

論文

CFRP 복합재료의 인장시험시 파괴기구의 해석

이종오* · 이주석* · 조정식* · 이승희** · 오세규***

The Analysis of Failure Mechanism during Tensile Test of CFRP

Jong-O Lee*, Joo-Suk Lee*, Kyung-Sik Cho*,
Seung-Hee Lee** and Sae-Kyoo Oh***

ABSTRACT

The detection of first ply fracture and the analysis of failure mechanism of the CFRP have been carried out by acoustic emission(AE) measurements, X-ray, optical microscopy during tensile test of $[0^{\circ}_s]$, $[90^{\circ}_s]$ and $[0^{\circ}/90^{\circ}_s/0^{\circ}]$ CFRP laminates. In the case of $[90^{\circ}_s]$ ply, the failure of the CFRP laminate was found to initiate by intraply matrix cracking(mode I) of the 90° ply. In the case of $[0^{\circ}_s]$ ply, the initial damage was confirmed by X-ray and 0° ply crack (mode II) propagating parallel to the fiber orientation. Much of mode II crack and delamination were found to grow simultaneously, in the cross ply laminates. The amplitude of AE signal by mode I crack is about 10 times lower than that by mode II crack.

1. 서 론

복합재료란 일반적으로 가공성이 좋은 경량 기지 재료에 섬유상 또는 입상의 강화 소재를 보강함으로써 구조재료로서 요구되는 우수한 기계적 특성을 보유한 재료를 말하며, 구조용 재료로 사용함에 있어 초기결함의 검출 및 파괴기구의 해석은 중요한 문제중의 하나이다.

이러한 동적 파괴기구의 해석 방법으로 음향방출

(Acoustic Emission: AE) 측정이 이용되는데, AE은 발생, 성장하는 동적 결함으로부터 방출되는 응력 파로서 그 신호는 발생원인 결함의 정보를 지니고 있으므로 AE신호의 해석에 의해 파괴기구의 해석 가능성을 제시하는 것이다. 지금까지 연구는 검출된 AE신호의 event count, ring-down count, peak amplitude, energy등의 AE activity특성 또는 rise time, rising slope, event duration, frequency spectrum 등의 파형의 특성을 비교 분석함으로써

* 한국기계연구소 비파괴시험실

** 계명대학교 물리학과

*** 부산수산대학교

복합재료의 파괴기구를 해석하고 있는데[1~10], 시편의 구조, sensor의 위치, 방출신호의 전파시 진폭 감쇄 등 복잡한 변수들에 의해 자의적 해석 가능성에 대한 문제점이 지적되고 있다[1,5,6].

본 연구는 적층 CFRP의 인장 파괴 시험시 방출되는 AE를 분석하고 자의적 해석을 제거하기 위하여 X-ray시험 및 현미경 관찰을 병행하여 CFRP의 초기 파손기구와 CFRP의 파괴 mechanism을 설명해 보고자 한다.

2. 실험

2-1. 시편제작

본 연구에서 사용된 시편은 unidirectional carbon/epoxy prepreg(한국화이버 CU125NS)를 적층 성형하여 제작하였으며 사용된 fiber 및 prepreg의 기계적 특성은 table 1과 같다.

준비된 prepreg를 $[0^{\circ}_8]$, $[90^{\circ}_8]$ 및 $[0^{\circ}/90^{\circ}_8/0^{\circ}]$ 의 순서로 적층한 후 autoclave에서 성형하였으며, 성형조건은 3기압의 압력하에서 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도를 140°C 까지 승온한 후 4기압의 압력 하에서 95분간 유지하였다. 성형이 완료된 후 시편의 휨을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하였다. 성형된 CFRP적층판을 이용하여 Fig.1과 같은 인장시편을 가공하였다. 이때 시편은 기대되는 파손 mode가 원하는 위치에 생성되기 용이하도록 밀링 머머신으로 notch를 가공하였으며, 결함유무를 X-ray 투과시험으로 확인하였다.

2-2. 실험방법

CFRP의 파괴거동을 해석하기 위해 시편의 인장 파괴 시험중 손상진전에 따라 방출되는 AE를 측정하였다. 인장시험은 Instron Model 8501 UTM을

Table 1. The Mechanical Properties of Fiber and Prepreg.

Property	unit	carbon fiber Toho HTA12K (T300급)	carbon/epoxy (CU125NS)
tensile strength axial (0°) transverse (90°)	kg_f/mm^2	352 --	164 12
tensile modulus axial (0°) transverse (90°)	kg_f/mm^2	23,500 --	12,681 850
Poisson's ratio axial (0°) transverse (90°)		none	0.27 --
compressive strength axial (0°) transverse (90°)	kg_f/mm^2	none	113 21.4
compressive modulus axial (0°) transverse (90°)	kg_f/mm^2	none	11,336
shear strength shear modulus	kg_f/mm^2	none	9 1,046
density	g/cm^3	1.77	1.59
R/C (resin content)	wt %	--	27
fiber volume fraction	vol %	--	64

