

평직구조 CFRP 적층판 복합재의 강도 및 균열진전특성에 대한 AE 평가

윤유성 · 권오현[†]

부경대학교 안전공학과

(2003. 9. 18. 접수 / 2003. 12. 4. 채택)

AE Evaluation on Strength Characteristic and Crack Propagation Behavior of Plain Woven CFRP Composite

Yu-Seong Yun · Oh-Heon Kwon[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received September 18, 2003 / Accepted December 4, 2003)

Abstract : The mechanical strength and crack propagation of plain woven carbon fiber fabric laminate composites are examined by acoustic emission(AE). AE signals are measured during the tensile test and fracture tests. Thus, the relationship between AE signal and load-displacement curves and crack extension length are shown. Also the fracture mechanisms in terms of AE characteristics are discussed in viewpoint of crack propagation behavior.

Key Words : plain woven CFRP, crack propagation, acoustic emission

1. 서 론

최근 선진국에서 차세대전투기와 고속철도차량 및 자동차 동체 등 경량화를 위해 복합재료의 사용 범위가 증가되고 있다. 특히 강화재로서 섬유를 직물구조의 형태를 이용한 직물구조 CFRP 복합재료는 일방향 섬유에 비해 변형능력이나 기계적 특성이 우수하여 철근 콘크리트 구조물의 보강제와 같은 구조물 등에까지 그 사용이 확대되고 있다. 하지만 결함의 종류와 사용환경에 따라서 직물구조 CFRP 복합재료에 미치는 손상의 정도는 크게 영향을 받는다. 직물구조의 복잡한 강화구조로 인하여 내부의 손상형태나 위치를 파악하기가 어렵고 역학적 손상거동평가와 명확한 파괴거동 해석수법은 확립되어 있지 않다¹⁾. 이러한 직물구조 CFRP 복합재료의 파괴거동 해석을 위해 본 연구에서는 AE(음향방출)을 이용하였다. AE법에 의한 비파괴적 검사는 구조물의 이상유무를 조기에 발견하고 실시간 주기

적으로 모니터링할 시스템에 적합하며, 저장탱크 및 고압탱크의 누설 및 그 누설부의 결함 위치 등의 검출에 사용된다. 또한 산업설비의 안전관리 등 여러 분야에서 재료 및 구조물의 손상거동을 파악할 수 있는 초기결함의 검출 및 파괴기구 규명에 유용한 수단으로 입증되고 있다²⁾.

복합재료에 대한 AE의 연구는 Barre 등³⁾이 GFRP 재료에 대하여 음향방출신호 진폭이 각 대응되는 손상형태에 따라 변화하는 것을 보고하였고, 또한 균열진전거동과 AE 특성과의 관계는 Jinen 등⁴⁾이 보고하였으나 GFRP 단층판의 경우에 한하였으며 Kageyama 등⁵⁾은 섬유방향을 변화시킨 직물 CFRP 적층판의 파괴인성치와 AE와의 관계를 제시하였으나 파손기구에 대해 충분히 설명하지 못하였다. 이와 같이 직물구조의 CFRP 복합재료에 대한 파손기구와 AE 특성과의 관계는 아직 불명확한 실정이다. 따라서 본 연구는 직물구조 CFRP 복합재료의 인장 및 파괴시험을 통해 기계적 강도특성평가와 하중방향의 변화에 대한 균열진전과 AE 특성을 비교 검토하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조를 나타낸다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

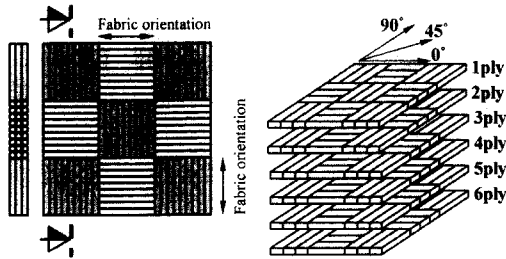


Fig. 1. Fabric texture orientation of plain woven CFRP laminate composite

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험 재료

실험재료로 사용한 직물구조 탄소섬유강화 프리프레그(woven carbon prepreg)는 국내 한국카본(주)에서 생산·시판되는 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)를 이용하였다. 프리프레그는 가로·세로 각각 250×250mm로 절단하여 6플라이(ply)로 적층하였다. 적층된 적층판은 성형판에 실리콘 오일 KS 707인 이형재를 바른 후 열성형기(hot press)에서 성형온도와 게이지 압력을 각각 140℃, 60kg/cm²에서 60분간 성형하였고 잔류응력 완화, 뒤틀림 방지 및 변형을 방지하기 위해 대기중에 1시간이상 보존하여 최종 두께가 1mm로 되게 제작되었다. 프리프레그의 화학적 성분은 Table 1에 나타낸다.

