

AE법에 의한 유한 폭 CFRP 판재의 파괴특성

박성완*, 이장규⁺

(논문접수일 2006. 9. 27, 심사완료일 2007. 5. 22)

Fracture Characteristics of Finite-Width CFRP Plates by Acoustic Emission

Sung-Oan Park*, Zhang-Kyu Rhee⁺

Abstract

The purpose of present paper is to investigate a fracture characteristics of the finite-width single-edge-notch(SEN) carbon fiber/epoxy reinforced plastics(CFRP) plates by using an acoustic emission(AE). Uni-directionally oriented 10 plies CFRPs specimen which had different notch length were prepared for monotonic tensile test. Matrix cracking appeared over whole testing process and fiber breaking appeared later on mainly. Load distribution factor of the matrix confirmed that increased according as increases of plate width ratio. The amplitude distribution of AE signal from a specimens is an aid to the determination of the different fracture mechanism such as matrix cracking, disbonding, interfacial delamination, fiber pull-out, fiber breaking, and etc. In the result of AE amplitude distribution analysis, matrix cracking, fiber disbonding or interfacial delamination, and fiber pull-out or fiber breaking signal correspond to <65dB, <75dB, and <90dB respectively. Also, changes of the slope of cumulative AE energy represented crazing phenomena or degradation of materials.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Finite-Width(유한 폭), Carbon Fiber/Epoxy Composites(탄소섬유/에폭시 복합재), Single-Edge-Notch Specimen(SEN 시험편), Uni-direction(일방향), Fracture Characteristics(파괴특성)

1. 서론

신소재의 하나인 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)은 비강도, 비강성 및 중량 감소 측면에서 우수한 특성을 나타내며, 보강재의 방향을 임의로 조절하여 재료의 이방성을 변화

시킬 수 있는 장점과 열팽창계수가 작아 치수균일성이 높다는 장점 때문에 항공 우주 분야뿐만 아니라 자동차 및 스포츠 용품 등 여러 분야에서 구조물의 경량화 설계를 위해 사용되는 빈도가 점차 증대되고 있다. 그러나 이러한 복합재료의 가장 큰 문제점은 재료가 하중을 받을 때, 강도, 강성

* 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과 (sopark@icc.ac.kr)
주소: 402-750 인천시 남구 도화동 235

+ 인천대학교 기계공학과

및 수명의 감소를 일으킬 수 있는 불균일성 또는 재료의 제조 과정에서 발생하는 각종 형태의 결함을 내재할 가능성이 크고, 적층각 또는 적층 순서에 따라 불규칙한 파괴 양상이 일어나는 매우 복잡한 파괴특성을 갖고 있는 경향이 있다. 따라서 복합재료를 구조용 재료로 사용하기 위해서는 재료 내부에 존재하는 각종 손상 및 결함에 대한 강도상의 신뢰성에 대한 요구도 높아지고 있다. CFRP에 있어서 손상의 전개는 재래식 금속재료와는 달리 근본적인 차이점이 있으며, 모재파괴(균열), 모재와 섬유와의 계면분리, 층간분리, 섬유뿔침, 섬유파단 등의 복잡한 형태로 구성되어 있으므로 정확한 파괴기구의 이해가 중요하다⁽¹⁻⁴⁾.

본 연구에서는 에폭시 수지(epoxy resin)를 기지재(matrix)로 하는 CFRP SEN(single-edge-notch) 시험편에 대한 크랙(노치) 선단으로부터의 미시적 균열생성에서 최종파단에 이르는 과정에 걸쳐 발생하는 AE 신호를 계속하고, 판 폭에 대한 크랙의 길이변화에 따른 파괴양상을 정성적 및 정량적인 방법으로 해석하여 CFRP의 파괴기구를 규명함으로써 궁극적으로 현장에서의 CFRP 복합재 손상평가⁽⁵⁾에 활용하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 Carbon/Epoxy 복합재 시험편의 재료는 (주)SK에서 제작된 USN 200A의 프리프레그(prepreg)로 그 기계적인 물성은 Table 1과 같다.

또한 탄소섬유의 배향각을 0°로 하여 각각 10plies씩 적층하고, 오토클레이브(autoclave)에서 진공백(vacuum bag) 성형을 하였다.