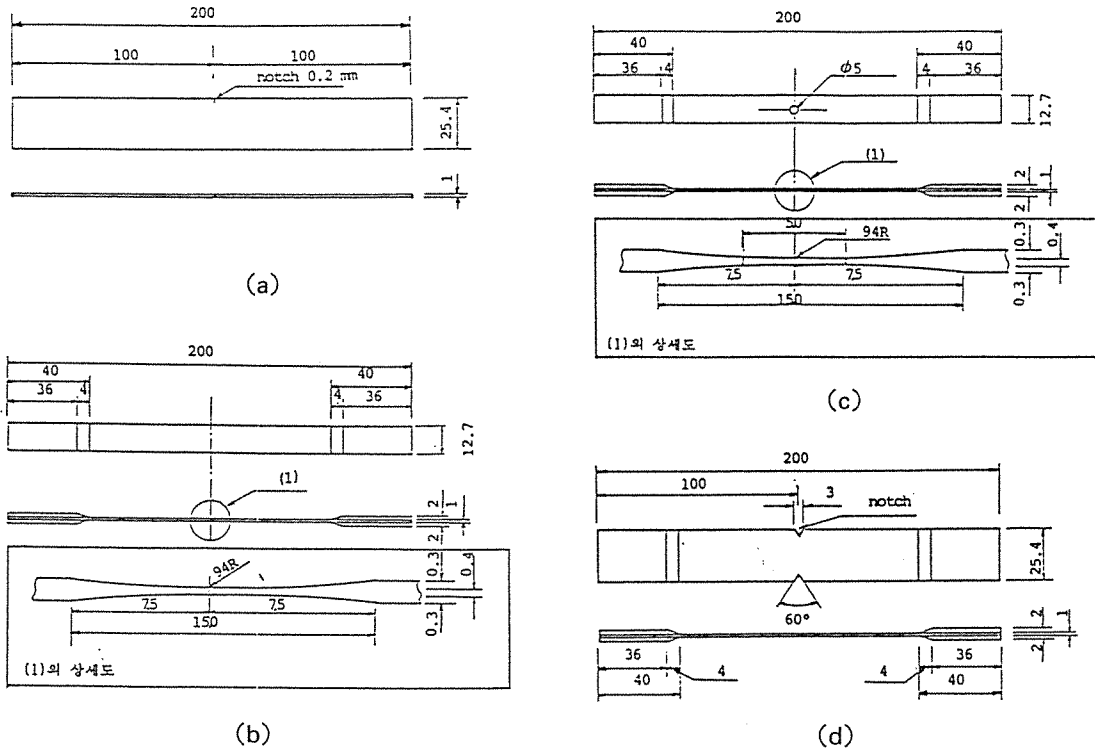


Fig. 1. Shape of the Tensile Specimens.

(a) $[90^\circ]$, (b) $[0^\circ]$, (c) $[0^\circ]_{CN}$, (d) $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$

이용하였고, 최대 하중 10ton의 Load cell이 사용되었다. 인장시험시 cross-head speed를 $[90^\circ]$ 시편에 대해서는 0.05mm/min, 다른 시편의 경우 0.1mm/min로 일정하게 유지하였으며, 방출되는 AE신호의 측정 및 분석을 위해 AET 5500 system을 사용하였고, 실험장치의 Block diagram은 Fig.2와 같다.

Fig.2에서 보는 것처럼 sensor #1 및 #2는 AE 신호의 검출강도를 높이기 위해 175KHz 공진형 transducer를 사용하였으며, 그리세린 couplant 및 constant force clamp를 이용하여 균일한 acoustic coupling이 되도록 부착하였다. sensor에 의해 검출된 AE신호는 125~250KHz 범위의 band-pass filter를 거쳐 pre-amp.에서 40dB, main amp.에서 26dB로 증폭하여 0.2V threshold 이상의 진폭을

갖는 AE pulse만을 신호처리하였다.

두 sensor는 예상되는 주 결함 발생 부위를 중심으로 6cm간격을 두고 부착되었으며, 검출된 AE신호의 도착 시간치를 이용하여 linear source location을 수행하여 두 sensor 사이에서 발생한 AE event에 대해서만 신호처리를 함으로써 인장 시험기 및 grid 부위에서의 noise를 제거하였다. 이렇게 신호처리된 AE event를 인장시험동안 검출시간 및 AET 5500장치에 의해 analog parameter로 처리된 하중값과 함께 IBM PC의 hard disc에 기록하였다. 이 AE data들은 post processing을 통해 loading stage별로 location, peak amplitude 분포 등의 분석에 이용되었다.

한편 시편의 종류 및 손상진전 강도에 따라 변화하는 파괴양상을 확인하기 위해 AE에 의해 손상의

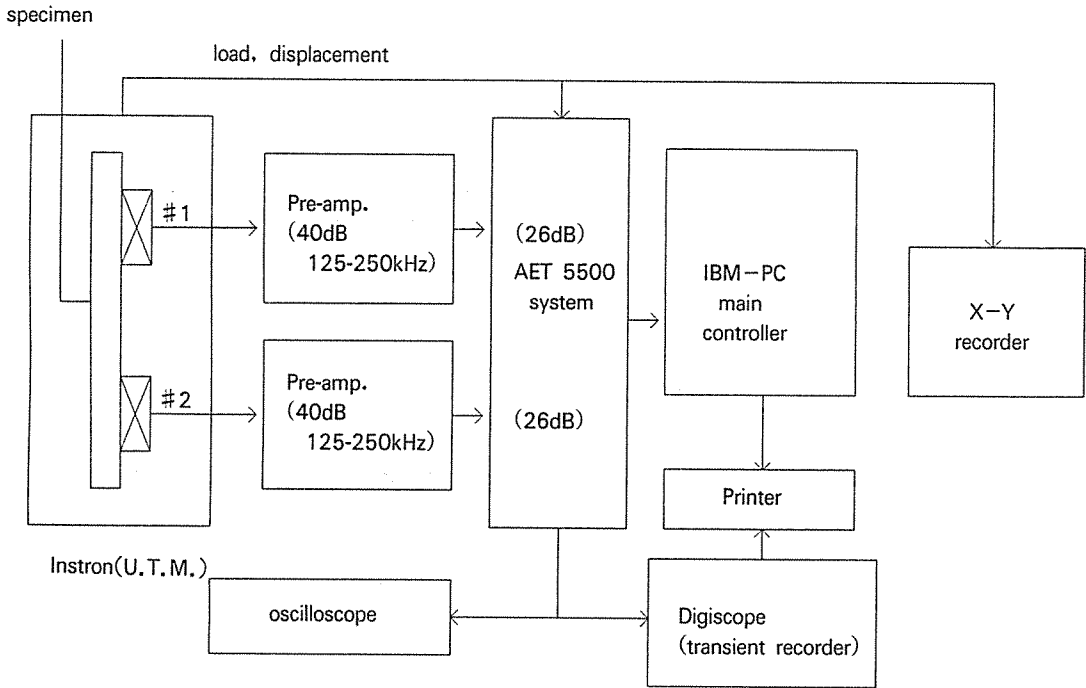


Fig. 2. Block Diagram of Experimental Set Up for Acoustic Emission Measurements.

진전을 감시하여 적절한 하중까지 인장시험을 행한 후 X-선 시험을 수행하였으며, 일반 X-선 시험시 검출 확률이 낮은 미세균열의 탐상을 위해 침투제로 diiodomethane을 진공분위기에서 손상시편에 침투시켜 25KV, 5mA의 X-선을 이용하여 40초간 노출하였다.

또한 손상 양태의 미시적 관찰을 위해 적절한 하중까지 인장시험이 행해진 시편을 단면 가공시 손상진전을 피하기 위해 시편을 epoxy moulding한후 단면을 cutting, polishing을 행한후 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3-1. [90°]시편

Fig.3은 [90°]시편의 인장시험시 그 하중 및 총 AE event수의 시간적 변화를 나타낸 것으로 인장 시험시 cross-head speed를 0.05mm/min로 일정하

게 유지하여 cross-head의 변위는 인장시간과 선형적 비례관계를 가지므로 하중-변위 및 총 event 수-변위 곡선으로 볼 수 있다. 하중-변위 곡선은 선형 탄성 파괴의 전형적 양상을 나타내었으며 그 결과는 시편의 적층구조상 90° ply의 취성 matrix가 mode I 균열에 의해 파괴에 이를 것이라는 예측을 뒷받침해 주고 있으며, 최종 파단은 notch부위로 부터 성장한 균열에 의해 대략 70Kg_f의 하중에서 일어났다.

