delta_c$ 는 임계변위,  $B$ 는 시험편의 폭,  $L$ 은 스패ん길이 이다.

## 2.4 Mode I 및 Mode II 층간파괴인성값의 정리

DCB 및 ENF 시험에 의하여 얻어진 CFRP시험편 및 6종류의 CNWT가 삽입된 시험편들의 Mode I 및 Mode II 층간파괴인성값( $G_{IC}$  및  $G_{IIC}$ )에 대한 분산의 정도를 비교하기 위하여 정규확률분포(식(3) 및 (4))를 이용하였다[9,10].

$$f(G_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s^2}} \exp \left\{ -\frac{(G_c - x)^2}{2s^2} \right\} \quad (3)$$

$$F(G_c) = \int_0^{G_c} f(g_c) dg_c \quad (4)$$

여기서,  $x$ 는 평균  $G_c$ 값,  $s^2$ 는  $G_c$ 데이터에 대한 변동,  $f$ 는 확률밀도함수 및  $F$ 는 누적분포함수 이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 Mode I 층간파괴인성거동

Table 1에는 DCB실험에 의해 얻어진 평균 Mode I 층간파괴인성값( $G_{IC}$ )을 나타낸다. Table 1을 살펴보면, 평균  $G_{IC}$ 값은 CFRP 시험편과 비교하여, A-시험편은 약2.6%, B-시험편은 약 8.4%, C-시험편은 약5.3%, D-시험편은 0%, E-시험편은 약6.6% 및 F-시험편은 약10%감소하였다. 이러한 감소의 원인은 CNWT의 단섬유들이 응력집중원으로 작용되었기 때문이지만, D-시험편과 같이 감소하지 않는 원인으로 단섬유의 섬유파단(fiber breakage)이라는 증가작용(단섬유의 파단에 의한 Mode I 균열전진의 억제효과)도 공존하기 때문에 크게 감소하지는 않았다[10].

Table 1 Mean  $G_{IC}$  values for the DCB test

Specimen	Mean $G_{IC}$ ( $J/m^2$ )	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
CFRP specimen	227	10	4.4
A-specimen	221	12	5.4
B-specimen	208	13	6.3
C-specimen	215	23	10.7
D-specimen	227	22	9.7
E-specimen	212	15	7.1
F-specimen	204	11	5.4

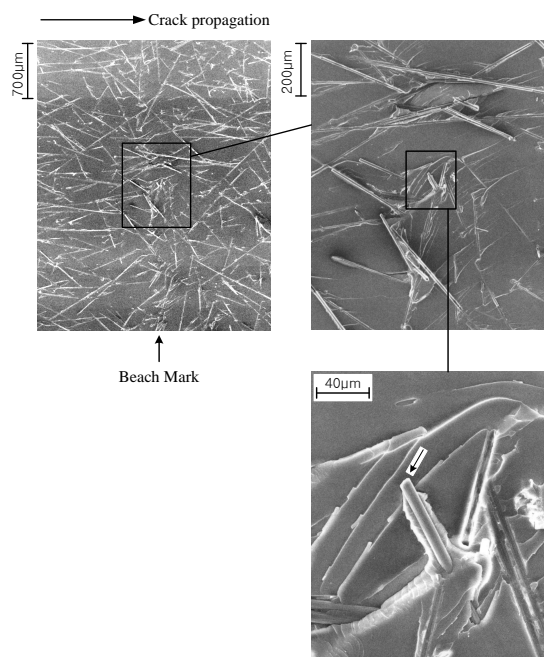
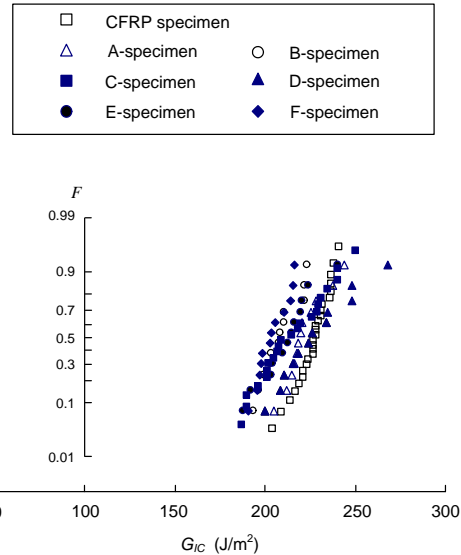
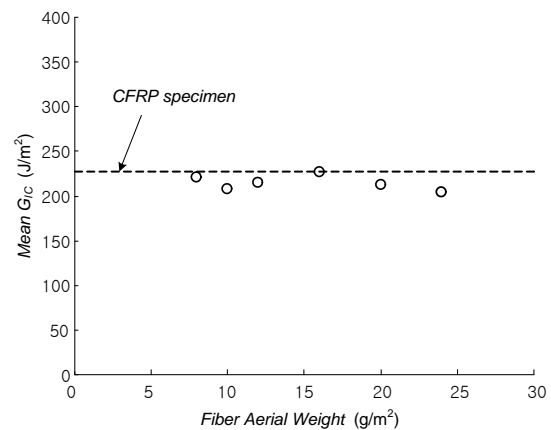
Fig. 4 A SEM photo of fracture surface of the CNWT( $12g/m^2$ ) interleaved specimen under the DCB test.

