

원공노치를 가진 CFRP의 적층방향에 따른 기계적 특성 평가

태영일 · 윤유성 · 권오현[†]

부경대학교 안전공학과

(2001. 12. 10. 접수 / 2002. 3. 14. 채택)

The Mechanical Properties Evaluation on Lay-up Orientation Effect of CFRP Laminate Composite with the Hole Notch

Young-II Tae · Yu-Seong Yun · Oh-Heon Kwon[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received December 10, 2001/ Accepted March 14, 2002)

Abstract : The tensile tests for $[0/90]_s$, $[90/0]_s$, and $[0/\pm 45/90]_s$ laminate composite were accomplished with acoustic sensor and failure processes were recorded by a video camera in real time. Also SEM examinations for fracture and side surface were carried out. The purpose of study is estimation of the failure mechanism and the mechanical properties effected by lay-up orientation for CFRP laminate composite with the hole notch. From the results, mechanical properties were obtained and they are similar between two kinds of cross-ply orientation in CFRP laminate composites, but not on $[0/\pm 45/90]_s$. And according to increasing the load, accumulate AE count was increased, regardless of lay-up orientation. Futhermore, failure mechanism was described by a video monitoring and SEM.

Key Words : CFRP, mechanical properties, lay-up orientation, failure mechanism, SEM, delamination

1. 서 론

안전성의 측면에서 볼 때, 기계설비 및 구조물의 파손을 유발할 수 있는 재료손상에 대한 평가는 매우 중요하며 사용 목적에 부합되는 우수한 첨단재료의 개발과 그 특성을 파악할 필요성이 있다. 그 중에서 섬유강화복합재료는 금속재료보다 높은 비강도와 비강성을 가지며 적층각도, 적층순서 및 경화방법에 따라서 원하는 강도와 강성 및 기계적 성질을 가질 수 있다. 특히, 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP) 복합재료는 스포츠용품에서 최신 항공기의 구조재료에 이르기까지 경량화 관점에서 기존의 재료를 대체해 나가고 있다. 하지만 CFRP 복합재료는 기지와 섬유 사이의 비균등성, 비등방성 때문에 금속에서 볼 수 없는 기지균열(matrix cracking), 섬유파단, 섬유와 기지간의 박리, 적층분리, 섬유균열 및 섬유 뺏힘 등을 포함하는 여러 문제점이 발생되기 쉽다.

CFRP 복합재료가 실제구조물에 적용될 때 가공, 제작 및 사용상 결함 등이 유발되어, 재료 자체가 갖는 취성의 영향과 복합적으로 작용하여 극히 낮은 하중상태에서 급작스러운 균열진전이 발생할 수 있다.¹⁾ 이와 같이 파손이 진행되면 작용하는 하중의 수직방향층 기지에 발생한 균열은 복합재료 직교적층판의 강성에 큰 영향을 미친다.^{2,3)} Lawcock 등⁴⁾은 노치의 형태에 따른 잔류인장강도와 층간분리의 특성에 대해 고찰하였고, Yoshiyuki 등⁵⁾은 v 노치 CFRP 시험편에 대하여 충격시험을 실시하여 기계적 특성에 대한 적층순서의 영향을 연구하였다. 이러한 파괴기구현상을 평가하는데 많은 실험방법이 있지만 그 중에서 가해지는 하중의 형태와 종류에 따라 재료자체에서 방출되는 탄성파인 음향방출(Acoustic Emission, AE)법이 유용하게 적용될 수 있다. 음향방출에 관한 연구는 1970년대 이후 크게 발전되어, Nonaka 등⁶⁾은 CFRP적층판의 손상과정을 적외선응력 화상과 AE에 의하여 검토하였고, 전 등⁷⁾은 직교적층판의 횡방향층 균열밀도변화에 대한 AE특성을 연구