AE은 최대 인장하중의 80% 정도에서부터 파단에 이르기까지 간헐적으로 방출되었으며, 파단시까지 측정된 AE event의 총수는 10개 내외로 매우 적었다. Fig. 4 a, b)는 파단시까지 검출된 AE신호를 처리하여 얻은 AE source location 결과 및 진폭 분포로 a)에서 보면 AE의 발생원으로 생각되는 mode I ply crack이 중심 notch부위 뿐만 아니라 시편의 여러 부위에서 발생하는 것을 알 수 있고 이 결과를 미루어 볼 때 단층균열은 최종 차단이 이루어진 notch 부위에서 상대적으로 크게 성장하지만 시편의 다른 부위에서도 작은 기지 균열의 성장이 일어난다고 추정되었다.

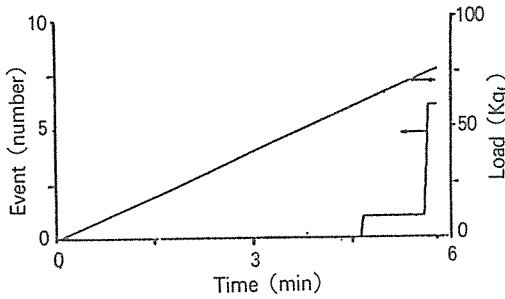


Fig. 3. Total AE Events and Load vs Time curve for $[90^\circ]$ Specimen during Tensile Test.

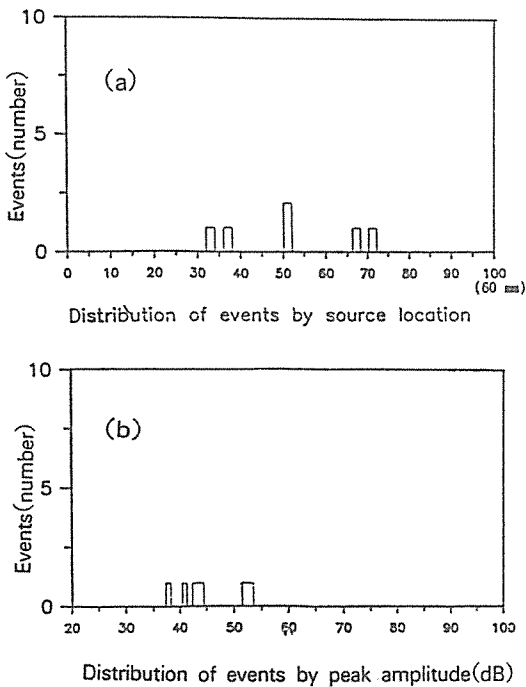


Fig. 4. a) Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and sensor #2 for $[90^\circ]$ Specimen during Tensile Test. (sensor location; 0:#1, 100:#2)
b) Peak Amplitude Distribution for $[90^\circ]$ Specimen.

이러한 기지 균열에서 방출된 AE신호의 진폭은 b)에서 볼 수 있는 바와 같이 35~54dB사이의 값을 가진 것으로 관측되었다.

3-2. $[0^\circ]$ 시편

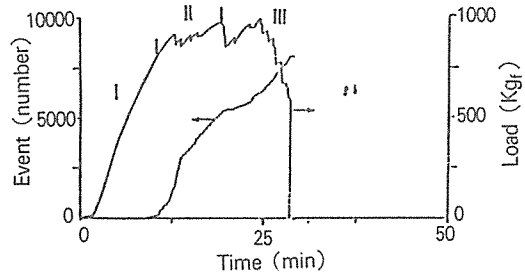


Fig. 5. Total AE Events and Load vs Time curve for $[0^\circ]$ Specimen during Tensile Test.

Fig.5는 $[0^\circ]$ 시편의 하중 및 총 AE event 수의 시간에 대한 변화를 나타낸 것으로 하중 곡선의 초반부에 나타난 slip 현상은 시편중심의 어긋남 및 grip 부위의 미끄러짐에 기인하는 것으로 해석되고 인장 변위가 커짐에 따라 하중은 선형적으로 증가하다가 대략 400Kg_f 부근에서부터 서서히 compliance의 변화가 커져 대략 850Kg_f 의 하중에서부터 pop-in을 거듭하며 하중의 증가없이 elongation이 계속되다가 최종파단에 이르렀다. pop-in이 계속되는 동안 시편의 표면 ply들은 시편 중앙부 양면의 grinding된 부위로부터 섬유방향균열(0° ply 기지균열)이 성장해 가는 것을 육안으로 관측할 수 있었고, AE신호는 390Kg_f 의 하중에서부터 검출되기 시작하여 하중-변위 곡선의 pop-in 부근에서 급격한 AE activity의 증가를 보였다. 손상 mode 변화에 의해 또는 손상 하중의 집적에 의해 AE activity 변화가 일어나므로 AE event-변위곡선에서 AE event의 기울기가 급격히 변하는 지점을 기준으로 Fig.5에서와 같이 손상 stage를 구분하였다.

Fig.6는 전술한 시험시 측정된 AE신호의 source location 결과로 손상이 진행됨에 따라 시편의 양 side쪽으로 확대되어 감을 알 수 있다. $[0^\circ]$ 시편은 중앙부 양면을 grinding하여 그 부위의 표면 ply들은 free edge를 형성하고 있기 때문에 본 시편의 초기 손상 기구는 이들 자유단으로부터 성장하는 기지균열로 추정되며, 이 예측을 확인하기 위해 AE이 검출되기 시작한 직후까지 인장하중을 가한 시편에