인장시험편은 Fig. 2(a)와 같이 ASTM D-3039⁶⁾에 참조하여 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 절단가공하였으며, 시험편 끝단은 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로 알루미늄 탭을 부착하여 인장시험시 시험기의 그립으로부터의 손상을 방지하였다. 파괴시험의 CT 시험편은 Fig. 2(b)와 같이 ASTM E-647⁷⁾ 추장법에 따라 Heiwa technica사의 만능자동정밀시편절단기에 휠커터를 부착하여 폭 8mm로 노치를 삽입하여 $a_0/W=0.4$, $a_0/W=0.5$, $a_0/W=0.6$ 이 되게 하였다. 여기서 a_0 는 초기균열길이이며 W 는 시험편의 폭을 나타낸다. 또한 하중방향에 대하여 0°, 30° 및 45°로 섬유방향(fabric orientation)을 경사시켜 절단·가공하였다.

Table 1. Chemical compositions of prepreg

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

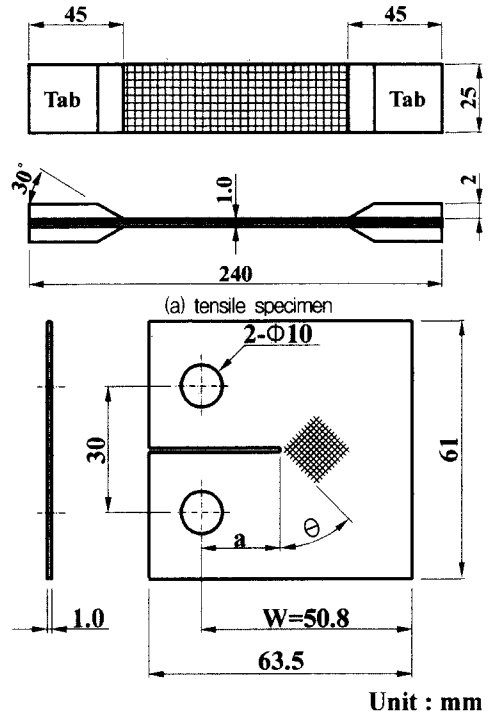


Fig. 2. Specimen configurations

2.2. 실험방법

재료의 탄성계수, 인장강도 등의 기본 재료 물성치를 측정하기 위한 인장시험은 상온에서 만능동적시험기(Hyunyang Co., 50kN)를 사용하였으며 ASTM D-3039에서 추천하고 있는 방법인 0.2mm/min 변위 제어로 행하여 졌다. 또한 CT 시험편의 파괴시험 동안 AE 측정시 잡음을 고려하여 알루미늄으로 좌굴방지용 지그를 자체 제작하여 부착함으로써 좌굴을 최소한으로 방지하였다.

진전균열길이 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.

AE 측정은 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC 시스템을 사용하였다. 센서는 R15 센서로 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였고, Threshold는 Fixed로 Threshold 값은 인장시험에서 44dB 그리고 파괴시험에서 48dB로 하였다.

실험 중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. 파괴시험

동안 균열길이측정은 이동식 현미경(Japan, N.O.W. Co.)을 사용하여 균열발생지점을 직접 눈으로 관찰하여 일정균열성장 지점에서 성장길이를 이동식 현미경에서 PC로 저장하였다. Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인장 및 파괴시험

직물구조 CFRP 복합재료의 전형적인 인장시험에 대한 결과로서 하중-하중선 변위 선도를 Fig. 4에 나타낸다. 하중-하중선 변위 선도는 거의 파단시까지 안정적으로 선형적인 관계를 나타낸다. 최대파단하중은 평균 41.2kN으로 변위가 약 3.2mm까지 성장하였으며 얻어진 재료특성치는 Table 2에 나타낸다.