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

하였다. Ni 등⁸⁾이 AE와 파괴파라미터와의 관계를 규명하기 위하여 복합재료를 사용하였다. 또한 Chow 등⁹⁾은 노치를 가진 GFRP에 인장하중시 발생하는 AE 신호와 초음파 X선단층촬영법을 이용하여 노치에서 발생한 균열진전 정도가 복합재료 내에 미치는 영향을 연구하였다. 이와 같이 섬유강화복합재료에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 CFRP 복합재료 손상기구에 대한 명확한 파악은 아직 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 상용 프리프레그로 제작된 CFRP의 기계적 특성 및 파손기구를 평가하기 위해 원공노치를 가진 [0/90]s, [90/0]s 및 [0/±45/90]s 적층 CFRP 복합재료로 전형적인 인장시험을 수행하였다. 시험편 표면에 AE센서를 부착하여 기계적 특성과 AE신호를 비교 평가하였으며 동시에 소형 CCD 카메라를 이용하여 원공주위의 파손형상을 실시간으로 모니터링하였다. 또한 주사전자현미경(SEM)으로 파단면을 관찰하였다.

2. 복합재료 및 음향방출 특성

2.1. 복합재료의 특성

두 가지 이상의 서로 다른 성질의 유용한 재료가 거시적으로 혼합된 복합재료는 각 성분이 원래의 성질을 가지고 있어 미시적으로 보면 비균질한 상태로 존재하며 낮은 비중 때문에 높은 비강도와 비강성의 값을 가질 수 있고 원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있어 재료의 낭비를 막을 수 있다. 또한 탄소섬유는 열팽창계수가 거의 0에 가깝기 때문에, 온도의 변화에 따라 크기가 거의 변화하지 않는 구조물을 제조할 수가 있다. 복합재료는 서로 다른 플라이(ply)와 플라이가 기지에 의하여 결합되어 대부분 적층판 형태로 많이 사용되며 하중을 받는 복합재료 적층판의 변위나 변형률은 각 층 사이의 상호작용으로 인하여 단일층 복합재료와 다른 변위나 변형률이 나타나게 되고 파괴거동도 단일층의 파손거동보다 훨씬 복잡하다. Fig. 1은 대칭 적층판 복합재료의 경우에 대한 예로서 본 실험에 사용된 [0/±45/90]s의 적층방법을 나타낸다.

2.2. 음향방출의 특성과 측정

재료의 내부 또는 외부에 응력이 가해지면, 작용하는 응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 내부 결합이 생성되거나 완전파괴가 되기까지 그 재료 특유의 소리를 발생하게 되며 파괴시 축적되는 변형에

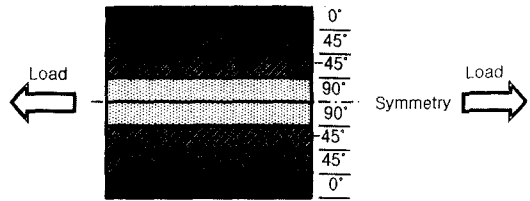


Fig. 1. Lay-up orientation of CFRP laminate composite([0/±45/90]s)

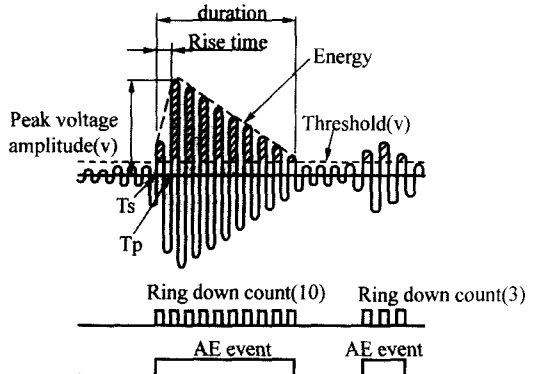


Fig. 2. Parameter of acoustic emission signal analysis

너지는 여러 형태의 에너지로 변환되어 계측장치에 의해서 가시적으로 검출될 수 있다. 이 중에서 물체가 외력에 의해 소재 그 자체의 변형으로 방출되는 탄성파를 음향방출(AE)이라 한다. AE법은 기존의 비파괴검사와 달리, 검출되는 에너지가 고체 내부에서 방출되는 것이므로 구조의 질적저하, 균열의 발생이나 성장, 고체의 소성변형 등을 동적 과정에서 포착하여 기존의 검사방법으로 불가능했던 정보를 알 수 있으므로 구조물의 결합위치와 설비의 파괴진단에 적용할 수 있다.

