

論文

음향방출을 이용한 Loading-Unloading 인장시험시
CFRP의 파괴거동해석

윤동진* · 권오양* · 이재락**

Fracture Behavior of CFRP in Loading-Unloading
Tensile Tests by Acoustic Emission

Dong-Jin Yoon*, Oh-Yang Kwon* and Jae-Rock Lee**

ABSTRACT

Acoustic emission(AE) has been employed for characterizing fracture behavior of CFRP during the stepwise, loading-unloading tensile tests. Crack density measured by the replica from the edge of specimens was related to AE activity in terms of AE parameters such as event counts, energy and peak amplitude. The experimental results showed that the crack density of side surface at each step was nearly proportional to cumulative event counts. From the amplitude distribution analysis, a group of AE signals with the low amplitude of 12-30dB occurred in the early stage of testing can be assigned to the initiation of matrix cracking. Another group of AE events with high energy but medium amplitude in the very last stage of failure can account for the rapid growth of delamination. The energy analysis can be superior to the amplitude analysis in some particular cases.

초 록

CFRP에 대한 단계별 반복하중(load-unloading) 인장시험시 음향방출을 이용하여 파괴거동을 고찰하였다. 단계별로 균열이 열린상태와 닫힌상태에서 시편 가장자리의 replica 방법을 이용하여 측정된 균열 밀도는 event counts, peak amplitude 및 energy 등의 AE 변수와 비교 고찰되었다. 각 하중 단계로부터 측정된 균열밀도는 누적 event counts와 매우 유사한 증가추세를 보여 주었으며, AE 신호의 energy 또는 peak amplitude 분포해석에 의한 $[\pm 45]2s$ 적층판의 파괴거동에 예측과도 잘 일치하였다. AE 신호해석의 결과로부터 지금까지 그 간편성 때문에 가장 많이 사용된 peak amplitude 분포보다는 signal energy 분포가 다양한 layup으로 구성된 적층판의 파괴거동의 예측에 더 적합한 것을 알 수 있었다.

* 정회원, 한국 표준연구소

** 정회원, 한국 화학연구소

1. 서 론

일반적으로 고체내에서의 국부적인 스트레인 에너지 분포의 변화에 의해 발생하는 탄성 응력파를 Acoustic Emission(AE : 음향방출)으로 정의하며 [1] 금속에서는 소성변형이나 균열의 발생 및 전파 등이 AE 발생의 주요 원인이 되며 섬유강화 복합재료의 경우에는 기지균열, 섬유/기지 계면분리, 층간분리, 섬유 pullout, 섬유파단 등이 주요한 AE 발생원으로 알려져 있다[2]. AE는 특유의 고감도, 원거리 탐지능력, 실시간 처리기능, 결함위치 결정등의 몇가지 장점때문에 특히 복합재료의 특성 평가에 있어서 미시적 파괴거동의 규명에 많이 사용되고 있다. 또한 압력용기, 각종 배관 등 필라멘트 와인딩 제품을 비롯한 복합재료 구조물의 제조공정 및 사용중 안전성 진단에도 최근 AE 시험이 활발히 적용되고 있으며 표준화된 규격의 제정이 일부 완료되었다[3, 4].

그러나 복합재료에서는 앞에서 열거한 여러가지의 발생원이 재료내부를 온통 채우고 있으며 매우 낮은 하중에서부터 최종 파단시까지에 걸쳐서 동시다발로 작용하게 되므로, AE 신호 데이터의 양도 엄청나게 많은 뿐 아니라 이를 해석하고 발생원을 찾아내는 것이 쉽지않다. 지금까지의 많은 연구에서는 주로 시편의 파단시까지 몇분정도 걸리는 빠른 속도로 연속 하중을 가한후 사후에 데이터를 전체적으로 분석하여 특성을 규명하려는 시도가 있었으나 이 경우 사실상 AE 데이터와 복합재료내의 미시적 파괴거동을 구체적으로 관련지어 설명하기가 어려웠다. 이러한 실험조건은 또한 복합재료의 실제 사용조건을 재현하기에는 미흡하여 이때 기록된 AE 신호의 분석결과는 자칫하면 매우 위험한 결론을 낳을 가능성이 크다. 또한 섬유나 기지 각각에 대한 파괴특성을 AE 변수와 관련지어 설명한 연구도 많이 있으나 실제 여러 형태로 구성된 lay-up에서의 결합발생 특성을 설명하기엔 미흡하였다.