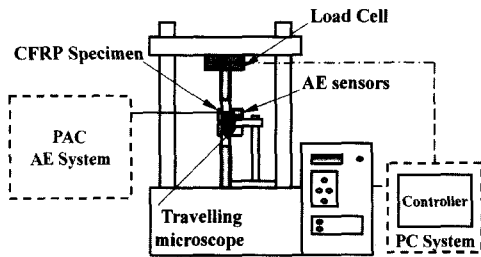


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus

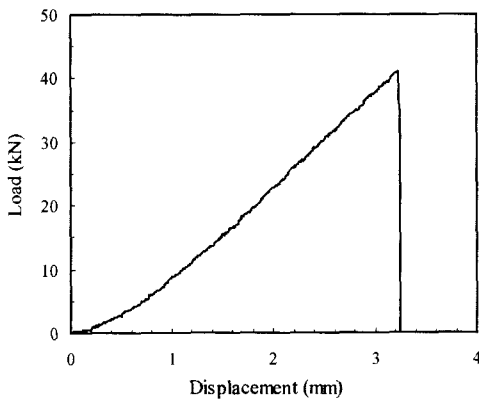


Fig. 4. A typical load-displacement curve acquired from a tensile test for CFRP

Table 2. Mechanical properties of tensile specimen

Tensile modulus, E	149.3 GPa
Ultimate strength, σ_u	1,546 MPa
Elongation	1.0 %
Poisson ratio, ν	0.09

파괴시험은 CT 시험편을 사용하였다. Fig. 5(a)~(i)는 하중방향에 대한 섬유방향에 각각 0°, 30°, 45°에서의 a_0/W 비를 0.4, 0.5, 0.6으로 변화시킨 파괴시험에서 구해진 하중-하중선 변위 및 균열성장길이와의 관계를 나타낸다. Fig. 5의 (a)~(c)는 하중방향에 대한 섬유방향에 0°에서 $a_0/W=0.4, 0.5, 0.6$ 인 경우로서, (a)인 $a_0/W=0.4$ 에서 초기에 하중이 가해짐에 따라 비교적 선형적인 변화를 나타내는 약 0.64kN에서 두께 8mm 휠커터의 노치를 삽입한 노치단 라운드 양 끝 부분에서 약 0.24mm의 미세 균열이 초기 성장하는 것을 관찰할 수 있었고, 하중이 증가하여 최대 하중 2.1kN까지 증가한 이후 급격한 하중감소 지점에서 균열은 급속히 성장하며 6.94mm까지 상승하여 직접 눈으로도 확인할 수 있는 정도의 균열로 성장하였다. 이후 하중이 급속히 재감소하는 위치에서 성장균열길이는 9.93mm까지 성장하였으며 최종 22.75mm까지 성장하였다.

Fig. 5(b)인 $a_0/W=0.5$ 의 경우도 초기 0.69kN까지 0.27mm의 미세 균열을 관찰할 수 있었고 최대하중인 1.66kN 이후 하중이 급감하는 지점에서 균열길이 10.36mm까지 급성장하여 최종 16.9mm까지 성장하였다.

Fig. 5(c)인 $a_0/W=0.6$ 에서도 a_0/W 비가 0.4, 0.5와 유사하게 초기 0.46kN까지 0.16mm의 미세 균열을 관찰할 수 있었고 최종 11.84mm까지 성장하였다. 하지만 하중의 급감소 차이는 0.4, 0.5에 비해 작아 급성장보다는 다소 완만하게 성장하였으며 30°, 45°의 경우에서도 유사하게 나타났다. 또한 $a_0/W=0.4$ 에 시는 리그먼트의 영향으로 $a_0/W=0.5, 0.6$ 에 비해 균열성장길이는 크며, 최대하중 역시 $a_0/W=0.4$ 에서 높게 나타났다.

균열성장은 하중방향에 대한 섬유방향에 0°의 경우에서 균열성장방향이 0°와 90°의 섬유소 방향에 따라 두 가지의 경로로 성장하였으며, 섬유방향에 30°인 경우는 30°와 60° 두 가지의 경로로 성장예측하였으나 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 형태의 특징을 보여주었다.