AE특성을 결정하는 AE신호처리 파라미터(Fig. 2 참조)는 AE사상, AE링다운 카운트, 진폭분포, AE에너지, 상승시간, 유지시간 등이 있다. 이러한 AE특성은 주로 진폭분포 또는 사상계수(event count) 등으로써 정량화되어 재료의 거동을 나타낼 수 있다.

3. 시험편 및 실험방법

3.1. 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 국내 한국카본(주)에서 생산, 시판되는 고탄성 프리프레그(Low HCU 1003, 두께 : 0.126mm)를 가로, 세로 각각 245mm로 절단하여 [0/90]s, [90/0]s 및 [0/±45/90]s로 8플라이를

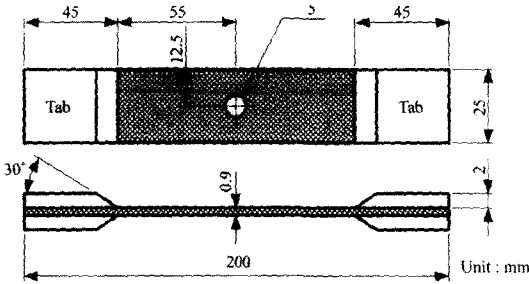


Fig. 3. CFRP specimen configuration

적층하였다. 적층된 적층판은 금형판에 이형제를 바른 후 삽입하여 열성형기에서 성형온도 150°C, 게이 지압력 80kg/cm²로 하여 성형하였다. 성형된 적층판을 잔류응력완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 대기 중에 1시간 이상 보존시켜 최종 두께 0.9mm가 되게 하였다. 적층된 CFRP 복합재료는 ASTM D-3039⁽⁹⁾를 참조하여 다이아몬드 휠커터에 의해 200mm×25mm로 절단가공 하였다. 절단된 시험편은 원공노치가 공시 적층분리와 같은 손상을 최소화하기 위해 자체적으로 제작한 지그와 지름 5mm의 원통형 다이아몬드 드릴을 사용하여 정밀 가공하였다. 또한 인장시험시 시험기의 그림으로부터 손상을 방지하기 위하여 시험편 끝단에 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로 1 : 1의 중량비로 혼합하여 알루미늄 탭(두께 : 2.0mm)을 부착하였다. 또한 알루미늄 탭을 부착 후 전기로에서 130°C로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시켜 시험의 슬립을 방지하였다. Fig. 3은 시험편의 크기와 형상을 나타낸다.

3.2. 실험방법

재료의 탄성계수, 최대인장강도 등의 기본 재료 특성치를 측정하기 위한 인장시험은 상온에서 만능동적시험기(H사, Ston)를 사용하였으며 ASTM D-3039에서 추천하고 있는 방법인 0.5mm/min 변위제어로 행하여 졌다. 실험중의 모든 자료는 디지털제어기와 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 입력되었다. 시험편의 방향과 약 30°에서 60W의 조명을 비추었고, 인장시험동인기 지 및 섬유에 표면손상과정을 소형 CCD 카메라를 부착하여 확대 모니터링하고 PC에 순간적인 손상과정을 저장하였다. 또한 파단된 재료의 미시 구조는 SEM을 사용하여 파단면을 관찰하였다. 섬유에 수직과 수평 방향으로 절단한 시험편은 SEM관찰도중에 전하되는 것을 방지하기 위하여 코팅처리되었다. SEM에 의하여 관찰 측정된

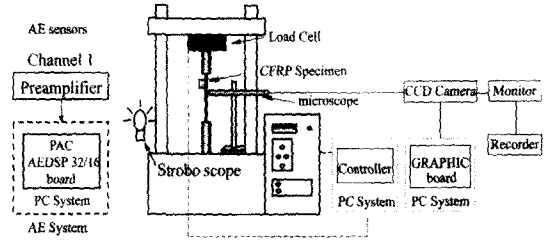


Fig. 4. Schematic diagram of experimental apparatus

섬유의 직경은 7.4μm였다.

