

## 論文

## 열가소성 복합재료의 층간 파괴에서 AE 특성

이강용\* · 손태익\*\*

## AE Characteristics on Interlaminar Fracture of Thermoplastic Composite Material

Kang Yong Lee\* and Tae Ik Son\*\*

## ABSTRACT

The AE characteristics in static and fatigue loading for the DCB specimen made of AS4/PEEK thermoplastic composite material are quite different. In static loading, the AE waves with high energy level are emitted with the frequency ranges between 45 and 100 KHz at the fracture of matrix, between 210 and 260 KHz at the fracture of fiber and between 150 and 300 KHz at fiber pull-out, fiber bridge and the friction among fibers. Most AE waves emitted in fatigue fracturing are due to the friction among fibers and have the range of narrow peak amplitude. The mode II interlaminar fracture toughness value measured by AE method is resulted to be more conservative than that by ASTM method. The AE characteristics in mode I and II are compared.

## 초 록

AS4/PEEK 고인성 열가소성 복합재료로써 DCB 시험편을 제작하여 모드 I 정하중 상태와 피로하중 상태에서 AE 특성을 비교 검토한 결과, 정하중 상태와 피로하중 상태에서 AE 특성은 모든 AE 파라메타에서 뚜렷한 차이를 보였다. 한편 정하중 상태에서 기지 파괴 때 45~100 KHz, 섬유 파괴 때 210~260 KHz 그리고 섬유끼리의 마찰, 섬유 이탈, 섬유 영킹이 발생할 때 150~300 KHz의 주파수 범위에서 높은 에너지의 AE파를 발생하며, 피로 파괴에서 발생하는 대부분의 AE event는 섬유끼리의 마찰에 기인하며 협소한 peak amplitude 범위를 갖는다는 것을 보였다. 또한 ENF 시험편으로써 모드 II 층간 파괴 인성치를 ASTM 방법과 AE 방법에 의해 측정하였으며 AE 방법에 의한 것이 더 보수적인 결과를 준다는 것을 보였다. 그리고 모드 I 과 모드 II 파괴에서 AE 특성을 비교하였다.

\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 주식회사 금성사 영상미디어연구소 6실

## 1. 서 론

복합재료의 적층판은 기존 등방성재료와는 달리 각층들의 포와송비(Poisson's ratio)와 연계성질(coupling property)들이 섬유방향에 따라 이방성을 나타내므로, 하중을 받을 때 적층 구조물의 가장 취약한 적층면에서 층간 수직응력과 층간 전단응력에 의하여 자유단 부근에 층간 분리현상(delamination)이 생긴다[1]. 이와같은 층간분리는 복합적층 구조물의 강성 저하 요인으로 재료자체가 가지는 취성 등의 영향과 결합되어 결합이 없는 복합적층 구조물에 비해 훨씬 낮은 하중 상태에서 최종 파단에 이르게 한다.

층간 파괴인성을 증대시키기 위해 최근 열경화성 수지(thermoset resin)를 열가소성 수지(thermoplastic resin)로 변경하고 있다. 그러나 열가소성 수지는 열경화성 수지에 비해 훨씬 높은 층간파괴 인성치(interlaminar fracture toughness)를 주고는 있으나 섬유와 수지와의 접합 문제 및 낮은 열안정성 문제때문에 그 사용이 미비하다. 현 시점에서 대표적인 모재수지로서는 영국 ICI사에서 개발한 PEEK(Poly-Ether-Ether-Ketone)가 있다. 층간 파괴에 대한 실험으로 모드 I 실험에서는 DCB(double cantilever beam) 시험편을 이용하고 모드 II 실험에서는 ENF(end notched flexure) 시험편이 일반적으로 받아들여지고 있다[2].

DCB시험편에 대한 기존의 연구로서 Chai[3]는 Graphite/Epoxy에 대해 에너지 해방율을 구하고 파손기구를 관찰하였으며, 45°/0° 사이에서 섬유파괴와 섬유이탈등이 보이고 있음을 보고했다. Ramkumar등[4]은 변위제어 모드에서는 층간분리성장이 안정하게 일어나고 있음을 언급했다. Komai등[5]은 carbon/epoxy 복합재료써 정하중 및 피로하중시험을 행하여 AE파의 진폭, AE수와 지속시간(duration)의 비, 지속시간의 차이에 대해 관찰하였다.

Suzuki등[6,7]은 단섬유 강화 PET와 carbon/epoxy 복합재료 제작한 가장자리 균열 시험편에 대해서 피로하중에서의 AE(acoustic emission) 주파수 특성을 정하중에서의 주파수특성과 비교하여 추정하였으며, 여러 파괴기구에 대한 AE신호도 분석하

였다. Masayasu[8]는 복합재료와 같이 감쇠(attenuation)가 심한 재료에서는 수100 KHz이상의 AE 주파수 성분은 검출 대상으로 그다지 의미가 없음을 기술하였다. Newaz등[9]은 열경화성 복합재료와 열가소성 복합재료를 사용한 DCB 시험편에 대하여 상온과 고온에서 피로하중을 주었을때의 층간파괴 거동을 살폈다.

한편 ENF 시험편 실험에 대한 연구로서 Jeng등[10]은 일축방향섬유 C/PEEK와 C/PPS적층판으로 균열이 없는 3점 굽힘 시험편, ENF 시험편, 인장 시험편을 제작하여, 정하중에서 각 시험편이 파괴될 때 파괴 기구에 대한 AE 반응을 연구하였으며, 진폭-지속시간 관계 그래프를 제안하였다. Russell등[2]은 최근에 순수 모드 II ENF 시험편을 소개하였다. 그는 모드 II 입계 에너지 해방율  $G_{Ic}$ 의 값이 ENF 실험에서 균열면 마찰로 인해 2% 정도 과대평가 된다고 하였다. Gillespie등[11]은 순수 모드 II 시험편으로 ENF 시험편의 타당성을 증명하였다.

