

원공노치를 가진 CFRP의 적층방향에 따른 기계적 특성 평가

태영일 · 윤유성 · 권오현*

부경대학교 안전공학과 대학원 · *부경대학교 안전공학과

1. 서론

안전성의 측면에서 기계설비 및 구조물의 파손을 유발할 수 있는 재료손상에 대한 평가는 매우 중요하기 때문에, 사용 목적에 부합되는 우수한 첨단재료의 개발과 그 특성을 파악할 필요성이 있다. 그 중에서 섬유강화 복합재료는 금속재료보다 높은 비강도와 비강성을 가지며 적층각도, 적층순서 및 경화방법에 따라서 원하는 강도와 강성을 가질 수 있다. 특히, 탄소섬유강화복합재료(CFRP)는 스포츠용품에서 최신 항공기의 구조재료에 이르기까지 경량화 관점에서 기존의 재료를 대체해 나가고 있다. 이러한 CFRP 복합재료는 기지와 섬유사이의 비균등성, 비등방성 때문에 금속에서 볼 수 없는 적층분리, 섬유균열, 섬유뿔힘 등을 포함하는 여러 문제점이 발생되기 쉽다. CFRP 복합재료가 실제구조물에 적용될 때 가공, 제작 및 사용시 결함 등이 유발되어, 재료 자체가 갖는 취성의 영향과 복합적으로 작용하여 극히 낮은 하중상태에서 급작스러운 균열진전이 발생 될 수 있다.⁽¹⁾ 이와 같이 복합재료 내에 여러 형태의 파괴기구현상이 존재할 수 있고 결함의 종류에 따라 강도에 영향을 미치며 파손이 진행되면 특히 수직방향층 기지에 발생한 균열은 복합재료 직교적층판의 강성에 큰 영향을 미친다.^(2,3) 이러한 파괴기구현상을 평가하는 방법으로써 음향방출(Acoustic Emission)법이 유용하게 적용될 수 있다.

음향방출은 가해지는 하중의 형태와 종류에 따라 재료자체에서 방출되는 탄성파이다. 음향방출에 관한 연구는 1970년대 이후 크게 발전되어, Nonaka 등⁽⁴⁾은 CFRP적층판의 손상과정을 적외선응력 화상과 AE에 의하여 검토하였다. 근래에는 Ni 등^(5~7)이 AE와 파괴파라미터와의 관계를 규명하기 위하여 복합재료를 사용하였다. 또한 Chow 등⁽⁸⁾은 노치를 가진 GFRP에 인장하중시 발생하는 AE신호와 초음파 Tomography를 이용하여 노치에서 발생한 균열진전 정도가 복합재료 내에 미치는 영향을 연구하였다. 이와 같이 섬유강화복합재료에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 CFRP 복합재료 파괴기구에 대한 명확한 파악은 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 [0/90]s과 [90/0]s 적층 및 [0/±45/90]s 적층 CFRP 복합재료에 AE 센서를 부착하여 전형적인 인장시험을 행한 후 그 기계적 특성을 평가하고 SEM에 의한 파단면 평가와 동시에 소형 CCD 카메라를 이용하여 파괴과정을 실시간 연속 촬영하여 AE 센서에 의한 AE정보로 원공주위의 손상 파괴형상에 대하여 평가하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 국내 한국카본(주)에서 생산, 시판되는 고탄성 프리프레그인 Low HCU 1003으로 Table 1에 그 물성치를 나타낸다.

Table 1 Mechanical properties of CFRP

Material	CF Wt(gr/m ²)	Resin Wt(gr/m ²)	R/C	Scrim Wt(gr/m ²)	Total Wt(gr/m ²)	t (mm)
HCU 1003	112	41	27±2	34	155	0.126

