

섬유방향 변화에 따른 직물구조 CFRP 적층판의 균열진전 및 AE평가

윤유성[†] (부경대학교 대학원) · 권오현(부경대학교)

Crack Propagation and Acoustic Emission Evaluation of Plain Woven CFRP Laminate Composites for Fiber Orientation

Yu-Seong Yun(Pukyong Univ.) and Oh-Heon Kwon(Pukyong Univ.)

Key Words: Plain Woven CFRP(탄소섬유복합재료), Acoustic Emission(음향방출), Crack Propagation(균열진전)

Abstract

Crack propagation and AE characteristics of CFRP plain woven laminate composites are examined with acoustic sensor by AEDSP 32/16 board in PC system. AE signals are measured during the fracture behavior tests. The purpose of study is the estimation of the crack extension behavior effected between three kinds of fiber orientation for plain woven CFRP laminate composite and the relationship between AE characteristics and load-displacement curves and crack extension length.

1. 서 론

섬유강화복합재료는 일반적으로 금속에 비해 비강도 및 비강성이 우수하여 최근 항공우주분야에서 사용이 확대되고 있다. 그러나 직물구조 복합재료는 일방향 복합재료에 비하여 그 구조가 복잡한 강화구조를 가지기 때문에, 많은 연구자에 의해 다양한 수법이 제안되어져 왔으나, 아직까지 명확한 파괴해석은 이루어지지 않은 실정이다. Lee 등⁽¹⁾의 연구에서는 일방향 섬유에 의한 lay-up 변화에 따른 부직포 삽입형 혼성복합재료의 피로강도 특성을 파악하였고, 일방향 연속섬유강화복합재료의 경우에는 Phillips 등⁽²⁾이 개구형 변형양식에서 균열이 진전할 때 균열진전저항특성을 파악하였고 또한 Nidal 등⁽³⁾은 모드 I의 경우 직물 유리와 탄소섬유복합재료에 대한 균열진전방향과 delamination의 영향에 대해 조사하였다. 또한 초기 결함의 검출 및 파괴기구 규명에 실시 간으로 평가가 가능한 AE(음향방출)법이 유용한 평가수단으로 이용되고 있고, 복합재료의 음향방출의 적용한 경우는 기지균열, 섬유기지 계면분리, 섬유파단과 적층분리와 같은 다양한 AE원이

파괴기구에 관여하는 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾. Barre 등⁽⁵⁾은 GFRP 재료에 대하여 음향방출신호 진폭이 각 대응되는 손상형태에 따라 변화하는 것을 보고 하였다. 또한 균열진전거동과 AE 특성과의 관계는 Jinen 등⁽⁶⁾이 보고하였으나 GFRP 단층판의 경우에 한하였으나 파손기구와의 연결성을 충분히 설명하지 못하였다. 이러한 배경에서 직물구조의 CFRP 복합재에 대한 파손현상과 AE 특성과의 관계가 아직까지 명확하게 이루어지고 있지 않는 실정이다. 본 연구는 평직구조의 CFRP 적층복합재에 대하여 인장 및 파괴실험을 행하여 재료 물성치를 측정하고 균열성장에 대한 AE 특성치를 계측하여 균열발생진전의 관계를 관찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험 재료

실험재료로 사용한 직물구조 탄소섬유 프리프레그(Woven Carbon Prepreg)는 국내 한국카본(주)에서 생산되는 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)를 이용하였다. 적층판은 6ply로 Hot press에서 성형

온도와 게이지 압력을 각각 140°C, 60kg/cm²에서 60분간 성형하여 최종 두께가 1mm로 되게 제작되었다.

인장시험편은 Fig. 1 (a)와 같이 ASTM D-3039-00⁽⁷⁾에 참조하여 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 절단가공 하였으며, 시험편 끝단은 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로 알루미늄 탭을 부착하여 인장시험시 시험기의 그림으로부터 손상을 방지하였다. 파괴시험의 CT시험편은 Fig. 1 (b)와 같이 ASTM-E647-93 추장법에 따라 Heiwa technica사의 만능자동정밀시험절단기에 두께 8mm의 Fine wheel cutter로 노치를 삽입하여 $a_0/W=0.55$ 가 되게 하였다. 여기서 a_0 는 초기균열 길이이며 W는 시험편 폭을 나타낸다. 또한 섬유 방향에 대하여 0°, 30°, 45°로 경사시켜 절단·가하였다.