본 연구에서는 일정폭(25.4mm), 일정 두께(24층)을 갖는 영국 ICI사의 AS4/PEEK 고인성 열가소성 복합재료(이하 APC-2)를 사용한다. 모드 I 하중하에서 층간 파괴현상을 잘 나타내 주는 DCB 시험편을 제작하여 정하중 상태와 피로하중 상태에서 모드 II 특성을 비교 검토한다. 한편, 모드 II 에너지 해방율을 측정하는 대표적인 방법인 ENF 실험에서 ASTM에서 제안한 방법[12]과 AE를 이용하여 구한  $G_{Ic}$  값과 비교 검토한다. 또한 ENF 실험에서 발생한 AE파의 특성도 관찰한다.

## 2. 실 험

### 2-1. 시험편

열가소수지인 영국 ICI사의 PEEK를 기지로 하는 두께 0.125mm APC-2 prepreg 테이프를 이용하여 적층판을 제작한다. Prepreg의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 이때 초기 균열을 만들어 주기 위해서 중간면 끝에 알루미늄 포일(aluminum foil)을 삽입하였으며 성형 사이클은 Fig.1과 같다. DCB 시험편중 AE특성을 관찰하기 위한 시험편의 적층판은

Table 1. Mechanical characteristics of APC-2

Fiber volume constant $V_f$ (%)	Elastid properties			
	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu_{12}$
62	134.00	8.90	5.10	0.31

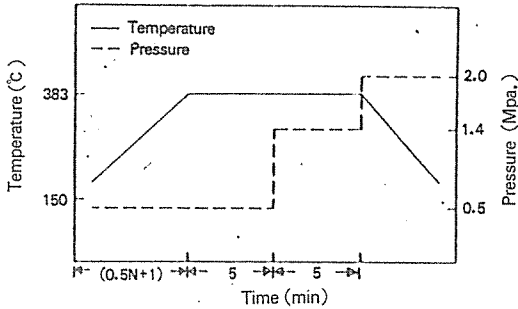


Fig. 1. Cure cycle for APC-2 (N=number of ply)

기지만의 파괴가 일어나게 하기 위한  $[0]_{24}$ 와 균열 전면에서 파괴시 기지와 섬유 파괴가 일어날 수 있도록 적층한  $[+45/-45_2/0_6/-45_2/+45]_s$ 의 2종류로 하였고, ENF 실험에 쓰인 시험편은  $[0]_{24}$ 으로 적층을 하였다. 성형된 적층판은 일정폭(25.4mm)으로 다이아몬드 휠 카터로 절단한 다음 DCB 시험편은 모드 I 하중을 가하기 위해 경첩을 이용하여 보울트로 체결시킨 탭을 하중점에 부착하였다.

알루미늄 포일에 의한 초기균열은 미시적으로 노치(notch)이므로 실제 균열을 만들어 줄 필요가 있다. 따라서 cross head 속도를 1mm/min으로하여 정하중을 주어 실제 균열을 5mm 발생시켰다. ENF 시험편은 파괴시 불안정한 파괴가 일어나도록 하기 위해 다음조건을 만족하도록 초기균열 길이 a를 설정하였다[13].

$$a \leq \frac{L}{3\sqrt{3}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 L은 중앙 하중점에서 바깥하중점까지의 거리이다.

실험에 사용된 시험편의 치수를 Table 2에서 보여주고 있다.

Table 2. Dimensions of specimens

Specimen	Initial crack length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	
DCB	$[0]_{24}$	55	25.4	3.0
	$[+45/-45_2/0_6/-45_2/+45]_s$	55	25.4	3.0
ENF	$[0]_{24}$	25	25.4	3.0

2-2. 실험장치

실험에 사용한 장비는 만능재료시험기(INSTRON 1350)와 AE장비(AET 5500)를 사용하였으며 장치 연결은 Fig.2와 같다. AET 5500에서의 AE 센서는

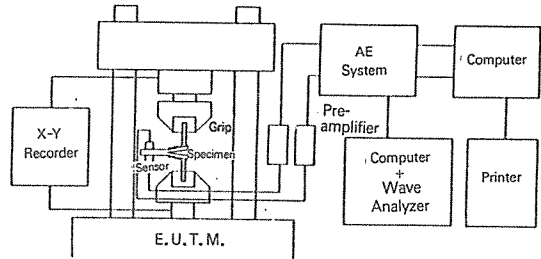


Fig.2. Testing system

AE 매개변수를 해석하기 위한 375 KHz인 압전형 공진센서와 주파수분석을 하기위한 광대역 센서를 사용하였으며 시험편 상하면에 각각 1개씩 부착하였다. 센서에서 감지된 신호는 선증폭기에서 40dB로 증폭이 된후 AET 5500의 본체로 입력되어 내부에서 다시 40 dB이 증폭된다. 압전형 공진 센서인 경우에는 125 KHz~2 MHz의 신호만 통과시키는 필터를, 광대역 센서인 경우에는 1 KHz~300 KHz 사이의 신호만 통과시키는 필터를 장착하였다. AE 문턱값(threshold level)은 1.0 V로 하였으며 잡음의 크기에 따라 자동적으로 크기가 조절되는 모드(automatic mode)를 선택하였다. 주파수 분석을 위해 파형분석 장치(SONOTEK사의 STR\*825)를 사용하였다. 입력신호는 FFT법에 의해 energy spectrum이 계산된다. 센서를 시험편에 부착할 때 AE파가 시험편에서 센서로 잘 전달되도록 하기 위해 pro-

pylenen glycol를 센서 위치에 칠했으며 움직이지 않도록 일정력 크래프를 사용하여 고정시켰다.