시험편의 형상은 Fig. 1과 같고, 양쪽에 45mm의 탭(tab)을 두었으며, 시험편 폭에 대한 크랙(crack) 길이의 비인 판 폭비 $2a/W$ 는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5($a=2, 4, 6, 8, 10$ mm, $W=40$ mm)로 하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 Spartan 2000(PAC, USA) 시스템⁽⁶⁾의 DAQ 모듈과 Autograph 25-TG(Shimadzu, Japan) 인장시험기를 사용하였다. 인장시험기의 부하속도는 0.5mm/min의 정속신장형 부하이며, 인장시험기로부터 출력되는 하중값은 별도의 커넥터^(5,7,8)를 통해 각각의 시스템에 전송하였다.

AE신호 계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 Fig. 1

Table 1 Properties of prepreg, USN 200A

Tensile strength	Tensile modulus	Resin content
450kgf/mm ²	24×10 ³ kgf/mm ²	36%
Fiber density	Resin density	Thickness
1.77g/cm ³	1.2g/cm ³	0.207mm

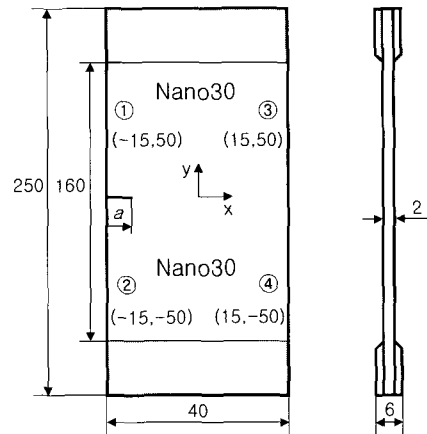


Fig. 1 Geometry of SEN specimen(unit:mm)

과 같이 시험편의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 대칭이 되도록 Nano30(공진주파수 300kHz) 센서 4개를 특수 제작한 고정구를 사용하여 압착시키고 캘리브레이션(calibration)^(9,10)을 실시하였다.

이때 전치증폭기(1220A)의 게인(gain)은 60dB로 설정하였고, 검출된 아날로그 AE신호는 주증폭기에서 20dB로 2차 증폭하여 디지털 데이터로 변환시킨 후 PC에 전송하였으며, threshold는 55dB로 고정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 SEN 시험편에 대하여 $2a/W=0.1$ 인 경우의 결과를 나타낸 것으로 (a)는 인장시험기에서 얻은 실제의 load-time 곡선이고, (b)는 차후 $2a/W$ 에 따라 각 조건별로 AE 신호분석을 도모하기 위해 나타낸 AE 신호의 대표적인 예이다.

Fig. 2 (b)의 막대그래프는 AE 계측시스템에서 획득한 counts-time의 결과이고, 선그래프는 인장시험기의 로드셀을 5ton(49kN) 풀 스케일(full scale)로 설정한 경우에 대하여 인장시험기 아날로그 출력단자에서 획득한 외부입력

(parametric#1) 신호를 나타낸 것으로 time축에 대하여 전반적으로 일정한 간격만큼의 불연속적인 형상을 볼 수 있는데, 이는 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 시험편의 경우에는 인장시험기의 로드셀을 20ton(196.1kN) 풀 스케일로 설정하여 실험을 해야 하지만, 통상 복합재료의 경우 최대하중의 30~60%에 해당하는 하중이 재료에 작용할 경우 재료의 구조적 신뢰성 평가에 있어서는 계를을 다한 것으로 보기 때문에 보다 미시적인 고찰을 위해 본 실험에서 적용한 인장시험기의 하중변위 제어 조건에 대한 특성이 AE 계측시스템에 반영된 것으로 볼 수 있다.

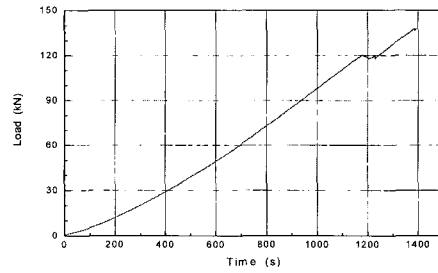
또한 최고하중의 87%(120kN)인 1200s에서 하중강하는 기지재와 섬유의 전체적인 파단이 아닌 부분파단에 의해 발생하며, 최대하중 100%(137kN)인 1400s에서 최종 파단됨으로써 취성과 파괴 현상을 보이고 있다.