2.2 실험방법

재료의 탄성계수, 인장강도 등의 기본 재료 물성치를 측정하기 위한 인장시험은 상온에서 만능

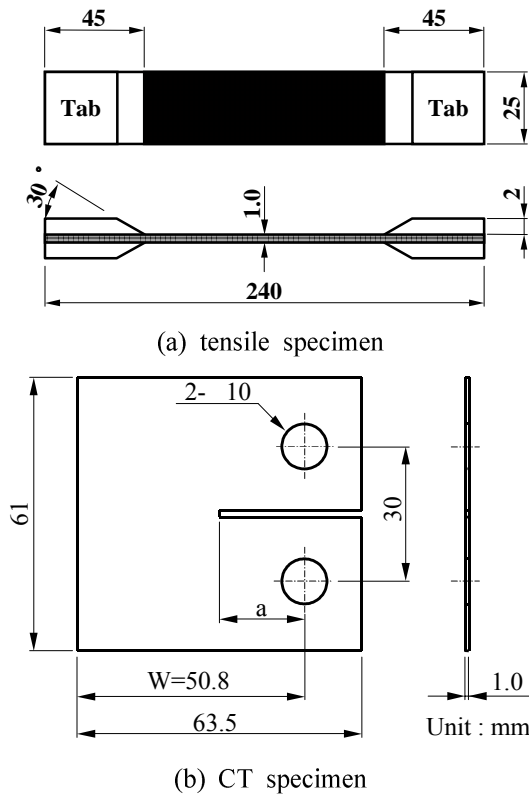


Fig. 1 Specimen configurations

동적시험기(H사, 50kN)를 사용하였으며 ASTM D3039-00⁽⁷⁾에서 추천하고 있는 방법인 0.2mm/min 변위제어로 행하여 졌다. 또한 CT시험편의 파괴 시험 동안 AE측정시 잡음을 고려하여 알루미늄으로 좌굴방지용 지그를 자체 제작하여 부착함으로써 좌굴을 최소한으로 방지하였다.

AE측정은 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템을 사용하였다. 센서는 R15센서로 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였고, Threshold는 Fixed로 Threshold값은 인장시험에서 44dB 그리고 파괴시험에서 48dB로 하였다.

파괴시험 동안 균열발생 및 진전거동은 M사의 이동식 현미경의 눈금값을 PC에 저장하기 위하여 이동식 현미경 자체에 부착된 데이터 저장 푸시버튼을 이용하여 균열발생지점에서 진전균열길이를 기준으로 이동식 현미경의 균열길이를 디지털변환기로 기록하여 PC에 저장하였다. 실험 중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장 및 파괴시험

Fig. 3은 직물구조 적층판의 CFRP 복합재료 시험편의 인장시험에 대한 결과로서 하중-하중선 변위 선도를 나타낸다. 하중-하중선 변위 선도는 거의 파단시까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있다.

파괴시험은 CT시험편을 사용하였다. 진전균열길이 측정은 이동식 현미경에 의해 직접 관찰, 측정하였으며, 측정된 균열성장길이는 시험편의 한 방향에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 시험편 두

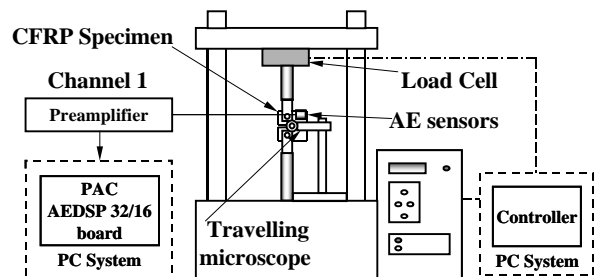


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

께가 1mm로 비교적 박편이므로 반대 면에서의 측정결과와 거의 일치하여 좌우 균일하게 성장하는 것으로 간주하였다.