### 2-3. 실험방법

먼저 AE특성을 관찰하기 위한 실험에서는 정하중시험에서 cross-head속도를 5 mm/min으로 하고 피로시험시 주파수는 온도상승의 영향을 무시할 수 있는 1.5 Hz로 하여 변위제어(stroke control)로 하였다 변위비(최소변위/최대변위)를 0.1로 하였으며 최대변위는 정적 파괴변위의 약 90%로 하였다. 하중 파형은 파괴에 영향을 거의 주지 못하므로[13] 가장 일반적인 sine파를 사용하였다. 그리고 ENF 실험에서는 3점 굽힘 그립(3-point bending grip)을 사용하여 cross-head 속도를 5 mm/min으로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 모드 I 실험

DCB시험편을 사용한 정하중시험에서의 하중-변위-AE event수 관계 그래프를 Fig.3에 두 종류의 시험편 즉,  $[0]_{24}$  시험편(이하 A-시험편)과  $[+45/-45/0_6/-45_2/+45]_s$  시험편(이하 B-시험편)에 대해 나타내었다. 파괴하중을 비교해보면 A-시험편이 B-시험편 보다 높은 하중에서 첫 층간분리가 일어났다. 그러나 A-시험편은 계속 자가(self-similar) 균열 진전을 하여 안정파괴가 일어났으나 B-시험편은 자가 균열 진전을 하다가 변위가 45 mm 근처에서 갑작스런 균열 진전으로 하중이 급격히 감소

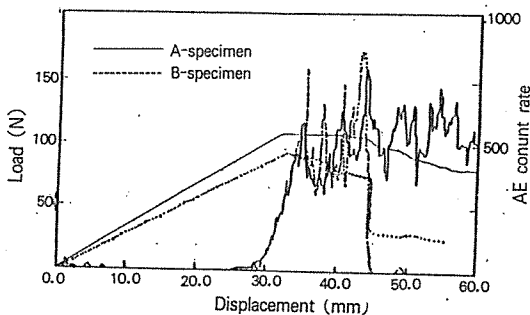


Fig. 3. Load-displacement-AE event count rate curve

하는 현상이 발생하였다. 이것은 섬유 영킴(fiber bridge) 현상에 의해 균열 진전을 어느정도 막고 있다가 섬유영킴이 풀리면서 갑작스런 균열 진전이 발생하였기 때문이다. 갑작스런 균열진전 직전에 AE event가 많이 발생되고 그 이후에는 거의 발생되지 않은 것은 한동안 균열 진전이 일어나지 않았기 때문이다. 일반적으로 A-시험편보다 B-시험편이 더 많은 AE event가 발생한다고[14] 알려져 있으나 위와같은 현상으로 실험 전체에서 발생한 AE수는 A-시험편이 B-시험편보다 더 많다. A-시험편이 B-시험편보다 높은 파괴하중을 갖는다는 것은  $[0]_{24}$ 로 적층한 시험편이 각도를 섞은 시험편보다 높은 층간파괴인성치를 준다는 것[15]과 잘 일치하고 있다.

AE event count를-피로 사이클수 관계 그래프를 Fig.4에 나타내었다. 피로 사이클수가 증가함에 따라

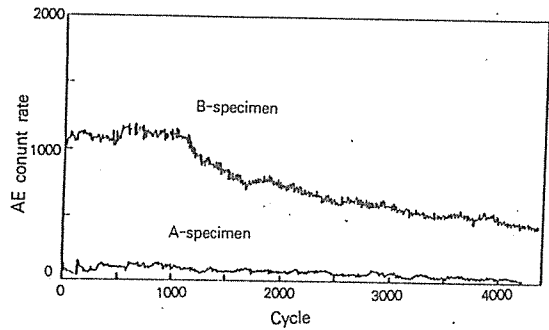
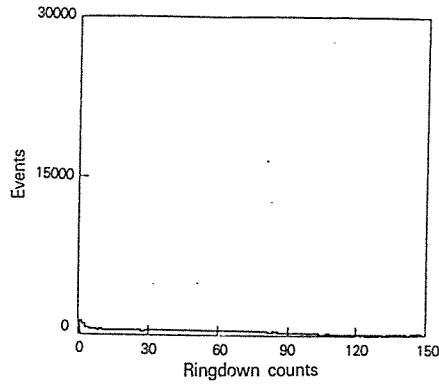


Fig. 4. Relation between AE event count rate and cycle number

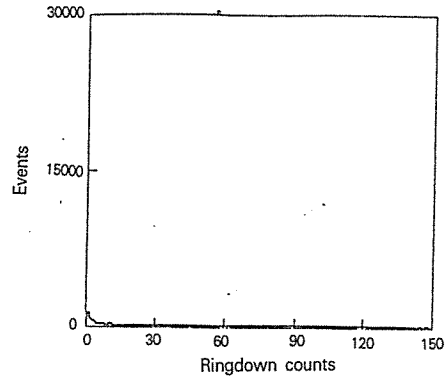
발생하는 AE event count률은 감소함을 보이고 있다. 이 현상은 변위제어 모드에서 당연하다. A-시험편 보다 B-시험편에서 AE파가 더 많이 발생하였는데, 이는 B-시험편에서 섬유영킴에 의해 섬유끼리 마찰이 심하게 발생하였기 때문으로 여겨진다.

Fig.5에서 보던 정하중시험시의 event발생에 150개 이내의 RDC(ringdown count)가 발생한다는 것을 알 수 있고 피로하중시 A-시험편은 대부분의 event에서 15개 이내의 RDC를 가지고 B-시험편의 경우 70개 이내의 RDC를 가진 event가 전체의 95%를 차지하고 있다는 것을 알 수 있다.