Fig. 2 (b)의 선그래프는 Fig. 1에 의하면 4개의 그래프가 있어야 하지만, 본 연구에서는 위치표정(sensor location)에 목적을 두고 있지 않으므로 sensor 3과 4의 신호만을 필터링하여 나타냈는데, 이는 궁극적으로 시험편의 크랙이 sensor 3과 4의 방향으로 진전되어 최종 파단에 이를 것으로 예측되기 때문이다. 따라서 외부입력 신호를 제외한 모든 AE 신호는 sensor 3과 4의 신호만을 포함한다. 한편 이 선그래프는 진폭의 기울기 값인 b -value^(10,11)를 의미하는데, 전반적으로 그 경향은 비슷하였다. 그러나 sensor 4에서는 높은 빈도의 counts와 56dB 이상의 진폭분포를 나타내고 있는 반면, sensor 3에서는 비교적 낮은 빈도의 counts와 70dB 이상의 진폭분포가 발생하는 것으로 나타났다. 그러므로 threshold를 55dB로 고정하여 설정한 것은 무척 타당한 것으로 사료된다. 또한 Fig. 2 (b)의 amplitude-time으로부터 상기 사실을 재차 확인할 수 있다.

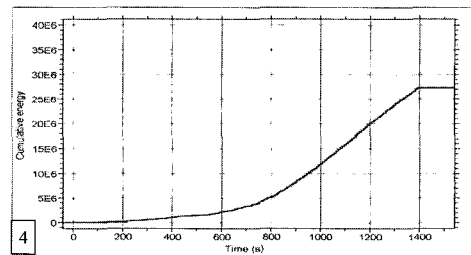
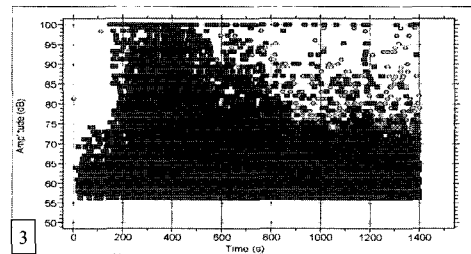
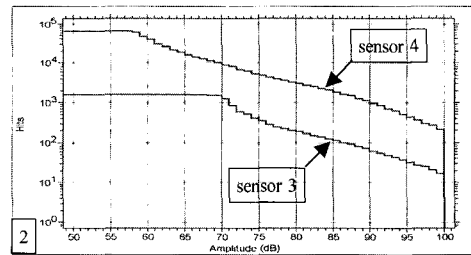
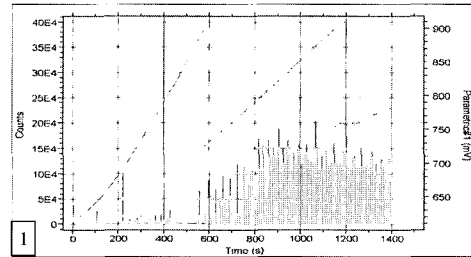
그리고, Fig. 2 (b)의 cumulative energy-time으로 1에서의 counts와 energy는 유사한 경향을 나타내는데, 여기에서는 energy를 누적하여 나타낸 것으로 그 기울기로부터 CFRP 복합재의 손상정도를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3은 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 SEN 시험편에 대하여 $2a/W$ 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 변화시켰을 경우, 막대그래프는 AE 계측시스템에서 획득한 counts-time의 결과이고, 선그래프는 인장시험기의 아날로그 출력단자에서 획득한 외부입력(parametric#1) 신호로 load-time에 대한 결과이다.

에너지방출 측면에서 전반부(region I)는 $2a/W=0.1$ 일 때 최고하중 137kN의 7.3%(10kN), $2a/W=0.2$ 일 때 최고하중 112kN의 9.38%(10.5kN), $2a/W=0.3$ 일 때 최고하중 102kN



