

# 하중방향에 따른 직물구조 CFRP의 손상에 대한 AE특성

윤유성 · 이승현 · 권오현\*

부경대학교 대학원 안전공학과 · \*부경대학교 안전공학과

## 1. 서 론

최근 선진국에서 차세대전투기와 고속철도차량 및 자동차 동체 등 경량화를 위해 복합재료의 사용범위가 증가되고 있다. 특히 강화재로서 섬유를 직물구조의 형태를 이용한 직물구조 CFRP 복합재료는 일방향 섬유에 비해 변형능력이나 기계적 특성이 우수하여 철근 콘크리트 구조물의 보강제와 같은 구조물 등에 까지 그 사용이 확대되고 있다. 하지만 직물구조 CFRP 복합재료는 내부의 손상형태나 위치를 파악하기가 어렵고 직물구조의 복잡한 강화구조를 가지기 때문에 그 역학적 손상거동과 명확한 파괴거동 해석수법은 확립되어 있지 않다. 따라서 많은 연구자에 의해 연구가 이루어지고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 직물구조 CFRP 복합재료의 파괴거동 해석을 위해 본 연구에서는 AE(음향방출)을 이용하여 파괴기구 규명에 이용하였다. AE에 의한 검사는 실시간으로 재료 및 구조물의 손상거동을 파악할 수 있는 유용한 수단으로 초기결함의 검출 및 파괴기구 규명에 이용되고 있다.

Nidal 등<sup>2)</sup>은 직물구조 유리 및 탄소복합재료에 대한 모드 I 박리저항의 균열진전방향과 직물구조형태의 영향에 대해 조사하였다. 복합재료에 대한 AE의 연구는 Barre 등<sup>3)</sup>이 GFRP 재료에 대하여 음향방출신호 진폭이 각 대응되는 손상형태에 따라 변화하는 것을 보고하였고, 또한 균열진전거동과 AE 특성과의 관계는 Jinen 등<sup>4)</sup>이 보고하였으나 GFRP 단층판의 경우에 한하였으며 또한 파손기구에 대해 충분히 설명하지 못하였다. 이와 같이 직물구조의 CFRP 복합재료에 대한 파손기구와 AE특성과의 관계는 아직 불명확한 실정이다. 따라서 본 연구는 직물구조 CFRP 복합재료의 인장 및 파괴실험을 통해 기계적 특성평가와 하중 방향의 변화에 대한 균열거동과 AE특성을 비교 검토하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 실험 재료

직물구조 탄소섬유 프리프레그(Plain Woven Carbon Prepreg)는 국내 한국카본(주)에서 생산되는 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)를 사용하였다. 적층판은 6ply로 D사의 열성형기(Hot press)에서 성형온도와 게이지 압력을 각각 140℃, 60kg/cm<sup>2</sup>에서 60분간 성형하여 최종 두께가 약 1mm로 제작하였다.

인장시험편은 다이아몬드 휠 커터로 ASTM D-3039-00에 참조하여 절단가공 하였으며, 아랄다이트(araldite)로 시험편 끝단에 알루미늄 탭을 부착하여 인장시험시 시험기의 그립으로부터의 손상을 방지하였다. CT시험편은 ASTM-E647-93 주장법에 따라 Fine wheel cutter를 부착한 만능자동정밀시험절단기에서 8mm로 노치를 삽입하여  $a_0/W=0.4$ ,  $a_0/W=0.5$ ,  $a_0/W=0.6$ 이 되게 하였으며, 또한 하중방향에 대하여 0°, 30° 및 45°의 방향으로 변화시켜 제작하였다. 여기서  $a_0$ 는 초기균열길이이며  $W$ 는 시험편 폭을 나타낸다. Fig. 1 (a)와 Fig. 1 (b)와 각각 인장시험편과 CT시험편의 개략도를 나타낸다.