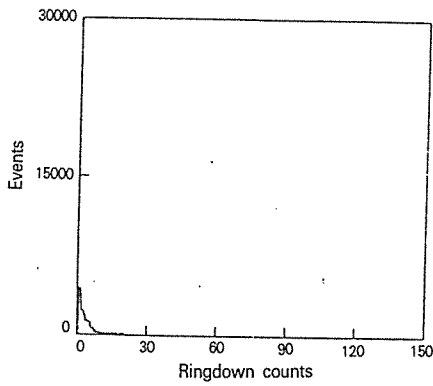
Fig.6의 peak amplitude분포에서 보듯이 정하중



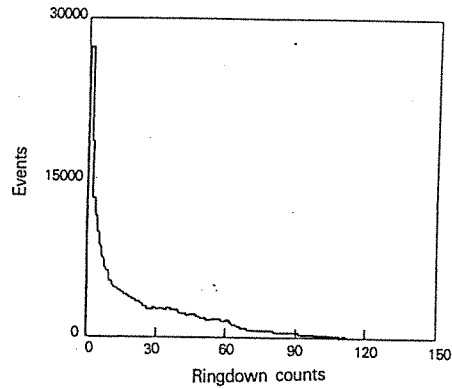
(a) A specimen in static loading



(b) B specimen in static loading

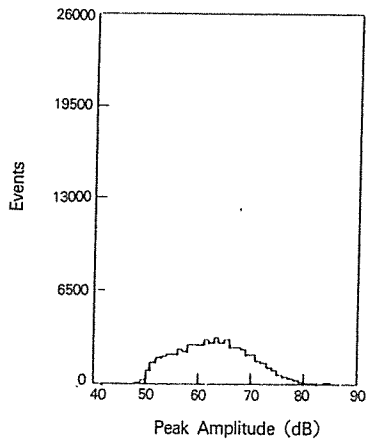


(c) A specimen in fatigue loading

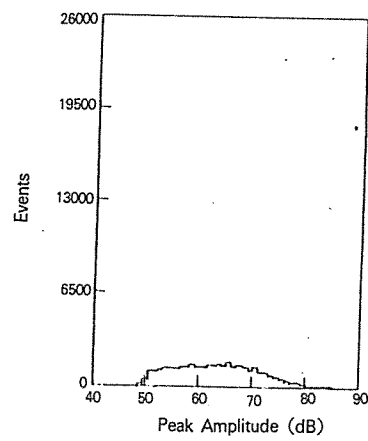


(d) B specimen in fatigue loading

Fig. 5. Distribution of events by ringdown counts

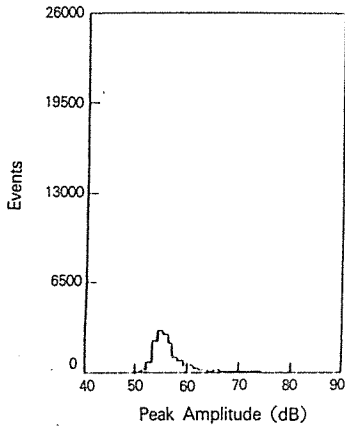


(a) A specimen in static loading

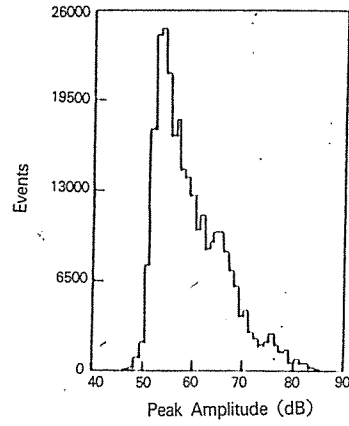


(b) B specimen in static loading

Fig. 6. Distribution of events by peak amplitude

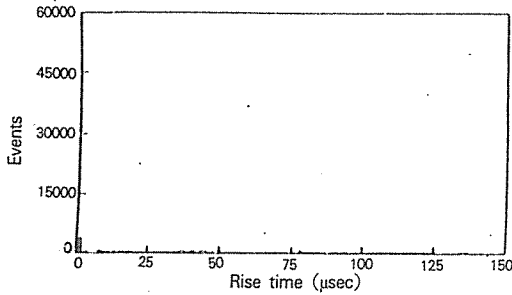


(c) A specimen in fatigue loading

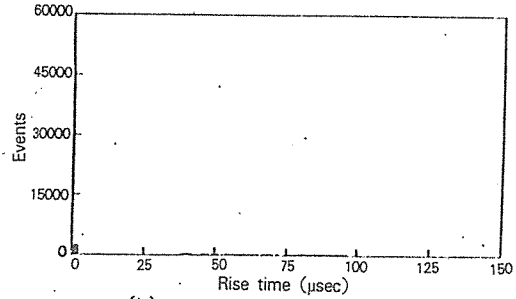


(d) B specimen in fatigue loading

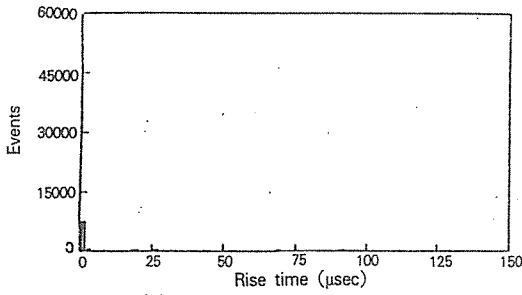
Fig. 6. (Continued)



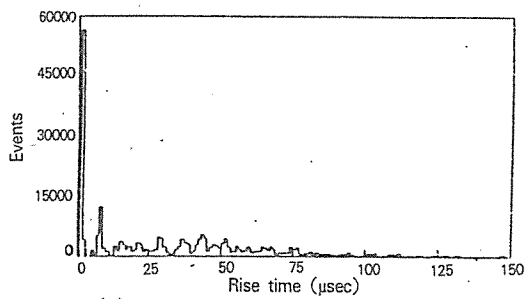
(a) A specimen in static loading



(b) B specimen in static loading



(c) A specimen in fatigue loading



(d) B specimen in fatigue loading

Fig. 7. Distribution of events by rise time

에서는 50 dB~85 dB의 넓은 분포를 가지나 피로 하중에서는 약 55 dB 정도의 peak amplitude를 가지는 AE event가 지배적으로 발생함을 알 수 있다.

