

# 평직 CFRP 복합재료의 균열진전 및 AE평가에 미치는 하중방향 영향

권오현\*·윤유성†

(2003년 8월 8일 접수, 2004년 2월 23일 심사완료)

## The Effect of Load Orientation for Crack Propagation and Acoustic Emission Evaluation on Plain Woven CFRP

Oh-Heon Kwon and Yu-Seong Yun

**Key Words:** Plain Woven CFRP(평직 탄소섬유복합재료), Acoustic Emission(음향방출), Crack Propagation(균열진전), Load Orientation(하중방향)

### Abstract

In recent year, composite materials are increasingly used in various fields of engineering because of its superior properties. The relationships of between crack propagation and AE characteristics for CFRP plain woven laminate composites are examined. AE signals are measured during the fracture behavior tests. The purpose of study is to estimate the crack extension behavior with AE characteristics according to the load orientation for plain woven CFRP laminate composite.

### 1. 서론

최근 산업현장의 경량화 및 고속화 등에 의해서 기존의 재료를 대체할 새로운 복합재료의 사용이 급속히 증가하고 있다. 일반적으로 복합재료는 금속재료보다 높은 비강도와 비강성을 가지며 그 중에서 섬유강화복합재료는 적층각도, 적층순서 및 경화방법에 따라서 원하는 강도와 강성 및 기계적 성질을 가질 수 있다. 탄소섬유강화복합재료는 스포츠용품에서 최신 항공기의 구조재료에 이르기까지 경량화 관점에서 기존의 재료를 대체해 나가고 있다. 하지만 CFRP 복합재료는 기지와 섬유사이의 비균등성, 비등방성 때문에 기지균열, 섬유파단, 적층분리 및 섬유뿔힘 등과 같은 금속에서 볼 수 없는 여러 문제점이

발생되기 쉽다. 따라서, 안전성의 측면에서 기계설비 및 구조물의 파손을 유발할 수 있는 재료손상에 대한 평가는 매우 중요하므로 그 특성을 파악할 필요성이 있다.

직물구조가 아닌 일방향의 경우에는 섬유에 의한 적층 변화에 따른 부직포 삼입형 하이브리드 복합재료의 피로강도 특성을 Lee 등<sup>(1)</sup>이 파악하였고, Lawcock 등<sup>(2)</sup>은 노치의 형태에 따른 잔류인장강도와 층간분리의 특성에 대해 고찰하였다. 또한 Yoshiyuki 등<sup>(3)</sup>은 v 노치 CFRP 시험편에 대하여 충격시험을 실시하여 기계적 특성에 대한 적층순서의 영향을 연구하였다. 한편 직물구조의 경우는 Nidal 등<sup>(4)</sup>이 유리섬유복합재료에서 균열진전방향과 적층분리의 영향을 모드 I의 경우에 대해 조사하였다. 일방향 섬유강화복합재료에 의한 연구는 많은 연구자에 의해 이루어지고 있지만 직물구조 섬유강화복합재료의 경우 복잡한 강화구조로 인하여 명확한 파괴거동 해석기법이 확립되어 있지 않다. 이러한 파괴거동현상을 평가하기 위하여 초기 결함의 검출 및 파괴기구 규명에 실시간으로 평가가 가능한 음향방출(Acoustic

† 책임저자, 회원, 부경대학교 안전공학과

E-mail : planet70@naver.com

TEL : (051)620-1522 FAX : (051)620-1516

\* 회원, 부경대학교 안전공학과

Emission, AE)법이 유용한 평가수단이 되고 있다. Nonaka 등<sup>(5)</sup>은 CFRP 적층판의 손상과정을 적외선응력 화상과 AE에 의하여 검토하였고, Chun 등<sup>(6)</sup>은 직교적층판의 횡방향층 균열밀도변화에 따른 AE 특성을 연구하였다. Ni 등<sup>(7)</sup>은 AE와 파괴파라미터와의 기초적 관계를 도출하였다. 또한 Chow 등<sup>(8)</sup>은 노치를 가진 GFRP에 인장하중시 발생하는 AE 신호와 초음파 X선 단층촬영법을 이용하여 노치에서 발생한 균열진전 정도가 복합재료 내에 미치는 영향을 연구하였다. Barre 등<sup>(9)</sup>은 GFRP 재료에 대하여 음향방출신호 진폭이 각 대응되는 손상형태에 따라 변화하는 것을 보고 하였다. 또한 균열진전거동과 AE 특성과의 관계는 Jinen 등<sup>(10)</sup>이 보고하였으나 GFRP 단층판의 경우에 한하였으며 파손기구와의 연결성을 충분히 설명하지 못하였다. 이와 같이 섬유강화복합재료에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 직물구조 CFRP 복합재료의 손상기구에 대한 명확한 파악은 아직 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 상용 평직구조 프리프레그로 제작된 CFRP 적층판을 이용하여 하중방향에 따른 파손거동과 AE 특성과의 관계를 평가하였다. 시험은 AE 센서를 부착한 인장 및 CT시험편으로 행하여졌으며 AE 특성치와 재료 특성치 및 균열발생진전과의 관계를 도출하였다.