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 섬유방향을 각각 0°, 30° 45°에서의 인장파괴실험에 의하여 구하여진 하중-하중선 변위 및 균열성장길이와의 관계를 나타낸다. Fig. 4의 (a)는 섬유방향이 0°인 경우로서, 초기에 하중이 가해짐에 따라 비교적 규칙적인 변화를 나타내는 약 0.53kN까지 진전균열은 두께 8mm의 Fine wheel cutter의 노치를 삽입한 라운드 양 끝 부분에서 약 0.43mm까지의 미세 균열이 성장하는 것을 관찰할 수 있었고, 이후 하중이 증가하여 1.23kN에서 1.26mm로 직접 눈으로도 확인될 수 있는 정도의 균열이 성장하였다. 최대 하중인 1.58kN까지 증가한 이후 하중의 급격히 감소하는 지점에서 균열은 급속히 성장하며 5.82mm까지 상승하였다.

또한 균열의 진전량은 섬유방향에 지배를 받은 것으로 판단되나 진전방향은 섬유방향과 동일한 방향으로 성장하였다.

Fig. 4의 (b)는 섬유방향이 30°로서, Fig. 4의 (a)의 섬유방향이 0°인 경우와 유사하게 약 1.32kN까지 라운드 양 끝 부분에서 응력집중현상을 나타내며 약 0.56mm까지의 미세 균열이 성장하는 것을 관찰할 수 있었고, 최대인장하중은 1.51kN까지 상승하였다. 이 때 균열은 약 5.71mm로 이후 하중이 급격히 감소하는 위치에서 급속히 성

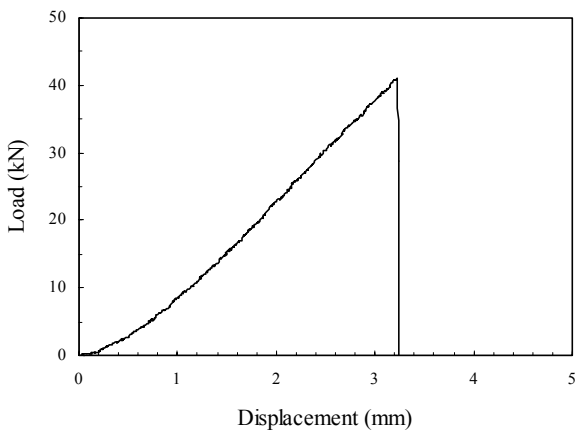
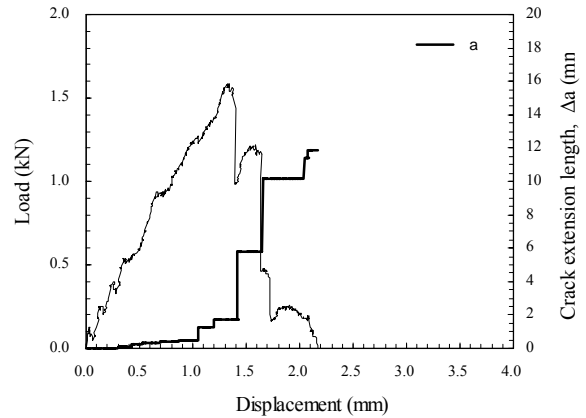


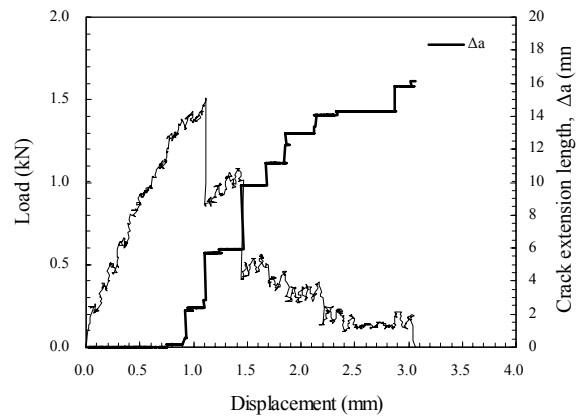
Fig. 3 A typical load-displacement curve acquired from a tensile test for CFRP

장하고 있다.

