

# DCB 시험편의 평직 CFRP 복합재 층간파괴인성 및 AE 특성 평가

윤유성<sup>†</sup> · 권오현

부경대학교 안전공학과

(2004. 11. 22. 접수 / 2005. 2. 5. 채택)

## The Evaluation of Interlaminar Fracture Toughness and AE Characteristics in a Plain Woven CFRP Composite with DCB Specimen

Yu-Seong Yun<sup>†</sup> · Oh-Heon Kwon

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received November 22, 2004 / Accepted February 5, 2005)

**Abstract** : Recently, many kinds of advanced composite materials have been used in various industry fields. Among them, fabric CFRP composites are being used as primary structural components in many applications because of their superior properties. However, the complexity of the fabric structure makes understanding of their failure behavior very difficult. The mechanical strength and crack propagation of plain woven carbon fiber fabric laminate composites are examined by acoustic emission(AE) method. AE signals are acquired during the tensile test and fracture tests. Thus, the relationship between AE signal and mechanical behavior curves and crack extension length are shown. Also the interlaminar fracture toughness in terms of AE characteristics are discussed in viewpoint of crack propagation behavior.

**Key Words** : plain woven CFRP, DCB(double cantilever beam), crack propagation, acoustic emission

### 1. 서 론

신제품은 새로운 특성이나 기능을 갖는 소재가 개발됨으로 탄생된다. 새로운 특성을 갖는 재료가 개발되면 새로운 분야의 기술 개발로 지속적인 기술혁신을 이룰 수 있다. 반면 적절한 재료가 없는 경우 실용화를 이루지 못하는 경우도 있다. 이러한 결과 최근 구조물의 대형화와 고속화 등으로 국내 외적으로 에너지의 절약과 성능향상 차원에서 기계 및 구조물의 경량화에 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 경량화의 대표적 방법인 복합재료 사용은 스포츠용품에서 항공기, 자동차 및 고속전철 등 산업에서의 그 실용성이 급속히 증가하고 있다. 하지만 복합재료가 실제 구조물에 적용된 경우 기존의 금속재료에서 볼 수 없는 문제점들을 가지고 있다. 특히 복합재료의 적층분리(Delamination) 현상은 빈번히 나타나는 손상 중의 하나이다<sup>1)</sup>. 따라서,

안전성의 측면에서, 사용 환경과 목적에 부합되는 명확한 특성과 재료의 성질을 기초로 한 재료손상을 파악할 필요성이 있다. 복합재료의 적층분리에 대한 파괴인성 및 손상평가의 연구에는 DCB(Double Cantilever Beam) 시험편이 주로 사용된다<sup>2)</sup>. 또한 결함 등의 파손현상을 초기에 파악할 수 있는 음향방출(Acoustic Emission, AE)법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 아직 명확한 수법이 확립되지 못하고 있는 실정이다.

직물구조 CFRP에 대한 적층분리의 연구로서는 Kinsey 등<sup>3)</sup>이 4×4 Twill 직물구조 CFRP에 압축력을 가해 충격 손상과 성장을 초음파와 방사선투과 검사로 측정하였다. 이러한 초음파와 방사선투과 검사의 경우 일정 이상의 균열이 성장한 후 측정되며 실제 구조물에 적용되어 초기결함 검출과 실시간으로 손상을 평가하기에 다소 어려운 점이 있다. Lee 등<sup>4)</sup>이 AS4/PEEK 고인성 열가소성 복합재료에 대한 층간파괴를 정하중과 피로하중에서 실시간 결함 및 손상검출을 AE 특성을 이용하여 비교·관찰하였다. 하지만 직물구조 섬유강화복합재료에 대한 층간분

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
planet70@naver.com

리와 같은 손상기구 및 균열거동을 섬유조직적 복합성 때문에 명확한 파악은 아직 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 평직 CFRP 복합재료에 대해 DCB 시험편을 이용하여 층간분리 파손기구현상파악 및 균열거동을 파악하기 위해 AE특성과 층간파괴인성을 평가하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 시험편 및 재료

사용된 재료는 Fig. 1에 나타나는 것처럼 평직 탄소섬유강화 프리프레그(plain woven carbon prepreg)로 국내 한국카본(주)에서 생산·시판되는 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)를 이용하였으며 프리프레그의 섬유 및 수지의 함량은 Table 1에 나타낸다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 평직 CFRP 복합재료 적층판의 구조를 나타낸다.