탄소섬유강화프리프레그는 에폭시 수지를 사용하여 기지를 만들고, 탄소섬유를 혼입하여 반경화 상태로 가공된다. 프리프레그는 가로, 세로 각각 245mm로 절단하여 [0/90]_s, [90/0]_s와 [0/±45/90]_s의 3종류로 8플라이를 적층하였다. 적층된 적층판은 금형판에 이형재(Silicon Oil KS 707)를 바른 후 열성형기에서 삽입하여 성형온도 150℃, 게이지압력 80kg/cm²로 유지하여 성형하였다. 성형된 적층판은 잔류응력완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 대기 중에 1시간 이상 보존시켜 최종 두께가 0.9mm로 되게 하였다. 성형된 CFRP 복합재료는 다이아몬드 휠커터를 사용하여 ASTM D-3039-00에 참조하여 인장시험편의 길이와 폭을 각각 200mm×25mm로 절단하였다. 절단된 시험편은 원공노치를 가공하기 위하여 지름 5mm의 원통형 다이아몬드 드릴을 사용하였으며 가공시 드릴작업으로 인한 적층분리와 같은 손상을 최소화 하기 위해 자체 제작한 지그를 부착하여 가공하였다. 또한 인장시험시 시험기 그림으로부터 손상을 방지하기 위하여 시험편 끝단에 열화 에폭시접착제(Araldite)를 사용하여 알루미늄 탭(두께 : 2.0mm)을 가공 부착하였다. 시험편은 알루미늄탭을 부착 후 전기로에서 130℃로 30분간 열처리를 시행하여 탭의 접합강도를 강화시켜 시험편의 슬립을 방지하였다. Fig. 1은 시험편의 크기와 형상을 나타낸다.

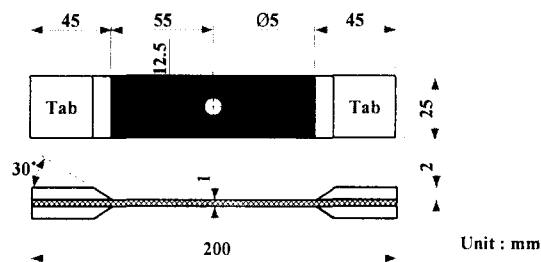


Fig. 1 CFRP tensile test specimen configuration

2.2 실험방법

재료의 탄성계수, 최대인장강도 등의 기본 재료 물성치를 측정하기 위한 인장시험은 상온에서 만능동적시험기(H사, 5ton)를 사용하였으며 ASTM D3039-00에서 추천하고 있는 방법인 변위제어로 0.5mm/min로 행하여 졌다. 또한 실험중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 DA 프로그램을 이용하여 pc에 입력되었다. 인장시험동안 기지 및 섬유 표면손상과정을 P사의 WV-CP220 소형 CCD 카메라에 3.3배 현미경 접안렌즈를 부착하여 확대 모니터링하고 그래픽 보드가 장착된 pc에 의해 순간적인 손상과정을 저장하였다.

인장시험 결과로 파단된 재료의 미시구조는 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 파단면을 관찰하였다. 섬유에 수직과 수평방향으로 절단한 시편을 SEM관찰도중에 전하되는 것을 방지하기 위하여 코팅 처리하였다. SEM에 의하여 관찰 측정된 섬유의 직경은 7.4 μ m였다. 그리고 AE 측정에는 미국 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템을 사용하였다. AE 센서는 공진주파수가 150kHz인 R15센서를 사용하였으며 시험편과 센서사이에 접착매질을 바른 후 천테이프로 압착하였고, 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였다. Threshold는 Fixed로 설정하였고 Threshold값은 40dB로 하였다. 본 실험의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