## 2. 음향방출의 특성

음향방출에 관한 연구는 1950년대 초기에 독일의 Kaiser로부터 시작되어 1970년대 이후 크게 발전되어왔다. 재료에 응력이 가해지면, 작용하는 응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 내부 결함이 생성되거나 완전파괴가 되기까지 그 재료 특유의 소리를 발생하게 된다. 파괴시 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동해 가는 현상의 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환되며 계측장치에 의해서 가시적으로 검출될 수 있다. 이 중에서 물체가 외력에 의해 소재 그 자체의 변형으로 방출되는 탄성파를 음향방출이라 한다. AE 신호의 형태에는 돌발형과 연속형 AE로 나뉘어진다. 돌발형 AE는 균열의 생성 및 성장 등과 같은 발생원에는 시간 축에 대해서 감쇠형 모양을 가지며 발생에너지가 높고 비교적 발생률이 적은 펄스형태를 갖는다. 이에 반해서 전위의 이동, 마모나

소성변형 중의 전위의 축적 과정과 누출 등에 의해 발생하는 것과 같은 연속적인 변형 현상에 대응하며 단위 시간당 방출수가 많고 파형이 연속잡음과 같은 형태를 가지는 것이 연속형 AE이다. 복합재료의 음향방출의 적용한 경우는 기지균열, 섬유기지 계면분리, 섬유파단과 적층분리와 같은 다양한 AE원이 파괴기구에 관여하는 것으로 알려져 있다<sup>(11)</sup>. AE 파형의 상승에서는 가해지는 하중의 형태를 구별할 수 있으며 event나 count로부터는 손상의 빈도, 시간분포에서는 손상의 형태, 진폭이나 에너지로부터는 손상의 크기 등을 알 수 있다. AE 신호는 개개의 event에 의해 관측되고 AE 에너지와 유지시간, 그리고 개개의 event가 발생하는 시간적 빈도나 공간적 위치에 관한 정보를 나타내게 된다. Fig. 1에 AE 특성을 결정하는 AE event, AE count, 진폭분포, AE 에너지, 상승시간, 유지시간 등 AE 신호처리 파라미터를 나타낸다.

## 3. 재료 및 실험방법

### 3.1 실험 재료

실험재료로 사용한 직물구조 탄소섬유 프리프레그(Woven Carbon Prepreg)는 국내 한국카본(주)에서 생산되는 평직 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)를 이용하였다. 프리프레그의 화학적 성분은 Table 1에 나타낸다. 프리프레그는 가로·세로 각각 250×250mm로 절단하여 6플라이로 적층하였다. 적층된 적층판은 열성형기(Hot press ; 국내, 50MPa)에서 성형온도와 게이지 압력을 각각

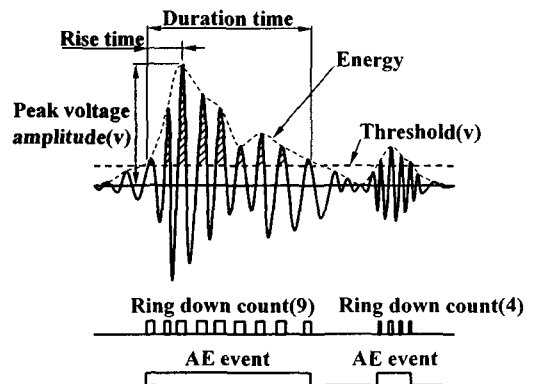


Fig. 1 Parameter of acoustic emission signal

**Table 1** Chemical compositions of prepreg

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

140℃, 60kg/cm<sup>2</sup>에서 60분간 성형하였고 최종 두께가 1mm로 되게 제작하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조를 나타낸다.

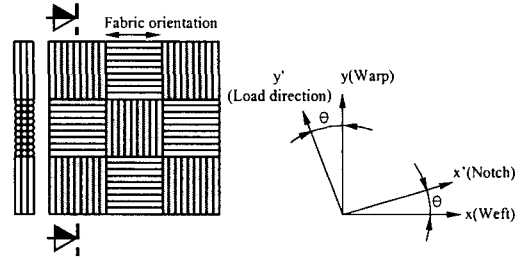
인장시험편은 Fig. 3 (a)와 같이 ASTM D-3039-00<sup>(12)</sup>에 참조하여 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 절단·가공하였으며, 시험편 끝단은 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로 알루미늄 탭을 부착하여 인장시험시 시험기의 그림으로부터 손상을 방지하였다. 파괴시험의 CT시험편은 Fig. 3 (b)와 같이 ASTM-E647-99<sup>(13)</sup> 추장법에 따라 Fine wheel cutter가 부착된 만능자동정밀시편절단기(Heiwa technica)를 이용하여 하중방향에 대한 섬유방향(warp)이  $\theta=0^\circ, 30^\circ$  및  $45^\circ$ 가 되게 경사시켜 절단·가공하였다. 또 커터 두께인 폭 8mm로 노치를  $a_0/W=0.55$ 가 되게 삽입하였다. 여기서  $a_0$ 는 초기균열길이이며  $W$ 는 시험편 폭을 나타낸다.

**3.2 실험방법**

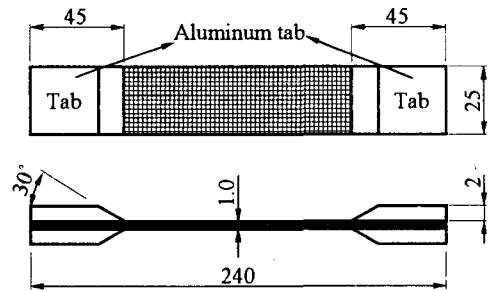
재료의 탄성계수, 인장강도 등의 기본 재료 물성치 측정은 중형 2방향 변형율게이지를 부착한 인장시험편으로 상온에서 만능동적시험기(H사, 50kN)를 사용하여 구하였으며 ASTM D3039-00<sup>(12)</sup>에서 추천하고 있는 방법인 변위제어 0.2mm/min로 행하여 졌다. 또한 CT시험편의 파괴시험 동안 박판으로 인한 좌굴을 방지하기 위하여 좌굴방지용 지그를 AE측정시 잡음을 고려하여 알루미늄으로 자체 제작하여 부착함으로써 좌굴을 최소한으로 방지하였다.

