

ENF 시험편을 이용한 평직 CFRP의 층간파괴인성 및 AE 특성 평가

The Evaluation of Interlaminar Fracture Toughness and AE Characteristics in a Plain Woven CFRP Composite with ENF Specimen

윤유성 · 권오현

Y. S. Yun and O. H. Kwon

Key Words : Plain Woven CFRP(평직탄소섬유강화복합재료), Interlaminar Fracture Toughness(층간파괴인성), Acoustic Emission(음향방출), End Notched Flexures specimen(ENF 시험편), Crack Propagation(균열진전)

Abstract : Woven fabrics composites are used as primary structural components in many applications because of their superior properties that offer high specific strength and stiffness. However, the complexity of the fabric structure makes understanding of their failure behavior very difficult. Also, laminate woven fabrics CFRP have unique failure mechanisms such as fiber bridging, fiber/matrix crack and so on. In particular, the delamination phenomenon of the composite materials is one of the most frequent failure mechanisms. So, we estimated interlaminar fracture and damage in composites using as ENF specimen by a 3 point bending test. And AE characteristics were examined for crack propagation on plain woven CFRP. We obtained the following conclusions from the results of the evaluation of the 3 point bending fracture test and AE characteristic estimation. AE counts of maximum crack length were obtained as 85.97×10^4 and 93×10^3 for $a_0/L=0.3$ and 0.6 , respectively. Also the maximum amplitudes were over 80dB at both $a_0/L=0.3$ and 0.6 . G_{IIc} at that's a_0/L ratio were obtained with $1.07kJ/m^2$ and $3.79kJ/m^2$.

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료(CFRP)는 무게가 가볍고 비강도와 비강성이 우수하며, 열팽창계수가 낮고 화학적으로도 안정하기 때문에 경량화를 요구하는 항공 및 우주용 재료로 사용되는 신소재이다^{1,2)}. 그 중에서 직물구조 섬유강화복합재료는 에폭시, 폴리아미드 등과 같은 기지(matrix)에 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등과 같은 강화섬유를 직물구조 형태로 혼입한 형태로 구성되며, 적층각도, 섬유배열 및 경화방법에 따라서 원하는 강도와 강성 및 기계적 성질을 가질 수 있다³⁾. 이러한 직물구조 복합재료는 일방향 섬유강화복합재료에 비해 변형능력이나 인장강도가 우수하다. 하지만 직물구조 복합재료는 복잡한 강화구조를 가지기 때문에 그 역학적 손상거동은 파악하기가 쉽지 않다. 또한 복합재료가 실제

구조물에 적용된 경우 기존의 금속재료에서 볼 수 없는 기지균열, 섬유파단, 섬유와 기지간의 박리, 섬유균열 및 섬유뿔힘 등을 포함하는 여러 문제점들을 가지고 있다⁴⁾. 특히 복합재료의 적층분리(Delamination) 현상은 복합재료 구조물에서 가장 취약한 부위인 층간면에서의 파손양상으로서 주로 적층 복합재료의 제작 및 가공시에 존재할 수 있는 1차 결함 또는 실제 구조물에 적용되어 유발될 수 있는 2차 결함 등에 의해 발생한다⁵⁾. 따라서, 안전성의 측면에서, 그 사용 환경과 목적에 부합되는 명확한 특성과 재료의 성질을 기초로 한 재료손상을 파악할 필요성이 있다. 적층분리 현상은 파괴형태 중 모드 I 과 모드 II에서 발생할 수 있다. 열림모드의 적층분리에 대한 파괴인성 및 손상평가의 연구에 가장 많이 사용되고 있는 시험편은 DCB(Double Cantilever Beam)이며⁶⁾, 모드 II에 대해서는 ENF(End Notched Flexures) 시험편을 이용하여 적층분리 현상을 평가할 수 있다⁷⁾. 또한 이러한 파괴 거동현상을 평가하기 위하여 초기 결함의 검출 및 파괴기구 규명에 실시간으로 평가가 가능한 음향방

접수일 : 2006년 4월 21일
권오현(책임저자) : 부경대학교 안전공학과
E-mail : kwon@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1522
윤유성 : 부경대학교 대학원 안전공학과

출(Acoustic Emission)법이 유용한 평가수단으로 적용될 수 있다.