3.2. AE에 의한 특성

Fig. 6은 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 인장 시험시 얻어지는 AE 특성으로 10초 동안 발생한

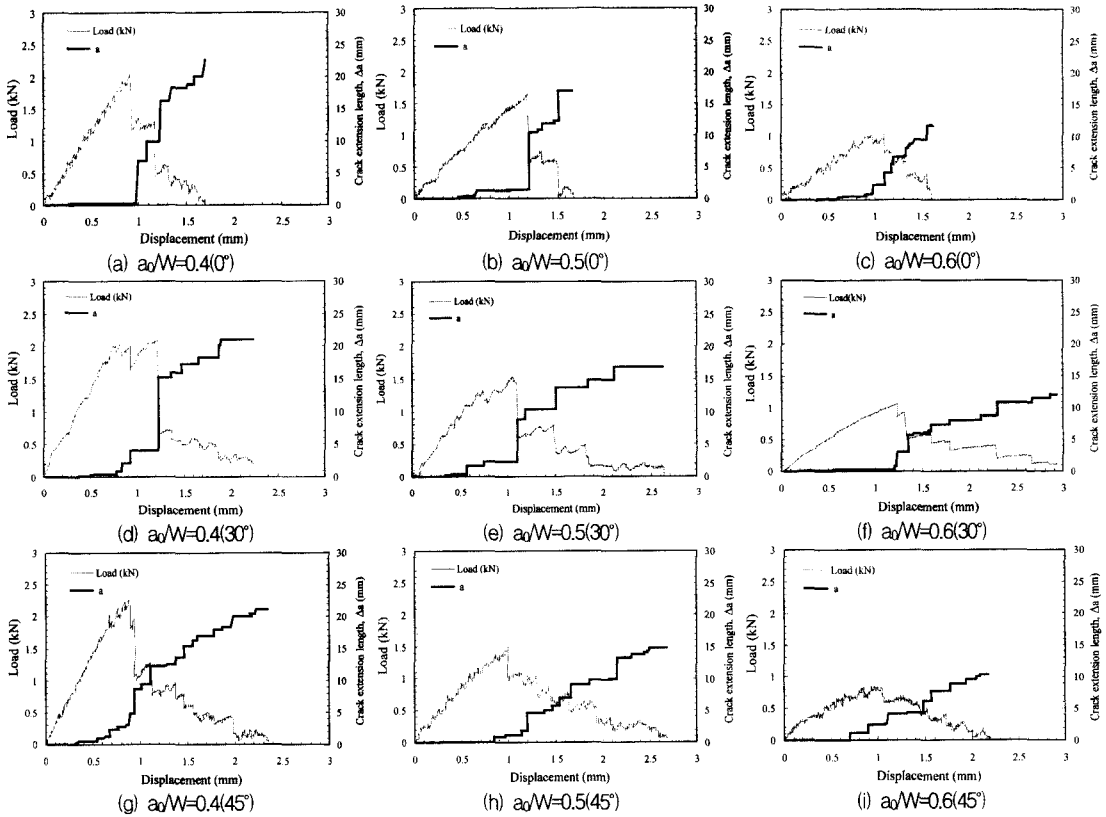


Fig. 5. Load-displacement and crack extension length variation of a fracture test

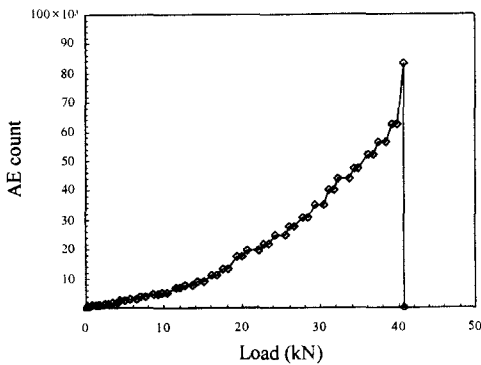


Fig. 6. Load-AE count relationship of tensile specimen

AE count의 누적합계와 하중과의 관계를 나타낸 것이다. AE 특성 중 AE count는 재료 및 구조물의 손상의 빈도를 나타내는 척도로 이용될 수 있으며, 초기 하중상태에서는 AE count의 발생이 없는 것으로부터 잡음은 최소화된 것이라 판단된다. 인장시험 시작 이후 4.01kN 하중인 185초까지 각 10초 동안 발생한 누적 AE count는 완만히 증가하여 1.67×10^3