AE 측정은 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC 시스템을 사용하였다. 센서는 R15센서로 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였고, Threshold는 Fixed로 Threshold값은 인장시험에서 44dB 그리고 파괴시험에서 23dB로 하였다.

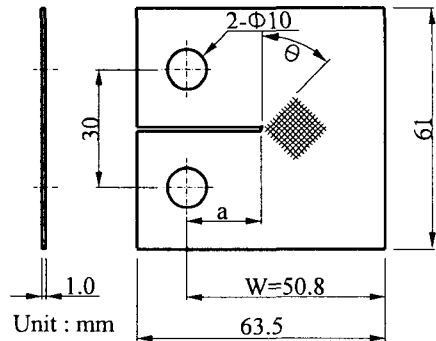
실험 중의 모든 자료는 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. 파괴시험 동안 균열길이측정은 이동식 현미경(Japan, N사)을 사용하였다. 균열발생지점을 직접 눈으로 관찰하면서 일정균열성장 지점에서 성장길이를 이동식 현미



**Fig. 2** Texture and load orientation of plain woven CFRP laminate composite



(a) tensile specimen



(b) CT specimen

**Fig. 3** Specimen configurations

경에서 PC로 저장하였다. Fig. 4는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

**4. 결과 및 고찰**

**4.1 인장 및 파괴시험**

Fig. 5는 직물구조 CFRP 복합재료의 인장시험편에 대한 인장시험의 결과로서 응력-변형률 선도를 나타낸다. 응력-변형률 선도는 거의 파단시까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있으

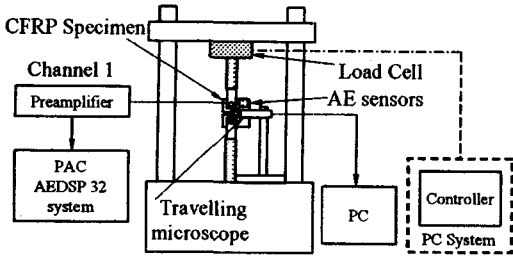


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Mechanical properties of tensile specimen

Tensile modulus, E	149.3 GPa
Ultimate strength, $\sigma_u$	1,546 MPa
Elongation	1.0 %
Poisson's ratio, $\nu$	0.09

며, 얻어진 재료특성치는 Table 2에 나타낸다.

평직구조 CFRP 복합재료의 파괴시험은 CT시험편을 사용하였다. 진전균열길이 측정에는 이동식 현미경에 의해 직접 관찰·측정하였으며, 데이터 입력장치를 이용하여 연속적으로 PC에 저장하였다. 측정된 균열성장길이는 시편의 한 방향에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 시편의 두께가 비교적 얇은 1mm의 박판이므로 반대 면에서의 측정결과와 거의 일치하여 좌우 균일하게 성장하는 것으로 간주하였다.

Fig. 6은 waft 섬유방향을 기준으로 하중방향에 각각 0°, 30°, 45°에서의 인장파괴시험에 의하여 구하여진 하중-하중선 변위 및 균열성장길이와의 관계를 나타낸다. Fig. 6의 (a)는  $\theta=0^\circ$ 인 경우로 waft 섬유방향에 노치와 같은 방향이다. 초기에 하중이 가해짐에 따라 약 0.52kN에서 균열이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 균열발생은 노치라운드 양 끝 부분에서 약 0.378mm로 측정되었으며, 이후 하중이 증가하여 1.23kN에서 1.26mm로 직접 눈으로도 확인될 수 있는 정도로 균열이 성장하였다. 최대 하중인 1.58kN까지 증가한 이후 하중이 급격히 감소하는 지점에서 균열은 급속히 성장하여 5.82mm까지 상승한 후 완만한 성장을 하고 있다.

Fig. 6의 (b)는  $\theta=30^\circ$ 로서, Fig. 6의 (a)의  $\theta=0^\circ$ 인 경우와 유사하게 약 0.19kN에서 노치반경 양 끝 부분에서 응력집중 영향으로 인한 미세 균열이 약 0.13mm 성장한 것을 관찰할 수 있었다. 최대하중은 1.51kN까지 상승하였으며 이 때 균열은

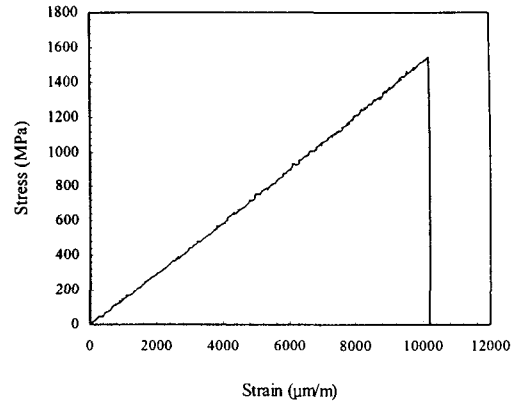
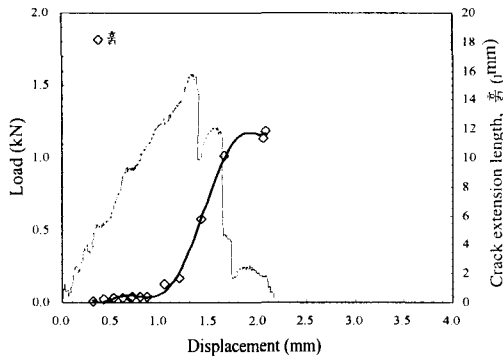


Fig. 5 A typical stress-strain curve acquired for a plain woven CFRP composite under uniaxial tensile test

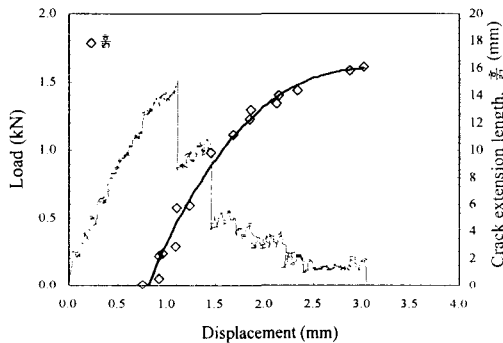
약 5.71mm로 하중이 급격히 감소하는 위치에서 급속히 성장하여 이후 서서히 증가하고 있다.