AE는 고체 내에서 국부적으로 형성되었던 변형 에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파를 의미한다. 재료내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에서 압력용기나 구조물의 진단 및 가동중 산업 설비의 기계·기구나 운항중의 항공기의 연속감시 체제에 이르기까지 매우 다양한 응용사례를 보이고 있다³⁾. 복합재료에 대한 AE의 적용은 Giordano 등⁹⁾의 연구에서 탄소섬유복합재료에 대한 인장시험시 발생하는 손상형태를 주파수분석을 통해 AE 신호를 구분하였지만, 파괴인성과의 관계를 설명하지 못했으며, 직물구조 섬유강화복합재료에 대한 여러 연구에서 복합재료의 층간분리와 같은 손상기구에 대한 명확한 파악은 아직 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 평직 CFRP 적층복합재료에 대해 ENF 시험편을 이용하여 3점 굽힘시험으로 층간파괴인성치를 측정하였다. 또한 파손기구 현상을 평가하기 위해 ENF 시험편 표면에 AE센서를 부착하여 층간분리에 대한 AE특성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 평직 탄소섬유강화 프리프레그(plain woven carbon prepreg)로 한국카본(주)에서 생산·시판되는 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)를 사용하였다. 프리프레그의 섬유 및 수지의 함량은 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Composition of the fiber and resin in prepreg(CF 3327 EPC)

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

Fig. 1은 평직 CFRP 복합재료 적층판을 구성하는 프리프레그의 구조를 나타내며, 프리프레그는 폭 1m의 원단으로 생산되기 때문에 가로·세로 각각 250×250mm로 절단하였다. 절단된 프리프레그는 최종 20플라이로 적층되며 ENF 시험편에 초기균열(a₀)을 삽입하기 위해 10플라이와 11플라이 사이에 두께 80μm의 테프론 테이프를 삽입하였다. 적층된

프리프레그는 성형 후 금형판과 쉬운 탈착을 위해 아세톤과 실리콘 오일(Silicon Oil KS 707)을 7 : 3의 비율로 혼합한 이형재를 금형판 전체에 바른 후 열성형기(Hot press ; 국내 D사, 50MPa)에서 압착 성형되었다. 성형온도는 초기 135℃까지 상승시킨 후 2분 간격으로 1℃씩 상승시켜 최종 성형온도를 140℃로 하였으며 게이지 압력 57.7MPa에서 60분간 성형하였다. 성형된 적층판은 잔류응력 완화와 뒤틀림의 변형을 방지하기 위해 대기중에 자연냉각시켰으며 최종 두께가 약 4mm로 얻어졌다. 성형된 복합재료는 시험편 제작용 다이아몬드 휠커터를 사용하여 Fig. 2와 같이 절단가공 하였다. ENF 시험편은 테프론의 노치 선단부에서 피로예균열을 삽입하여 a₀/L=0.3, 0.4, 0.5와 0.6이 되게 하였다. 여기서 a₀는 초기균열길이이며, L은 스패길이의 1/2를 나타낸다.

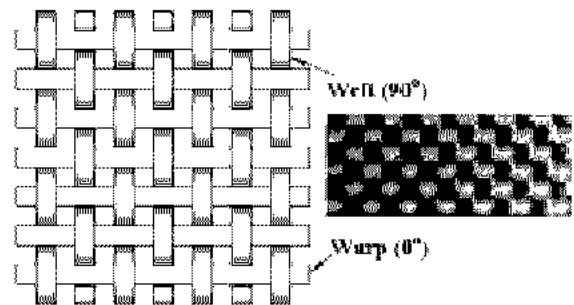


Fig. 1 Construction of plain woven CFRP prepreg composite

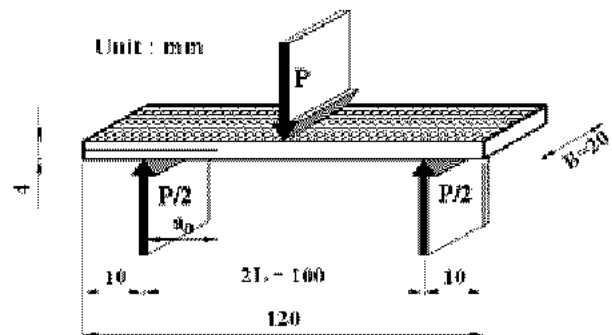


Fig. 2 Schematic of 3 point bending test with ENF specimen

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 만능동적시험기(H사, 50kN)를 사용하였으며 ASTM D 3039¹⁰⁾에서 추천하고 있는 방법인 변위제어 1mm/min로 행하여 졌다. 파괴시험 동안 균열성장길이는 눈으로 직접 측정된 것으로 4단구조의 접안렌즈로 최저 5.5배율에