Fig. 7에서 정하중때와 피로하중때의 rise time은 2μsec인 event가 지배적이며 정하중보다 피로하중

때가 rise time이 2μsec인 event수가 훨씬 많이 발생하였다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 다음식에서 구해지는 에너지의 분포이다.

$$\text{Energy} = \text{Peak Amplitude} + 10 \log (\text{Event Duration}) \dots\dots\dots (2)$$

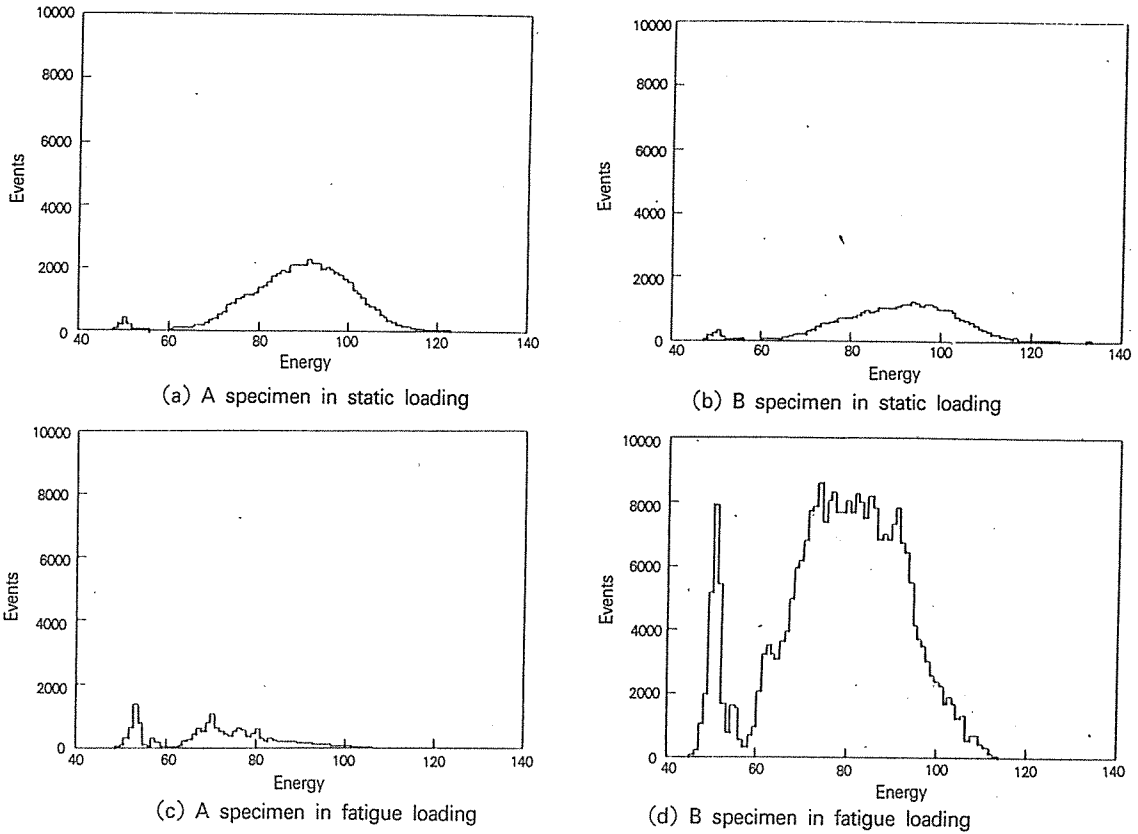


Fig. 8. Distribution of events by energy

정하중과 피로하중에서의 에너지는 공히 48~55와 60~110에 분포하고 있으며 피로하중에 비해 정하중에서 에너지 분포상으로 볼때 높은 에너지를 가진 event가 낮은 에너지를 가진 event보다 더 많이 발생되었음을 알 수 있다.

피로하중 실험에서 B-시험편에서는 섬유끼리의

마찰에 의한 영향이 매우 크게 작용하고 있는 것으로 여겨져, 앞에서 피로실험을 하여 섬유영킴이 발생한 시험편에 대해 평균범위를 전과 동일한 값으로 고정된 상태에서 균열성장을 발생시키지 않고 섬유마찰만을 일으키도록 하기 위해 변위비를 0.5로 증가시켜 피로하중을 주면서 AE파를 받아들였다. 그때의

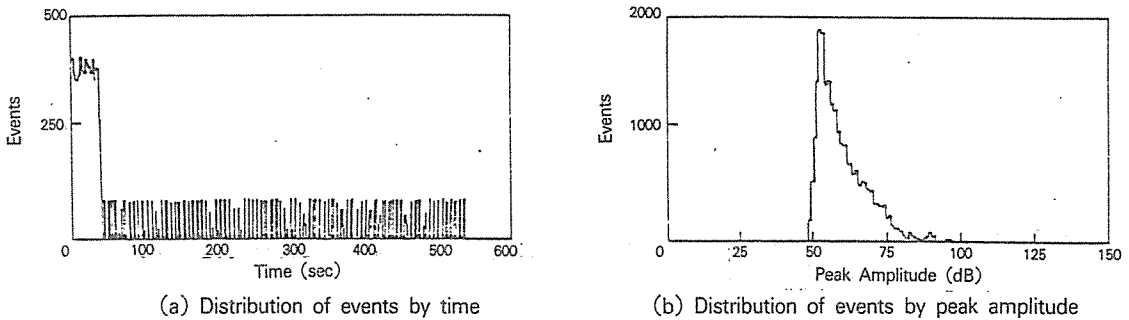


Fig. 9. Graph of response by fiber friction

AE파를 관찰한 결과를 Fig.9에 나타냈다. Fig.9 (a)에서 event발생이 시간에 따라 일정하게 발생하여 단지 섬유끼리의 마찰에 의해서만 발생된 AE파임을 알 수 있다. Fig.6에서 보는 바와 같이 AE매개변수들중 peak amplitude 분포가 여러 파괴기구에 의한 AE파의 특징을 잘 나타내 주고 있으므로[9] event대 peak amplitude분포를 Fig.9 (b)에서 보였으며 Fig.6 (d)와 비교해보면 두 그래프 모양이 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 B-시험편의 AE파는 주로 섬유끼리의 마찰에 의해 발생하는 것이 지배적임을 알 수 있다.