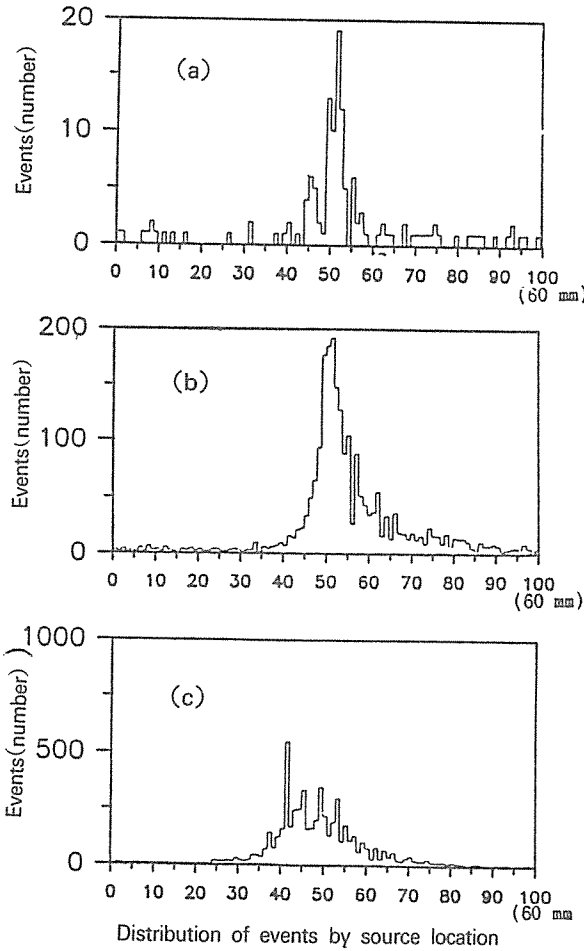


Fig. 6. Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and Sensor #2 for $[0_8]$ Specimen during Tensile Test. (sensor location; 0: # 1, 100: # 2) a) stage I, b) stage II, c) stage III

diiodomethane을 침투시켜 X-선 투과시험을 행한 결과가 Fig. 7이며, Fig. 9는 이 부위의 현미경 단면 사진으로 예상과 같이 시편의 grinding된 부위로부터 생성된 기지균열을 잘 보여주고 있다. 그리고 Fig. 8에서 보는 바와 같이 AE source location 결과도 X-선 시험에서 확인한 기지 균열의 위치를 정확히 표정한 것을 알 수 있었다. 이 결과들로 미루어 Fig. 5의 stage I에서 검출된 AE 신호는 기지균열로부터 방출되었다는 사실을 확인하였다.

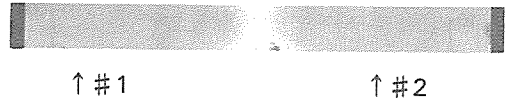


Fig. 7. X-ray Radiograph $[0_8]$ Specimen Loaded Up to $400Kgf_f$.

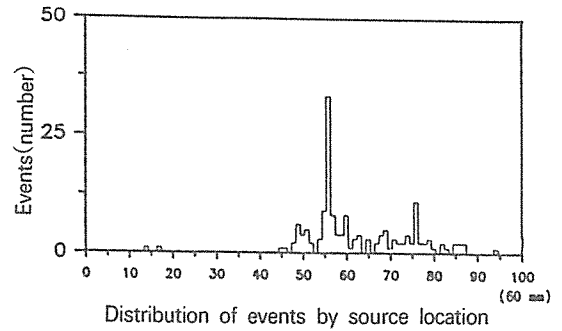


Fig. 8. Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and Sensor #2 for $[0_8]$ Specimen Loaded Up to $400Kgf_f$. (sensor location; 0: # 1, 100: # 2)

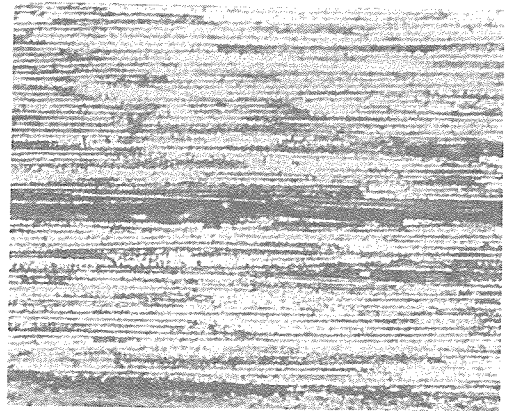


Fig. 9. Optical Microscopy for $[0_8]$ Specimen Loaded Up to $400Kgf_f$ (Crack). $[x100]$

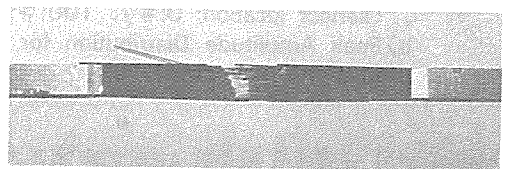


Fig. 10. Fracture Shape of $[0_8]$ Specimen after Tensile Test.

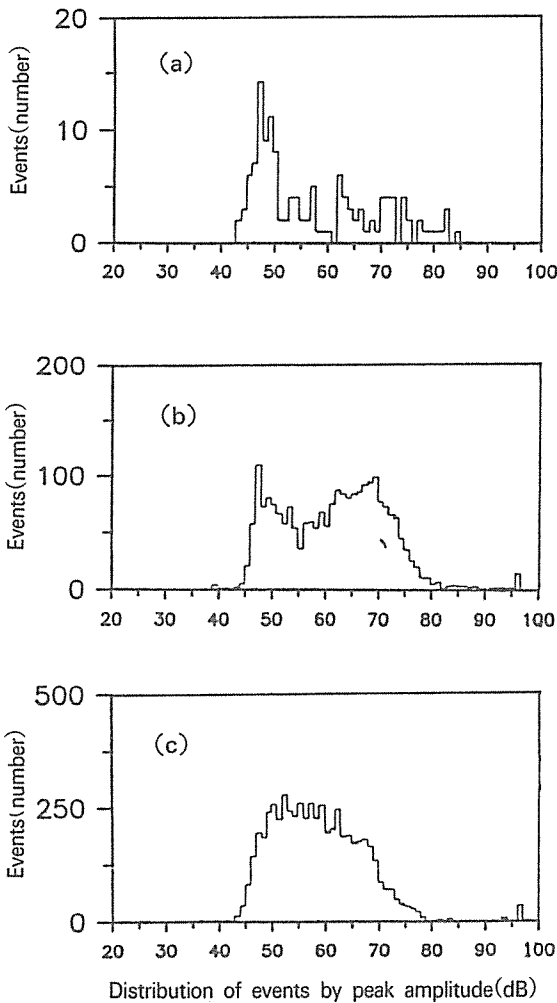


Fig. 11. Peak Amplitude Distribution for $[0_8^0]$ Specimen
a) stage I, b) stage II, c) stage III

Fig. 5의 stage II 및 III에서는 기지균열의 생성, 성장과 더불어 육안으로 관측된 표면 ply의 섬유방향 단층균열(mode II crack)이 발생하는 것으로 추정되며 이 mode II ply 균열은 Fig. 6의 source location 결과로 미루어 ply의 자유단으로부터 섬유방향으로 성장하는 것으로 판단되었다. 특히 stage III에서는 Fig. 10과 같이 시편의 최종 파단 양태에서 관측된 섬유파단, fiber-matrix debonding, fiber pull-out, splitting 등 다양한 파손기구들이 나타날 것으로 예

측되므로 이들의 개별적 해석이 매우 어려울 것이다.