(a) Load-time curve by Autograph 25-TG



(b) AE signals by Spartan 2000 system

Fig. 2 Representative results of the $2a/W=0.1$

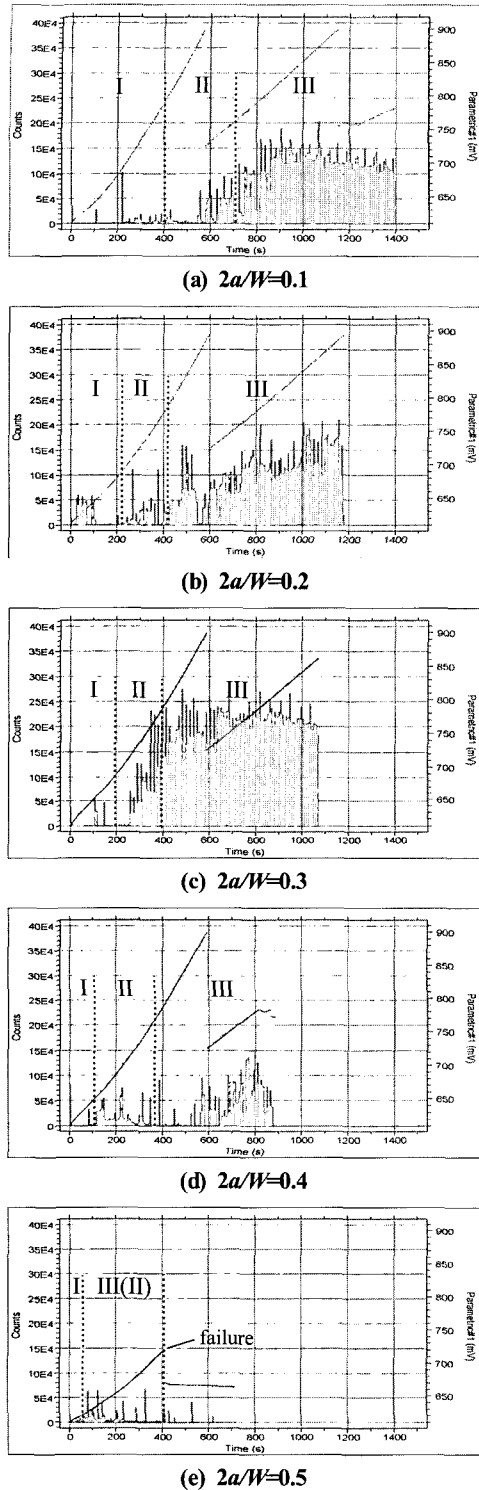


Fig. 3 Plots of counts and parametric#1(load) vs. time

의 10.8%(11kN), $2a/W=0.4$ 일 때 최고하중 72kN의 18.75% (6.3kN), 그리고 $2a/W=0.5$ 일 때 최고하중 18kN의 21.1% (3.8kN)에서 크랙의 미소변형에 의한 손상으로 인해 미소한 양의 counts가 발생한다.

중반부(region II)는 $2a/W=0.1$ 일 때 최고하중의 36.5%(50kN), $2a/W=0.2$ 일 때 최고하중의 23.7%(26.5kN), $2a/W=0.3$ 일 때 최고하중의 29.6%(30.2kN), $2a/W=0.4$ 일 때 최고하중의 40.3%(29kN), 그리고 $2a/W=0.5$ 일 때 최고하중의 91.7%(16.5kN)에서 하중증가에 따른 기지재의 누적손상으로 인하여 counts가 점차 증가되는 것을 알 수 있다.

또한 후반부(region III)는 $2a/W=0.1$ 일 때 최고하중의 51.0%(70kN), $2a/W=0.2$ 일 때 최고하중의 60.7%(68kN), $2a/W=0.3$ 일 때 최고하중의 48%(49kN), $2a/W=0.4$ 일 때 최고하중의 67.36%(48.5kN), 그리고 $2a/W=0.5$ 일 때 최고하중의 55.6%(10kN)에서 counts가 집중되면서 피크(peak)를 나타내는 것은 기지재와 섬유사이의 계면분리가 시작됨을 의미하며, 그 이후 시험편의 거시적인 누적손상으로 인하여 counts 값은 $2a/W=0.1, 0.2$ 일 때 13×10^4 으로 유지됨을 알 수 있고, $2a/W=0.3$ 에서 20×10^4 으로 증가하는 것은 판폭비의 영향에 의한 것임을 알 수 있다. 또 $2a/W=0.4, 0.5$ 는 균열의 진전과 더불어 counts 값이 급격히 감소하며, 이것으로부터 더 이상 재료에 손상이 누적되지 않음을 알 수 있다.