Fig.10은 정하중에서의 A,B-시험편에서 나온 AE파를 주파수분석하여 나타낸 그래프이다. Fig.10 (a)는 A-시험편 결과로써 높은 에너지의 AE파가 45~100 KHz와 150~300 KHz의 주파수 범위를 갖는다는 것을 보이고 있다. 이러한 주파수를 발생시킨

파괴 기구를 규명하기 위하여 prepreg 1장을 사용하여 모재만의 파괴를 일으키게하기 위하여 모드 III 하중을 주어 섬유방향으로 균열을 진전시켰으며 발생한 주파수 특성은 Fig.11 (a)와 같고, 섬유 파괴를 일으키기 위해 prepreg 1장을 섬유방향의 수직방향으로 굽힘을 주어 prepreg를 깨었으며 발생한 주파수 특성은 Fig.11 (b)와 같다. Fig.11 (a)에서 45~100 KHz, Fig.11(b)에서 210~260 KHz의 주파수를 갖는 AE파가 큰 에너지를 방출함을 알 수 있다. 이러한 실험결과로써 모재의 파괴는 45~100 KHz, 섬유의 파괴는 210~260 KHz 주파수 범위를 갖는 파에 기인한 것임을 알 수 있다. 위의 prepreg 실험에서는 완전한 모재 또는 완전한 섬유만의 파괴가 되지 않았으므로 Fig.11 (a)에서는 170 KHz 근처, Fig.11 (b)에서는 45~70 KHz를 갖는 AE파도 발생되었다.

Fig.10(b), (c)는 B-시험편의 주파수분석 결과

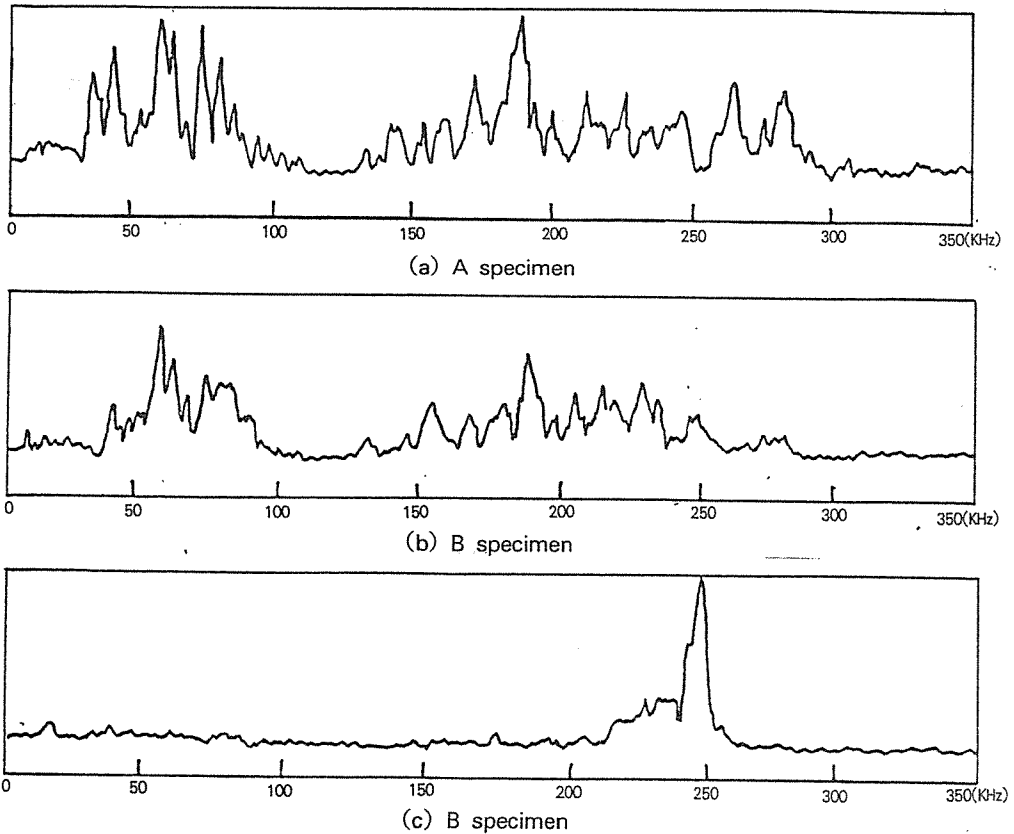
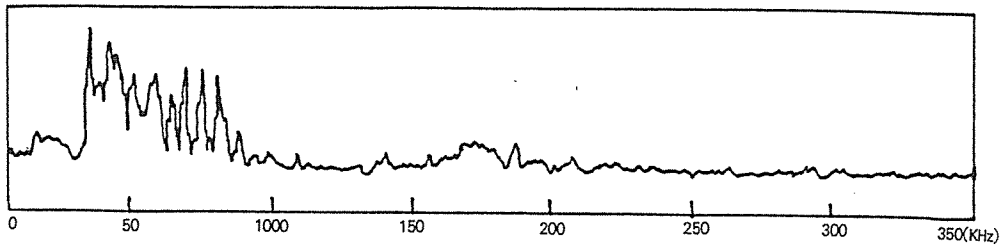
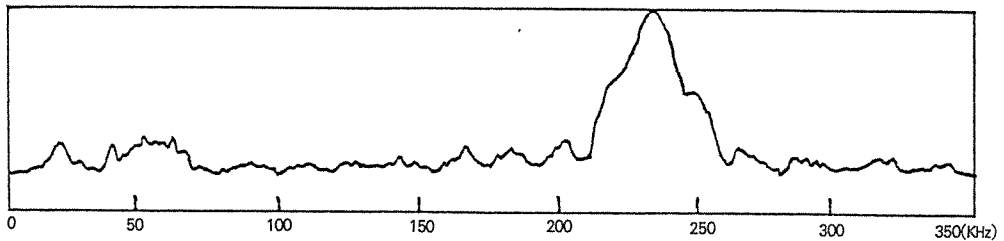