AE계측에는 미국 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템을 사용하였다. AE센서는 공진주파수가 150kHz의 R15센서를 사용하였으며 시험편과 센서사이에 접촉매질(글리세린)을 바른 후 천테이프로 압착하였고, 100kHz에서 300kHz의 밴드패스 필터를 사용하였다. Threshold는 Fixed로 설정하였고 Threshold값은 40dB로 하였으며 해석 프로그램인 MISTRAS-2001에 의해 AE신호를 해석 처리되었다. 인장시험시 소형 CCD 카메라에 의해 손상부위를 촬영하였고 인장시험 후 AE특성 정보에 따른 시간과 비디오녹화시간을 비교 분석하여 파손기구의 AE신호 특성을 평가하였다. Fig. 4는 시험장치의 개략도를 나타낸다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 인장시험

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 [0/90]s, [90/0]s 그리고 [0/±45/90]s의 3가지 종류 적층판에 원공노치를 가지는 CFRP 복합재료 시험편의 인장시험에 대한 결과로서 하중-변위 선도를 나타낸다. 3종류의 적층판은 적층방향에 관계없이 하중-변위 선도가 거의 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있으며 취성재료의 파단특성과 유사하게 극한인장강도에 도달하여 파단되었다. 또한 일반적인 금속재료에 비해 변형율이 적게 나타나므로 취성재료에 가깝다는 것을 알 수 있다. 적층방향에 따른 평균최대파단하중은 Fig. 5(a)의 [0/90]s와 (b)의 [90/0]s는 평균최대파단하중이 1376.8kgf와 1454.3kgf로 약간 차이가 나타났으나 Fig. 5 (c)의 [0/±45/90]s 경우에는 평균최대파단하중이 1015.3kgf로 3가지 적층방향 시험편 중 가장 낮은 값을 보이며, 최대 변위는 모두 1.5mm 전후로 나타났다. 또한 [0/±45/90]s는 Fig. 5(a),(b)의 직교적층재보다 약 197.1~239.3MPa의 낮은 인장강도 차이가 나