Fig. 11은 각 stage별로 검출된 AE 신호들의 진폭 분포를 표시한 것으로 stage I에서는 50dB, stage II에서는 50dB 및 70dB 정도의 진폭분포 peak를 보여주고 있다. 이러한 손상 단계별 진폭 분포의 차이는 파손기구의 차이에 기인하는 것으로 생각되었으며, 앞에서 고찰한 각 stage별 주요 손상기구와 연관하여 기지 균열 및 mode II ply crack 으로부터 방출되는 AE신호의 상대적 진폭을 대략 예측할 수 있을 것이다. 본 결과에서는 기지 균열로부터 방출된 AE 신호의 진폭이 mode II ply crack의 그것에 비해 10배(20dB) 정도 작은 것으로 추정되었다.

3-3. Center Notched $[0_8^0]_{CN}$ 시편

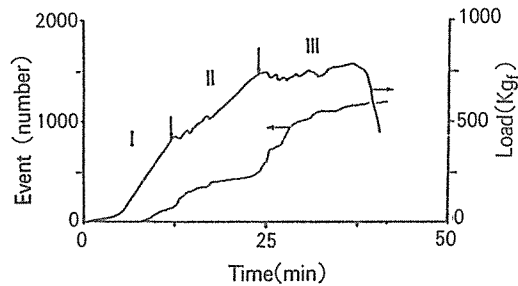


Fig. 12. Total AE Events and Load vs. Time Curve for $[0_8^0]_{CN}$ Specimen during Tensile Test.

Fig. 12는 시편 중앙에 5mm의 원공을 가공한 $[0_8^0]_{CN}$ 시편의 인장시험시 하중과 총 AE event 수의 시간에 대한 변화를 나타낸 것이다. 인장하중은 stage I에서 450Kg_f의 하중까지 거의 선형적으로 증가하다가 stage II에서 간헐적 pop-in을 보이면서 750Kg_f 정도까지 증가한 후, stage III에 이르러 계속된 pop-in을 거듭하여 파단에 이르는 것으로 나타났다.

인장시험 중 육안 관찰에 의하면 stage I에서 mode II ply crack이 notch선단으로부터 시작하여 성장하는 것이 관측되었으며, stage II에 이르러 Fig. 13의 X-선 시험결과에서 나타난 바와 같이 ply crack이 시편의 두께 방향으로 관통한 splitting 및 이들로부터 성장한 기지 균열들이 많이 관측되었다. 또한 stage

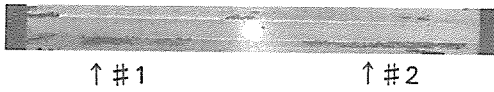


Fig. 13. X-ray Radiograph of Center Notched $[0_8^0]_{CN}$ Specimen Loaded Up to 750 Kg_f.

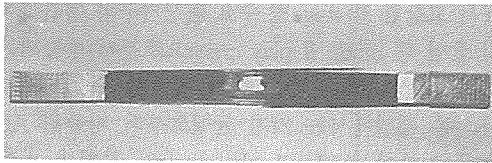


Fig. 14. Fracture Shape of Center Notched $[0_8^0]_{CN}$ after Tensile Test.

III에서의 Fig. 14의 최종 파단 양상에서 확인할 수 있는 바와 같이 섬유파단, fiber pull-out 등의 파손 기구들이 파단에 기여하는 것으로 추정되었다.

Fig. 15는 위 실험결과의 AE source location 결과로, stage I에서 시편의 중앙부 및 중앙으로부터 sensor #2쪽의 부분에 손상이 발생한 것을 나타내 주고 있으며 stage II 및 III에서는 시편의 전 시험대상 부위에 걸쳐 발생한 것을 보여주고 있다. 특히 stage II 및 III에서는 전 stage에서 AE event의 발생이 상대적으로 적었던 위치에서 비교적 많은 발생빈도를 나타내었다. 이 결과를 전술한 파손 기구와 비교 검토한 결과 다음과 같은 파손과정의 설명이 가능하였다. 즉 stage I에서는 $[0_8^0]$ 에서 언급한 시편 중앙부 기지균열 및 notch 선단으로부터 sensor #2 방향으로 성장한 mode II ply crack이 초기 파손 기구로 작용하였다. 그리고 stage II에서는 ply crack이 중앙 notch의 양쪽 선단으로부터 양 sensor방향으로 모두 생성되어, 이들이 시편의 두께방향으로 성장하여 시편을 관통한 splitting현상을 나타내었다. 또한 이 stage에서 Fig. 19에서 관측된 바와 같이 splitting된 시편의 하중을 지탱하고 있는 notch의측 부위에 많은 기지균열이 형성되는 것을 알 수 있었다. 그리고 stage III에서는 $[0_8^0]$ 시편의 stage III에서와 같은 다양한 파손기구들이 잔존 하중 지탱 부위에 발생할 것으로 추정되었다.

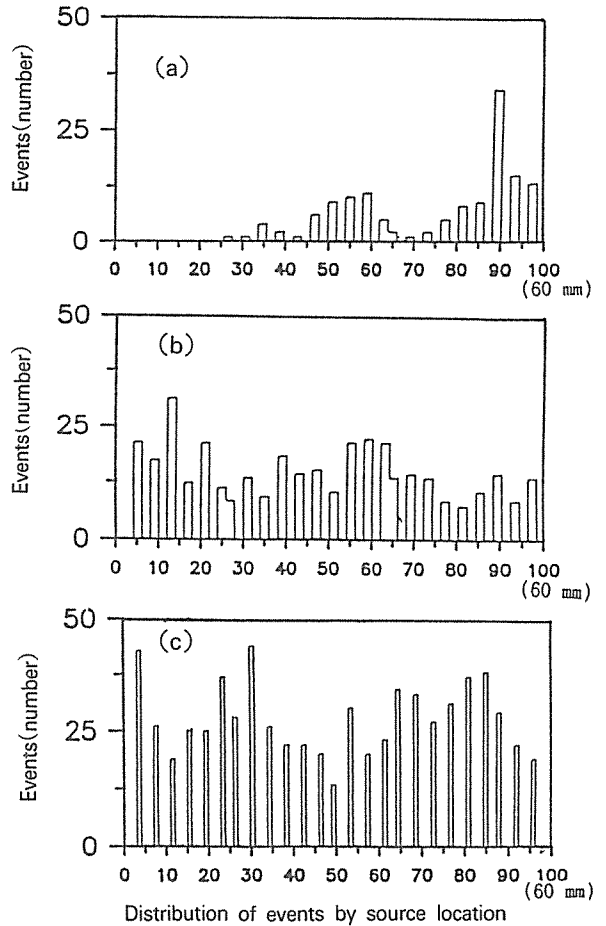


Fig. 15. Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and Sensor #2 for center notched $[0_8^0]_{CN}$ Specimen during Tensile Test. (sensor location; 0:#1, 100:#2)
a) stage I, b) stage II, c) stage III