프리프레그는 원단으로 생산되기 때문에 가로·세로 각각 250×250mm로 절단하였다. 절단된 프리프레그는 DCB 시험편에 초기균열( $a_0$ )을 삽입하기 위해 9플라이와 10플라이 사이에 두께 80 $\mu$ m의 테프론 테이프를 삽입하여 최종 18플라이로 적층하였다. 적층된 적층판은 성형판에 실리콘 오일(KS 707)인 이형제를 바른 후 열성형기(hot press, 국내 D사, 500kg/cm<sup>2</sup>)에서 성형온도와 게이지 압력을 각각 130 $^{\circ}$ C, 5kg/cm<sup>2</sup>에서 90분간 성형하였고 잔류응력 완화, 뒤틀림 및 변형을 방지하기 위해 대기중에 2시간이상 보존하여 최종 두께가 4mm 되게 제작되었다. 성형된 복합재료는 시험편 제작용

Table 1. Composition of the fiber and resin in prepreg(CF 3327 EPC)

Fiber (Wt. g/m <sup>2</sup> )	Resin (Wt. g/m <sup>2</sup> )	Resin Content (%)	Total (Wt. g/m <sup>2</sup> )
205	148	42±2	353

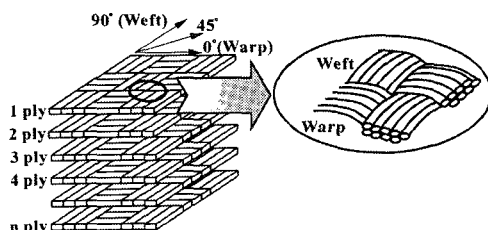


Fig. 1. Construction of plain woven CFRP laminate composite

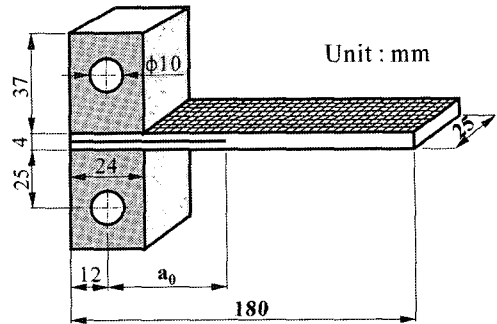


Fig. 2. Specimen configurations (DCB specimen)

다이아몬드 휠커터를 사용하여 절단가공 하였으며, Fig. 2와 같이 시험기 그림의 고정을 위해 접착면은 #100의 에머리-페이퍼로 거친 가공을 하고 자체 제작한 알루미늄 블록을 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로 부착하였다. 또한 알루미늄 블록이 부착된 DCB 시험편은 전기로에서 90 $^{\circ}$ C로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시켜 시험편의 슬립을 방지하였다.

### 2.2. 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 만능동적시험기(H사, 50kN)를 사용하였으며 ASTM D 3039S에서 추천하고 있는 방법인 변위제어 0.2mm/min로 행하여 졌다. 파괴시험 동안 균열성장길이 측정은 눈으로 직접 측정된 것으로 4단구조의 접안렌즈로 최저 5.5배율에서 최고 50배의 배율로 조절이 가능한 이동식 현미경(Japan, N사)을 이용하여 일정 균열성장 지점에서 최고 50배의 배율로 측정하였다. 이때 시험편의 균열길이 측정면은 보다 정확한 관찰을 위해 #1000의 에머리-페이퍼로 연마하였다. 또한 이동식 현미경에서 측정된 균열길이는 디지털변환기인 IT-005D(Japan, M사)를 거쳐 바로 PC로 저장하였다.