따라서 본 연구에서는 replica 방법을 사용하여 단계별 반복하중 인장시험도중 각 단계에서의 파괴거동을 미시적으로 관찰함으로써 AE 데이터와 연결시켜 분석을 시도하였다. 또한 각 하중 단계

에서의 peak amplitude 및 energy 분포해석을 통하여 인장시험시 angle-ply 적층판에서 가능한 파괴거동을 AE 신호의 실시간(real time) 처리에 의해 예측할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실 험

2-1. 시편 및 실험장치구성

본 연구에 사용된 시편은 길이 153mm, 폭 25.4mm, 두께 1.1mm의 인장시편으로 Fig. 1과 같으며 T300/5208 조성에 $[\pm 45]_2s$ 및 $[0/90]_2s$ 구성을 가진 CFRP 적층판으로부터 절단하여 사용하였다. 시편의 가장자리는 균열밀도를 정확히 측정하기 위해 시험하기 전에 표면을 잘 연마하였다. 단계별 반복하중 인장시험을 위해 table-top Instron(Model 1122)을 사용하였고 AE 신호측정을 위해 사용된 센서는 공진 주파수가 300kHz인 압전형 AE 센서(Model MAC300L, AET Corp.)였으며 탐지된 신호는 250-500kHz의 bandpass 필터가 내장된 pre-amplifier(Model AET 160B)에서 60dB 증폭된후 PC로 컴퓨터화된 AE 장비(Model AET5000)에 전송되고 분석된다. 또한 개별적인 AE 신호의 파형 분석이 필요한 경우에 대비하여 video 파형 기록기(Model AV3605, Sony)에 신호를 기록하였다. 이와같은 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

2-2. 실험 방법

단계별 반복하중 인장시험시의 하중조건은 Fig.

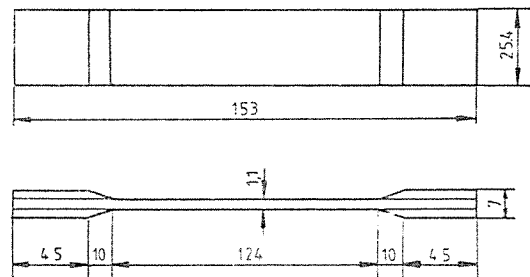


Fig. 1 Dimension of CFRP specimens, $[\pm 45]_2s$ and $[0/90]_2s$, in mm.