판폭비가 증가할수록 기지재의 하중분담율이 커지는 것을 알 수 있으며, CFRP 시험편에서의 AE activity 발생시점과 함께 파단시점이 점차 빨라지고 있음을 확인할 수 있다. 즉, $2a/W=0.1$ 일 때 1400s, $2a/W=0.2$ 일 때 1200s, $2a/W=0.3$ 일 때 1100s, $2a/W=0.4$ 일 때 900s, 그리고 $2a/W=0.5$ 일 때는 700s로 빨라지는데, 이는 크랙이 커지면 시험편이 갖고 있는 섬유 기지재가 작아지기 때문이다. 그리고 섬유파단이 생기면서 소성변형이 증가하여 섬유파단으로 인한 시험편의 크레이징(crazing) 현상이 일어나고, 인장시험 시 시험편의 섬유배향 방향으로 열경화성 수지에 소성변형이 일어나 수지가 하얗게 되는 백화현상(whitening)이 발생하였다. AE activity 측면에서는 (a)~(c)까지의 경우 많은 양의 counts가 발생하며 점차 증가하는 경향을 보였지만, (d) 이후에는 counts가 감소하는 경향을 보였다. 한편, counts가 400~600s 범위에서 백화현상이 시작됨을 알 수 있으며 그 때의 진폭은 판폭비가 증가 할수록 작아진다.

Fig. 4는 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 SEN 시험편에 대하여 $2a/W$ 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 변화시켰을 경우, cumulative energy-time에 대한 결과이다. Fig. 3과 마찬가지로 (a)~(c)에서는 시간(하중)의 증가와 더불어 CFRP 시

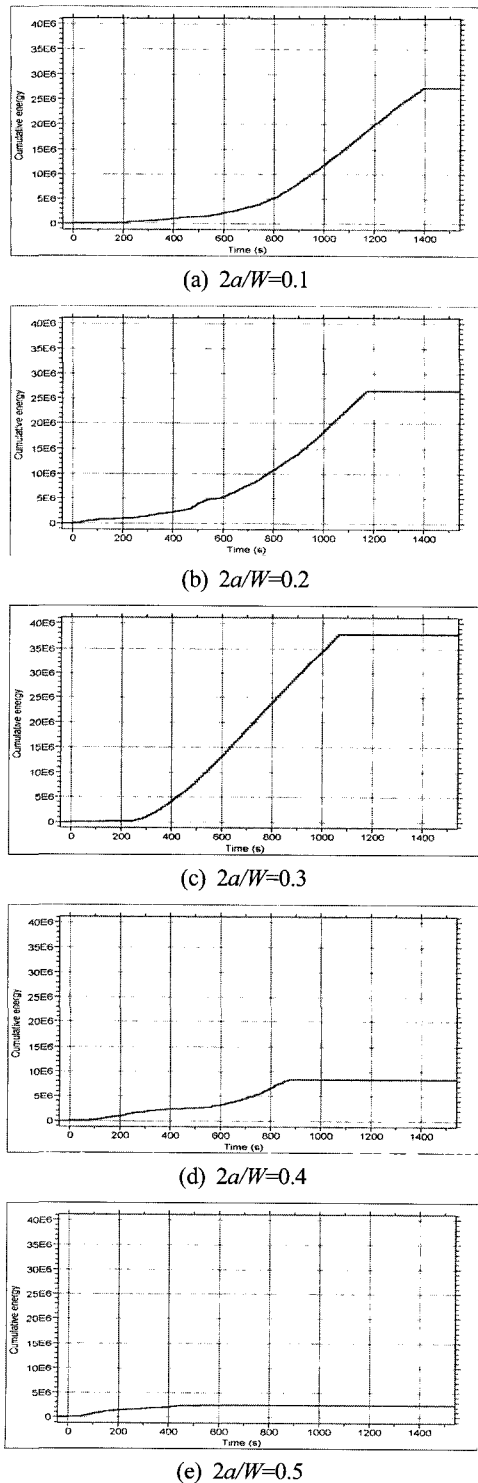


Fig. 4 Plots of cumulative energy vs. time

험편에 크랙이 진전되면서 소성변형으로 인해 소재가 가지고 있던 잠재적인 에너지가 방출되어 AE activity가 증가하여 그 기울기가 점차 급해졌지만, (d) 이후에는 기울기가 다시 완만해지는 것으로 나타났다.