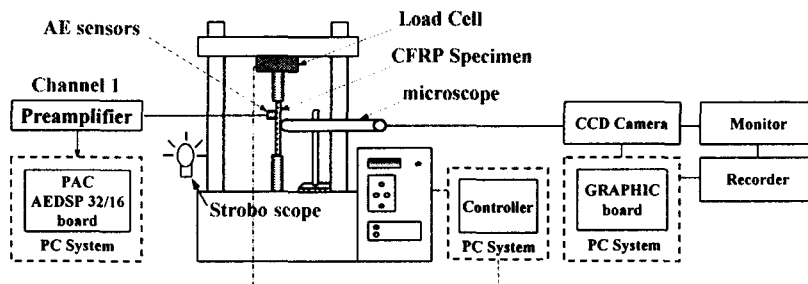


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험

Fig. 3은 [0/90]s, [90/0]s 그리고 [0/±45/90]s의 3가지종류 적층판에 원공노치를 가지는 CFRP 복합재료 시험편의 인장시험에 대한 결과로서 하중-변위 선도를 나타낸다. [0/90]s와 [90/0]s의 경우에는, 적층방향에 관계없이 변위가 약 0.3mm이후부터 파단까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있음을 알 수 있고 [0/90]s와 [90/0]s 적층시험편에서 [0/90]s보다 [90/0]s의 평균최대파단하중이 약 155kgf정도가 높음을 알 수 있다. [0/±45/90]s 경우에는 변위가 0.5~1.0mm정도 지난후 비로소 안정적인 직선 변화를 가지며 평균하중이 1053kgf로서 3가지 적층방향 시험편 중 가장 낮게 나타났으며 적교적층재에 대해서 약 11.7~18.6kgf/mm²의 인장강도의 차이를 나타내었다. Table 2는 인장시험을 통하여 얻어진 최대인장강도의 평균값을 나타내었다.

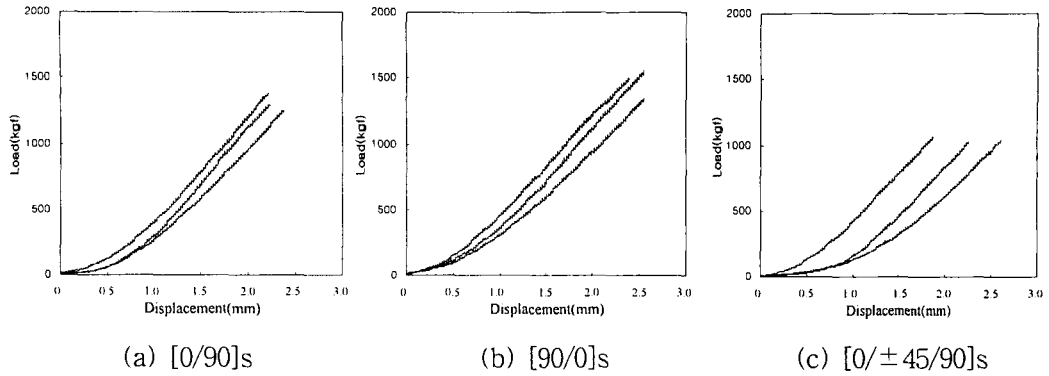


Fig. 3 Load-displacement relationships.

Table 2 variation of ultimate strength of tensile tests

Fiber Orientation	$\sigma_u(\text{kgf}/\text{mm}^2)$	Maximum Load(kgf)
[0/90]s	58.5	1315.7
[90/0]s	65.4	1470.7
[0/±45/90]s	46.8	1053.7

3.2 SEM관찰에 의한 파단분석

시험편이 파단된 후 주사전자현미경(SEM)을 통해 시험편의 파단면과 측면을 관찰한 사진을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)는 [0/90]s 하중방향에 수직인 방향으로 섬유가 파단된 측면을 나타낸다. Fig. 4 (b)와 (c)는 [90/0]s과 [0/±45/90]s의 최종파단면 양상을 나타내고 있다. Fig. 4 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 90° 층에서 먼저 파단된 후 0° 층과의 사이에 적층분리가 진행되어 하중방향의 섬유들이 최종 파단된 것으로 추정된다. Fig. 4 (d)는 0° 적층에서 하중방향으로 섬유소의 뿔침현상을 보여주는 것으로 파손기구에는 파단, 박리, 섬유뿔침 등 CFRP 복합재의 여러 파손기구가 관여하고 있음을 알 수 있다.