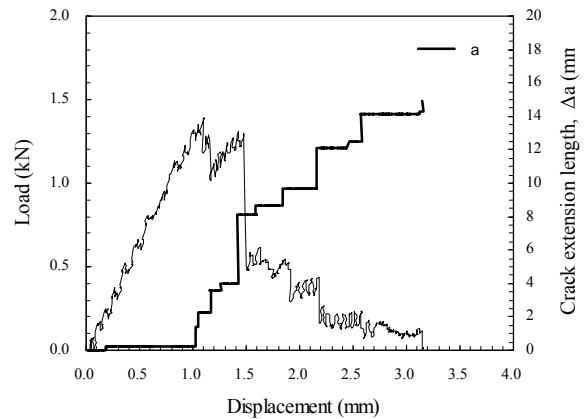
Fig. 4의 (c) 45°에서 전술한 두 가지의 경우와 유사하게, 약 1.35kN까지 라운드 양 끝 부분에서



(a) 0°



(b) 30°



(c) 45°

Fig. 4 Load-displacement and crack extension length relationships acquired from a fracture test for CFRP

응력집중현상을 나타내며 약 1.37mm까지의 미세 균열이 성장하는 것을 관찰할 수 있었고, 최대인장하중은 1.38kN까지 상승하였다. 이 때 균열은 약 2.27mm로 이후 하중이 급격히 감소하는 위치에서 급속히 성장하고 있다. 최대하중은 섬유방향각도가 커질수록 낮아지고 있으나 최대하중에서 발생하는 균열성장길이는 오히려 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 초기 균열길이는 섬유방향 각이 클수록 보다 높은 하중에서 크게 발생됨을 알 수 있었다. 이것은 섬유방향 각이 클수록 균열발생저항이 커지만 일단 발생되면 성장속도가 빠르게 나타난다고 생각된다. 섬유방향이 30°인 경우는 0°, 45°와 다르게 균열이 섬유방향에 따라 60°와 30° 두 가지의 경로로 성장할 수 있으나 실험 결과 30°의 각도로 균열이 성장하는 것을 알 수 있었고 이러한 이유로 0°, 30°, 45° 중에서 성장균열길이 제일 큰 값을 가지고 있다. 또한 섬유방향이 노치를 기준으로 45°인 경우는 균열진전방향이 0°의 경우와 유사하게 수평방향으로 성장하였고, +45°와 -45°의 어느 한 쪽이 균열이 성장하면 다른 한 쪽이 성장하는 지그재그 형태를 가지는 특징을 보여주고 있으며 여기에 대한 구체적인 모델화는 차후연구에서 보고될 것이다.

3.2 음향방출에 의한 특성

Fig. 5는 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 인장실험시 얻어지는 AE특성으로 10sec 동안 발생한 AE count의 누적합계와 하중과의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 인장실험시 얻어진 AE특성으로 초기에 하중이 가해짐에 따라 AE count의 발생이 없는 것으로 잡음은 최소화된 것이라 판단된다. 인장실험 시작 이후 185sec까지 각 12sec 동안 발생한 누적 AE count는 1.67×10^3 , 하중은 4.01kN이다. 하중의 계속적인 증가로 30.4kN까지 AE count 또한 더불어 34.96×10^3 까지 선형적으로 증가하였고 이후 991.3sec에서 최종 파단되었으며 최종 파단 직전인 957.7sec까지 발생한 누적 AE count가 62.27×10^3 에서 83.25×10^3 까지 급상승하였다.