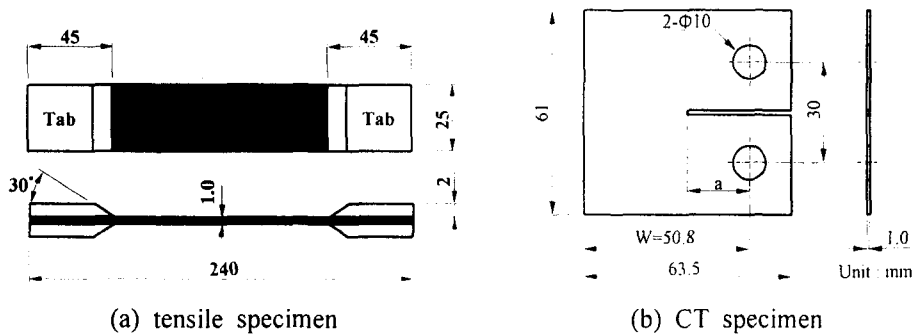


Fig. 1 Specimen configurations

## 2.2 실험방법

적물구조 CFRP 복합재료의 기본 재료 물성치인 탄성계수와 인장강도 등의 측정은 상온에서 H사의 만능동적시험기(50kN)를 사용하였으며 ASTM D3039-00에서 추천하고 있는 방법인 0.2mm/min 변위제어로 인장시험을 행하였다. 또한 CT시험편을 이용한 인장파괴시험시 1mm 정도의 박판으로 인한 파괴실험 동안의 좌굴을 방지하기 위해 자체 제작한 지그를 부착하여 좌굴을 최소한으로 방지하였다.

음향방출은 P사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템에 의해 측정하였다. 센서는 공진주파수가 150kHz인 R15센서로 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였고, Threshold는 Fixed로 인장실험에서 44dB, 파괴실험에서 48dB로 하였다. 실험 중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. 파괴시험 동안 균열발생 및 진전거동과 기지 및 섬유 표면손상과정을 이동식 현미경(Japan, N사)을 사용하여 균열발생지점을 직접 눈으로 관찰하여 일정균열성장 지점에서 성장길이를 이동식 현미경에서 PC로 저장하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 인장 및 파괴실험

적물구조 CFRP 복합재료의 전형적인 인장실험에 대한 결과로서 하중-하중선 변위 선도를 Fig. 2에 나타낸다. 하중-하중선 변위 선도는 거의 파단시까지 안정적으로 선형

적인 관계를 나타낸다. 최대파단하중은 평균 41.2kN으로 변위가 약 3.2mm까지 성장하였다.

파괴실험은 CT시험편을 사용하였다. 진전 균열길이 측정은 이동식 현미경에 의해 직접 관찰, 측정하였으며, 측정된 균열성장길이는 시편의 한 방향에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 시편 두께가 1mm로 비교적 박판이므로 반대 면과 균일하게 성장하는 것으로 간주하였다.

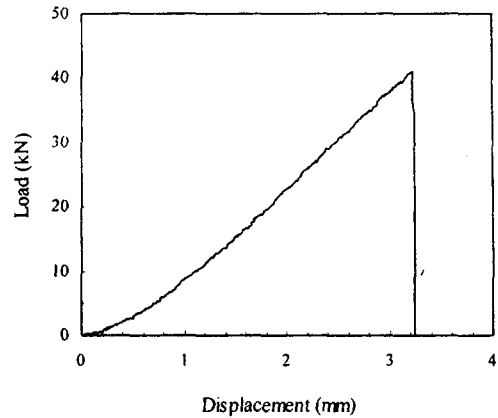


Fig. 2 A typical load-displacement curve acquired from a tensile test for CFRP

Fig. 3의 (a)~(i)는 하중방향을 각각 0°, 30°, 45°에서의  $a_0/W=0.4$ ,  $a_0/W=0.5$ ,  $a_0/W=0.6$ 에서의 인장과파괴실험에 의하여 구하여진 하중-하중선 변위 및 균열성장길이와의 관계를 나타낸

다. Fig. 3의 (a)~(c)는 하중방향이 0°에서  $a_0/W=0.4$ ,  $a_0/W=0.5$ ,  $a_0/W=0.6$ 인 경우로서, 초기에 하중이 가해짐에 따라 비교적 선형적인 변화를 나타내는 약 0.5kN에서 두께 8mm의 Fine wheel cutter의 노치를 삽입한 라운드 양 끝 부분에서 약 0.4mm 전후의 미세 균열이 초기 성장하는 것을 관찰할 수 있었고, 이후 하중이 증가하여 Fig. 3 (a)  $a_0/W=0.4$ 인 0°에서 최대 하중 2.1kN까지 증가한 이후 하중의 급격히 감소하는 지점에서 균열은 급속히 성장하며 6.94mm까지 상승하여 직접 눈으로도 확인될 수 있는 정도의 균열로 성장하였다. 이후 하중이 급속히 재감소하는 위치에서 성장균열길이는 16.3mm까지 급속히 상승하였으며 최종 22.75mm까지 성장하였다. Fig. 3 (a) 이외의 Fig. 3 (b)~(i)에서도 Fig. 3 (a)와 유사하게 최대하중 이후 하중이 감소하는 지점에서 균열이 급성장함을 알 수 있다.