AE 측정에는 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC 시스템을 사용하였다. 센서는 R15 센서로 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였다. DCB 시험편의 경우 AE 측정시 잡음을 고려하여 알루미늄 블록과 시험기 고정핀 사이에 그리스를 발라 시험기 운전시 고정부와 회전부에서 발생할 수 있는 잡음을 최소화하였다. 또한 실험 중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

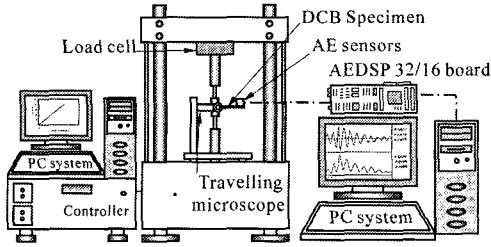


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus

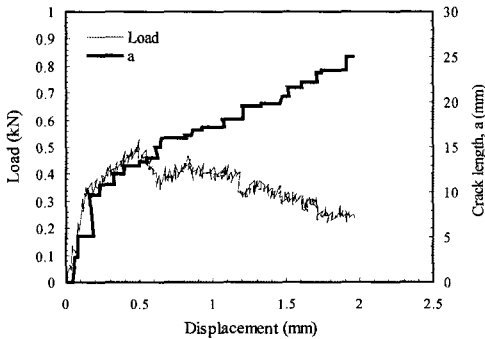


Fig. 4. Load-displacement and crack length variation of a fracture test with DCB specimen

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 파괴시험에 대한 하중 및 AE 특성

평직 CFRP 복합재료의 인장파괴시험에 의하여 구하여진 하중-하중선 변위의 관계 및 균열길이(a)와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. DCB 시험편의 제작과정에서 삽입한 테프론의 초기균열길이(a<sub>0</sub>)인 9.76mm 까지 하중값이 0.35kN으로 비교적 급격히 상승하고 있다. 이후 하중의 증가가 다소 완화된 후 최대인장하중인 0.53kN의 균열길이가 16.07mm까지 선형적으로 증가하였으며, 최대인장하중 이후 하중이 증가·감소를 하는 형태로 비선형적으로 지하하였다. 균열성장 은 하중이 감소되는 지점에서 관찰되었다.

Fig. 5는 균열발생 및 진전 형상을 관찰한 결과를 모델화 한 것이다. Fig. 5(a)는 초기 균열의 형상을 나타낸 것으로 균열노치단을 기준으로 Fig. 1에서 제시한 직물의 warp 섬유면을 따라 균열이 발생 성장하는 것을 알 수 있었다. (a) 이후는 Fig. 5(b)의 경우와 같이 계속되는 하중증가로 섬유방향이 0°인 warp 방향과 90°의 weft 섬유방향이 교차하는 부분에서는 일부분이 weft 섬유다발 속으로 균열이 성장하여 섬유소가 파단되고 이후 다시 warp 방향을 따라 균열이 성장함을 관찰하였다.

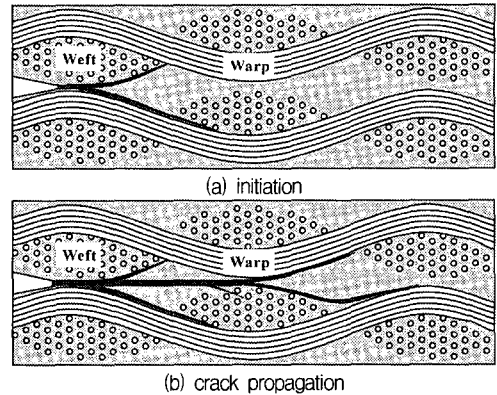


Fig. 5. Typical pattern model of crack extension acquired from a fracture test

Fig. 6은 평직 CFRP 복합재료에 대하여 인장파괴시험시 6sec 동안 발생하여 얻어진 누적 AE count와 균열성장길이(Δa)와의 관계를 나타낸 것이다. AE 특성 중 AE count는 재료 및 구조물의 손상의 빈도를 나타내는 척도로 이용될 수 있으며, 초기하중상태에서는 AE count의 발생이 없는 것으로부터 잡음은 최소화된 것이라 판단된다. 균열발생은 누적 AE count가 최대 누적 AE count의 약 1%인 6667에 도달되었을 때 시작되었으며 최대 누적 AE count에 비해 비교적 적은 발생량으로 나타나 초기균열발생에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 5(a)에서 균열이 초기에 섬유 warp 방향으로 발생되고 있는 것에 기인한다고 여겨진다. 초기균열발생 이후 균열이 성장함에 따라 누적 AE count 역시 상승하고 있으며, Fig. 4에서 하중변위가 1.2mm에서 하중이 감소함에 따라 성장균열길이가 9.77 mm에서 상대적으로 급속히 성장하여 누적 AE count 역시  $39.3 \times 10^4$ 으로 급상승하는 것을 알 수 있다. 최대 균열성장길이가 15.3mm까지 얻어진 최대 누적 AE count는  $68.6 \times 10^4$ 으로 얻어졌다.