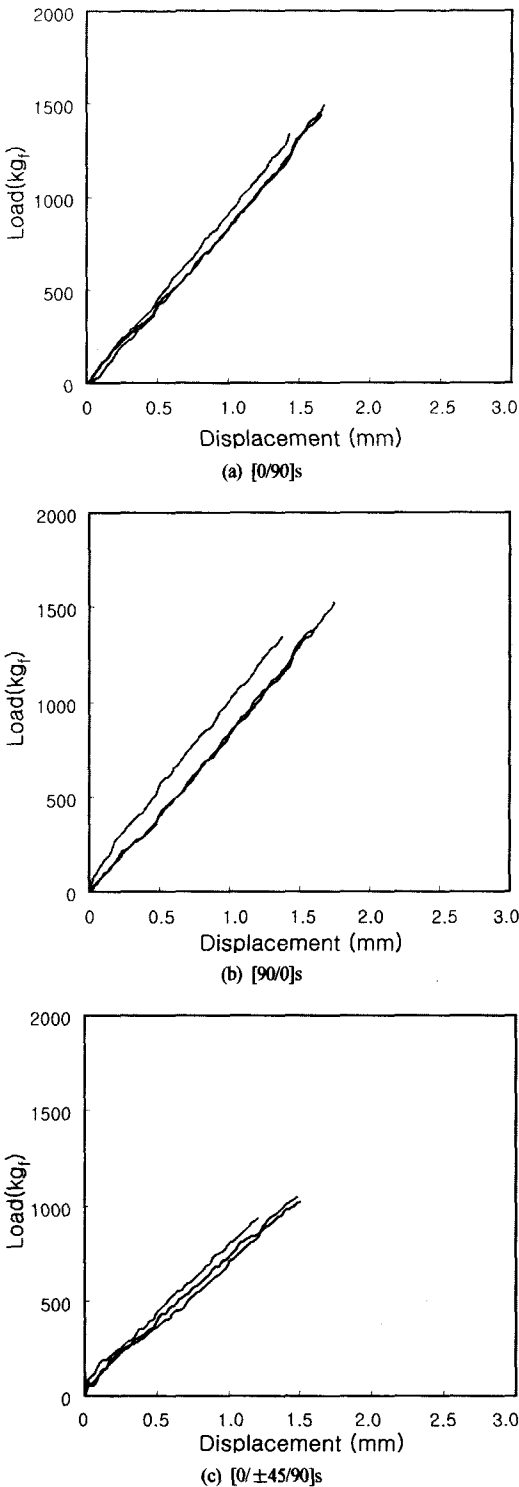


Fig. 5. Load-displacement relationships

Table 1. Variation of strength of tensile test results

specimens	lay-up	[0/90]s (kg)	[90/0]s (kg)	[0/±45/90]s (kg)
1		1300	1346	1070
2		1320	1561	1041
3		1312	1505	1050
4		1358	1455	931
5		1389	1468	1033
6		1492	1385	967
7		1341	1527	-
8		1473	1387	-
9		1406	-	-
Max. Load Average(kg)		1376.8	1454.3	1015.3
σ_u (MPa)		750	792.2	552.9
E(GPa)		53.1	56.0	43.3
ϵ_u (%)		1.46	1.38	1.26

타나므로 직교적층재가 [0/±45/90]s보다 인장강도가 우수하다고 할 수 있다. 이것은 ±45° 적층방향이 인장강도값을 저하시키는 원인이며 같은 재료라 하여도 적층방향에 따라 강도변화가 있음을 알 수 있었다. Table 1은 인장시험을 통하여 얻어진 최대인장강도, 탄성계수 및 변형률을 나타낸 것으로 이들 각 물질치에서 [0/±45/90]s의 적층구조가 역시 제일 낮은 값을 나타내고 있다.

4.2. AE에 의한 특성

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 각각 인장시험과 동일하게 [0/90]s, [90/0]s 그리고 [0/±45/90]s 3가지 종류 적층의 원공노치를 가지는 CFRP 복합재료에 대하여 인장시험시 얻어지는 AE특성으로 3초 동안 발생한 AE count의 누적합계를 나타낸 것이다. 어느 경우에 있어서도 시간에 따른 누적 count수는 (a), (b), (c)에서처럼 각각 I, II, III, IV로 나누어져 초기단계, 부하단계, 파손성장단계, 최종파단단계로 구분할 수 있다. Fig. 6(a)인 [0/90]s 경우는 인장시험을 실시하여 하중이 가해지는 99초까지의 초기부하단계인 II영역은 하중이 752kg에서 누적 AE count가 2600이하의 값을 보여주며, 하중의 증가와 함께 일정한 count의 증가를 가지는 153초의 파손성장단계인 III영역까지 최대 13800의 count값을 보이며 이때 하중은