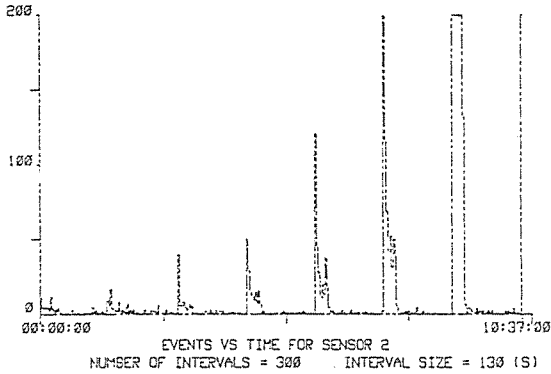


Fig. 4 AE event counts vs. time (from 30% loading to failure). $[\pm 45]_2s$

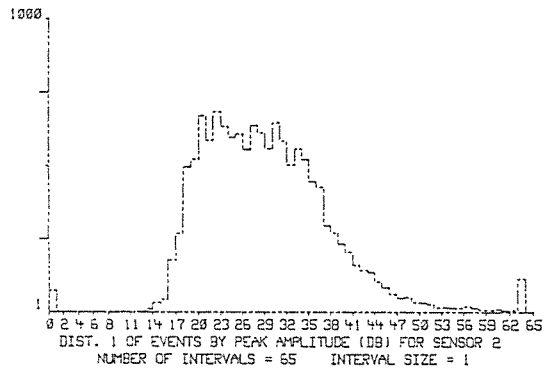


Fig. 6 The peak amplitude distribution of an entire test. $[\pm 45]_2s$

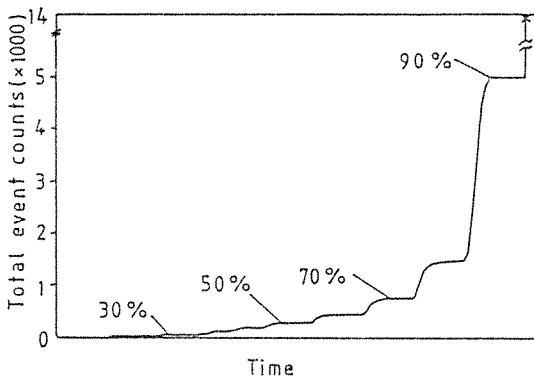


Fig. 5 The cummulative event counts vs. time of an entire test. $[\pm 45]_2s$

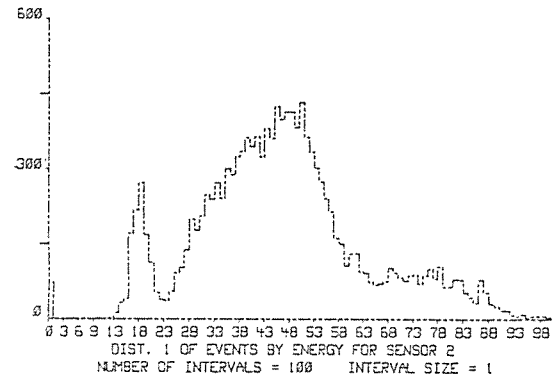


Fig. 7 The energy distribution of an entire test. $[\pm 45]_2s$

Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 6에서 peak amplitude 분포는 단순한 Gaussian 형 분포를 보여주는 반면, Fig. 7에서 energy 분포는 3개의 뚜렷한 그룹으로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 이러한 분포도에서 하나 이상의 그룹이 존재하는 것은 AE 신호의 발생원이 한가지 종류 이상임을 의미한다[9]. Fig. 6 및 Fig. 7의 결과를 보다 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각의 변수에 대한 하중단계별 분포도를 나타내었다. Fig. 8에서는 대표적인 하중단계에서의 peak amplitude 분포를 나타내었는데, 30% 하중에서부터 90% 하중에 이르러 이미 Fig. 6의 전체 분포도의 형상을 유지하게 되며 50% 하중단계에서부터 거의 전체

모양을 갖추기 시작함을 알 수 있다. 여기서 30% 하중에서의 peak amplitude 값은 10-30dB의 범위를 가지는 낮은 신호로 형성되어지는데 이는 기지의 횡방향 균열이 시작되는 시점으로 알려져 있다 [10].

한편 Fig. 9에서는 각 하중단계에 대한 energy 분포를 보여주는데 90% 하중에서도 energy 분포가 Fig. 7의 최종 분포도를 완전히 형성하지 못하고 있음을 알 수 있다. 즉 65에서 100에 이르는 energy를 갖는 AE 신호들은 90% 하중까지에서도 나타나지 않고 있다. 반면에 앞서 설명한 peak amplitude 분포에서는 그런차이가 없음을 보았다. 따라서 이것은 비록 amplitude는 높지 않더라도 높은