Fig. 6의 (c)는  $\theta=45^\circ$ 인 경우로, 전술한 두 가지 하중방향의 경우와 유사하게, 초기 약 1.28kN까지 노치반경 양 끝 부분에서 약 0.21mm의 미세 균열이 발생·성장하는 것을 관찰할 수 있었고, 최대하중은 1.39kN까지 상승하였다. 이 때 균열은 약 2.27mm로 이후 하중이 급격히 감소하는 위치에서 급속히 성장하였다. 최대하중은 섬유방향에 대한 하중방향 각도  $\theta$ 가 커질수록 낮아지고 있으며 최대하중에서 발생하는 균열성장길이 또한 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 초기 균열발생은  $\theta$ 가 작을수록 보다 높은 하중에서 발생됨을 알 수 있었다. 이것은 방향 각이 클수록 균열발생저항이 크고 발생된 후 성장속도도 느리게 나타나는 것을 알 수 있다.  $\theta$ 가 30°인 경우는 균열이 0°, 45°의 경우와 다르게 직교하는 섬유방향에 따라 60°와 30° 두 가지의 경로로 성장할 수 있으나 실험 결과 30°의 방향으로 균열이 성장하였다. 또한 하중방향이 노치를 기준으로 45°인 경우는 균열진전방향이 초기에는 0°의 경우와 유사하게 수평방향으로 성장하다가 +45°와 -45°의 어느 한 쪽으로 균열이 성장하여 섬유를 절단하면 다음은 섬유소의 박리를 일으키며 직교섬유방향을 따라 성장하는 지그재그 형태를 가지는 특징을 보여 주었다.

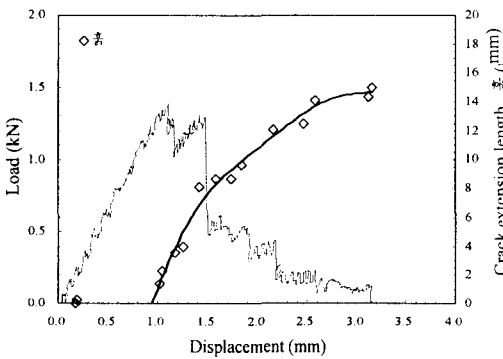
Photo. 1과 2는  $\theta=0^\circ, 45^\circ$ 인 경우의 균열진전양상을 보여주고 있다.



(a)  $\theta=0^\circ$



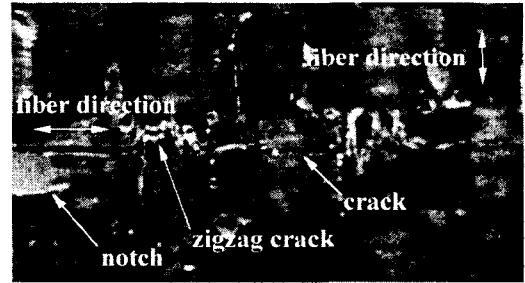
(b)  $\theta=30^\circ$



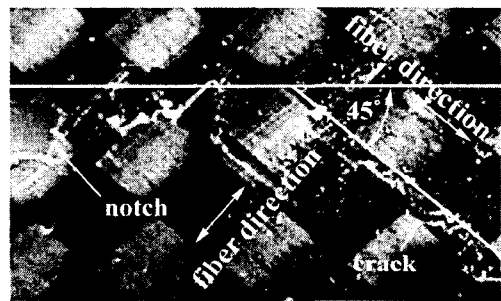
(c)  $\theta=45^\circ$

**Fig. 6** Load-displacement and crack extension length relationships acquired from a fracture test for CFRP

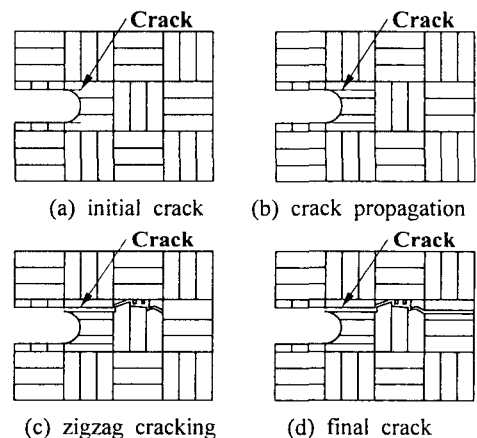
Fig. 7(a)~(d)는  $\theta=0^\circ$ 의 경우에 관찰된 균열 발생 및 진전의 결과를 모델화 한 것이다. Fig. 7(a)는 초기 균열의 형성을 나타낸 것으로 노치단을 기준으로 응력집중현상에 의해 미소 균열이 노치 선단방향으로 발생한다. 노치의 라운드 위치가 직물구조의 어떤 위치에 있는가에 따라서 초기