그리고 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 경우에는 기지재 파괴(matrix cracking), 층간분리(interfacial delamination) 또는 기지재와 섬유의 계면분리(disbonding), 섬유뽑힘(fiber pull-out) 및 섬유파단(fiber breaking)으로 인하여 점진적으로 에너지가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 SEN 시험편에 대하여 $2a/W$ 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 변화시켰을 경우, amplitude-time-energy에 대한 3D 및 2D contour map이다.

전반부(region I)의 낮은 에너지 레벨은 기지재의 미소균열 발생 및 성장에 의해 $2a/W=0.1, 0.2$ 일 때 <65dB, $2a/W=0.3$ 일 때 <75dB, $2a/W=0.4$ 일 때 <65dB의 신호가 발생되었다. 중반부(region II)는 하중이 점진적으로 증가함에 따라 섬유파단에 의해 <100dB의 신호가 발생하며, 후반부(region III)는 CFRP의 층간분리에 의하여 초기영역보다 높은 <80dB의 진폭분포를 보였으며, 특히 >800s에서는 초기영역보다 현저히 높은 30×10^4 의 에너지 레벨을 갖는 것으로 나타났다.

또한, 진폭 70~90dB에서 고에너지의 집중발생은 기지재의 층간분리와 동시에 기지재와 섬유의 계면분리, 섬유파단이 원인이며, 판폭비가 클수록 발생빈도시간이 빨라짐을 나타내고, $2a/W=0.3$ 일 때 판폭비의 영향이 가장 강한 것을 알 수 있다.

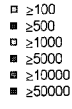
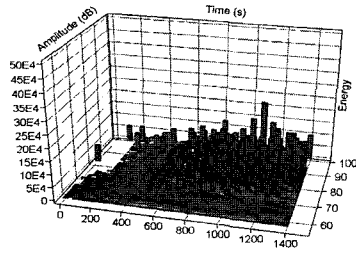
Fig. 6은 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 SEN 시험편에 대하여 $2a/W$ 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 변화시켰을 경우, parametric#1(load)-amplitude-RMS-background noise(events)에 대한 3D 및 2D contour map이다.

진폭분포 중에 $2a/W=0.1$ 일 때 56~65dB, $2a/W=0.2$ 일 때 56~60dB, $2a/W=0.3$ 일 때 65~70dB, $2a/W=0.4$ 일 때 56~62dB의 범위에서 미미한 잡음($\geq 0.003\mu V$)이 검출되는 것은 기지재의 미소균열 발생 및 성장에 의한 것임을 알 수 있으며, 따라서 주위의 잡음으로 인하여 발생하는 신호를 제거하기 위해 설정한 threshold 값을 55dB로 고정한 것은 무척 타당함을 확인 할 수 있다.

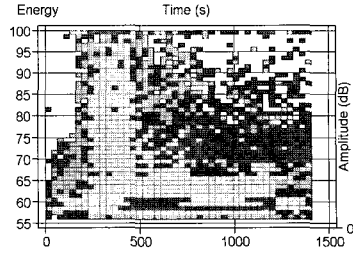
4. 결론

본 연구에서는 복합재료의 파괴거동에 영향을 주는 주요 인자 중, 섬유배향각 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 인 일방향 CFRP의 파괴거동

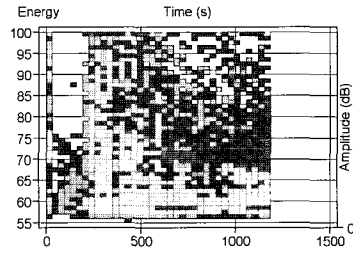
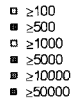
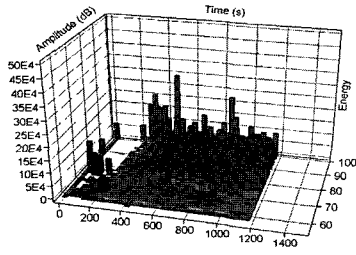
3D plot



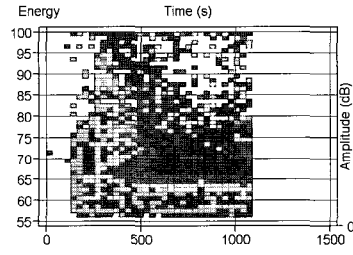
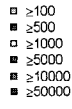
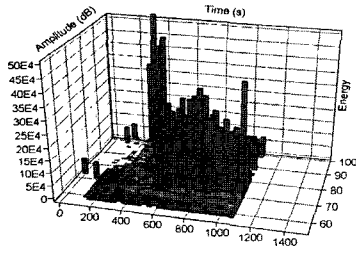
2D contour map