에 이르렀다. 하중이 계속 증가함에 따라 누적 AE count가 약 19.4kN까지 서서히 증가하다가 이후 40.3 kN까지 누적 AE count는 2차 곡선의 형태로 증가하였다. 이후 파단 직전인 957.7초까지 발생한 누적 AE count는 62.27×10^3 에서 최종 파단지점인 991.3 초의 83.25×10^3 까지 급상승하였다.

Fig. 7의 (a)~(i)는 하중방향에 대하여 섬유방향 각도가 각각 0°, 30°, 45°를 가지는 $a_0/W=0.4, 0.5, 0.6$ 에서의 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 파괴시험시 10초 동안 발생하여 얻어진 누적 AE count와 균열성장길이와의 관계를 나타낸 것이다.

인장시험에서와 같이 파괴시험에서 초기에 하중이 가해짐에 따라 AE 특성 값들의 발생이 없는 것으로 잡음은 최소화된 것이라 판단된다. Fig. 7(a)의 $a_0/W=0.4, 0^\circ$ 의 경우 초기 균열단 주위의 미세 균열이 성장하는 0.24mm인 84초에서 누적 AE count는 333으로서 비교적 작은 값을 나타내고 있으며 이후 Fig. 5(a)에서 나타난 최대하중인 2.0kN에서 누적 AE count는 3000으로 급상승하여 하중이 급격히 감

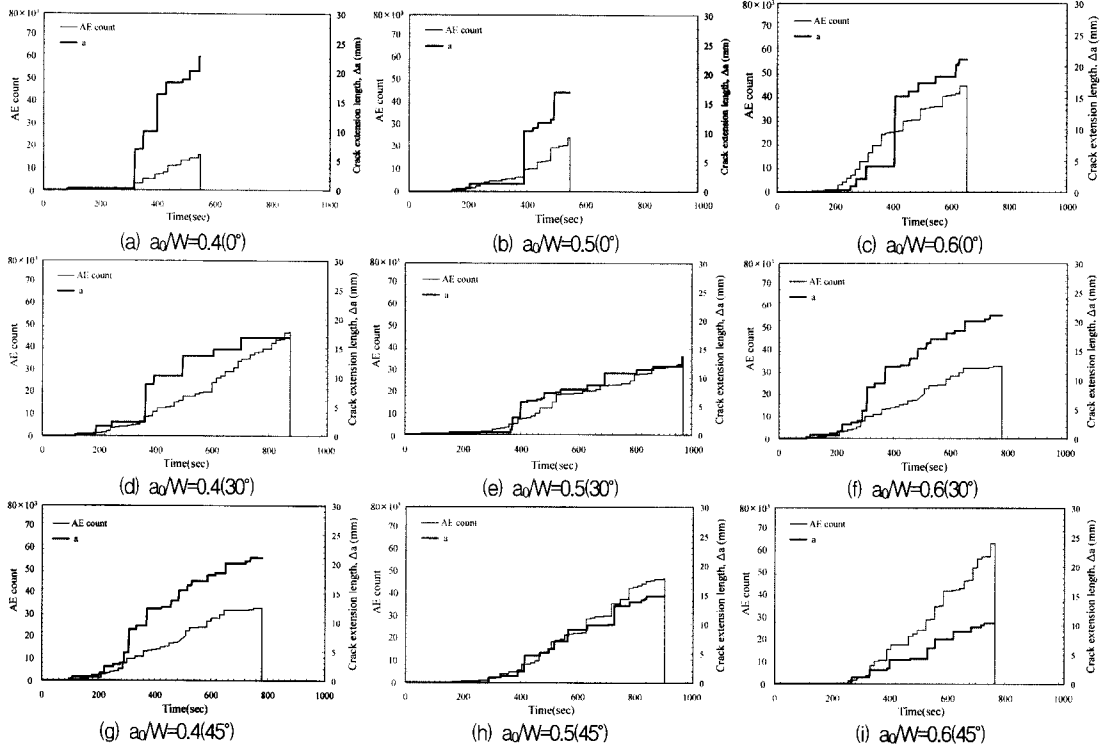


Fig. 7. AE count and crack extension length variation according to the time($a_0/W=0.4\sim 0.6$, $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)