Fig. 4는  $12g/m^2$ 의 탄소부직포가 삽입된 DCB시험편의 파단면을 주사형 전자현미경(SEM: scanning electron microscope)으로 관찰한 파단면 사진이다. 비치마크(beach-mark)부분에서 탄소부직포의 단섬유들의 섬유파단(화살표)이 관찰되었다.

Fig. 5는 CFRP 시험편, A-시험편, B-시험편, C-시험편, D-시험편, E-시험편 및 F-시험편의  $G_{IC}$ 값에 대한 분산의 정도를 나타내기 위한 정규확률지이다. Fig. 5를 보면, CFRP 시험편과 6종류의 시험편들의  $G_{IC}$ 값의 분산의 정도는 서로 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 CFRP 시험편, A-시험편, B-시험편, C-시험편, D-시험편, E-시험편 및 F-시험편의 평균  $G_{IC}$ 값을 비교한 것이다. 무게가 상이한 CNWT가 삽입된 6종류의 시험편들의 평균  $G_{IC}$ 값은 큰 차이를 보이지 않아, 탄소부직포의 무게와 평균  $G_{IC}$ 값은 특별한 상관관계가 있는 것으로는 보이지 않았다.

Fig. 5  $G_{IC}$  on normal probability paper.Fig. 6 Comparison of mean  $G_{IC}$  of CNWT having different weights interleaved specimens.

### 3.2 Mode II 층간파괴인성거동

Table 2에는 ENF실험에 의해 얻어진 평균 Mode II 층간파괴인성값( $G_{IIC}$ )을 나타낸다. Table 2를 살펴보면, 평균  $G_{IIC}$ 값은 CFRP 시험편과 비교하여, A-시험편은 약211%, B-시험편은 약 209%, C-시험편은 약 259%, D-시험편은 약226%, E-시험편은 약245% 및 F-시험편은 약240% 각각 증가하였다. 이러한 증가의 원인은 CNWT의 단섬유들에 의한 섬유가교(fiber bridging)의 현상(단섬유의 가교에 의한 Mode II 균열성장의 억제효과) 때문이다[9].

Fig. 7에  $12g/m^2$ 의 탄소부직포가 삽입된 ENF시험편의 파괴 메카니즘 모델을 나타낸다. 균열의 끝단에서, 에폭시수지의 균열은

Table 2 Mean  $G_{IIC}$  values for the ENF test

Specimen	Mean $G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
CFRP specimen	839	156	18.6
A-specimen	2613	357	13.6
B-specimen	2596	294	11.3
C-specimen	3011	625	20.7
D-specimen	2736	208	7.6
E-specimen	2900	416	14.3
F-specimen	2860	158	5.5

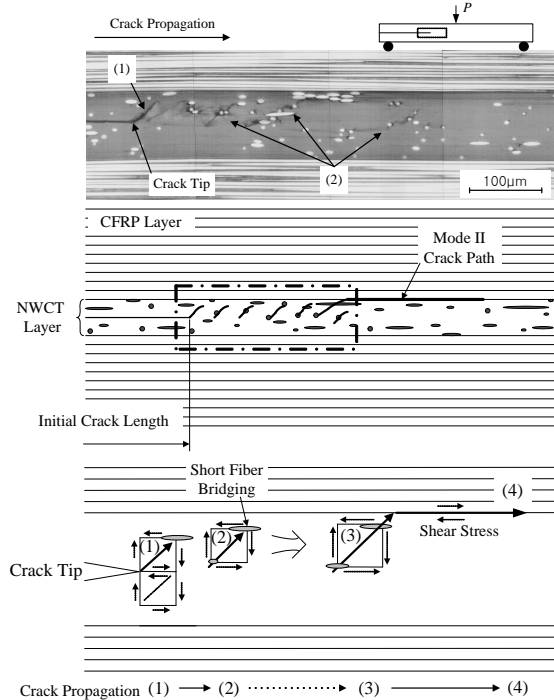


Fig. 7 Fracture mechanism for the CNWT(12g/m<sup>2</sup>) interleaved specimen under the ENF test.