Fig. 16은 전술한 파손과정 중 방출된 AE신호들의 진폭 분포를 stage별로 정리한 것이다. stage I에서는 70dB의 특성적 진폭 분포 peak를 보여주고 있었으며, 이는 $[0_8^0]$ 시편에서 언급된 바에 따라 mode II ply crack이 이 stage의 주요 손상기구로서 작용한다고 추정되었다. stage II 및 stage III에서는 50 dB정도의 진폭을 가진 AE신호가 가장 많이 검출되었으며 이 신호는 기지균열로부터 방출된 신호의 특성 진폭으로 $[0_8^0]$ 시편의 결과로부터 추정된 바

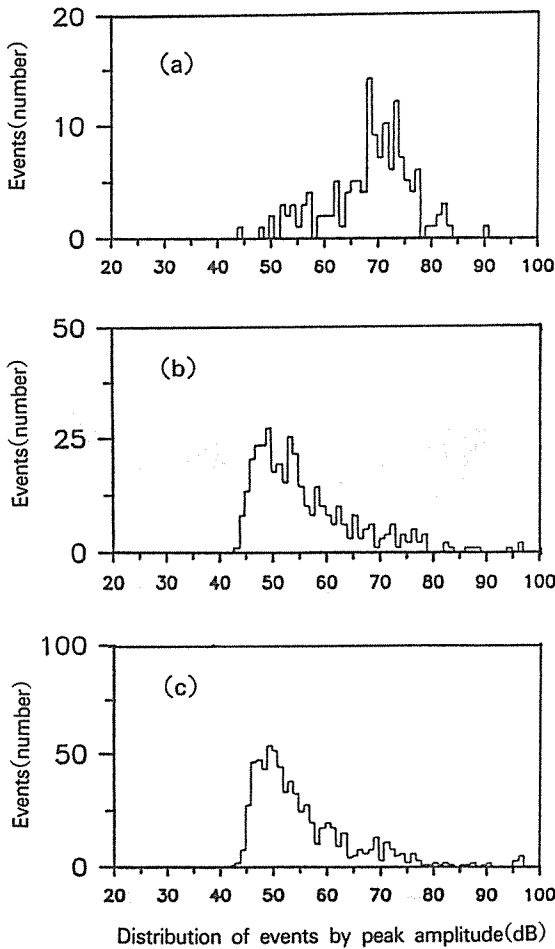


Fig. 16. Peak Amplitude Distribution for $[0^{\circ}]_{CN}$ Specimen
a) stage I, b) stage II, c) stage III

있다. stage I에서 기지균열에 의한 50dB 진폭분포 peak 및 stage II, III에서 ply crack에 의한 70dB 진폭 분포 peak가 각각 미미하게 나타난 것은 이들이 해당 stage에서 부차적인 손상기구로서 작용한 결과이거나 splitting 일어난 후기 stage에서 source location error 등에 기이한 것으로 판단된다.

3-4. $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}]$ 시편

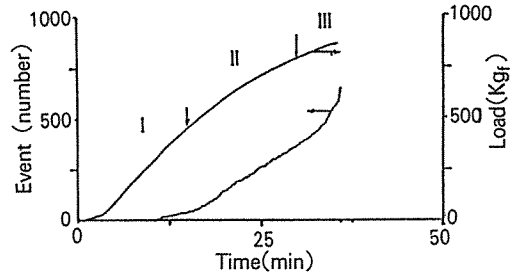


Fig. 17. Total AE Events and Load vs. Time Curve for $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}]$ Specimen during Tensile Test.

Fig. 17은 $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}]$ cross ply 시편의 인장시험시 하중과 총 AE event 수의 시간에 대한 변화를 나타낸 것으로 인장하중의 증가에 따라 최종 파단까지 compliance는 서서히 변화하며 pop-in 현상은 관측되지 않았다. 이때 AE는 100Kgf의 하중에서부터 검출되기 시작하였으며 다른 시편의 경우와 마찬가지로 손상단계를 3단계로 구분하였다.

전술한 일방성 CFRP 시편들은 초기 손상기구가 비교적 단순한 반면 본 시편에서는 초기손상기구의 예측이 어려웠다. 따라서 본 시편에 대해서는 초기 손상기구의 확인을 위해 AE이 검출되기 시작하여 약간의 하중이 증가할 때까지만 인장시험을 수행하고 인장시 검출된 AE의 source location 및 X-선 시험을 하였다. Fig. 18 a), b)는 160Kgf까지 인장 하중을 가한 시편의 X-선 시험결과 및 동일 시편의 AE에 의한 결함의 위치 표정 결과이다. a)에 의하면 본 시편의 초기손상기구는 양쪽 notch선단으로부터 성장하는 mode I ply crack이었으며 이들 위치표정도 b)에서 볼 수 있는 바와 같이 완벽하지는 않지만 비교적 양호하게 나타났다. 이 균열은 90° ply에서 발생한 것으로 a)에서처럼 균열의 ligament 방향의 진전이 정지한 양상도 관측할 수 있었다.

Fig. 19는 900Kgf (stage III)까지 인장하중을 가한 시편에 대한 X-선 시험 및 AE source location 결과로 stage III까지의 파손기구는 mode I 및 mode II ply crack 그리고 mode II 균열로부터 성장한 delamination으로 확인되었으며 b)는 a)에서 확인된 손상 발생 빈도를 정성적으로 잘 나타내주고 있었다.