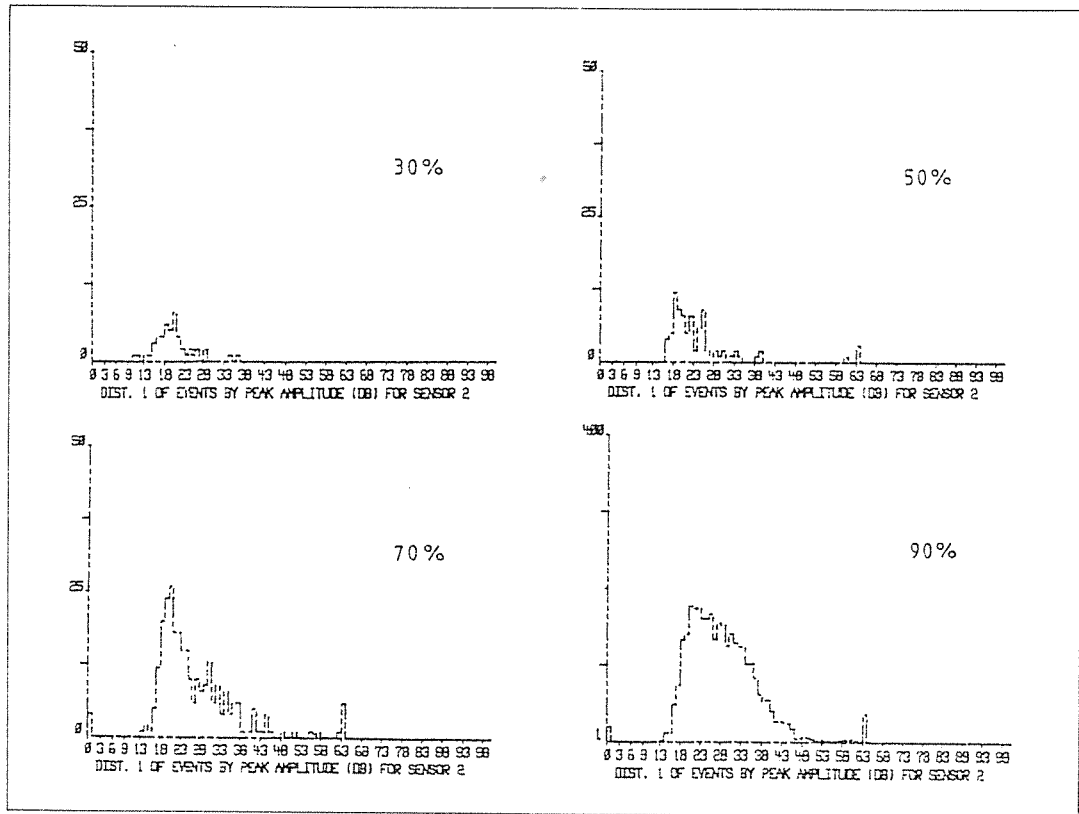


Fig. 8 The peak amplitude distribution at different loading steps. $[\pm 45]_2s$

energy를 가진 신호집단이 최종 파단 단계에서 발생하고 있음을 의미한다. 따라서 이들 AE events의 발생원으로서 최종 파단 단계에서 섬유방향으로의 층간 분리의 급속한 성장을 생각할 수 있다[11].

대부분 시편에서의 total event counts 수는 대개 13,000에서 15,000의 범위내에 있었으며; Fig. 5에서 보는 바와같이 90% 하중단계까지는 거의 5,000에 불과하다. 즉 최종 파단 단계에서 8,000에서 10,000에 이르는 events들이 발생하고 있는데 이들중에서 상당한 숫자의 AE 신호는 중간정도의 peak amplitude(Fig. 6에서 25-40dB) 이면서도 매우 높은 energy를 갖는 집단으로 나타났다. 이상과 같은 결과로부터 AE 신호의 energy 분포해석이 angle-ply 적층판의 파괴거동을 규명함에 있어 유효한 방법의 하나임을 알 수 있다.

3-2. $[0/90]_2s$ 적층판

AE 신호의 energy 분포해석을 같은 재료의 다른 적층판에 적용한 실험의 결과를 $[0/90]_2s$ 시편에 대하여 Fig. 10 및 Fig. 11에서 peak amplitude 및 energy 분포를 비교하여 살펴보았다.