서 최고 50배의 배율로 조절이 가능한 이동식 현미경(Japan, N사)을 이용하여 일정 균열성장 지점에서 최대 배율로 측정하였다. 이때 시험편의 균열길이 측정면은 보다 정확한 관찰을 위해 #1000의 에머리-페이퍼로 연마하였다. 또한 이동식 현미경에서 측정된 균열길이는 디지털변환기인 IT-005D(Japan, M사)를 거쳐 직접 PC로 저장하였다.

3점 굽힘시험에 의한 ENF 시험편의 중앙부 처짐량 측정은 비접촉식 미소 변위계로서 MEL사의 M5로 레이저 앰프로 연결된 레이저변위 측정기를 이용하여 측정하였다.

AE 측정은 PAC사의 AEDSP 32/16 PC 시스템을 사용하였다. 센서는 R15 센서로 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였다. 또한 실험 중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 D/A 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

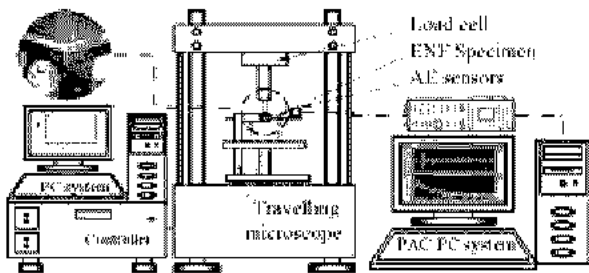


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 굽힘시험에 대한 하중 및 AE 특성

평직 CFRP 복합재료의 파괴시험은 3점 굽힘시험을 이용하여 수행하였다. ENF 시험편이 파괴되기까지 굽힘시험에 의하여 구하여진 하중-하중선 변위의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 a_0/L 비가 0.3의 경우 ENF 시험편에 하중이 가해지기 시작하여 최대하중인 2.16kN까지 하중선 변위는 하중의 증가와 함께 선형적인 관계를 나타내었다. 이후 하중-하중선 변위의 증가 속도가 다소 둔화되어 하중선 변위가 3.751mm가 되었을 때 초기균열이 순간적으로 발생하여 Δa 가 5.67mm로 관찰되었다. 이때 하중은 2.134kN로 측정되었다. 초기 균열성장 이후 하중이 1.02kN까지 급격히 감소하는 지점에서 균열은 성장길이(Δa)가 29.13mm로 급속 성장하였다. 이후 균열은 하중의 계속적인 상승으로 인해 적층방향으로 증가하였으

나 성장·정지를 반복하면서 최대 45.05mm로 성장하였다. $a_0/L=0.4$ 인 경우 초기 하중이 가해짐에 따라 대략 2.336mm까지는 하중선 변위가 선형적인 관계를 유지하였다. 하중선 변위가 3.246mm에서 초기 균열이 3.57mm로 성장하였고 균열성장 이후 하중-하중선 변위의 증가속도가 역시 둔화되어 최대 하중까지 완만히 증가하였다. $a_0/L=0.5$ 의 경우도 $a_0/L=0.3, 0.4$ 와 유사한 결과로 나타났으며 이때 얻어진 최대하중은 하중선 변위가 3.479mm에서 1.67kN이며, 최대 균열성장길이는 30.88mm로 나타내었다. Fig. 4의 $a_0/L=0.6$ 인 경우 초기 하중선 변위가 2.552mm까지는 $a_0/L=0.3$ 과 유사하게 선형적인 관계를 유지하였다. 이후 1.06kN에서 균열성장길이(Δa)가 2.22mm로 개시하기 시작하여 하중-하중선 변위의 증가속도가 역시 둔화되어 1.21kN까지 하중이 증가한 후 1.09kN으로 감소하는 지점에서 균열 성장길이(Δa)가 급격히 증가하였다. 이후 균열은 $a_0/L=0.3$ 과 유사하게 하중의 계속적인 상승으로 인해 적층방향으로 성장·정지를 반복하면서 최대 Δa 가 35.17mm로 성장하였다. 이것은 $a_0/L=0.3$ 에 비해 길게 남아 있는 리그먼트(ligament)의 영향으로 판단되며 이러한 이유로 선형적으로 하중이 증가하여 감소하는 지점에서의 하중값 변화도 리그먼트가 긴 $a_0/L=0.3$ 의 경우가 높은 값을 나타내었다.