**Photo. 1** The crack propagating path in  $\theta=0^\circ$  type specimen



**Photo. 2** The crack propagating path in  $\theta=45^\circ$  type specimen



**Fig. 7** Schematic model of crack extension acquired from a fracture test

미소 균열길이가 다르며  $\theta=0^\circ$ 인 현재 시험편의 경우 Fig. 6(a)의 하중 0.52kN, 초기 균열길이가 약 0.378mm로 나타났다. Fig. 7(b)의 경우는 (a) 이후의 계속인 하중증가로 섬유방향이 하중방향과 교차하는 부분까지 초기 균열이 계속 성장하

는 것을 나타낸다. 이것은 노치방향을 따라 배향된 섬유다발의 진전저항이 낮기 때문이다. Fig. 7(c)의 경우는 하중방향과 일치하는 섬유배향이 노치방향과 직교된 부분으로 Fig. 7(b)에 비해 균열진전저항이 크므로 균열진전이 용이한 섬유배향으로 미소 성장 후 인접 섬유소를 절단하면서 지그재그로 성장한다. 이 부분에서는 다수의 섬유의 파단과 기지균열의 발생을 동반하여 복잡한 형태를 가지게 된다. Fig. 7(d)의 경우는 파괴실험의 종료까지로서 전체적인 균열은  $\theta=0^\circ$ 인 경우 노치방향을 따라 성장함을 나타낸다.

#### 4.2 AE에 의한 특성

Fig. 8은 평직구조 CFRP 복합재료의 인장시험시 얻어지는 AE 특성을 시간에 대하여 나타낸 것으로 10sec 동안 발생한 AE count의 누적합계와 하중을 동시에 나타내었다.

초기에는 AE count의 발생이 나타나지 않아 값이 최소화된 것을 알 수 있다. 인장시험 시작 이후부터 185sec까지 각 10sec 동안 발생한 누적 AE count는 선형 변화하여  $1.67 \times 10^3$ , 하중은 4.01kN이다. 하중이 30.4kN까지 계속 단조 증가함에 따라 누적 AE count 또한 더불어  $62.27 \times 10^3$ 까지 2차 곡선을 따라 증가하였고 이후 991.3sec에서 최종 파단되었다. 최종 파단 직전 발생한 누적 AE count는  $83.25 \times 10^3$ 까지 급상승하였다.

Fig. 9에서와 같이 응력에 따른 누적 AE count의 관계는 다음 관계식으로 구하여진다. 얻어진 식 (1)은 최소자승법으로 구하였다.

$$C = 0.0358S^2 + 0.9482S \quad (1)$$

여기서 C는 누적 AE count이며 S는 응력을 나타낸다.

Fig. 10(a), (b), (c)는 섬유배향(warp)에 대한 하중방향이 각각  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 인 CT 시험편을 이용하여 파괴시험시 10sec 동안 발생하여 얻어진 누적 AE count와 균열성장길이와의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 10(a)는  $\theta=0^\circ$ 의 경우 얻어진 균열성장길이와 누적 AE count의 관계를 나타낸다. 하중의 증가와 함께 균열단 주위의 미세균열이 선형적으로 서서히 성장하는 것을  $\theta=30^\circ$ 와  $45^\circ$ 의 경우에서 보다 확연히 알 수 있다. 이것은 4.1에서 언급한 바와 같이  $\theta=0^\circ$ 인 경우는 노치방향이 weft 섬유방향과 일치하므로 균열진전이 비교적 용이한 것에 기인한다. 이때 누적 AE count의 발생량은 320sec까지 155로 다소 낮은 값을 나타내고 있다. 320sec 이후 하중이 1.23kN에서 균열성장길이가 1.26mm로 성장하는 곳에서 AE count가 상승하는 것은 섬유의 파단이 기여함을 알 수 있다. 하중이 급격히 감소하는 지점인 438sec에서는 균열성장길이는 5.28mm까지 급성장하였으며 누적 AE count는  $7.33 \times 10^3$ 으로 상승하였다. 이것은 균열성장방향이 섬유배향과 동일한 것에 기인한 것으로 AE count가 섬유의 분리에 관여하기 때문인 것으로 여겨진다. 이후 500.1sec에서 한번 더 급성장한 후 파괴 종료시점인 655.1sec까지 비선형적으로 서서히 증가하여 최대 균열성장길이 11.86mm에서 최대 누적 AE count가  $28.00 \times 10^3$ 을 나타내었다. 하중이 급감하는 지점에서 상대적

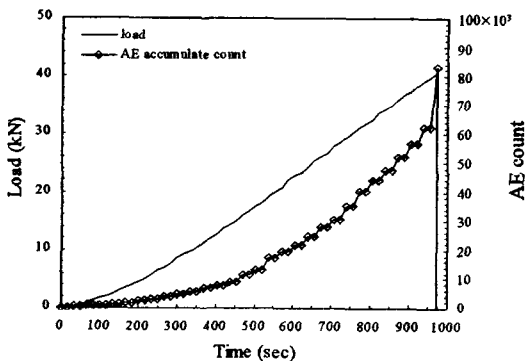


Fig. 8 The variation of load and AE accumulate count according to the time for tensile test