우선 Fig. 11에서 보는 바와같이 앞의 $[\pm 45]_2s$ 시편에 대한 Fig. 7의 경우와는 달리 energy 분포에서 높은 energy 값을 가지는 신호집단이 나타나지 않고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 10을 Fig. 6과 비교해보면 중간에서 높은 amplitude(26-60dB)를 갖는 신호가 $[\pm 45]_2s$ 시편에 비해 훨씬 적게 나타나고 있다. 이것은 최대하중(100%)에서 발생한 events의 total events에 대한 비율이 상대적으로 적은데서도 뒷받침된다. 즉 $[\pm 45]_2s$ 시편의 경우 그 비율이 대략 10,000 : 15,000인데 비해, $[\pm 90]$

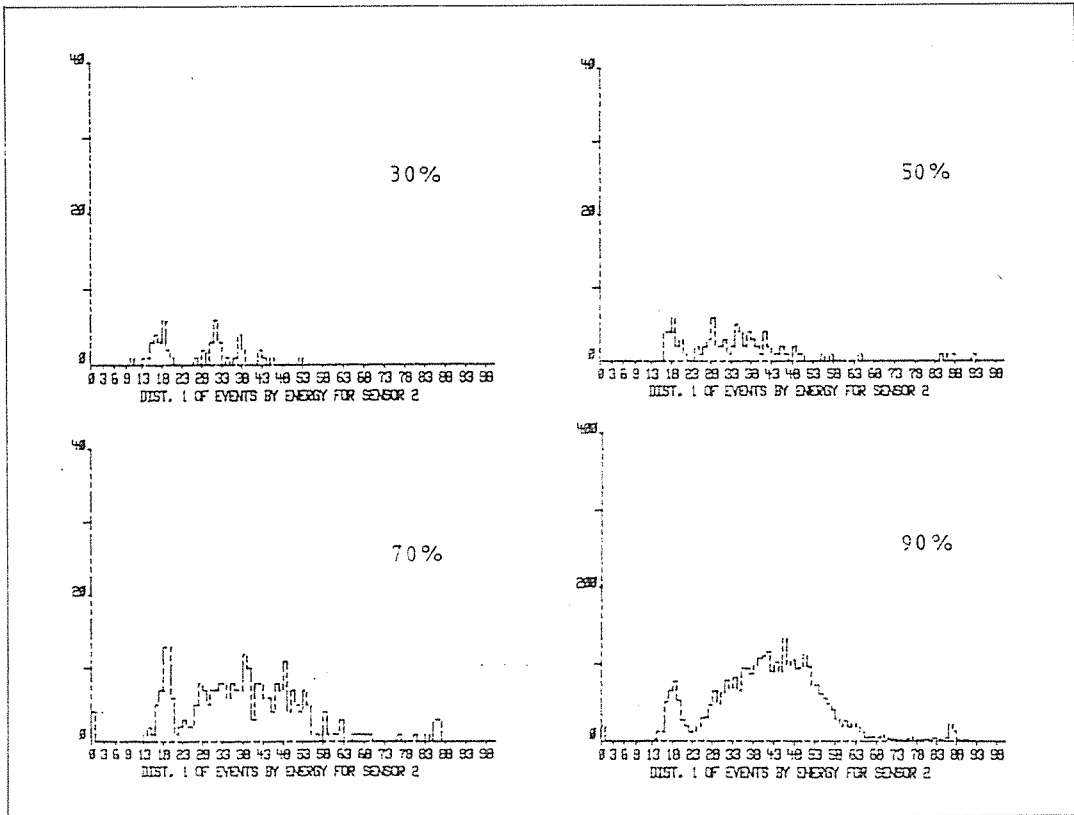


Fig. 9 The energy distribution at different loading steps. $[\pm 45]_2s$

2s 시편의 경우는 10,000 : 30,000의 비율이었다.

이와같은 결과에서 cross-ply 시편에서는 최종 파단 단계에서 급격한 층간 분리의 성장이 발생하지 않는것으로 추정되며, 비록 파단된 시편에서 상당한 층간 분리가 발견되었을지라도 이들은 최종 파단 훨씬 전부터 서서히 형성되었으며 $[\pm 45]_2s$ 시편의 경우처럼 높은 energy를 가진 신호들은 발생할 수 없었을 것으로 볼 수 있다. 이에 대한 이유로서는 섬유방향에 평행한 기지 splitting이 90°-plies에 의해 구속될수가 있으며 따라서 높은 energy 신호를 발생시키는 것으로 알려진 상대적으로 큰 파괴면의 형성을 억제시키고 있음을 들 수 있다.