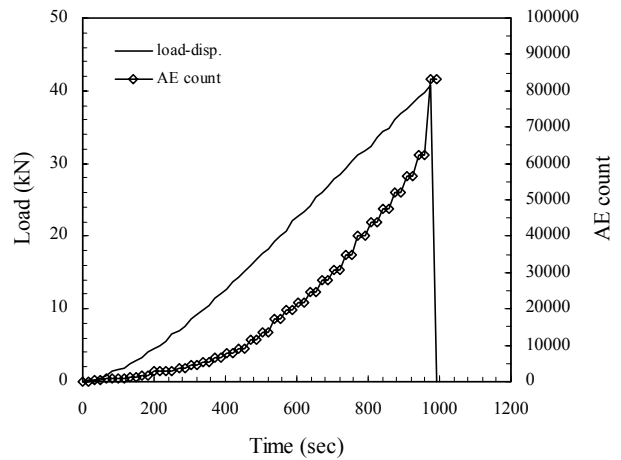


Fig. 5 Load-AE count relationship of tensile specimen

Fig. 6 (a), (b), (c)는 섬유방향에 대하여 각각 0°, 30°, 45°에서 직물구조 CFRP 복합재료에 대하여 인장파괴실험시 10sec 동안 발생하여 얻어진 누적 AE count와 균열성장길이와의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 6 (a)는 섬유방향에 대하여 0°의 경우에 인장파괴실험시 얻어진 균열성장길이와 누적 AE count의 관계를 나타낸다. 하중의 증가와 함께 균열단의 주위의 미세균열이 선형적으로 서서히 성장하는 것을 30°와 45°의 경우에서 보다 확연히 알 수 있다. 이후 320초인 하중이 1.23kN에서 균열성장길이가 1.26mm로 성장하였고, 하중이 급격히 감소하는 지점인 438sec에서 균열성장길이도 급성장하여 5.28mm까지 성장하여 이후 파괴 종료시간인 655.1sec까지 비선형적으로 증가하여 최대 누적 AE count가 28.00×10^3 이며 최대 균열성장길이는 11.86mm이다.

Fig. 6 (b) 30°의 경우 0°의 경우와 유사하게 하중의 증가와 함께 균열단의 주위의 미세균열이 서서히 선형적으로 성장하는 것을 알 수 있으며 섬유방향에 지배를 받는 경향이 있음을 알 수 있었다. 하중선 변위가 0.919mm인 248sec까지 하중은 1.34kN이며 이때 누적 AE count는 43.31×10^2 정도까지 선형적으로 증가하고 있다. 이후 424sec까지 하중이 증가와 함께 누적 AE count도 선형적으로 증가하고 있으며 하중이 급격히 감소하는 지점에서 균열성장길이는 급성장하며 누적 AE count 역시 상승하고 있다. 최종 실험종료시간인