0°, 30°와 45°의 하중방향에 대해서는  $a_0/W$ 의 변화와 관계없이 하중방향 0°의 경우에서 균열성장방향이 0°와 90°로 두 가지의 경로를 따라 지그재그로 성장하였으며 균열 성장길이가 같은 하중선 변위내에서 0°의 경우가 대체로 크다는 것을 알 수 있었다. 이것은 0°방향이 기지와 섬유와의 분리에 기인한 것으로 판단된다. 또한 최대하중은 하중방향각도가 커질수록 높아지고, 초기 균열길이는 하중방향 각이 적을수록 크게 발생됨을 알 수 있었다. 이것은 하중방향 각이 클수록 균열발생저항이 커지만 일단 발생되면 성장속도가 빠르게 나타난다고 생각된다. 하중방향이 30°인 경우는 0°와 같이 균열이 하중방향에 따라 30°와 60° 두 가지의 경로로 성장할 수 있으나 실험 결과 30°의 각도로 균열이 성장하는 것을 알 수 있었고, 또한 하중방향이 노치를 기준으로 45°인 경우는 균열진전방향이 +45°와 -45°의 어느 한 쪽이 균열이 성장하면 다른 한 쪽이 성장하는 지그재그 형태를 가지는 특징을 보여주고 있으며 여기에 대한 구체적인 모델화는 차후 연구에서 보고될 것이다.

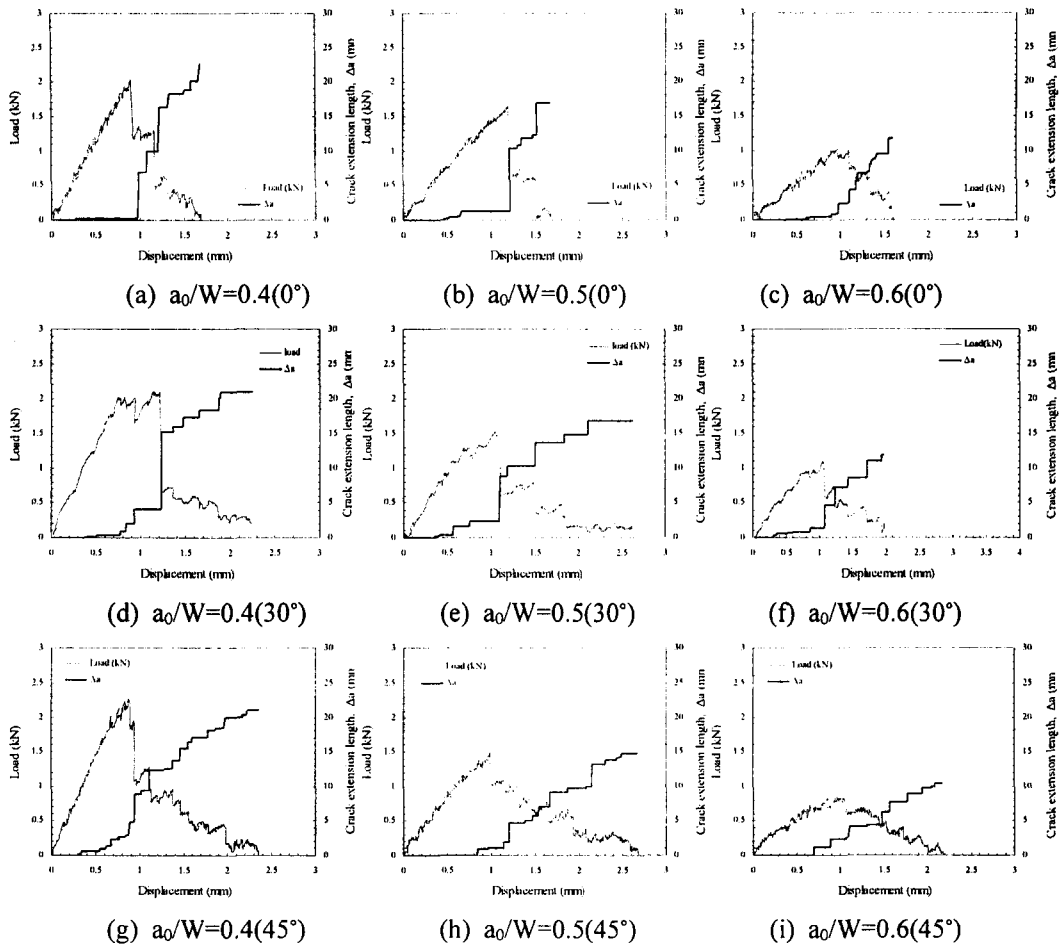


Fig. 3 Load-displacement and crack extension length relationships acquired from a fracture test for CFRP