3-3. 균열 밀도

AE events 발생율과 균열밀도 사이의 상관관계를

규명하고자 Fig. 12에 $[\pm 45]_2s$ 시편에 대한 하중 단계별 균열밀도를 나타내었다. 그림에서 하중유지와 회복시의 균열밀도 값은 서로 차이가 나며 이는 회복 단계에서는 균열이 일부 close 되었기 때문인데 전체적인 경향에서는 서로 비슷하게 나타나고 있다. 그리고 Fig. 5와 비교해보면 total event는 80%에서 90% 하중단계에서 급격한 증가를 보여줌에 비해 균열밀도는 40% 하중부터 증가 추세를 나타내며 80% 부터는 급격한 증가를 나타낸다. 즉, 시편 측면에서의 균열밀도 증가는 AE total events의 증가와 전체적으로는 상당히 비슷한 경향을 나타내지만 40%에서 80% 하중단계에서는 큰 차이를 보여주고 있다.

Fig. 13에는 각각의 하중단계에서 replica로부터 얻은 현미경 사진을 균열성장 과정을 보기위해 대표적으로 나타내었다. 특히 바깥층에서는 균열이

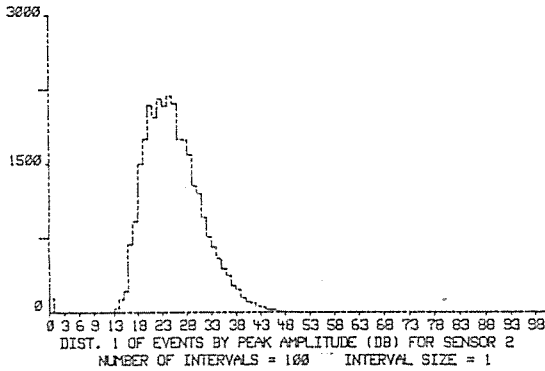


Fig. 10 The peak amplitude distribution of an entire test. $[0/90]_2s$

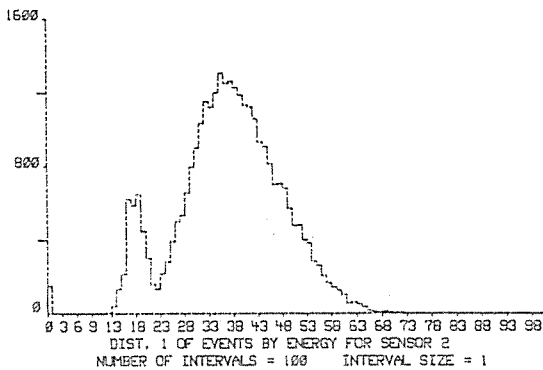


Fig. 11 The energy distribution of an entire test. $[0/90]_2s$

횡방향으로 시작되고 있음을 알 수 있으며, 약 50%-70% 하중단계에서 균열이 층간방향으로 전파를 시작함을 알 수 있다. 그리고 90% 하중단계에서는 $[\pm 45]_2s$ 적층판의 전형적인 파괴현상인 층간분리로 연결되어진 횡방향 균열이 형성되고 있음을 보여준다.

4. 결 론

CFRP(T300/5208)의 단계별 반복하중 인장시험시 파괴거동을 음향방출을 이용하여 규명하였으며 AE events에 대한 peak amplitude 및 energy 분포해석과 replica 방법에 의한 균열의 진행상태 및 균열밀도 측정으로부터 얻은 결론은 다음과 같