이러한 손상들의 미세적 양상을 조사하기 위하여 전술한 시편들의 단면을 현미경으로 관찰한 결과를

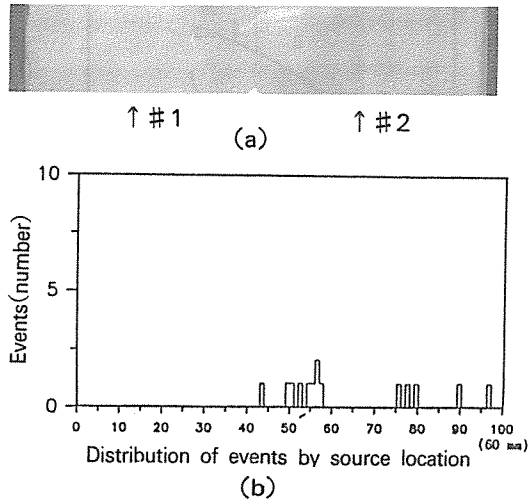


Fig. 18. For $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}_8]$ Specimen Loaded Up to 160 Kg_f
 a) X-Ray Radiograph
 b) Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and Sensor #2
 (sensor location; 0:#1, 100:#2)

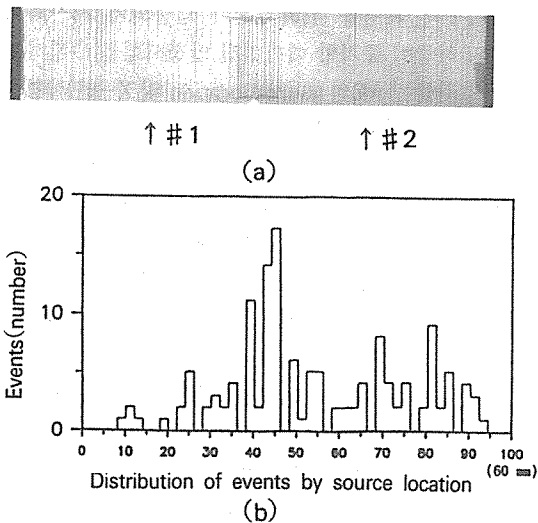


Fig. 19. For $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}_8]$ Specimen Loaded Up to 900 Kg_f
 a) X-Ray Radiograph
 b) Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and Sensor #2
 (sensor location; 0:#1, 100:#2)

Fig. 20에 나타내었다. Fig. 20 a)에 나타난 초기 손상 양상으로부터 mode I crack이 시편의 표면쪽 90° ply에서부터 성장하여 몇개의 ply를 관통한후 정지한 것을 관찰할 수 있으며 delamination은 관측되지 않았다. 이러한 mode I 균열은 손상이 진전되어 stage III에 이르면 Fig. 20 b)에서의 같이 6층의 전체 90° ply를 관통한 것이 확인되었다. 또한 stage III에서는 Fig. 20 c)에서의 같은 0° 및 90° ply 사이의 delamination이 많이 성장한 것도 관측되었다. Fig. 21은 $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}]$ 시편의 최종 파단 양상으로 전술한 손상 이외에 섬유파단, fiber pull-out등의 손상기구

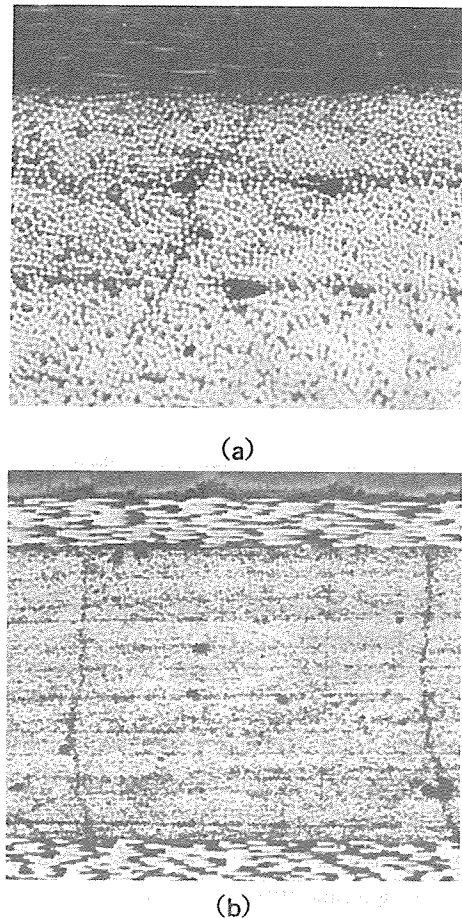
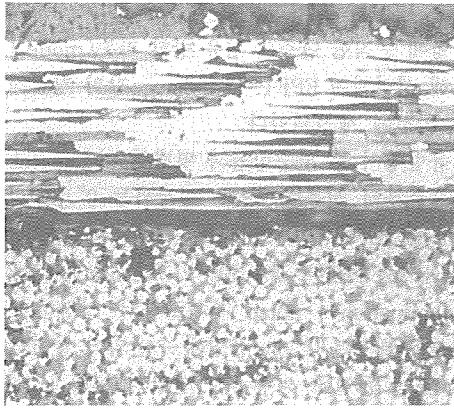


Fig. 20. Optical Microscopy for $[0^{\circ}/90^{\circ}_6/0^{\circ}_8]$ Specimen
 a) Loaded Up 160 Kg_f [x 100]
 b), c) Loaded Up to 900 Kg_f [x 50, x 100]



(c)

Fig. 20. [Continued]

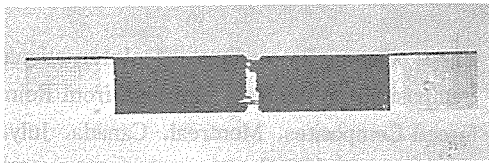


Fig. 21. Fracture Shape of $[0^\circ/90^\circ_6/0^\circ]$ Specimen after Tensile Test.

가 stage III의 말기에서 발생한 것을 알 수 있었다.

Fig. 22는 손상 단계별 AE source location 결과로 stage I에서는 시편의 notch부위에서, stage II에서는 시편의 전 부위에서 손상이 발생하였으며 stage III에서는 시편의 전체 부위에서 손상이 진행되었으나 notch 부위에서 손상발생빈도의 peak를 나타내었다. 이 중 notch 부근에 집중된 stage I의 손상은 X-선 시험에서 90° ply의 mode I단층 균열로 확인되었으나 stage II 및 III에서는 이외에도 0° ply의 mode II 단층균열 및 $0^\circ/90^\circ$ 층간의 delamination 등의 발생 가능성이 예측되었다.