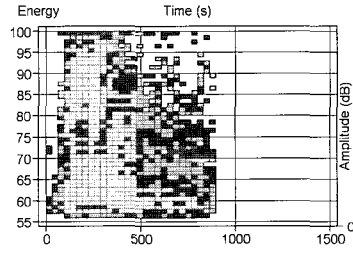
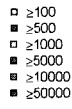
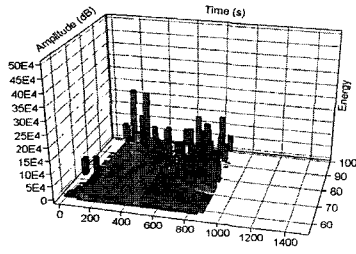
(a) $2a/W=0.1$



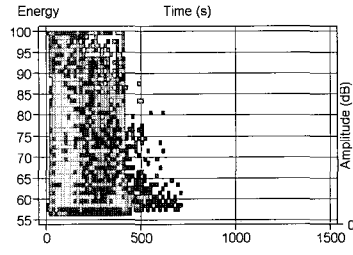
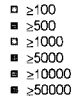
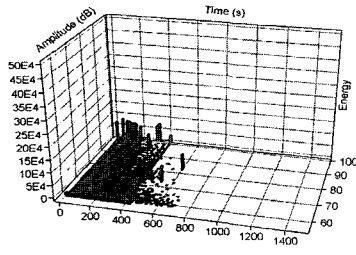
(b) $2a/W=0.2$