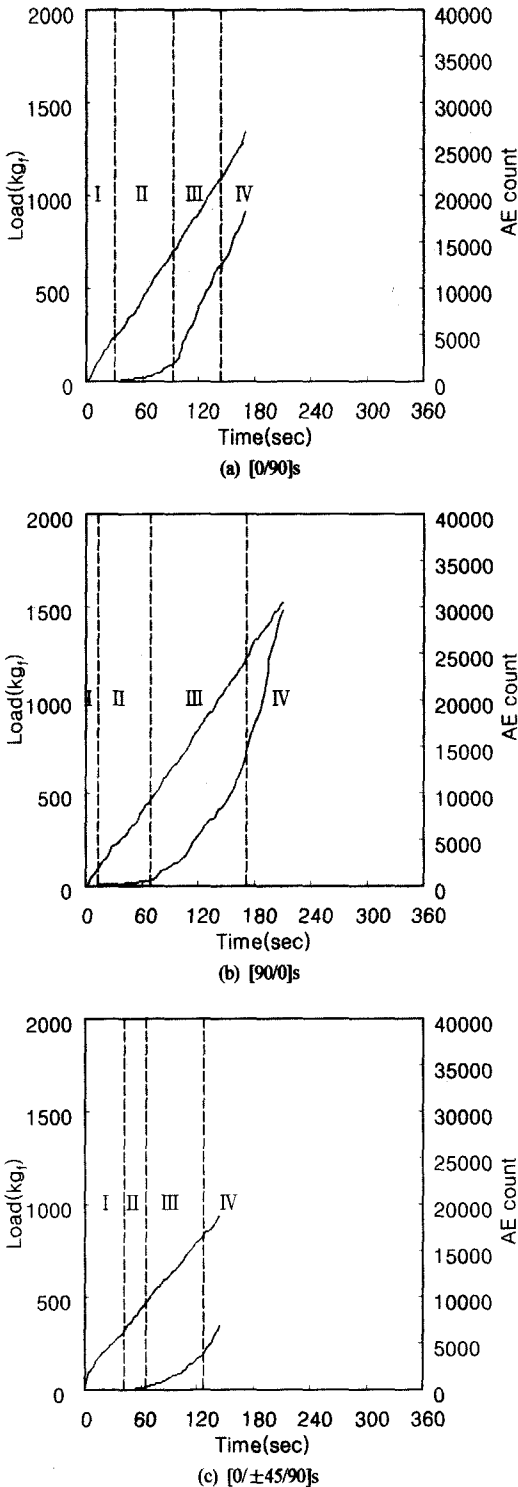


Fig. 6. The relationships of load and AE count for tensile test time

1163kgf이다. 최대 누적 count가 18200까지 급상승한 171.3초에서 최대하중 1341kgf를 가지며 최종파단된다. Fig. 6(b)의 [90/0]s는 18초부터 75초까지인 II영역은 833 이하의 누적 count를 보여주며 이후 하중의 증가와 함께 일정한 count의 증가를 가지는 171초까지 13600의 값을 보이며 이후 최대 누적 count가 29600까지 급상승한 210.4초의 1527kgf 최대하중에서 파단된다. Fig. 6(c)는 [0/±45/90]s에서 인장시험을 시작하여 시험편이 완전히 파단되는데 걸리는 총시간이 144.3초로 역시 (a), (b)와 유사한 경향을 나타내며 최대하중이 938kgf이다. 초기의 하중이 가해짐에 따라 대략 39초 이후부터 69초까지의 하중이 489kgf의 II영역에서 333 이하의 아주 낮은 count를 보여주고 있으며 이후 III영역의 845kgf에서 count는 하중이 증가함에 따라 129초에서의 4033까지 일정한 비율로 증가하다가 이후 최대 누적 count가 6867까지 급상승한 후 144.3초에서 파단됨을 알 수 있다. 이것은 적층방향에 따라 섬유파단과 기지층 손상의 영향이 다르게 주어지는 것을 보여주며 [90/0]s, [0/90]s, [0/±45/90]s 순으로 count수가 낮아진다. (a)의 적층 구조의 경우 내부의 중심 적층이 하중방향에 수직으로 주어지므로 기지손상과 박리현상으로 이어져 최종섬유파단이 발생되어 표면손상이 형성되며 (b)의 경우는 내부 중심 적층부가 작용 하중 방향으로배향되어 있으므로 초기 섬유소파단의 영향으로 인하여 높은 count가 발생하는 것으로 간주될 수 있다.

Fig. 7에서는 하중과 AE count의 관계로서 log-log 좌표계에서 선형적 관계를 나타낸다. 어느 경우에서도 $P = C \cdot (N_{AEC})^m$ 의 멱승함수 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 여기서 P는 하중, N_{AEC} 는 AE 누적

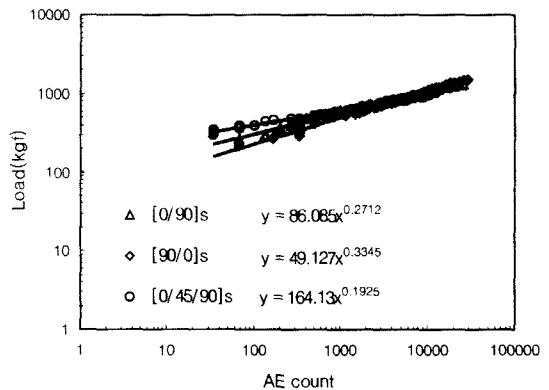


Fig. 7. Load-AE count relationships

count를 나타내며 C와 m은 적층방향상수이다. [0/90]s, [90/0]s 및 [0/±45/90]s에 대하여 C는 각각 86.085, 42.127 및 164.13이고 m은 [0/90]s의 경우가 가장 큰 값인 0.3346으로 기울기가 가장 급하게 나타났으며 다음으로 [0/90]s가 두 번째로 큰 0.2712로 나타났고 마지막으로 [0/±45/90]s가 가장 낮은 m승 값인 0.1925로 나타났다. 이것은 [90/0]s가 다른 적층방향보다 AE count 값의 범위가 증가하였기 때문이고 그 다음 [0/90]s와 [0/±45/90]s 순으로 나타났다.