Fig.10. Energy spectrum in static loading





(a) Matrix fracture by mode III load



(b) Matrix and fiber fracture by bending load

Fig. 11. Energy spectrum of prepreg

인데 두가지 경우가 발생했다. Fig. 10(b)는 45~100 KHz와 150~300 KHz, Fig. 10 (c)에서는 225~270 KHz를 갖는 AE파가 높은 에너지를 발생시켰다. 여기서도 위의 관찰결과로 미루어 45~100 KHz 주파수를 갖는 AE파는 모재의 파괴시 발생된 것이고, 150~300 KHz 주파수를 갖는 AE파는 섬유끼리의 마찰, 섬유이탈, 섬유엉킴으로 인해 발생된 것으로 해석할 수 있다. Fig. 10 (c)에서 256.2 KHz의 AE 주파수는 섬유 다발(fiber bundle)이 동시에 파괴되면서 높은 에너지를 갖는 AE파를 발생시킨 것으로 생각된다.

3-2. 모드 II 실험

ASTM에서는 탄성보에서 모드 II 에너지 해방률을 다음 식으로 제안하였다[12].

$$G_{II} = \frac{9P^2Ca^2}{2W(2L^3 + 3a^3)} \quad C = \frac{2L^2 + 3a^3}{8EWh^3} \quad \dots\dots (3)$$

여기서, P는 작용하중, W는 시편 폭, L은 시편 중앙하중점과 바깥하중점까지의 거리, E는 탄성계수, 2h는 시편 두께, a는 균열길이, C는 컴플라이

언스이다. 윗식에서 균열면사이의 마찰영향은 무시되었다.

사용된 시험편의 스펠(span)은 66mm이다. 실험 결과 하중-변위 선도는 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 임계 하중(P<sub>c</sub>)이 1274N이므로 식(2)에 대입하여 컴플라이언스와 에너지 해방율을 구하면 C=0.6767E<sup>-5</sup> m/N, G<sub>IIc</sub>=1959.7 J/m<sup>2</sup>이다. Fig. 13의 AE반응에 의하면 하중 1274N에서 불안정한 파괴가 일어나기전에 미세 파괴가 하중 1220.1N에서 일어났음을 알 수 있다. 이 하중에 의하면 컴플라이언스와

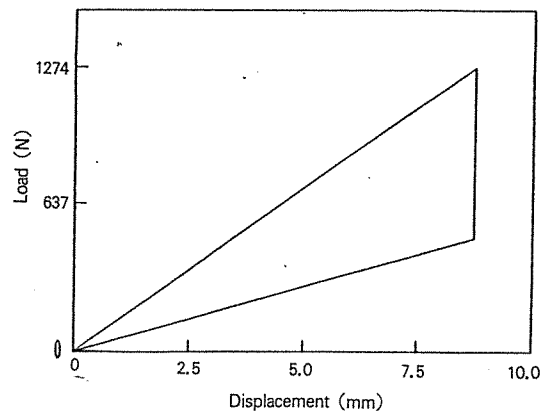


Fig. 12. Load-displacement curve

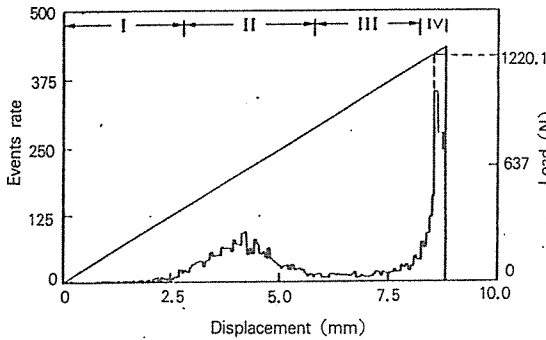


Fig. 13. Relation between load-displacement and AE event rate in ENF test

Table 3. Comparison among  $G_{IIC}$  values for ASTM test method, AE test method and Gillespie's result

	ASTM test	AE test	Gillespie[11]
$G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )	1959.7	1797.4	1870.3

에너지 해방율은  $C = 0.6767E-5$  m/N,  $G_{IIC} = 1797.4$  J/m<sup>2</sup>이다.

Table 3는 ASTM법, AE법과 Gillespie등[11]이 구한  $G_{IIC}$ 값을 비교하여 보여주고 있다. ASTM법에 의해 계산한 값이 Gillespie등이 제시한 값보다 1.5% 정도 높은 반면에 AE법에 의한 값은 3.9% 정도 낮다. 그 이유는 ASTM법이 거시적 변형에 의한 균열진전에 따른  $G_{IIC}$ 를 주는 반면에 AE법은 미시적인 변형에 의한 균열진전에 따른  $G_{IIC}$ 를 주기 때문이다.

Fig. 13은 하중-변위-AE event를 관계 그래프이다. 하중이 증가함에 따라 발생한 AE event들의 분포를 보면 4영역으로 나눌 수 있다. I 영역에서는 AE event가 거의 나타나지 않았으나, II 영역에서 많은 event가 나왔다. 그 이유는 588N 근처에서 바깥편에서 약간의 미끄러짐이 발생한 것으로 생각된다. III영역에서는 다시 event가 감소되었는데 이는 II영역에서의 event 발생 요인이 제거되었음을 알 수 있다. IV영역에서 하중이 임계치로 도달함에 따라 급격히 AE가 발생하고 하중이 1274N에서 층간 파괴가 일어났음을 알 수 있다. Fig. 14와 Fig. 15에