### 3.2 AE에 의한 특성

Fig. 4는 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 인장실험시 얻어지는 AE특성으로 10sec 동안 발생한 AE count의 누적합계와 하중과의 관계를 나타낸 것이다. 초기에 하중이 가해짐에 따라 AE count의 발생이 없는 것으로 잡음은 최소화된 것이라 판단된다. 인장실험 시작 이후 4.01kN 하중인 185sec까지 각 10sec 동안 발생된 누적 AE count는 완만히 증가하여  $1.67 \times 10^3$ 에 이르렀다. 하중의 지속적인 증가로 약 19.4kN까지 서서히 누적

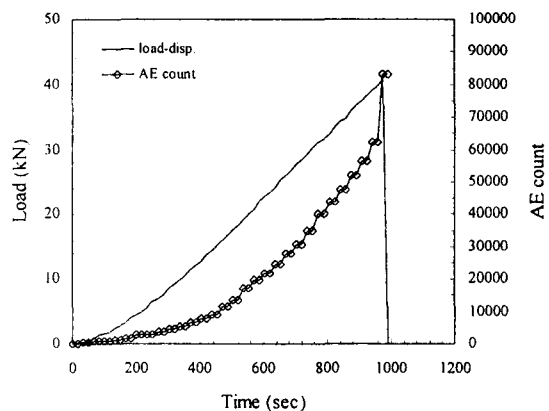


Fig. 4 Load-AE count relationship of tensile specimen

AE count가 증가속도를 높이다가 이후 30.4kN까지 AE count 또한 더불어  $34.96 \times 10^3$ 까지 하중증가속도와 거의 동일하게 선형적으로 증가하였고 이후 991.3sec에서 최종 파단 되었으며 최종 파단 직전인 957.7sec까지 발생된 누적 AE count가  $62.27 \times 10^3$ 에서  $83.25 \times 10^3$ 까지 급상승하였다.

Fig. 5의 (a)~(i)는 하중방향에 대하여 각각  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 를 가지는  $a_0/W=0.4$ ,  $a_0/W=0.5$ ,  $a_0/W=0.6$ 에서의 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 인장과파괴실험시 10sec 동안 발생하여 얻어진 누적 AE count와 균열성장길이와의 관계를 나타낸 것이다.

AE 특성 중 AE count는 재료 및 구조물의 손상의 빈도를 나타내는 척도로 이용될 수 있으며, (a)의  $a_0/W=0.4$   $0^\circ$ 의 경우 초기 균열단 주위의 미세균열이 성장하는 315초까지는 누적 AE count는 667로서 비교적 적은 값을 나타내고 있으며 이후 최대인장강도를 나타내는 2.0kN에서 누적 AE count는 3000으로 급상승하여 하중이 급격히 감소하는 지점에서 급작스러운 균열성장에 대해 손상의 빈도가 많다는 것을 알 수 있다. 이후 파괴 종료시간인 548.1sec까지 선형적으로 증가하여 최대 누적 AE count가  $16.0 \times 10^3$ 이며 최대 균열성장길이는 22.75mm이다. 또한 하중방향에 대한  $0^\circ$ 에 있어서는 섬유방향이  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 방향으로 위치하므로 섬유파단에 의한 AE count 발생량과 섬유와 기지의 분리에