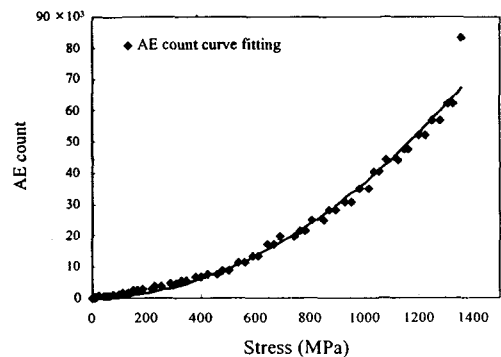


Fig. 9 The stress-AE count relationships for the woven CFRP specimen

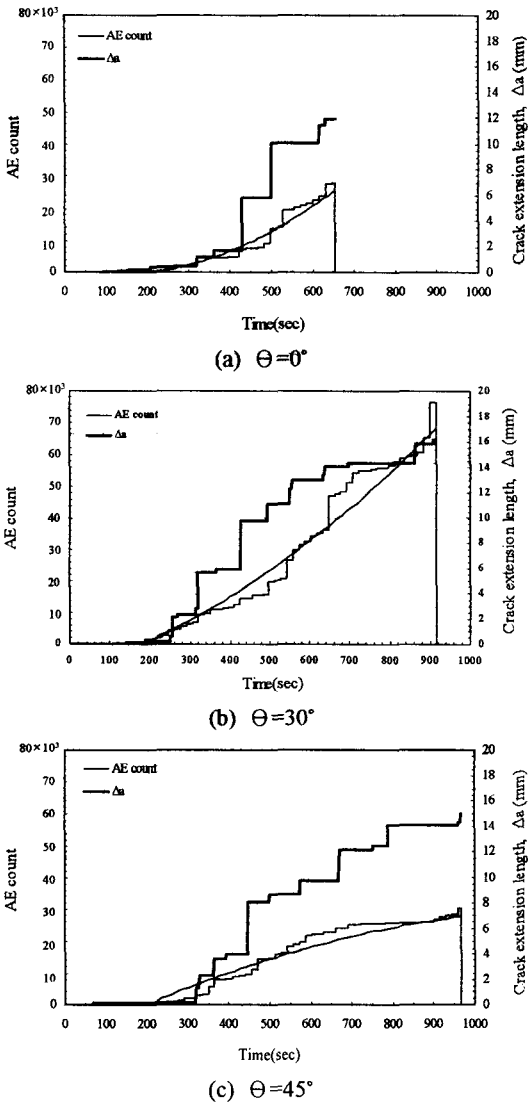


Fig. 10 AE count and crack extension variations for fracture test

으로 누적 AE count가 급상승한 후 다시 서서히 증가하는 것은 급상승하는 곳에 손상의 빈도가 많음을 알 수 있다.

$\Theta=30^\circ$ 일 때 하중의 증가와 함께 노치단 주위의 미세 균열의 발생이 어려워 0.13mm가 관찰된 후 0.919mm인 248sec에서 균열길이는 2.21mm로 노치방향에 대하여  $30^\circ$  방향으로 급성장하였다. Fig. 10(b)와 같이 이때 누적 AE count는  $43.31 \times 10^2$  정도까지 서서히 증가하고 있다. 이것은 초기 노치단의 위치가 노치단 방향과  $60^\circ$ 로 교차하는

섬유방향의 영향으로 균열발생이 곤란하다가 초기 균열 발생후  $30^\circ$  방향의 섬유소를 만나 급격히 성장한 것으로 섬유소의 분리의 영향으로 누적 AE count가 증가함을 알 수 있다. 이후 424sec까지 하중의 증가와 함께 누적 AE count도 단조 증가하고 있다. 하중이 급격히 감소하는 지점에서는 균열성장길이가 급성장하며 누적 AE count 역시 계면 기지파단, 섬유소의 분리에 의해 상승하고 있음을 알 수 있다. 이후 최종 실험종료시간인 910sec까지는 노치방향에 대하여  $30^\circ$ 의 방향으로 섬유파단, 섬유소 분리 및 계면을 따른 기지파단을 발생시키면서 16.13mm로 균열이 성장하였으며 누적 AE count는  $76.64 \times 10^3$ 까지 상승하였다.  $\Theta=30^\circ$ 인 경우  $0^\circ$ 의 경우에 비해 AE count량이 크게 나타났으며 이것은 균열성장에 따른 섬유파단이나 기지균열의 손상이 빈번함으로 인해 AE count량 또한 많이 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 10(c)는  $\Theta=45^\circ$ 의 경우를 나타내며,  $0^\circ$ 와  $30^\circ$ 의 경우와 유사하게 하중의 증가와 함께 노치단의 주위에서 미세균열이 섬유소파단을 초래하는 초기부터 균열성장이 현저한 시점까지 누적 AE count의 발생이 거의 없다가 이후 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 하중선 변위가 1.04mm인 328sec에서 하중은 1.35kN까지 도달하지만 이때 누적 AE count는  $29.96 \times 10^2$  정도까지만 증가하였다. 이후 균열성장과 함께 누적 AE count는 전체적으로 완만히 증가하고 있다. 하중이 급격히 감소하는 지점 즉, 균열성장길이가 급성장하는 위치에서는 누적 AE count 역시 급상승하고 있으며 최종 실험종료시간인 967sec에서 균열성장길이는 14.94mm로 누적 AE count는  $30.30 \times 10^3$ 까지 상승하였다.

$0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 전체적 누적 AE count의 변화 경향을 볼 때  $0^\circ$  및  $30^\circ$ 의 경우는 상승속도가 점점 증가하는 포물선 경향을 나타내며,  $45^\circ$ 의 경우는 상승속도가 점점 감소하는 포물선 형태를 변화함을 나타내고 있다.