4.3. 비디오 모니터링 기법에 의한 파단손상 관찰

Photo 1(a)~(c)는 [0/±45/90]s 적층의 경우로 인장 시험동안 시험편 표면손상을 소형 CCD 카메라로 기록한 예를 나타낸다. Photo 1(a)는 하중값이 296 kg로 될 때 원공노치의 주위 표면에 별다른 손상이 일어나지 않는 부분으로 이때 AE 누적 count가 33.3의 낮은 값을 나타낸다. Photo 1(b)에서 원공노치의 확대 변형이후 원공노치 표면주위방향으로 발생, 성장한 균열손상현상을 관찰할 수 있으며 이것은 90° 적층섬유의 기지와와 박리현상과 45° 적층섬유의 미소파단에 기인하는 것으로 여겨지며, 이때 최대파단 하중의 약 90%로서 하중값은 855kg로 나타났다. Photo 1(c)는 최대하중 938kg일 때 최종 파단된 시험편 형상을 나타내며, 이때 AE 누적 count가 섬유파단 및 기지파단 등으로 최대 6867값을 나타내었다. 내부 섬유방향이 ±45° 방향으로 적층되어 있는 경우이므로 ±45° 적층섬유는 원공중심축에서 하중 방향에 45° 방향으로 분리가 일어나며 표면층 섬유는 45° 적층 섬유분리에 기인하여 일부분 적층박리현상이 초래된 후 ±45° 각도로 섬유파단이 발생되었으며 최종 0° 층 섬유가 파단된 것으로 여겨진다. Photo 2(a)와 (b)는 파단된 [0/90]s, [90/0]s의 시험편을 나타낸다. 이 경우는 [0/±45/90]s와 다르게 하중방향에 거의 수직하게 파단되어 섬유파단이 재료파손에 기여하는 정도가 더 크음을 알 수 있다.

4.4. SEM관찰에 의한 파단분석

인장시험 후 주사전자현미경(SEM)을 통해 시험편의 파단면과 측면을 관찰한 사진을 Photo 3에 나타내었다. Photo 3(a)는 [0/90]s 하중방향에 수직한 방향으로 섬유가 파단된 측면을 나타낸다. Photo 3(b)와 (c)는 [90/0]s와 [0/±45/90]s의 최종파단면 양상을 나타내고 있다. Photo 3(b)에서 알 수 있는 바와 같



(a) Load=296kg

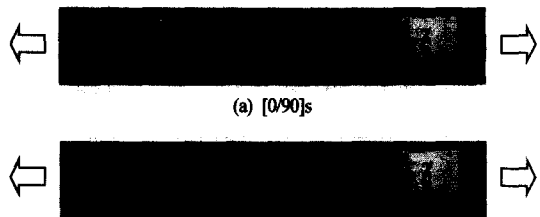


(b) Load=855kg



(c) Load=938kg

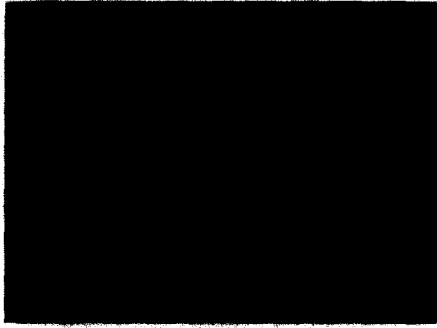
Photo 1. Photographs of video recording of fracture by tensile test([0/±45/90]s)



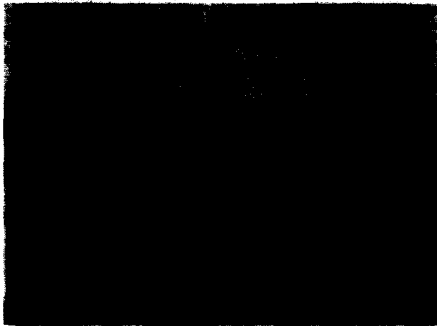
(a) [0/90]s

(b) [90/0]s

Photo 2. Photographs of fracture by tensile test



(a) [0/90]s



(b) [90/0]s



(c) [0/±45/90]s



(d) [0/90]s

Photo 3. SEM photograph of side and fracture surface for after tensile test

이 90°층에서 먼저 파단된 후 0°층과의 사이에 적층 분리가 진행되어 하중방향의 섬유들이 최종 파단된 것으로 추정된다. Photo 3(c)에서는 45° 방향의 섬유와 기지들이 최종 파단된 것이며 Photo 3(d)는 0° 적층에서 하중방향으로 섬유소의 뿔침현상을 보여주는 것으로 파손기구에는 섬유파단의 기지분리, 적층 분리 및 섬유뿔침 등 여러 파손기구가 관여하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