인장력에 의해 (1)과 같이 성장하다가 탄소부직포의 단섬유의 섬유가교에 의해 멈춘다. 이 후 그 균열의 끝단에서 가까운 단섬유의 응력집중에 의해 (2)와 같이 균열이 발생하다가 단섬유에 의하여 균열이 멈춘다. 이러한 과정이 반복되면 하중은 증가하여 (3)과 같이 단섬유를 파단시키며, 결국에는 (4)와 같이 균열은 탄소부직포층과 CFRP층의 계면을 따라서 진전한다. 이상과 같은 손상거동에 의한 에너지의 분산과 응력의 차폐효과로부터 Mode II 층간파괴인성값( $G_{IIC}$ )은 증가한다.

Fig. 8은 CFRP 시험편, A-시험편, B-시험편, C-시험편, D-시험편, E-시험편 및 F-시험편의  $G_{IIC}$ 값에 대한 분산의 정도를 나타내기 위한 정규확률지이다. Fig. 8을 보면, CFRP 시험편과 6종류의 시험편들의  $G_{IIC}$ 값의 분산의 정도는 서로 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

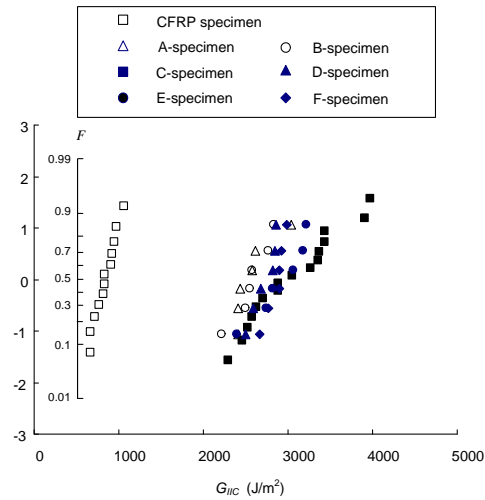


Fig. 8  $G_{IIC}$  on normal probability paper.

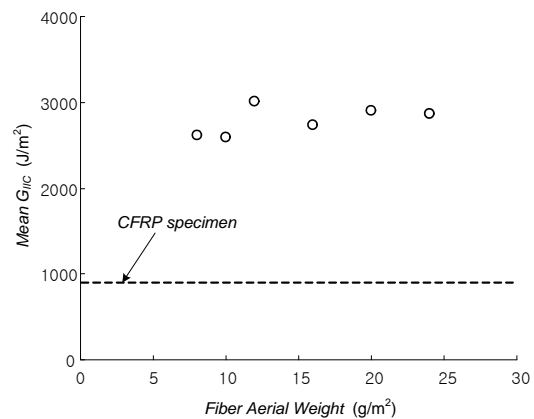


Fig. 9 Comparison of mean  $G_{IIC}$  of CNWT having different weights interleaved specimens.

Fig. 9는 CFRP 시험편, A-시험편, B-시험편, C-시험편, D-시험편, E-시험편 및 F-시험편의 평균  $G_{IIC}$ 값을 비교한 것이다. 무게가 상이한 CNWT가 삽입된 6종류의 시험편들의 평균  $G_{IIC}$ 값은 서로 비슷하였으며, 탄소부직포의 무게와 평균적인  $G_{IIC}$ 값은 각별한 상관관계가 있는 것으로는 보이지 않았다.

따라서, 탄소부직포의 삽입에 의해 Mode II 층간파괴인성은 2배 이상 크게 개선되었으며, 또한 이렇게 개선된 층간파괴특성을 활용하기 위해서는 A-시험편에 사용된 무게가 가벼운 8g/m<sup>2</sup>의 CNWT를 선택하는 것이 바람직하다고 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구는 탄소부직포(CNWT)에 의해 개선되는 층간파괴특

성을 활용하기 위하여 탄소부직포의 무게에 대한 층간파괴인성값의 변화를 비교함으로써 CFRP적층판에 삽입되는 적절한 탄소부직포의 무게를 제안하고자 실험적으로 검토하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1)  $8\text{g/m}^2$ ,  $10\text{g/m}^2$ ,  $12\text{g/m}^2$ ,  $16\text{g/m}^2$ ,  $20\text{g/m}^2$  및  $24\text{g/m}^2$ 의 탄소부직포가 각각 삽입된 시험편들의 평균 Mode I 층간파괴인성값( $G_{IC}$ )은 서로 비슷하였으며, CFRP시험편의 평균 Mode I 층간파괴인성값( $G_{IC}$ )에 비하여 약간 감소하였다.