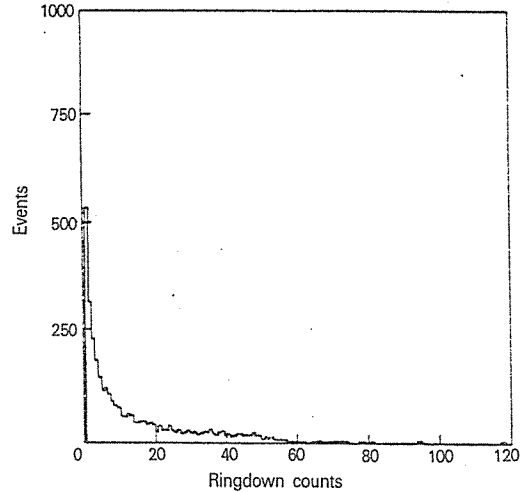


Fig. 14. Distribution of events by ringdown counts

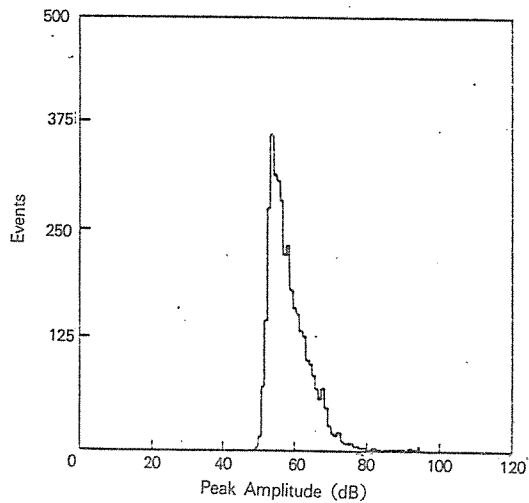


Fig. 15. Distribution of events by peak amplitude

나타낸 AE 매개변수들의 event 분포를 살펴보면 모드 I DCB 시험편(Fig. 5(a), (b)와 Fig. 6(a), (b))과 달리 적은 AE ringdown count를 가지고 또 50~60 dB 정도의 peak amplitude를 가진 event가 많이 발생했음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

APC-2 복합재료로 제작된 DCB 시험편에 대하여

AE특성을 관찰하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ringdown count, peak amplitude, rise time, 에너지 등에 의한 event분포는 적층방법에 관계 없이 정하중과 피로하중에서 뚜렷한 차이가 있다.
2. 정하중 상태에서 기지의 파괴때 45~100 KHz, 섬유파괴 때 210~260 KHz 그리고 섬유끼리의 마찰, 섬유이탈, 섬유엉킴이 발생할 때 150~300 KHz의 주파수 범위에서 높은 에너지를 가지는 AE파가 발생한다.
3. 피로하중상태에서 파괴될 때 협소한 peak amplitude 범위에서 대부분의 AE event가 발생하며 이 AE event는 주로 섬유끼리의 마찰에 기인한다.

한편 ENF 시험편에 의해 APC-2의 모드 II 층간 파괴인성치를 측정하였으며 AE법이 ASTM법 보다 약 8.3% 작은 층간파괴 인성치를 주었으며 DCB 시험편과 다른 AE 특성을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 1989년도 한국과학재단 목적 기초 연구비지원을 받아 수행된 것이며 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Jones, R.M., Mechanics of composite materials, Scripta Book Company, 1975.
2. Russell, A.J., and Street, K.N., "Moisture and temperature effects on the mixed mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy," ASTM STP 876, 1985, pp.349-370.
3. Chai, H., "The characterization of mode I delamination failure in nonwoven, multidirectional laminates," Composites, Vol.15, No.4, 1984, pp.277-290.
4. Ramkumar, R.L., and Whitcomb, J.D.,

"Characterization of mode I and mixed-mode delamination growth in T300/5208 graphite/epoxy," ASTM STP 876, 1985, pp.315-335.

5. 駒井 謙治郎, 箕島 弘仁, 涉谷 豊茂, "一方向強化炭素纖維/エポキシ樹脂複合材料の引張破壊特性とAE波分析," 日本機械學會論文集(A編), 56卷, 528號, 1990, pp.1792-1799.

6. 鈴木 惠, 伊村 莫, 岩本 正治, 自念 榮一, 藤原 照彦, "AE法による短纖維強化PETの疲勞破壊機構に関する研究," 日本機械學會論文集(A編), 55卷, 513號, 1989, pp.1081-1087

7. M. Suzuki, H. Nakanishi, M. Iwamoto, E. Jinen, Z. Maekawa and A. Mori, "Relationship between AE characteristics and factors of composite materials," Composites '86: Recent Advances in Japan and the United State, ed. Kawata, K., Umekawa, S. & Kobayashi, A., Proc. Japan-U. S CCM-III, Tokyo, 1986, pp.631-638.

8. 大津政康, アコースティック エミッションの特性と理論, 森北出版株式會社, 1988.

9. Newaz, G.M. and Mall, S., "Relaxation-Controlled Cyclic Delamination Growth in Advanced Thermoset and Thermoplastic Composites at Elevated Temperature," J. of Composite Materials, Vol.23, 1989, pp.133-145.

10. Jeng, J.S., Ono, K. and Yang, J.M., "Fracture Mechanism Studies of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites by Acoustic Emission," Progress in Acoustic Emission IV, JSNDI, 1988, pp.757-764.

11. J.W. Gillespie, L.A. Carlsson and R.B. Pipes, Delamination Growth in Composite Materials Final Report, NASA-CR-176416, 1985.

12. Proposed Manufacturing and Test Procedure for the End-notched Flexure(ENF) Test, ASTM D30.02 'round robin', 1985.

13. Carlsson, L.A. and Pipes, R.B., Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, Prentice-Hall Inc., 1987.

14. H. James, J. Williams and S.L. Samson,

“Acoustic Emission Monitoring of Fiber Composite Materials and Structures,” J. of Composite Materials, Vol. 12, 1978, pp. 348-370.

15. 이강용, 권순만, “복합재료의 층간파괴인성,” 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, 1991, pp. 1479-1485

---