소하는 지점에서 급작스러운 균열 성장에 대해 손상의 빈도가 많다는 것을 알 수 있다. 이후 파괴 종료 시간인 548.1초에서 최대 누적 AE count가 16.0×10^3 을 나타내었다.

Fig. 7(b)는 $a_0/W=0.5$ 의 0° 로서 미세 균열이 성장하는 0.27mm인 146초에서 누적 AE count는 333이며 최대하중인 1.66kN에서 누적 AE count는 10.3×10^3 이 되었다. 이후 파괴 종료시간인 548초에서 최대 누적 AE count가 24.3×10^3 을 나타내었다.

$a_0/W=0.6$ 의 0° 인 Fig. 7(c)는 최대하중인 1.04kN에서 누적 AE count는 8.0×10^3 이며, 이후 파괴 종료시간인 533.1초에서 최대 누적 AE count가 31.6×10^3 이었다.

또한 하중방향에 대한 섬유방향이 0° 의 경우에 $a_0/W=0.4, 0.5, 0.6$ 의 변화에 대한 누적 AE count의 변화는 a_0/W 비가 클수록 누적 AE count의 발생량이 많아졌다. 이것은 노치 이후에 남아있는 리거먼트와 균열성장속도의 영향으로 $a_0/W=0.4$ 의 경우 균열발생 저항이 커서 급작스러운 파괴현상이 가지는 반면 $a_0/W=0.6$ 에서는 균열발생 저항이 적어 균열성장이 느린 것에 기인하여 서서히 균열이 성장함으로

전체적으로 AE 발생량이 많은 것으로 판단된다. 또한 하중방향에 대한 섬유방향이 0° 와 90° 방향으로 위치하여 섬유파단에 의한 AE count 발생량과 섬유와 기지의 분리에 의한 AE count가 확연히 구분되는 구조를 가진다. 따라서 섬유파단보다는 섬유와 기지의 분리에 기인하여 하중방향 30° 와 45° 에 비해 작은 AE count 량을 보이는 것으로 생각된다. 하중방향이 노치를 기준으로 45° 인 경우는 섬유파단과 섬유 기지간의 분리가 동시에 발생할 수 있는 구조인 지그재그 형태를 가지므로 AE count의 발생량이 많은 것으로 판단된다.

Fig. 8은 인장시험 동안 획득된 AE 특성 중 인장하중에 대해 측정된 AE 진폭과의 관계를 나타낸다. 인장시험시 초기에 지그에 의해 시험편이 하중을 받으면서 진폭의 상승을 가져왔으나, AE count나 event 등 다른 AE 특성값의 변화가 없는 것으로 초기에 시험편의 손상은 없는 것으로 판단된다. 519초까지 평균 AE 진폭은 45dB로 거의 일정하며 이후 하중이 증가함에 따라 증가와 감소를 하지만 대체로 평균 AE 진폭은 상승하여 최대 진폭 96dB를 나타내었다.

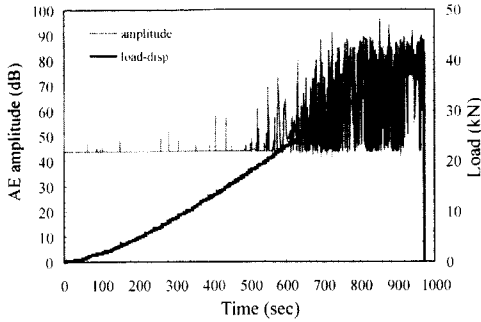


Fig. 8. The variation of load and AE amplitude for tensile test

Fig. 9(a)~(i)는 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 파괴시험 동안 실시간으로 얻어지는 AE 특성 중 AE 진폭과 균열성장길이와 관계를 나타낸다. Fig. 7의 누적 AE count의 경우 CFRP 복합재료에 대한 손상의 빈도를 나타낸다면 AE 진폭은 그 손상에 대한 크기를 나타낸다. 즉 AE 진폭의 크기는 균열성장상에 대한 손상의 크기를 나타내는 것이다. Fig. 9의 (a)~