Fig. 11은 인장시험 동안 획득된 AE 특성 중 시간에 대한 AE 진폭과 하중과의 관계를 나타낸다. 인장시험 초기에 지그에 의해 시험편이 하중을 받으면서 진폭의 상승을 가져왔으나, AE count나 event 등 다른 AE 특성값의 변화가 나타나지 않으므로 시험편의 초기 손상은 없는 것으

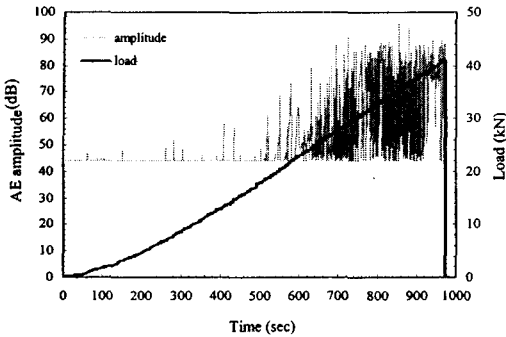


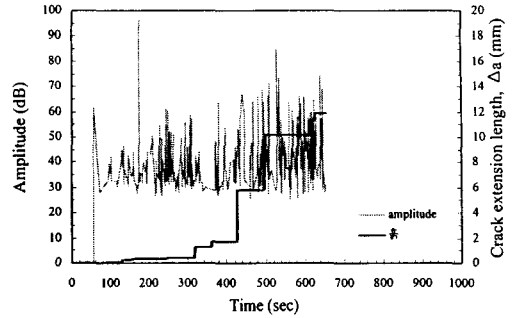
Fig. 11 The load and AE amplitude for tensile test

로 판단된다. 519sec까지 평균 AE 진폭은 45dB로 발생빈도가 적으며 이후 AE 진폭은 하중이 증가함에 따라 증가와 감소를 반복하는 발생빈도의 증가를 가져오면서 대체로 평균 진폭은 상승하고 있다. 최대 하중점에서 AE 진폭은 최대 96dB로 주어졌다.

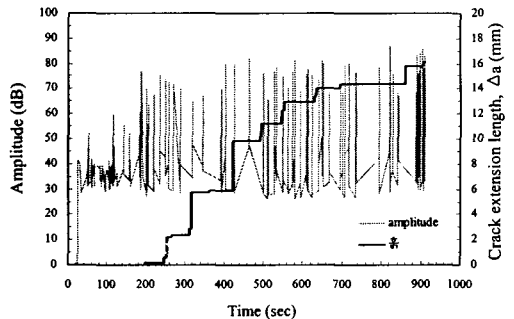
Fig. 12(a), (b), (c)는 파괴시험 동안 획득된 시간에 대한 AE 진폭과의 변화를 균열성장길이와 동시에 나타낸 것이다.

Fig. 12(a)는  $\theta=0^\circ$ 의 CT 시험편에서 파괴시험 시 획득된 AE진폭과 균열성장길이와의 관계를 나타낸다. 초기 51.15sec에 발생하는 AE 진폭은 61.5dB으로써 미소 균열발생 직전의 시험편 내부의 초기 손상을 나타낸다. 102.1sec에서 AE 진폭은 42dB를 나타내며 초기 균열이 발생하였다. 균열이 성장함에 따라 AE 진폭은 평균 30dB에서 45dB 사이에서 증가와 감소를 하다가 175.58sec에서 최고 96.6dB로 급증하였다. 이것은 초기 균열발생후 균열이 섬유소를 분리하거나 기지의 파단에 의해 성장함에 따라 저진폭의 분포가 나타나며 섬유소의 절단을 동반하는 경우에 소수의 고진폭이 발생하는 것으로 여겨진다. 또한 균열이 성장하는 지점에서 AE 진폭 역시 상승함을 알 수 있으며 균열이 급성장하기 이전 발생하는 AE 진폭의 상승은 성장균열 뒤 wake지역의 섬유 파단 및 기지균열 등의 발생에 의한 것으로 여겨진다.

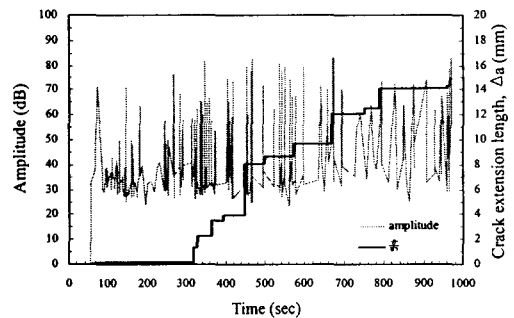
Fig. 12(b)는  $\theta=30^\circ$ 의 CT 시험편에서 파괴시험 시 획득된 AE 진폭과 균열성장길이를 나타낸다. 초기 AE 진폭발생은 25.27sec에서 41.5dB의 크기를 나타내었다. 이때 외부균열발생은 관찰되지 않았으므로 내부손상에 의한 영향으로 여겨진다.



(a)  $\theta=0^\circ$



(b)  $\theta=30^\circ$



(c)  $\theta=45^\circ$

Fig. 12 The relationships AE amplitude and Crack extension length of fracture test

초기 균열발생은 208.1sec에서 나타나며 이때 75.6dB AE 진폭크기를 나타내었다. 최대 AE 진폭은 821.84sec에서 최고 87dB로 증가하였다.  $\theta=0^\circ$ 의 경우에 비해 70dB이상의 고진폭이 많이 발생하는 것은 균열성장방향에 지배를 받는 것으로 기지의 손상과 더불어 섬유소파단이 많다는 것을 나타낸다.

Fig. 12(c)는  $\theta=45^\circ$ 의 경우로서  $\theta=30^\circ$ 의 경우와 유사한 결과를 나타내고 있다. 초기 균열발생은 56.20sec에서 발생되었으며 AE 진폭은 32.7dB



로 다소 낮은 값을 보이며 이것은 노치단에 가까운 기지균열의 발생에 기인한다. 균열이 성장함에 따라 역시 30°의 경우와 같이 70dB 이상의 고진폭이 많이 발생하며 균열진전방향의 영향력으로 인한 고진폭이 보다 많이 발생되고 있음을 파단빈도에 의해 알 수 있다. 이것은  $\theta=30^\circ$ 의 경우보다 섬유소를 파단하는 빈도가 많은 노치방향에 대해 45°방향으로 균열이 진전됨을 나타낸다.