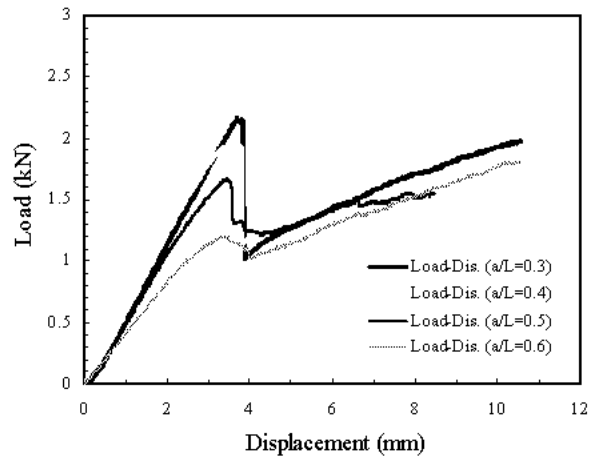


Fig. 4 The relationship of load-displacement for the fracture test with ENF specimen

Fig. 5는 굽힘시험을 시작하여 10sec 간격으로 얻어진 누적 AE count와 균열성장길이(Δa)와의 관계를 나타낸 것이다. AE 특성 중 AE count는 재료 및 구조물에 외력이 가해짐에 따라 발생하는 AE 진폭에서 펄스수를 나타내는 것으로 손상빈도의 측

도로 이용된다. 또한 AE에서 전기 및 기계적인 잡음을 동반할 수 있으므로, 이러한 잡음을 제거하기 위하여 Hsu-Nielsen source법¹¹⁾인 연필심 파괴로 잡음을 제거 및 수정하여 AE threshold를 50dB로 고정시켰다. 초기하중상태에서 AE count의 발생이 없는 것으로부터 잡음은 최소화된 것이라 판단된다.

Fig. 5의 $a_0/L=0.3$ 에서 누적 AE count의 발생은 초기균열이 성장하기 이전 30sec에서 3345로 일어났다. 이후 초기균열이 성장하는 220.2sec에서 누적 AE count가 7359로 상승하였다. 또한 최대하중이후 하중이 1.02kN으로 급격히 감소하여 균열이 상대적으로 크게 성장하는 227sec에서 누적 AE count 역시 19.4×10^3 로 급상승하는 것을 알 수 있다. 이후 균열진행은 Mode II 층간파단 형태를 나타내며 누적 count 증가율이 하중감소 때의 증가율보다 적으나 서서히 증가하여 최대 균열성장길이(Δa)가 45.05mm까지 얻어진 누적 AE count는 85.97×10^3 로 일어났다.

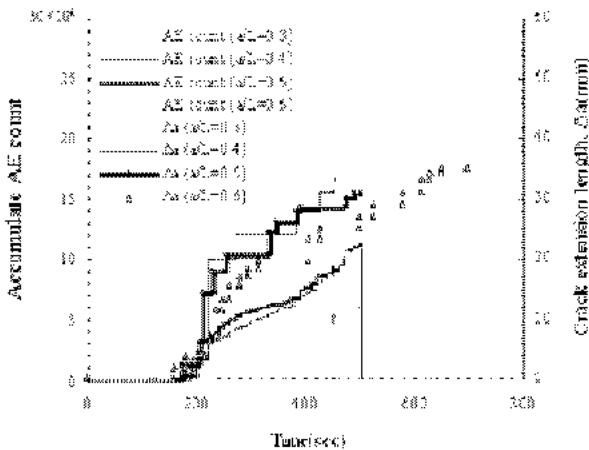


Fig. 5 AE count and crack extension length variation according to the time

Fig. 5의 $a_0/L=0.4$ 의 경우 초기균열 생성 전에 AE count는 120sec에서 669로 일어났으며 초기균열이 성장하는 190sec에서 누적 AE count가 7360로 상승하였다. 이후 최대 균열성장길이(Δa)가 33.33mm까지 얻어진 누적 AE count는 93×10^3 로 일어났다. $a_0/L=0.5$ 와 0.6의 경우에도 $a_0/L=0.3$ 과 0.4의 경우와 유사한 경향을 나타내며 $a_0/L=0.5$ 최대 균열성장길이(Δa)가 33.33mm까지 획득된 최대 누적 AE count는 93.0×10^3 로 일어났다. $a_0/L=0.6$ 에서 최대 균열성장길이(Δa)가 35.17mm까지 획득된 최대 누적 AE count는 16.1×10^4 로 일어났다.