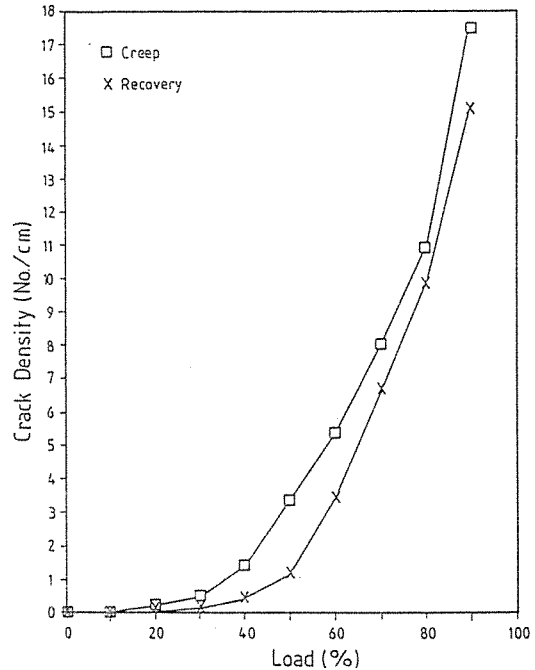


Fig. 12 The crack density vs. load levels. $[\pm 45]_2s$

다.

1. 시험 초기단계에서 발생한 12-30dB 범위의 낮은 peak amplitude를 가진 AE신호 집단은 기지 균열의 발달에 의한 것으로 분류되었으며 시험의 최종 파단 단계에서의 AE 신호집단은 높은 amplitude는 갖지 않으나 매우 높은 energy 값을 가진 신호들로서 최종 파단시 발생하는 급속한 층간분리의 성장으로 설명될 수가 있다. 따라서 두가지 분포도는 서로 밀접한 관계에 있을지라도 peak amplitude 분포도 보다 energy 분포도가 어떤 경우에는 더 유효하다.

2. Cross-ply 적층판에서는 $[\pm 45]_2s$ 의 경우에서 발생한 최종 파단시의 높은 energy 신호가 발생하지 않으며 이는 섬유방향에 평행한 기지 splitting이 90°-plies에 의해 구속되어져 높은 energy 신호의 발생원이 되는 급속한 층간분리를 억제하기 때문이다.