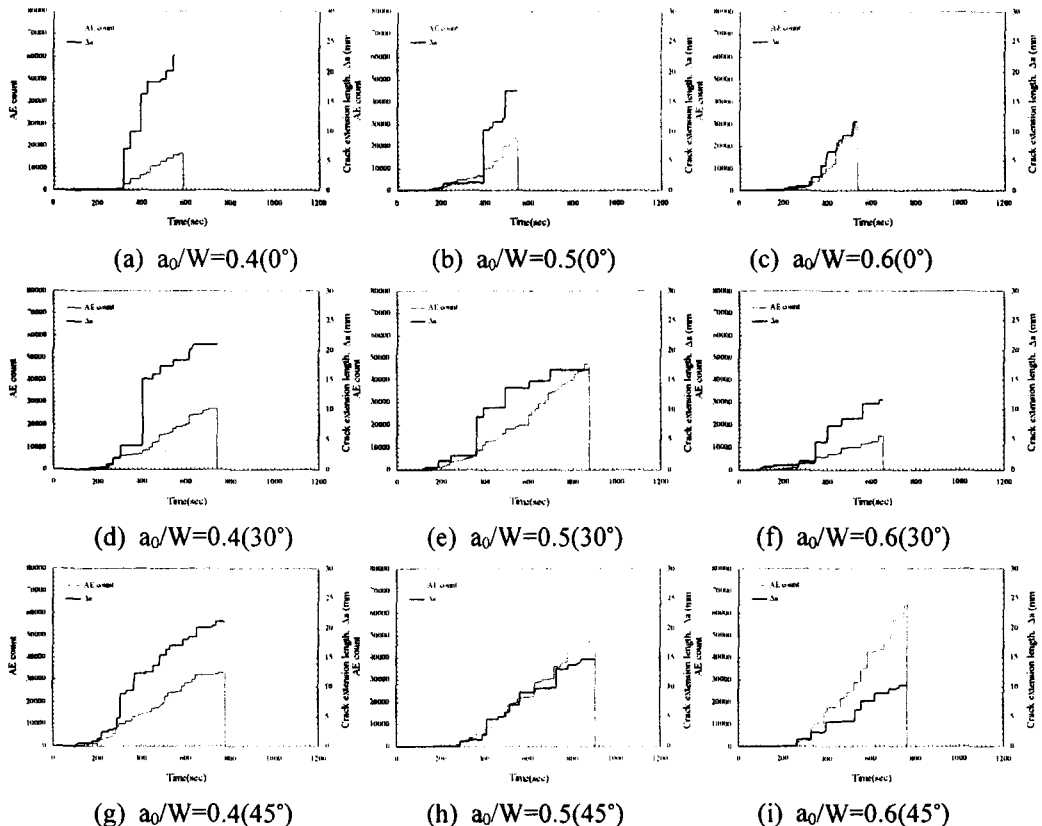


Fig. 5 Load-AE count relationships of fracture test

의한 AE count가 확연히 구분되는 구조를 가지므로 섬유파단보다는 섬유와 기지의 분리에 기인하여 하중방향 30°와 45°에 비해 가장 작은 AE count 량을 보이는 것으로 생각된다. 또한 하중방향이 노치를 기준으로 45°인 경우는 섬유파단과 섬유 기지간의 분리가 동시에 발생할 수 있는 구조를 가지며 균열진전방향이 +45°와 -45°의 어느 한 쪽이 균열이 성장하면 다른 한 쪽이 성장하는 지그재그 형태를 가지는 특징을 가지므로 AE count의 발생량이 많은 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

직물구조 CFRP 복합재료의 인장 및 파괴실험을 통해 기계적 특성평가와 하중 방향의 변화에 대한 균열거동과 AE특성을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험에 의한 하중-하중선 변위 선도는 거의 파단시까지 선형적인 관계를 나타내었으며 최대파단하중은 평균 41.2kN으로 변위가 약 3.2mm까지 성장하였다.

(2) 균열의 진전량은 섬유방향에 지배를 받은 것으로 판단되나 진전방향은 섬유방향과 동일한 방향으로 성장하였다.

(3)  $a_0/W=0.4$ 의 0° 하중방향에서 초기 균열단 주위의 미세균열이 성장하는 315초까지는 누적 AE count는 667이며 최대인장강도가 2.0kN에서 누적 AE count는 3000으로 급상승하였으며 파괴 종료시간인 548.1sec까지 최대 누적 AE count가  $16.0 \times 10^3$ , 최대 균열성장길이는 22.75mm로 하중이 급격히 감소하는 지점에서 급작스러운 균열성장에 대해 손상의 빈도가 많음을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Ping Tan, Liyang Tong, G. P. Steven and T. Ishikawa, "Behavior 3D orthogonal woven CFRP composites, Part I Experimental investigation", Composites : part A : app sci manu, Vol. 31, pp. 259~271, 2000.
- (2) Nidal A., Lief A. C., and Louis B., "The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode delamination resistance of woven glass and carbon composites", Elsevier Science, pp. 603~611, 1998.
- (3) S. Barre, Benzeggagh M. L., "On the use of a acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber-reinforced polypropylene", Composite Science and Technology, Vol. 52, pp. 369~376, 1994.
- (4) E. Jinen, Q. Q. Ni and H. W. Li, "The behave of crack propagation and acoustic emission in CFRP fabric mano-lamina composite made in Situ SEM", JSME(A), Vol. 62, No. 602, pp. 2207~2215, 1996.