(c)는 하중방향에 대하여 섬유방향 각도가 0°의 경우로서 섬유방향이 0°의 경우는 섬유 파단과 기지와 섬유의 분리가 대체로 구분됨으로 인해 진폭의 AE 값 역시 다소 작게 발생되고 있다. (a)인 $a_0/W=0.4$ 의 경우 초기 균열단 주위의 미세 균열이 성장하는 지점까지는 44dB 이하의 낮은 진폭값을 보이다가 128.4초에서 75.5dB, 269.3초에서 70.6dB, 426.9초에서 최고 86.2dB로 나타났다. 이것은 초기 균열발생은 섬유와 기지의 분리에 의해 저진폭을 보이다가 이후 섬유파단에 의해 고진폭을 발생시키는 것으로 여겨진다.

Fig. 9(b)는 $a_0/W=0.5$ 로서 $a_0/W=0.4$ 와 같은 미세 균열이 성장하는 지점에서 44dB 이하의 낮은 진폭값을 보이다가 54.7초에서 52.2dB이며 464.2초에서 최고 82.1dB로 나타났다. Fig. 9(c)는 $a_0/W=0.6$ 으로서 182.5초에서 50.4dB이며 530.1초에서 최고 83.6dB로 나타났다.

하중방향에 대한 섬유방향이 30°와 45°의 경우는

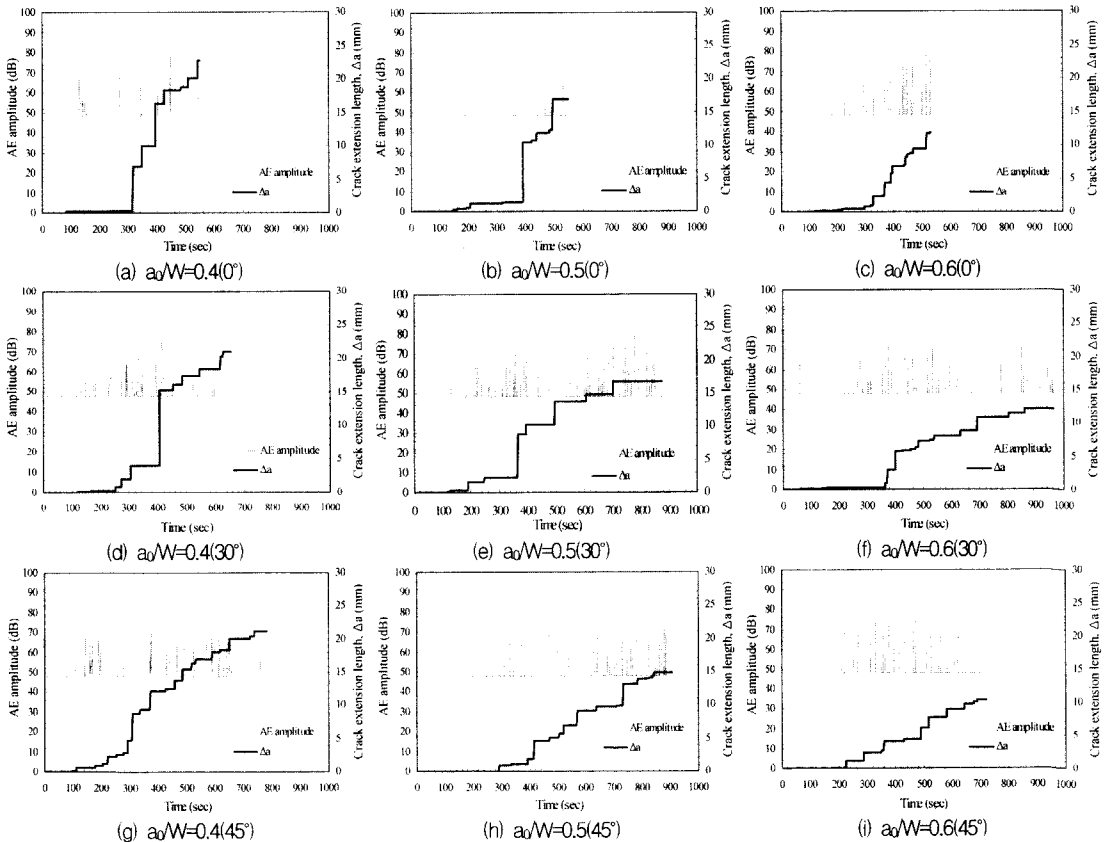


Fig. 9. The relationships AE amplitude and crack extension length of fracture test