3. 시험 가장자리에서 replica 방법으로 얻어진 각 하중단계에서의 균열밀도 측정치는 누적 event

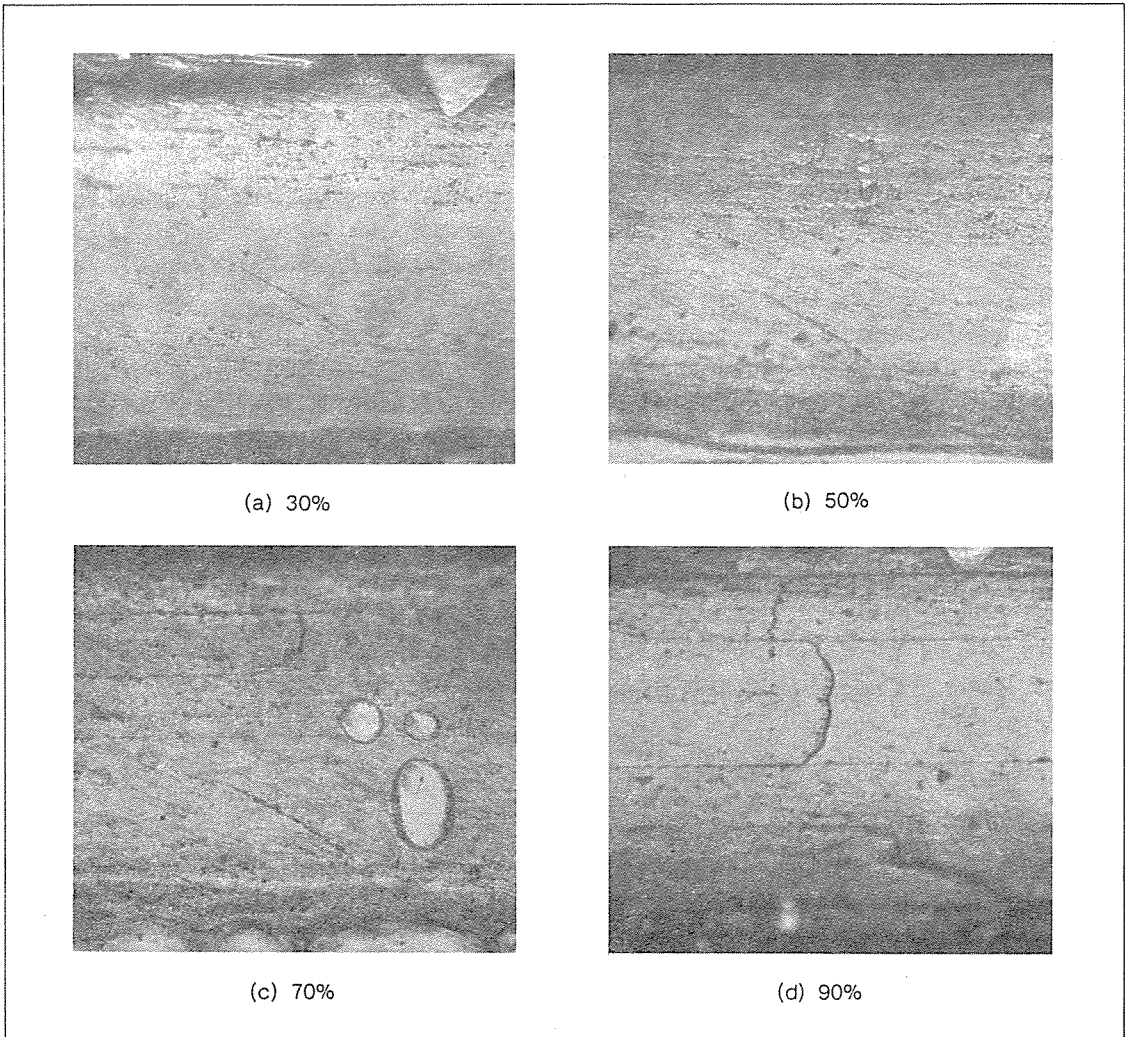


Fig. 13 Photomicrographs of $[\pm 45]_2s$ replica from the holding stage of different loading steps (x100).

counts와 대체적으로 같은 증가추세를 보이나 전 과정을 통하여 비례관계는 성립되지 않았다.

후 기

본 연구는 과학기술처 특정연구 과제로 수행된 사업의 일환으로 이루어진 것으로 연구비를 지원해주신 과학기술처에 감사드립니다.

참고문헌

1. ASTM E610-85, "Standard Definitions of Terms Relating to Acoustic Emission," American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA, 1977.
2. M.A. Hamstad, "A Review : Acoustic Emission, a Tool for Composite Material Studies," Experimental Mechanics, March 1986, pp.7-13.

3. SPI, "Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Tank/Vessels," The Society of the Plastics Industry, New York, NY, 1982.
 4. ASME Sec.V Art.11, "Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessel," American Society for Mechanical Engineering, 1986.
 5. D.J. Yoon, G.C. Kim, O.Y. Know and J.R. Lee, "Fracture Behavior of CFRP in Creep-Recovery Tensile Testing by Acoustic Emission," Proc. of the KSCM Fall Meeting, Nov. 11-12, 1988, Seoul, Korea.
 6. O.Y. Kwon and D.J. Yoon, "Energy Distribution Analysis of Acoustic Emission Signals from the Tensile Testing of CFRP," Proc. of 3rd Intl Symp. on AE from Composite Materials(AECM-3), Paris, France, July 17-21, 1989, ASNT, Columbus, OH, pp.298-303.
 7. A.G. Beattie, "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation," J. of Acoustic Emission, Vol. 2, No.(1/2), 1988, 95-128.
 8. Nondestructive Testing Handbook : Vol.5, "Acoustic Emission Testing," ASNT, Columbus, OH, 1978.
 9. M.A. Hamstad, "Quality Control and NDE Techniques for Composites-PartVI : Acoustic Emission-A State-of-the-Art Review," AVRAD-COM TR-83-F-7, May, 1983, pp.4-31.
 10. L. Lorenzo and H.T. Hahn, "On the Applicability of Amplitude Distribution Analysis to the Fracture Process of Composite Material," J. of Acoustic Emission, Vol.5, No.1, 1986, pp.15-24.
 11. M. Ohtsu and K. Ono, "Pattern Recognition Analysis of Acoustic Emission from Unidirectional Carbon Fiber Epoxy Composites by Using Autoregressive Modeling," J. of Acoustic Emission, Vol.6, No.1, 1987, pp.61-71.
-