Fig. 6은 ENF 시험편을 이용한 평직 CFRP 복합 재료에 대하여 굽힘시험 동안 실시간 획득된 AE진폭을 시간에 대하여 균열성장길이(Δa)와의 관계를 나타낸 것이다. 앞에 언급한 AE count가 재료손상의 빈도를 나타낸다면 AE 진폭은 그 손상에 대한 크기를 나타낸다. 즉 AE 진폭의 크기는 ENF 시험편의 균열성장 상태에 따른 손상의 크기를 나타내는 것이다. Fig. 6은 a_0/L 비가 0.6의 경우로서 최초 AE 진폭은 약 140.43sec에서 51.8dB의 진폭을 발생시킬 수 있으며 2.22mm의 초기균열이 발생하는 158.22sec에서 59.6dB의 진폭이 발생되었다. 또한 파괴시험 종료까지 얻어진 최대 AE진폭은 626.1sec에서 86.4dB을 유발시켰다. 이 지점은 Mode II 적층분리 균열이 하중점을 지나면서 발생되며 균열이 Wrap의 0° 방향으로 성장하다가 Weft인 90°방향의 섬유와 교차하는 지점에서 Weft 섬유 소 속으로 일부 진행하고 다시 Wrap 섬유다발의 가까운 쪽으로 성장한 균열이 섬유파단 및 적층분리현상에 의해 고진폭을 발생시키는 것으로 판단된다. 이러한 균열성장 상태에 따른 70dB이상의 고진폭이 1회 발생한 후 미처 파단되지 못한 섬유와 기지의 파단이 수반됨에 따라 평균 60dB이하의 진폭이 빈번하게 발생하는 것으로 사료된다. 이와 같이 AE count와 진폭 등의 AE 특성은 초기균열감지와 손상거동을 실시간으로 알 수 있는 유용한 정보를 제공한다.

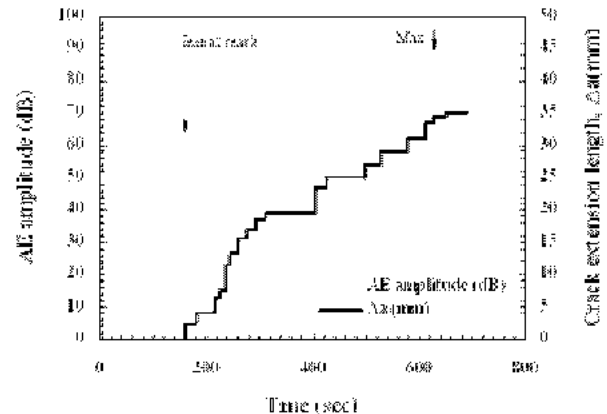


Fig. 6 The relationships AE amplitude and crack extension length of fracture test ($a_0/L=0.6$)

3.2 ENF 시험편에 의한 파괴인성

ENF 시험편을 이용한 3점 굽힘시험에서 얻어지는 모드 II에 대한 에너지해방률은 보 이론에 의해 일반적으로 다음 식 (1)에 의해 구해질 수 있다.

$$G_{IIc} = \frac{9a^2 P_c \delta}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (1)$$

여기서 P_c 는 하중, B 는 두께, L 은 스펠길이의 1/2 이고 a 는 균열길이이며 δ 는 레이저변위 측정기를 이용하여 측정된 ENF 시험편의 중앙부 처짐량이다.