Fig. 23은 동일한 AE data로부터 얻은 각 stage에서의 진폭 분포이다. stage I에서의 AE 진폭은 Fig. 23 a)에서의 같이 45~70dB의 분포를 나타내었는데 이들은 90° ply 균열로부터 방출된 것이라고 확인된 바 있다. 이 결과는 $[90^\circ_8]$ 시편에서 동일한 파손기구로부터 방출된 AE 신호의 진폭 분포에 비해

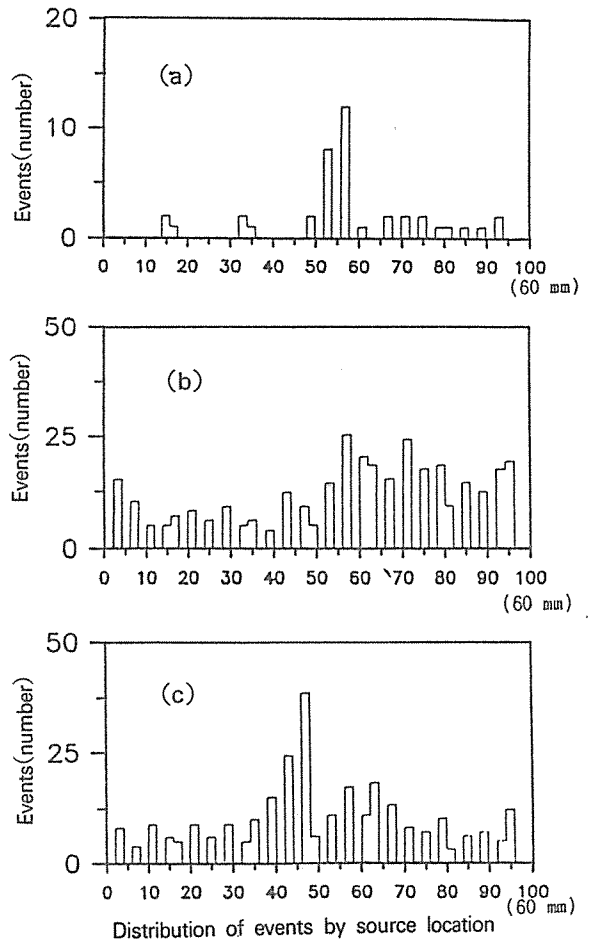


Fig. 22. Distribution of AE Events by Source Location Between Sensor #1 and Sensor #2 for $[0^\circ/90^\circ_6/0^\circ]$ Specimen during Tensile Test. (sensor location; 0:#1, 100:#2) a) stage I, b) stage II, c) stage III

3배(10dB) 정도 크게 나타났는데 이러한 차이는 시편 적층구조의 차이 및 그에 의한 AE방출시의 응력이 본 시편의 경우가 보다 크기 때문인 것으로 판단되었다. Fig. 23 b), c)에서 볼 수 있는 바와 같이 stage II와 stage III에서는 AE 진폭 분포가 55dB주위에서 넓은 peak를 보였으며 80dB 이상의 큰 진폭의 신호도 다수 검출되었다. 이들중 전자와 낮은 진폭을 가지는 AE신호의 source로는 90° ply

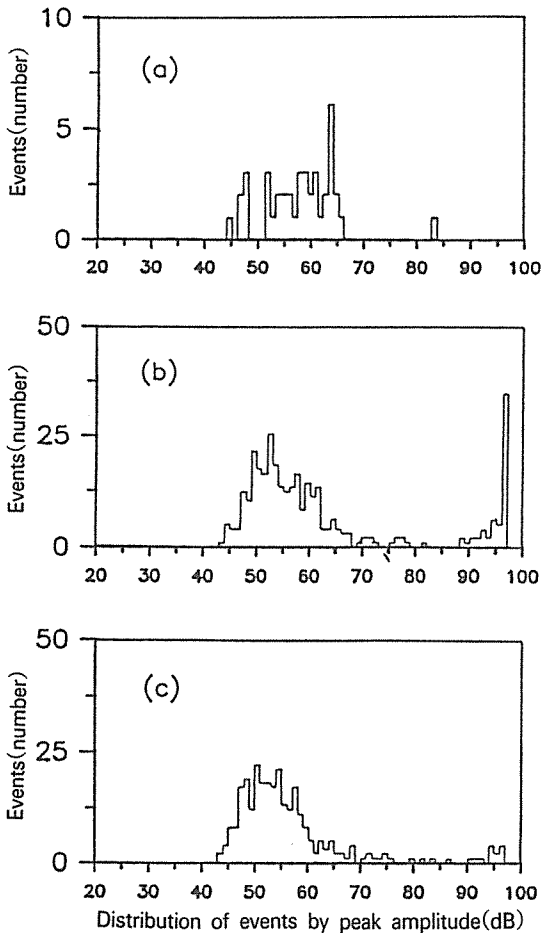


Fig. 23. Peak Amplitude Distribution for $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ Specimen Tensile Test.
a) stage I, b) stage II, c) stage III

균열 및 delamination으로 추정되었으며 80dB이상의 큰 진폭을 가지는 AE 신호의 source로는 0° ply 균열로 추정되었다.

4. 결 론

CFRP 복합재료의 인장시험시 AE 및 침투 X-선 시험을 통해 초기 단층파괴(first ply fracture; FPF) 등 손상 탐지 및 source location을 수행하였으며 그 손상 mechanism에 대한 분석이 가능하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 적층 FRP의 초기 파손은 섬유 방향이 주 하중 방향에 수직인 단층의 섬유 방향 파손(mode I)에 의해 시작되며 FPF는 compliance값의 거시적 변화 이전에 생성되었다.
- 섬유방향이 주 하중방향과 평행한 경우 notch 선단으로부터 섬유방향으로 성장하는 0° ply 균열(mode II)에 의해 초기 파손이 시작되었다.
- Cross ply FRP의 경우 FPF이후 cross ply 층간의 delamination이 notch 부위로부터 성장하며 이 결함은 대부분 0° ply 균열에 수반되어 일어났다.
- mode I 균열에 의한 AE 신호의 진폭은 mode II 균열에 의한 AE 신호의 진폭보다 10배 정도 작다.

Reference

1. Kanji Ono, Proceeding of International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Composites, Montreal, Canada, July, 21-25, p.22 (1986)
2. Lan Li and Jian-Hua Zohao, Proceeding of International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Composites, Montreal, Canada, July, 21-25, p.90 (1986)
3. E. Yasuda, M. Isomura and Y. Tanabe, Progress in Acoustic Emission IV, p.726 (1988)
4. I. Kimpara, I. Ohsawa, Progress in Acoustic Emission IV, p.732 (1988)
5. M. Shiwa, M. Enoki, T. Kishi and S. Kohara, Proceeding of International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Composites, Montreal, Canada, July, 21-25, p.44 (1986)
6. Nak-Sam Choi, Kiyoshi Takahashi and Nbuo Takeda, Progress in Acoustic Emission IV, p.781 (1988)
7. A. Maslouhi, C. Roy and D. Proulx, Proceeding of International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Composites,

- Montreal, Canada, July, 21-25, p.112 (1986)
8. M. Suzuki, H. Nakanishi, M. Iwamoto, E. Jinen, Z. Maekawa, A. Mori and F. Sun, ICCM-VI, Vol.1, 375 (1987)
9. F. Sun, M. Suzuki, H. Nakanishi, M. Iwamoto, and E. Jinen, Progress in Acoustic Emission IV, p.795 (1988)
10. T. Uenoya, Progress in Acoustic Emission IV, p.679 (1988)
-