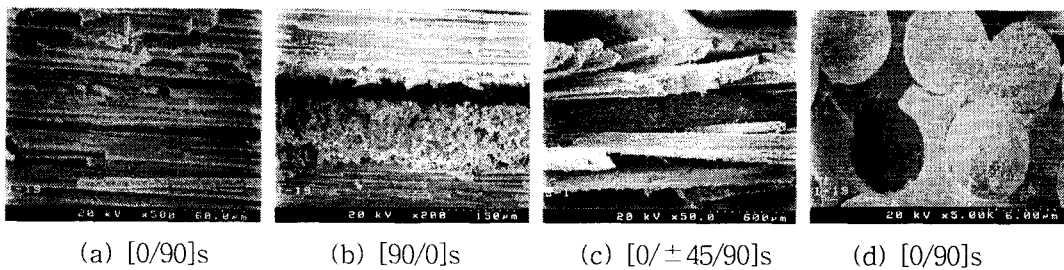


Fig. 4 SEM photograph of side and fracture surface for after tensile test.

3.3 AE에 의한 특성

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 각각 인장시험과 동일하게 $[0/90]_s$, $[90/0]_s$ 그리고 $[0/\pm 45/90]_s$ 3가지종류 적층의 원공노치를 가지는 CFRP 복합재료에 대하여 인장시험시 얻어지는 AE 특성으로 3초 동안 발생한 AE count의 누적합계를 나타낸 것이다. Fig. 5 (a)는 $[0/90]_s$ 에서 인장시험을 시작하여 시험편이 완전히 파단되는데 걸리는 총시간이 264.8초이다. 초기의 하중이 가해짐에 따라 대략 111초 이후부터 153초까지의 II영역에서 333이하의 아주 낮은 count를 보여주고 있으며 이후 III영역의 count는 하중이 증가함에 따라 243초에서의 11600까지 일정한 비율로 증가하다가 이후 최대 누적 count가 19600까지 급상승한 후 264.8초에서 파단됨을 알 수 있다. Fig. 5의 (b)의 경우는 144초 이후부터 153초까지인 II영역은 333이하의 count를 보여주며 이후 하중의 증가와 함께 일정한 count의 증가를 가지는 273초까지 최대 20800의 값을 보이며 이후 최대 누적 count가 44000까지 급상승한 306.2초에서 파단된다. Fig. 5의 (c)의 경우는 96초 이후부터 141초까지는 467이하의 count를 보여주며 이후 하중의 증가와 함께 일정한 count의 증가를 가지는 204초까지 5000의 값을 보이며 이후 최대 누적 count가 10600까지 급상승한 224.3초에서 파단된다. 적층방향에 따라 섬유파단과 기지층 손상의 영향이 다르게 주어지며 $[90/0]_s$, $[0/90]_s$, $[0/\pm 45/90]_s$ 순으로 count수가 낮아진다. 이것은 (a)의 적층 구조의 경우 내부의 중심적층이 하중방향에 수직으로 주어지므로 기지손상과 박리현상으로 이어져 최종섬유파단이 발생되어 표면손상이 형성되며 (b)의 경우는 내부 중심적층부가 작용 하중방향으로 배향되어 있으므로 초기 섬유소파단의 영향으로 인하여 높은 count가 발생하는 것으로 간주될 수 있다. 또한 어느 경우에 있어서도 시간에 따른 누적 count수는 (a)~(c)에서처럼 각각 I, II, III, IV로 나누어져 초기단계, 부하단계, 파손성장단계, 최종파단단계로 구분할 수 있다.

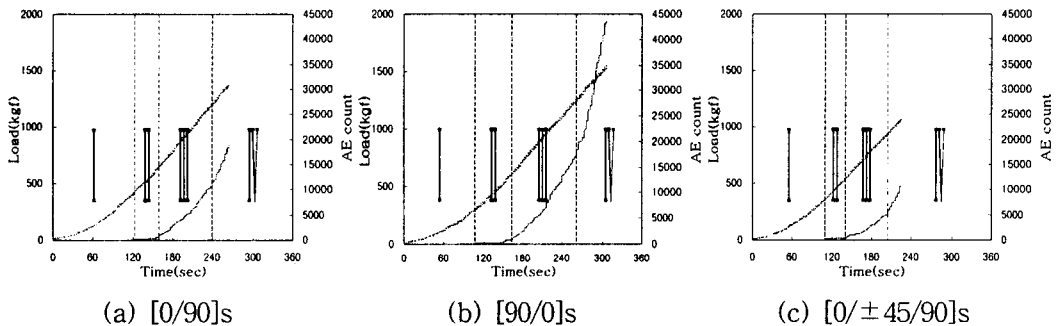
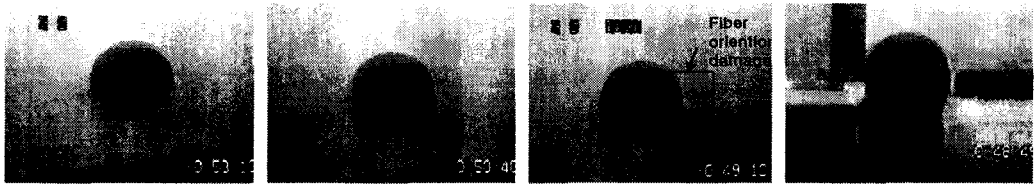