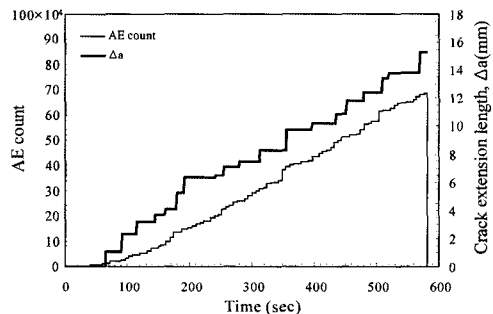


Fig. 6. AE count and crack extension length variation according to the time

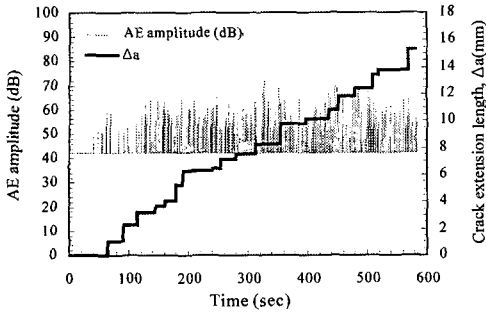


Fig. 7. The relationships between AE amplitude and crack extension length of fracture test

Fig. 7은 평직 CFRP 복합재료에 대하여 파괴시험 동안 실시간 획득된 AE진폭 특성 및 균열성장길이를 시간에 대하여 나타낸 것이다. AE count량이 손상의 빈도를 나타낸다면 AE 진폭은 그 손상에 대한 크기를 나타낸다. 즉 AE 진폭의 크기는 균열성장에 따른 손상의 크기를 나타내는 것이다.

초기균열발생은 약 40sec에서 45.4dB의 진폭을 발생시킴을 알 수 있으며 균열성장길이가 1.05mm로 될 때 57.5dB의 진폭이 발생되었다. 균열이 성장하는 지점에서는 Fig. 5(b)에서와 같이 균열진행인 warp 섬유방향의 섬유다발 속으로 균열의 일부가 성장하여 섬유파단을 일으키고 AE 고진폭이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 126sec 이후부터는 임의 균열성장에 의한 고진폭이 1회 발생한 후 미처 파단되지 못한 섬유와 기지의 파단 등으로 평균 50dB의 진폭이 빈번하게 발생하는 것으로 판단된다. 또한 AE진폭에서 얻어진 최대 진폭은 72.5dB이다. 이와 같이 AE count와 진폭 등의 AE 특성으로 초기균열감지와 손상 정도를 실시간으로 알 수 있는 유용한 정보를 제공한다.

### 3.2. DCB 시험편에 의한 파괴시험

DCB 시험편에 대한 파괴인성치는 일반적으로 다음 식 (1)에 의해 구해질 수 있다.

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

여기서  $P_c$ 는 하중,  $B$ 는 두께,  $W$ 는 폭 그리고  $a$ 는 균열길이이다. DCB 시험편을 이용한 응력확대계수  $K$ 는 Srawley와 Gross 등<sup>6)</sup>과 같이 많은 연구가들에 의해 연구가 이루어지고 있지만 본 연구에서는 최

근 연구의 Zhou<sup>7)</sup>에 의한 실험식인 다음 식 (2)를 적용하였다.

$$K_I = \frac{2\sqrt{3}P \cdot a}{W(B/2)^{3/2}} \cdot \left[1 + 0.639\left(\frac{B/2}{a}\right)\right] \quad (2)$$

Fig. 8은 하중의 증가로 인한 균열길이가 성장하는 지점에서 이동식 현미경을 통해 측정된 균열성장길이에 대한  $K_I$ 의 변화를 나타낸다.  $K_{Ic}$ 는 층간과괴인성치를 나타내며 약  $6.7\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 얻어졌다. Fig. 4의 하중-하중선 변위와 균열길이의 관계에서와 같이  $K_I$ 은 하중의 증가와  $\Delta a$ 가 3.17mm까지는 완만히 증가하다가 하중감소와 동시에 균열성장길이 5.23mm까지는  $K$ 의 감소가 발생하였다. 이것은 섬유 warp 면을 따라서 급속성장하는 균열과 일부 warp 섬유 다발 속으로 성장하는 균열로 인한 박리 등으로 일시적으로 하중곡선에서 하중이 감소하는 변곡현상에 의해  $K$ 가 감소하는 특이현상이 발생한 것으로 사료되며, 이후 균열성장길이 8.26mm에서 최대파괴저항값 약  $13.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 을 나타내었다.