컴플라이언스법(Compliance method)은 층간파괴 인성치를 구하는 실험적인 방법으로서 여러 가지 균열길이에 대응하는 컴플라이언스를 구하고 이들의 관계를 구하기 위하여 다항식으로 나타내는 방법이다. 실험결과에 의한 컴플라이언스 C 와 a 를 다항식을 이용하여 보 이론에서 3차항으로 구한다¹²⁾. Fig. 7은 균열길이와 컴플라이언스의 관계를 나타낸다. 실험 중 이동식 현미경을 통해 측정된 균열길이와 레이저 변위 측정기에 의해 측정된 처짐량과 하중에 상응하는 컴플라이언스를 구하면 다음과 같은 식 (2)을 얻을 수 있다.

$$C = C_0 + ma^3 \quad (2)$$

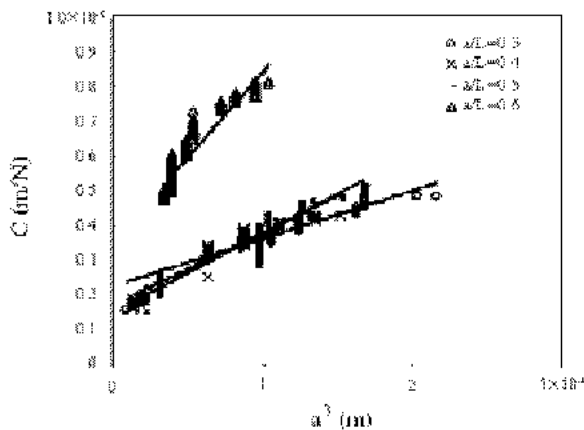


Fig. 7 The relationship between compliance and a^3 crack length

여기서 C_0 는 정수이고 m 은 C 와 a^3 의 기울기이다. C_0 는 $a_0/L=0.3, 0.4, 0.5$ 와 0.6 에서 각각 $2.0 \times 10^{-6}, 2.0 \times 10^{-6}, 2.0 \times 10^{-6}, 4.0 \times 10^{-6}$ 로 얻어졌고 m 은 $a_0/L=0.3, 0.4, 0.5$ 와 0.6 에서 $0.0136, 0.0208, 0.0225$ 와 0.0488 를 얻었다. m 을 이용하여 에너지해방률 G_{II} 는 다음 식 (3)에 의해 주어진다.

$$G_{II} = \frac{3P^2 ma^2}{2B} \quad (3)$$

Fig. 8은 균열길이가 성장하는 지점에서 이동식 현미경을 통해 측정된 균열성장길이에 대한 G_{II} 의

변화를 나타낸다. G_{IIc} 는 층간임계에너지해방률을 나타내며 $a_0/L=0.3$ 에서 $1.07kJ/m^2$, $a_0/L=0.4$ 에서는 $2.2kJ/m^2$, $a_0/L=0.5$ 에서 $0.92kJ/m^2$, $a_0/L=0.6$ 에서 $3.79kJ/m^2$ 로 각각 얻어졌다. 초기 균열길이의 변화와 관계없이 균열길이가 성장함으로 인해 에너지해방률 또한 상승하고 있으며 이것은 균질재료에서 볼 수 없는 직물구조 특유의 섬유가교현상으로 에너지해방률이 상승하는 것으로 판단된다.

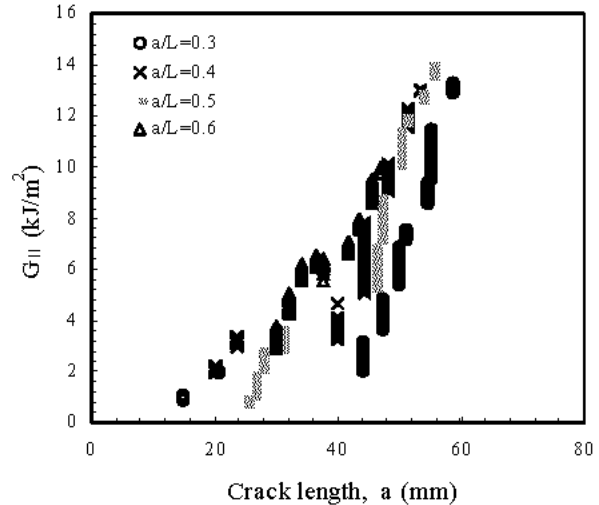


Fig. 8 The energy release rate variation for mode II

Fig. 9는 균열성장길이에 대한 Mode II 파괴저항 곡선을 나타낸다. 사용된 응력확대계수 K 는 응력확대계수와 에너지해방률의 관계인 다음 간편식 (4)를 이용하였다.

$$K_{II} = \sqrt{GE'} \quad (4)$$

식 (4)에서 K 는 파괴인성치, $E' = E/(1-\nu^2)$ 로써 E , ν 는 각각 탄성계수와 포아송비이다. 평직 CFRP의 경우 전보¹³⁾에서 구한 $E = 149.3GPa$ 및 $\nu = 0.09$ 를 적용하였다. 이때 얻어진 층간파괴인성치 K_{IIc} 는 $a_0/L=0.3, 0.4, 0.5$ 와 0.6 에서 각각 $0.4MPa \cdot m^{1/2}, 0.58MPa \cdot m^{1/2}, 0.37MPa \cdot m^{1/2}$ 와 $0.75MPa \cdot m^{1/2}$ 이다.