Fig. 5 The relationships of load and AE count for tensile test time.

3.4 CCD에 의한 비디오 모니터링 기법

Fig. 6 (a)~(d)는 $[0/90]_s$ 적층의 경우로 시험편 표면손상을 P사의 WV-CP220 소형 CCD 카메라를 통한 비디오로 기록한 예를 나타낸다. Fig. 6 (a)는 인장시험 시작시 원공노치 주위표면을 나타낸다. Fig. 6 (b)는 하중값이 153kgf로 될 때 원공노치의 주위 표면에 별다른 손상이 일어나지 않는 부분으로 이때 AE count가 낮은 333값을 나타낸

다. Fig. 6 (c)에서 원공노치의 확대 변형이후 원공노치 표면주위 섬유방향으로 발생 성장된 균열손상현상을 관찰할 수 있으며 이 때 하중값이 1213kgf로 나타났다. Fig. 6 (d)는 최대하중 1386kgf일 때 최종 파단된 시험편 형상을 나타내며 하중방향과 수직방향으로 파단되었으며 이 때 AE count가 최대 19600값을 나타내었다.



(a) Load=0kgf (b) Load=153kgf (c) Load=1213kgf (d) Load=1386kgf

Fig. 6 Photographs of video recording of fracture by tensile test([0/90]_s).

4. 결론

[0/90]_s, [90/0]_s, [0/±45/90]_s 적층방향에 따른 탄소섬유강화복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장시험을 통해 발생하는 AE특성과 SEM 및 CCD 카메라를 통한 파단면 관찰로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) [0/90]_s보다 [90/0]_s가 최대파단하중이 약 155kgf정도가 높았고 [0/±45/90]_s는 가장 낮은 최대파단하중이 나타났다.
- (2) SEM을 통해 [0/90]_s는 하중방향에 수직인 방향으로 섬유가 파단되었고 [90/0]_s는 90° 층에서 먼저 파단된 후 0° 층과의 사이에 적층분리가 된 후 파단, 박리, 섬유 뽑힘 등 CFRP 복합재의 여러 파손기구가 관여하였다.
- (3) 인장시험에서 발생하는 AE count 누적합계를 나타낸 결과 최대파단하중이 높은 [90/0]_s의 count가 가장 높은 38300값으로 나타났고 그 다음 [0/90]_s는 19200값, [0/±45/90]_s가 가장 낮은 10700값으로 나타났다.
- (4) CFRP에 대한 인장시험으로 AE count값의 변화를 파손의 초기단계인 I, II영역과 내부의 손상으로 인한 성장단계인 III영역 그리고 최종파단단계인 IV영역의 형태로 나뉘어져 적층방향과 관계없이 II단계에서 count가 천천히 증가하다가 III단계는 일정하게 증가하였으며 IV단계에서 급상승하였다.
- (5) [0/90]_s의 표면손상을 소형 CCD 카메라를 통한 비디오로 기록을 분석한 결과 하중값이 153kgf로 될 때까지는 원공노치 주위표면에 별다른 손상이 관찰되지 않았으나 하중값이 1213kgf로 일정하게 증가할 때 원공노치 주위표면 섬유방향으로 발생된 균열손상현상이 나타나고 마지막으로 최대 AE count가 발생될 때 시험편이 최종파단이 나타났다.