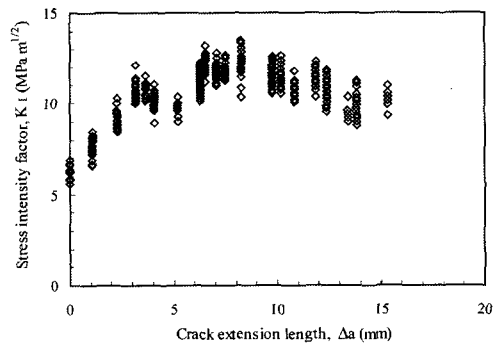


Fig. 8. Crack extension resistance curve

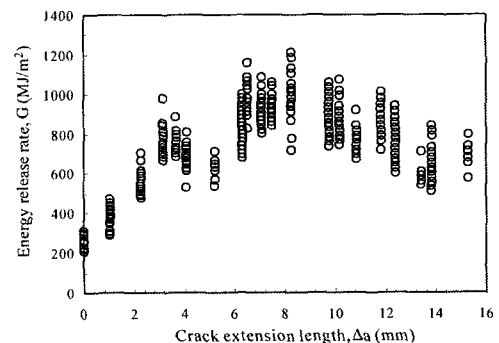


Fig. 9. The energy release rate variation

Fig. 9는 에너지해방률과 균열성장길이와의 관계를 나타낸다. 사용된 에너지해방률  $G$ 는 응력확대계수와 에너지해방률의 관계인 다음 간편 식 (3)을 이용하였다.

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (3)$$

식 (3)에서  $G$ 는 에너지해방률,  $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ 로서  $E$ ,  $\nu$ 는 각각 탄성계수와 포아송비이다. 평직 CFRP의 경우 전보<sup>8)</sup>에서 구한  $E = 149.3\text{GPa}$  및  $\nu = 0.09$ 를 적용하였다. 에너지해방률  $G$ 는  $K_I$ 와 유사하게 변화하였으며 이때 얻어진  $G_{IC}$ 는  $313.4\text{MJ/m}^2$ 이다.

Fig. 10은 균열성장길이와 누적 AE count와의 관계를 나타낸다. 누적 AE count는 순간 최대값을 나타내며 균열성장길이  $\Delta a$ 에 대하여 식 (4)와 같이 얻어진다.

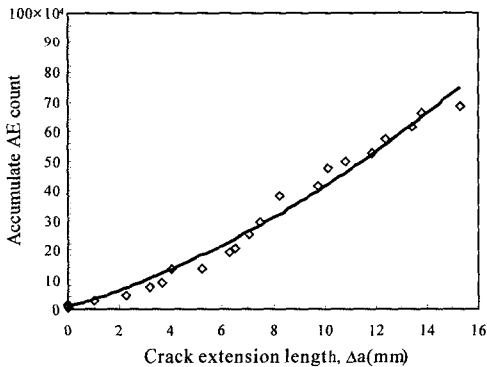


Fig. 10. The relationships between crack extension length and accumulate AE count

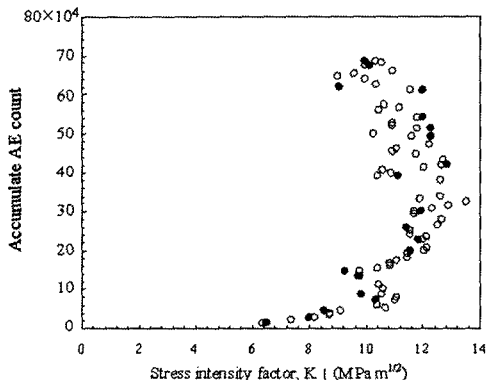


Fig. 11. The variation of accumulate AE count and  $K_I$

$$C = 1509(\Delta a)^2 + 25539(\Delta a) + 6667 \quad (4)$$

여기서  $C$ 는 누적 AE count,  $\Delta a$ 는 균열성장길이이다. 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 누적 AE count  $C$ 에 대한  $K$ 의 표현을 구하면 식 (5)와 같다.