Fig. 10은 누적 AE count와 응력확대계수의 변화를 나타낸 것으로 AE count의 증가에 따라 K_{II} 값은 증가함을 알 수 있다. 여기에서 일반적으로 얻어지는 균열길이의 관계대신에 누적 AE count의 측정으로 응력확대계수를 예측할 수 있는 다음 관계식 (5)에서 (8)를 얻을 수 있다.

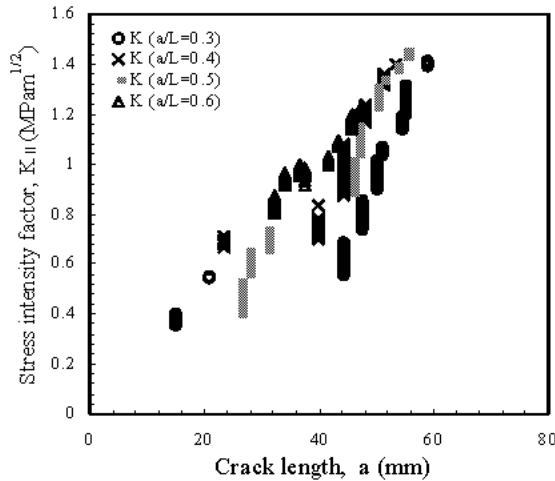


Fig. 9 Crack extension resistance curve

$$K_{II} = 0.7564 \times 10^{-11} C_{AE}^2 \quad (a_0/L=0.3) \quad (5)$$

$$+ 2.0864 \times 10^{-6} C_{AE} + 0.1885$$

$$K_{II} = 0.503 \times 10^{-11} C_{AE}^2 \quad (a_0/L=0.4) \quad (6)$$

$$+ 4.3961 \times 10^{-6} C_{AE} + 0.5819$$

$$K_{II} = 1.229 \times 10^{-11} C_{AE}^2 \quad (a_0/L=0.5) \quad (7)$$

$$+ 6.3 \times 10^{-6} C_{AE} + 0.5543$$

$$K_{II} = 0.9904 \times 10^{-11} C_{AE}^2 \quad (a_0/L=0.6) \quad (8)$$

$$+ 1.512 \times 10^{-6} C_{AE} + 0.5809$$

여기서 C_{AE} 는 누적 AE count를 나타낸다.

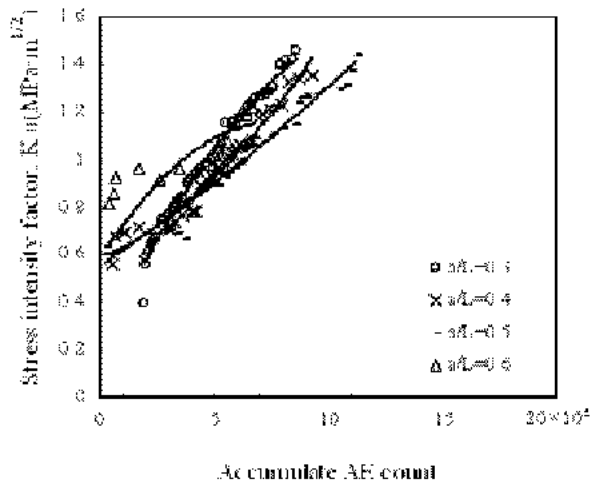


Fig. 10 The relationship of AE accumulate count and K_{II} at this point increasing AE count