이와 같이 AE 진폭은 AE count에 비해 비교적 정확하게 초기 내부 손상을 검출할 수 있으며 빈도를 통해 손상의 정도를 알 수 있다. 따라서 AE count와 AE 진폭을 이용하여 재료손상 크기와 파단 빈도 및 균열성장거동을 평가할 수 있어 AE 특성치는 유효한 재료거동 평가수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

섬유배향에 대한 하중방향이 0°, 30° 및 45°인 평직구조의 CFRP 적층복합재료에 대하여 전형적인 인장시험과 파괴시험을 수행함과 동시에 AE 특성치를 계측하여 균열발생과의 관계에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험에 의한 응력-변형률 선도가 파단까지 선형적인 관계를 보이다가 파단강도 1.546MPa, 최대 변위 3.2mm에서 급작 파괴현상을 나타내었다. 이때 탄성계수 E는 149.3GPa이 얻어졌다.

(2) 초기 균열  $\theta$ 가 작을수록 높은 하중에서 발생되어 균열의 진전방향은 섬유방향과 동일한 방향으로 성장하였으며, 최대하중까지 증가한 이후 하중이 급감하는 위치에서 급성장을 하였다.

(3) 파괴시험에서 AE count 발생량은 0°, 30°, 45°의 경우 적어도 누적 AE count 수가  $23.33 \times 10^2$  정도에서 1mm이상의 균열이 성장하였다. 0°, 30°, 45°의 각각에 대한 최대 균열성장길이는 11.86mm, 16.13mm, 14.94mm이며 대응되는 누적 AE count 발생량은 각각  $28.00 \times 10^3$ ,  $76.64 \times 10^3$  및  $30.30 \times 10^3$ 으로 얻어졌다.

(4) 균열성장길이가 급상승하는 위치에서 누적 AE count 발생은 섬유소의 분리, 파단 및 기지의 파단에 의해 급상승하였으며 0°, 30°의 경우는 최대치를 가지는 포물선 변화, 45°의 경우는 최소치를 가지는 포물선 변화를 하였다.

(5) 초기 균열발생시 AE 진폭은 다소 낮은 값을 보이나 균열이 성장함에 따라 70dB이상의 고진폭이 발생되었고 최대 AE 진폭은  $\theta=0^\circ$  CT 시험편에서 96.6dB로 나타났다. 또 섬유방향에 대한 하중방향의 영향으로 섬유소의 파단빈도가 높은 방향에서 보다 큰 고진폭이 발생되었다.

### 참고문헌

- (1) Seung Hwan, Lee. and Hiroshi, Noguchi, 2002, "Tension-Tension Fatigue Strength Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Tissue," *Transactions of the JSME(A)*, Vol. 68, No. 671, pp. 1054~1062.
- (2) Lawcock, G. L. Ye and Mai, Y., 1997, "Progressive Damage and Residual Strength of a Carbon Fiber Reinforced Metal Laminate," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 762~787.
- (3) Yoshiyuki Tomita and Kojiro Morioka, 1997, "Effect of lay-up sequence on mechanical properties and fracture behavior of advanced CFRP laminate composite," *Materials Science and engineering, A* 234-236, pp. 778~781.
- (4) Nidal Alif, Lief A. Carlsson, and Louis Boogh, 1998, "The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode delamination resistance of woven glass and carbon composites," *Elsevier Science*, pp. 603~611.
- (5) Katsunobu Nonaka, Kunihiko Okada, Kazuro Kageyama and Kazuyoshi Sekine, 1993, "A Study on Nondestructive Evaluation of Damage Development in Carbon/Epoxy Laminates by Means of AE Analysis and Infrared Thermal Imaging Stress Analysis," *Transactions of the JSSE*, Vol. 32, No. 4, pp. 233~241.
- (6) H. J. Chun, I. M. Daniel, 1998, "AE Characteristics on Damage and Failure Mechanisms of Crossply Composite Laminates," *KSCM*, Vol. 11, No. 5, pp. 14~21.
- (7) Ni, Q, 1997, "Fracture Behavior and Acoustic Emission in Bending Test on single-fiber Composites," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, p. 779.

- (8) Chow, T. M. Hutchins, D. A. and Mottram, J. T., 1993, "Simultaneous Acoustic Emission and Ultrasonic Tomography Imaging in Anisotropic Polymer Composite-Material," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 94, pp. 944~953.
- (9) S. Barre, Benzeggagh M. L., 1994, "On the Use of a Acoustic Emission to Investigate Damage Mechanisms in Glass-Fiber-Reinforced Polyopylene," *Composite Science and Technology*, Vol. 52, pp. 369~376.
- (10) E. Jinen, Q. Q. Ni and H. W. Li, 1996, "The Behave of Crack Propagation and Acoustic Emission in CFRP Fabric Mano-Lamina Composite Made in Situ SEM," *Transactions of the JSME(A)*, Vol. 62, No. 602, pp. 2207~2215.
- (11) Ely TM, Hill EK, 1995, "Longitudinal Splitting and Fiber Freakge Characterisation in Graphite/epoxy Using Acoustic Emission Data," *Material Eval*, pp. 288~294.
- (12) Standard Test Method for "Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," 2000, *ASTM D3039*.
- (13) Standard Test Method for "Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," 1999, *ASTM E647*.