$$K = \frac{2\sqrt{3}P(f+a_0)}{W(B/2)^{3/2}} \cdot \left[ 1 + 0.639 \left( \frac{(B/2)}{(f+a_0)} \right) \right] \quad (5)$$

여기서  $a_0$ 는 초기균열길이이며,  $f$ 는 다음 식 (6)과 같다.

$$f = \frac{(C+101391.4)^{0.5}}{38.845} - 8.46 \quad (6)$$

Fig. 11은 누적 AE count와 응력확대계수의 변화를 나타낸다. 층간파괴인성치  $6.7\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에서는 누적 AE count가  $13.3 \times 10^3$ 으로 발생되었으며,  $K$ 값이  $10 \sim 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 인 지점에서 누적 AE count가  $32.6 \times 10^4$ 까지 증가하였다. 이후 AE count의 증가에 따라  $K$ 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 Fig. 11에서 symbol  $\bullet$ 는 식 (5)에서 구한  $K$ 의 변화를 같이 표시하였다. 실험에서 얻어진 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 식 (5)를 사용하면 성장균열길이 측정없이 누적 AE count만 측정함으로써 층간파괴인성치를 구할 수 있음을 나타낸다.

#### 4. 결론

DCB 시험편을 이용한 평직 CFRP 복합재에 대하여 인장파괴시험 및 AE 특성치를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초기균열성장 이후 하중증가로 섬유방향이  $0^\circ$ 인 warp 방향과  $90^\circ$ 의 weft 섬유방향이 교차하는 부분에서는 일부분이 weft 섬유다발 속으로 균열이 성장하여 섬유소가 파단되고 이후 다시 warp 방향을 따라 층간파괴가 일어남을 알 수 있었다.

2) 초기균열발생은 최대 누적 AE count의 약 1%인 6667에 도달되었을 때 시작되어 최대 균열성장 길이가 15.3mm까지 얻어진 최대 누적 AE count는  $68.6 \times 10^4$ 으로 얻어졌다.

3) 시간주파수 분석에서 초기균열발생은 약 40sec에서 45.4dB의 진폭을 발생시켰고 warp 섬유다발

속으로 성장한 균열의 일부가 섬유파단으로 AE 고진폭이 발생되며 여기서 얻어진 최대 진폭은 72.5 dB이다.

4) 층간파괴인성치는 Zhou에 의한 실험식을 적용하여 약  $6.7\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 얻어졌으며, 간편식에 의해 변환한  $G_{IC}$ 는  $313.4\text{MJ/m}^2$ 로 얻어졌다.

5) 균열성장길이의 측정 없이 누적 AE count의 측정만으로 평가할 수 있는 간편 파괴저항식을 나타내었다.

### 참고문헌

- 1) C. T. Sun and M. G. Manoharan, "Growth of Delamination Cracks due to in [90/0/90] Laminate", *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 127~136, 1983.
- 2) P. E. Keary and L. B. Ilcewicz, "Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composites Using Slende Double Cantilevered Beam Specimens", *Journal of Composite Materials*, Vol. 19, pp. 145~177, 1985.
- 3) A. Kinsey, D. E. J. Saunders and C. Soutis, "Post-impact Compressive Behaviour of Low Temperature curing Woven CFRP Lamina", *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 661~667, 1995.
- 4) K. Y. Lee and T. I. Son, "AE Characteristics on Interlaminar Fracture of Thermoplastic Composites Material", *Journal of KSCM*, Vol. 6, No. 1, pp. 29~39, 1993.
- 5) Standard test method for "tensile properties of polymer matrix composite materials", ASTM D 3039, 2000.
- 6) J. F. Srawley and B. Gross, NASA TND-3820, 1967.
- 7) Zhou LI, "A new technique for determining fracture toughness K I C and its confidence with single DCB specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, pp. 133~137, 1996.
- 8) 윤유성, 권오현, "평직구조 CFRP 적층판 복합재의 강도 및 균열진전특성에 대한 AE 평가", *한국산업안전학회지*, 제18권, 제1호, pp. 31~37, 2004.