섬유파단 및 기지와 섬유의 분리가 동시에 존재하는 지그재그 형태의 균열로 성장하는 것으로 섬유 방향이 0°의 경우에서 보다 더 큰 진폭을 유발한다. 이처럼 70dB 이상의 고진폭을 나타내고 있는 것은 기지와 섬유분리로 인한 손상과 더불어 섬유파단의 발생이 많음을 나타내며 직물구조 CFRP 복합재료의 균열성장특성에 영향을 미침을 알 수 있다. 이것은 눈으로 측정하는데 있어 확인되지 않는 미세 균열의 발생을 AE 진폭을 통하여 더욱 정확하게 확인할 수 있어 초기 균열발생 검출에 AE법이 유용함을 알 수 있다.

4. 결 론

직물구조 CFRP 복합재료의 인장 및 파괴시험을 통해 기계적 특성평가와 하중 방향에 대한 섬유방향 각도 및 초기노치길이 변화에 대한 AE특성을 균열진전거동과 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인장시험에 의한 하중-하중선 변위 선도는 거의 파단시까지 선형적인 관계를 나타내었으며 최대 파단하중은 평균 41.2kN으로 변위가 약 3.2mm까지 성장하였다.
- 2) CT 시험편을 이용한 파괴시험에서 최대하중은 $a_0/W=0.4$ 의 경우가 크게 나타났고, 균열성장은 하중방향에 대한 섬유방향에 0°의 경우에서 균열성장방향이 섬유방향에 따라 0°와 90°로 따라 성장하였으며, 섬유방향에 30°인 경우는 30°의 각도로 균열이 성장하는 것을 알 수 있었다. 또한 45°의 경우에는 $\pm 45^\circ$ 방향으로 지그재그로 성장하였다.
- 3) 파괴시험시 발생된 누적 AE count는 $a_0/W=0.4$, 0°에서 초기 균열단 주위의 미세 균열이 성장하는 0.24mm에서 누적 AE count는 333으로서 비교적 적은 값을 나타내고 있으며 파괴시험 종료인 균열성장길이가 22.75mm에서 최대 누적 AE count가 16.0×10^3 이었다.
- 4) $a_0/W=0.4$ 의 경우 균열발생 저항이 커서 급작스러운 파괴현상이 발생하는 반면 $a_0/W=0.6$ 에서는 균

열발생 저항이 적어 서서히 균열이 성장함에 따라 최대 누적 AE count 량은 증가하였다.

5) 기지와 섬유의 분리에 의한 초기 균열은 저진폭을 발생시키나 하중방향에 대한 섬유방향에 30°와 45°에서 섬유파단 및 기지와 섬유의 분리가 동시에 존재하는 지그재그 형태의 균열성장률로 70dB 이상의 고진폭이 발생되었다.

감사의 글 : 이 논문은 2002 학년도 부경대학교 발전기금재단의 지원에 의하여 연구되었음.

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) 장경영, 이원휴, 김달중, "진파속도를 알 수 없는 재료에서의 AE 발생위치 온라인 측정", 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제3호, pp. 688~694, 1998.
- 3) S. Barre and M. L. Benzeggagh, "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.
- 5) K. Kageyama, K. Nonaka, S. Shimamura and S. Fukuda, "Fracture Toughness and Acoustic Emission of Carbon-Cloth/Epoxy Composite", JSME(A), Vol. 50, No. 454, pp. 1260~1266, 1983.
- 6) Standard test method for "tensile properties of polymer matrix composite materials", ASTM D3039, 2000.
- 7) Standard Test Method for "Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM E647, 1999.