4. 결 론

평직 CFRP 복합재료를 이용한 ENF 시험편의 3

점 굽힘시험을 수행함과 동시에 AE센서를 부착하여 파괴저항 및 AE 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ENF 시험편에 하중이 가해지기 시작하여 초기 균열이 발생하기 전까지 하중의 증가와 함께 하중선 변위는 선형적인 관계를 나타내었다. 또한 $a_0/L=0.3$ 의 경우 최대하중 2.16kN 이후 하중이 감소하는 지점에서 균열이 급격히 성장하였으며, 최대 균열성장길이는 45.05mm로 얻어졌다.
- 2) 누적 AE count의 발생은 $a_0/L=0.3$ 에 대하여 초기균열이 성장하는 220.2sec에서 누적 AE count가 7359로 상승하였고 최대하중 이후 하중 1.02kN으로 급격히 감소하여 균열이 상대적으로 크게 성장하는 227sec에서 누적 AE count 역시 19.4×10^3 로 급상승하여 최대 균열성장길이(Δa)가 45.05mm까지 얻어진 누적 AE count는 85.97×10^3 로 얻어졌다.
- 3) $a_0/L=0.6$ 의 경우 시간주파수 분석에서 초기 AE 진폭은 약 140.43sec에서 51.8dB의 진폭을 발생시켜 초기균열발생시에 59.6dB로 상승하였고, 최대 AE진폭은 626.1sec에서 86.4dB의 고진폭을 유발시켰다. 이것은 균열이 Wrap와 Weft 섬유 방향이 교차하는 지점에서 Weft 섬유소 속으로 일부 진행한 균열이 섬유 파단 및 적층분리에 의해 고진폭을 발생시키는 것으로 판단된다.
- 4) 층간임계에너지해방률 G_{IIc} 는 a_0/L 비가 0.3, 0.4, 0.5와 0.6에서 각각 1.07kJ/m^2 , 2.2kJ/m^2 , 0.92kJ/m^2 , 3.79kJ/m^2 로 각각 얻어졌으며 응력확대계수와 에너지해방률의 간편식에 의해 얻어진 K_{IIc} 는 $a_0/L=0.3, 0.4, 0.5$ 와 0.6에서 각각 $0.4\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $0.58\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $0.37\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 와 $0.75\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이다.
- 5) AE count 측정에 의한 모드II 층간파괴저항을 알 수 있는 간편식을 나타내었다.

참고 문헌

1. 이경엽, 이중희, 1998, "탄성일인자방법을 적용한 단일방향 탄소섬유/에폭시 DCB 시험편의 파괴인성 결정", 대한기계학회 논문집 A권, 제22권, 제3호, pp. 540-544.
2. 홍두현, 권오양, 1996, "충격손상을 받은 CFRP의 굽힘하중하에서의 AE특성", 한국복합재료학회, 추계학술발표대회논문집, pp. 135-140.

3. 웅장우, 이영신, 심봉식, 지용관, 주영상, 1989, "탄소섬유 복합재료의 AE 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제13권, 제1호, pp. 105-114.
4. 홍창선, 1990, "복합재료의 층간파괴 실험법", 대한기계학회지, 제30권, 제2호, pp. 172-179.
5. 이강용, 권순만, 1990, "복합재료의 AE법과 ASTM법에 의한 층간파괴 인성치 결정", 한국복합재료학회, 추계학술대회논문집, pp. 123-129.
6. P. E. Keary and L. B. Ilcewicz, 1985, "Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composites Using Slende Double Cantilevered Beam Specimens", Journal of Composite Materials, Vol. 19, pp. 145-177.
7. 심재열, 홍창선, 1989, "ENF 실험을 이용한 Gr/Ep 복합적층판의 층간전단 파괴인성치 평가", 한국복합재료학회, 춘계학술대회논문집, pp. 7-13.
8. 윤동진, 1997, "음향방출을 이용한 구조물진단기술", 대한기계학회지, 제37권, 제6호, pp. 47-53.
9. M. Giordano, A. Calabro, C. Esposito, A. D'Amore, and L. Nicolais, 1998, "An Acoustic-Emission Characterization of the Failure modes in Polymer-Composite Materials", Composites science and technology, Vol. 58, No. 12, pp. 1923-1928.
10. ASTM D 3039, 2000, Standard test method for "tensile properties of polymer matrix composite materials".
11. P. J. Shull, 2000, Nondestructive Evaluation, Marcel Pekker, Inc, pp. 370-371.
12. 김형진, 박명일, 광대원, 김재동, 고성위, 2002, "하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴인성치에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제4호, pp. 42-47.
13. 윤유성, 권오현, 2004, "평직구조 CFRP 적층판 복합재의 강도 및 균열진전특성에 대한 AE 평가", 한국산업안전학회지, 제18권, 제1호, pp. 31-37.