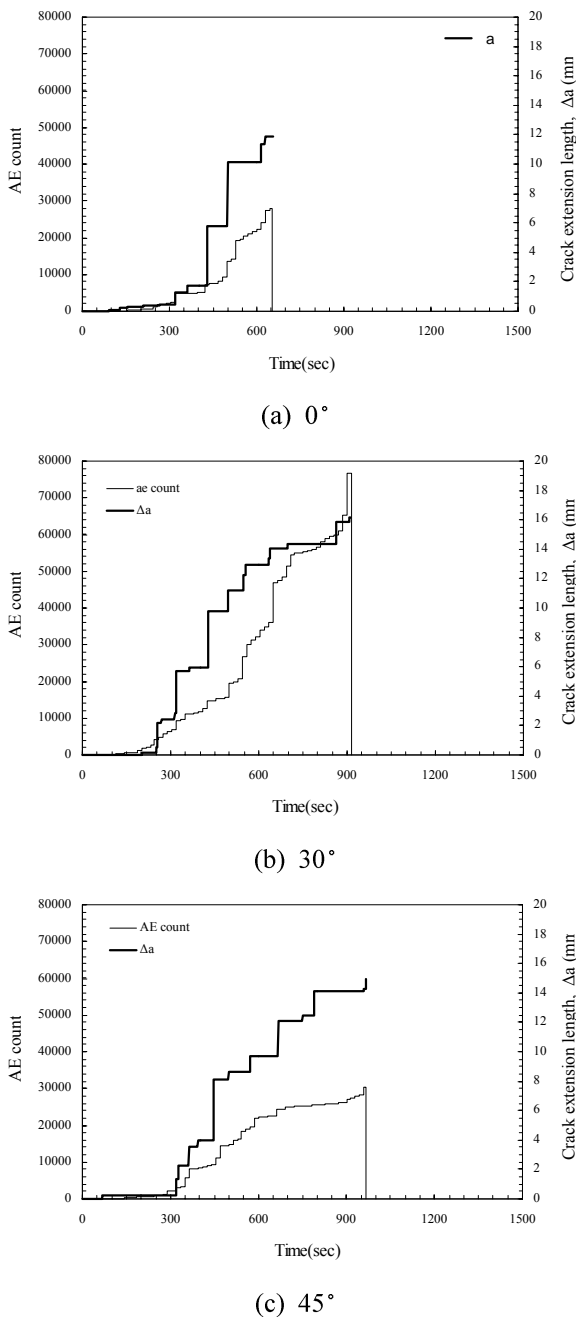


Fig. 6 Load-AE count relationships of fracture test

910sec에서 균열성장길이는 16.13mm로 누적 AE count는 76.64×10^3 까지 상승하였다. 이것으로 균열성장은 섬유방향인 30° 의 방향으로 균열이 성장하여 전체적인 균열길이는 0° 의 경우에 비해 크게 나타났으며, 이로 인해 AE count량 또한 많이 발생하는 것을 알 수 있으므로 내부에서 균열 성장으로 인해 발생하는 섬유파단이나 기지균열의 손상정도가 빈번하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 (c)는 섬유방향에 대하여 45° 의 경우, 0° 와 30° 의 경우와 유사하게 하중의 증가와 함께 균열단의 주위의 미세균열이 서서히 선형적으로 성장하는 것을 알 수 있으며 섬유방향에 지배를 받는 경향이 있음을 알 수 있었다. 하중선 변위가 1.04mm인 328sec까지 하중은 1.35kN이며 이때 누적 AE count는 29.96×10^2 정도까지 선형적으로 증가하고 있다. 이후 하중이 증가와 함께 누적 AE count로 선형적으로 증가하고 있으며 하중이 급격히 감소하는 지점에서 균열성장길이가 급성장하며 누적 AE count 역시 상승하고 있으며 최종 실험종료시간인 967sec에서 균열성장길이는 14.94mm로 누적 AE count는 30.30×10^3 까지 상승하였다.

또한 초기 균열발생시에 AE count가 발생되기 시작했으며 파괴실험에서 AE count 발생량은 0° , 30° , 45° 의 경우 30° 의 경우 초기 최대 발생되는 누적 AE count 수가 43.31×10^2 에서 균열이 성장하는 것을 알 수 있어 이후 발생하는 누적 AE count는 내부의 섬유파단과 기지균열의 손상정도는 나타낸다. 누적 AE count의 급상승지점과 균열성장길이의 급격한 진전지점은 약간의 오차는 발생되었으나 거의 일치하였다.

4. 결론

직물구조의 CFRP 적층복합재료에 대하여 전형적인 인장시험과 파괴실험을 수행함과 동시에 AE 특성치를 계측하여 균열발생과의 관계에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험에 의한 하중-변위 선도가 파단하중까지 안정적으로 선형적인 관계를 보이다가 급작 파괴현상을 보이며 이때 파단강도는 1.34MPa, 최대 변위가 3.2mm 전후로 나타났다.

(2) 균열의 진전량은 섬유방향에 지배를 받는 것으로 판단되나 진전방향은 섬유방향과 동일한 방향으로 성장하였으며, 섬유방향이 30° 인 경우는 0° , 45° 와 다르게 균열이 섬유방향에 30° 의 각도로 균열이 성장하는 것을 알 수 있었다.

(3) 파괴실험에서 AE count 발생량은 0° , 30° , 45° 의 경우 적어도 누적 AE count 수가 $43.31 \times$

10^2 정도에서 균열이 성장하는 것을 알 수 있어 이후 발생하는 누적 AE count는 내부의 섬유파단과 기지균열의 손상정도는 나타낸다.

(4) 인장파괴실험에서 최종 실험 종료시까지 누적 AE count 발생량은 0° 의 경우 28.00×10^3 에서 최대 균열성장길이는 11.86mm, 30° 의 경우 균열성장길이는 16.13mm에서 누적 AE count는 76.64×10^3 , 45° 에서 누적 AE count는 30.30×10^3 로서 균열성장길이는 14.94mm로 나타났다.

참고문헌

- (1) Seung Hwan, L. and Hiroshi, N., 2002, "Tension-Tension Fatigue Strength Characteristics of Hybrid Composites with Non-Woven Tissue", JSME(A), Vol. 68, No. 671, pp. 1054~1062.
- (2) Pillips, D. C. and G. M. J. Mater, 1982, Sci, Letters, 1-8, p. 321.
- (3) Nidal A., Lief A. C., and Louis B., 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.
- (4) Ely TM, Hill EK, 1995, "Longitudinal splitting and fiber freakge characterisation in graphite/epoxy using acoustic emission data", Material Eval, 288~294.
- (5) S. Barre, Benzeggagh M. L, 1994, "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.
- (6) 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", JSME(A), Vol. 62, No. 602, pp. 2207~2215.
- (7) Standard test method for "tensile properties of polymer matrix composite materials", ASTM D3039, 2000.