(c) $2a/W=0.3$



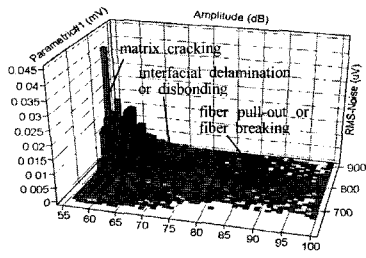
(d) $2a/W=0.4$



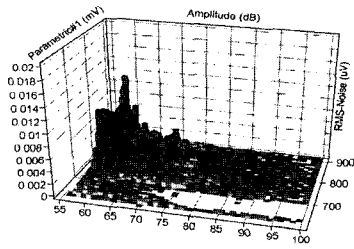
(e) $2a/W=0.5$

Fig. 5 Plots of amplitude and energy vs. time

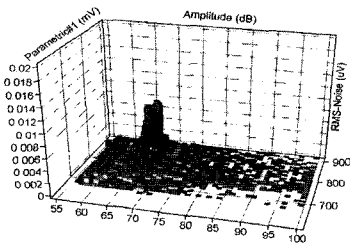
3D plot



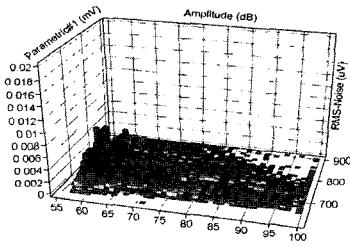
(a) $2a/W=0.1$



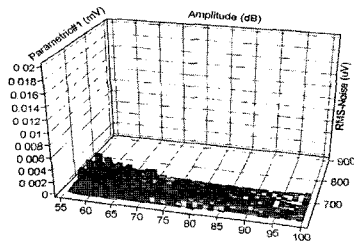
(b) $2a/W=0.2$



(c) $2a/W=0.3$



(d) $2a/W=0.4$



(e) $2a/W=0.5$

2D contour map

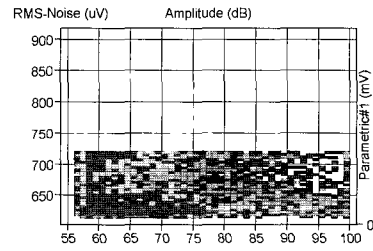
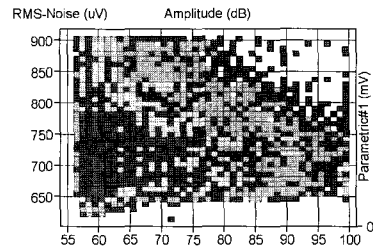
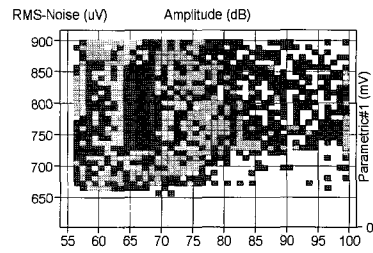
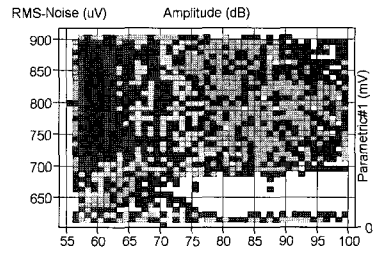
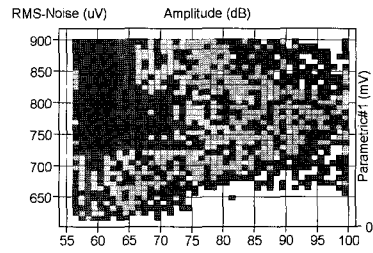


Fig. 6 Plots of parametric#1(load) and RMS-background noise(events) vs. amplitude

특성을 조사하기 위해 판폭비를 달리한 유한 폭 SEN 인장 시험편에 AE법을 적용하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 기지재 파괴는 시험과정 전체에 걸쳐 나타나고, 섬유파단은 주로 후반부에 나타났으며, 판폭비가 증가할수록 기지재의 하중분담율이 커지는 것을 알았다.
- (2) AE counts가 400~600s 범위에서 백화현상이 시작되고 있으며 그 때의 진폭은 판폭비가 증가할수록 감소되고, AE counts 값도 급격히 감소함으로써 더 이상 재료에 손상이 누적되지 않음을 알았다.
- (3) 진폭분포 해석결과로부터 전반부에서는 <65dB, 중반부에서는 <75dB, 후반부에서는 <90dB로 나타났는데, 이는 각각 기지재 파괴, 층간분리 또는 기지재와 섬유의 계면분리, 섬유뽑힘 및 섬유파단에 대응하는 것으로 판단된다.
- (4) 저진폭은 기지재의 파괴, 고진폭은 섬유재의 파괴를 나타내며 누적에너지의 기울기로부터 재료손상을 추정하는 것이 가능함을 알았다.

참 고 문 헌

- (1) Saito, N., Takemoto, M., Suzuki, H. and Ono, K., 1998, "Advanced AE Signal Classification for Studying the Progression of Fracture Modes in Loaded UD-GFRP," *Progress in Acoustic Emission IX*, pp. S289~S298.
- (2) Sun, F., Suzuki, M., Nakanishi, H., Iwamoto, M. and Jinen, E., 1988, "Relationship between Fracture Mechanisms and AE Characteristics of Model GFRP," *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 37, No. 416, pp. 517~522.
- (3) Suzuki, M., Nakanishi, H., Iwamoto, M., Jinen, E., Maekawa, Z., Mori, A. and Sun, F., 1987, "Studies on Fracture Mechanisms of CFRP by Acoustic Emission Method," *Transactions of the JSME Series A*, Vol. 53, No. 492, pp. 1459~1466.
- (4) Komai, K., Minoshima, K. and Shibutani, T., 1990, "Investigation of the Fracture Mechanism of Carbon/Epoxy Composites by AE Signal Analyses," *Transactions of the JSME Series A*, Vol. 56, No. 528, pp. 1792~1799.
- (5) Rhee, Z. K., Park, S. O., Kim, B. G. and Woo, C. K., 2005, "A Study on the Damage Estimation of Uni-directionally Oriented Carbon Fiber Reinforced Plastics using Acoustic Emission," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 30~36.
- (6) Physical Acoustics Corporation, 1995, *Spartan 2000 User's manual & Technical manual*, PAC.
- (7) Rhee, Z. K., Woo, C. K., Park, S. O., Yoon, J. H., Cho, J. H., Kim, B. G. and Koo, Y. D., 2004, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(1)," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 113~120.
- (8) Rhee, Z. K. and Woo, C. K., 2005, "Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 87~95.
- (9) Leaird, J. D., 1997, *Acoustic Emission Training Guide: How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission*, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.
- (10) Rhee, Z. K. and Woo, C. K., 2006, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(2)," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 104~113.
- (11) Pollock, A. A., 1973, "Acoustic Emission—Acoustic Emission Amplitudes," *Nondestructive Testing*, Vol. 6, No. 5, pp. 264~269.