(2) 6종류의 탄소부직포가 각각 삽입된 시험편들의 평균 Mode II 층간파괴인성값( $G_{IIC}$ )은 서로 비슷하게 평가되었으나, CFRP 시험편의 평균 Mode II 층간파괴인성값( $G_{IIC}$ )에 비하여 약 2배 이상 크게 증가하였다.

(3) 탄소부직포의 무게와 층간파괴인성값( $G_{IC}$  및  $G_{IIC}$ )들 사이에서 각별한 상관관계를 발견할 수 없었으며, 탄소부직포에 의해 개선되는 층간파괴특성을 활용하기 위해서는 무게가 가볍고, 경제적인 면에서도 유리한  $8\text{g/m}^2$ 의 CNWT를 선택하는 것이 바람직하다.

## 후 기

본 연구는 2007년도 서울산업대학교 해외파견 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) F. Erich, "Carbon Fibers and Their Composites," *United Nations Financing System for Science and Technology for Development*, Springer-Verlag, Berlin.
- 2) M. M. Stevanovic and T. B. Stecenko, "Mechanical Behaviour of Carbon and Glass Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites," *Journal of Material Science*, Vol. 27, 1992, pp. 941-946.
- 3) J. K. Kim, C. Baillie, J. Poh and Y. W. Mai, "Fracture Toughness of CFRP with Modified Epoxy Resin Materials," *Composites Science Technology*, Vol. 43, 1992, pp. 283-297.
- 4) N. Odagiri, H. Kishi and M. Yamashita, "Development of Torayca Prepreg P2302 Carbon Fiber Reinforced Plastic for Aircraft Primary Structural Materials," *Advanced Composite Materials (in Japan)*, Vol. 5, 1996, pp. 249-252.
- 5) F. Ozdil and L. A. Carlsson, "Mode I Interlaminar Fracture of Interleaved Graphite/Epoxy," *Journal of Material Science*, Vol. 26, 1992, pp. 432-459.
- 6) O. Ishai, H. Rosenthal, N. Sela and E. Drukker, "Effect of Selective Adhesive Interleaving on Interlaminar Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composite Laminates," *Composites (A)*, Vol. 19, 1988, pp. 49-54.
- 7) S. Yamashita, H. Hatta, T. Takei and T. Sugano, "Interlaminar Reinforcement of Laminated Composites by Addition of Orientated Whiskers in the Matrix," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 1254-1268.
- 8) S. K. Cheong, S. H. Lee and S. G. Lim, "A Study on the Material Properties of Carbon Fiber Reinforced Composite Laminates with Non-Woven Carbon Mat," *The First Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1)*, Japan, 1998, pp. 420.1-420.4.
- 9) S. H. Lee, H. Noguchi, Y. B. Kim and S. K. Cheong, "Effect of Interleaved Non-Woven Carbon Tissue on Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites: Part I-Mode II," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 2153-2168.
- 10) S. H. Lee, H. Noguchi, Y. B. Kim and S. K. Cheong, "Effect of Interleaved Non-Woven Carbon Tissue on Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites: Part II-Mode I," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 2169-2181.
- 11) S. H. Lee, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Static Behavior Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, 2003, pp. 233-252.
- 12) S. H. Lee, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Fatigue Behavior Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, 2003, pp. 253-268.
- 13) S. H. Lee, Y. Aono, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Damage Mechanism of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue Subjected to Quasi-Static Indentation Loads," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, 2003, pp. 333-349.
- 14) S. H. Lee, Y. Aono, H. Noguchi and S. K. Cheong, "Residual Compressive Failure Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Carbon Tissue after Indentation Damage," *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, 2004, pp. 1461-1477.
- 15) S. H. Lee, J. H. Lee, S. K. Cheong and H. Noguchi, "A Toughening and Strengthening Technique of Hybrid Composites with Non-Woven Tissue," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, 2008, pp. 21-29.
- 16) ASTM D5528-94, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, 1994.