[0/90]s, [90/0]s 및 [0/±45/90]s 적층 CFRP 복합재료에 대하여 기계적 특성 및 파손기구를 알아보기 위하여 AE신호측정과 CCD 카메라 비디오 모니터링 및 SEM관찰을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인장시험을 통해 직교적층구조인 [0/90]s와 [90/0]s는 평균극한강도가 거의 비슷하였으나 [0/±45/90]s는 직교적층구조보다 낮은 극한강도값이 나타나 ±45° 적층방향이 인장강도 저하에 큰 영향을 미친다고 판단된다.

2) 인장시험에서 발생하는 AE 누적 count수는 초기단계, 부하단계, 파손성장단계, 최종파단단계인 I, II, III, IV영역의 형태로 나누어졌다. AE count 누적합계는 [90/0]s의 적층구조가 가장 높은 29600값으로 나타났고 [0/90]s는 18200값, [0/±45/90]s가 가장 낮은 6867값으로 나타났으며, 파단하중과 누적 AE count는 누승의 관계가 성립함을 알았다.

3) CCD 카메라의 비디오 모니터링 영상을 관찰한 결과 인장시험재의 [0/±45/90]s 복합적층재는 하중방향에 45° 방향으로 섬유박리, 적층분리 및 섬유파단현상이 관여하고 직교적층재는 하중방향에 수직인 방향으로 섬유파단현상이 관여하여 파괴가 일어났다.

4) SEM을 통해 인장시험 후 시편의 파단면과 측면에서 섬유뿔침과 섬유파단 등이 관찰되었고 이러한 결과들은 CFRP 복합재료로 구성된 기계구조물 설비의 안전성평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 홍창신, "복합재료의 층간파괴 실험법," 대한기계학회지, Vol. 30, No. 2, pp. 172~179, 1990.

- 2) Ogin, S. L. Smith, P. A. and Beaumont, P. W. R., "Matrix cracking and stiffness reduction during the fatigue of [0/90₂]s GFRP laminate," *Composite Science and Technology*, Vol. 22, pp. 22~31, 1985.
- 3) Tsai, C. L. and Daniel, I. M., "The behavior of cracked cross-ply composite laminates under general in-plane loading," *Damage in Composite Materials*, ed. G. Z. Voyiadjis, Elsevier, pp. 51~66, 1993.
- 4) Lawcock, G. L. Ye and Mai, Y., "Progressive Damage and Residual Strength of a Carbon Fiber Reinforced Metal Laminate," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 762~787, 1997.
- 5) Yoshiyuki Tomita and Kojiro Morioka, "Effect of lay-up sequence on mechanical properties and fracture behavior of advanced CFRP laminate composite," *Materials Science and engineering, A* 234-236, pp. 778~781, 1997.
- 6) 野中, 岡田, 影山および關根, "AE法と赤外線應力測定法を併用したCFRP積層板の損傷過程の検討," *安全工学*, Vol. 32, No. 4, pp. 233~241, 1993.
- 7) 전홍재, I. M. Daniel, "복합재료 직교적층판의 손상과정에서의 AE특성에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, Vol. 11, No. 5, pp. 14~21, 1998.
- 8) Ni, Q, "Fracture Behavior and Acoustic Emission in Bending Test on single-fiber Composites," *Engineering, Fracture Mechanics*, Vol. 56, p. 779, 1997.
- 9) Chow, T. M. Hutchins, D. A. and Mottram, J. T., "Simultaneous acoustic emission and ultrasonic tomography imaging in anisotropic polymer composite-material," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 94, pp. 944~953, 1993.
- 10) Standard test method for "Tensile properties of polymer matrix composite materials," *ASTM D3039*, 2000.