

음향방출을 이용한 일방향 탄소섬유강화 플라스틱의 손상평가에 관한 연구

이장규*, 박성완⁺, 김봉각⁺⁺, 우창기⁺⁺⁺
(논문접수일 2004. 6. 9, 심사완료일 2004. 7. 15)

A Study on the Damage Estimation of Uni-directionally Oriented Carbon Fiber Reinforced Plastics using Acoustic Emission

Zhang-Kyu Rhee*, Sung-Oan Park⁺, Bong-Gag Kim⁺⁺, Chang-Ki Woo⁺⁺⁺

Abstract

This study is to investigate a damage estimation of single edge notched tensile specimens as a function of acoustic emission(AE) according to the uni-directionally oriented carbon fiber/epoxy composites, CFRP. In fiber reinforced composite materials, AE signals due to several types of failure mechanisms are typically observed. These are due to fiber breakage, fiber pull-out, matrix cracking, delamination, and splitting or fiber bundle breaking. And these are usually discriminated on the basis of amplitude distribution, event counts, and energy related parameters. In this case, AE signals were analyzed and classified 3 regions by AE event counts, energy and amplitude for corresponding applied load. Bath-tub curve shows 3 distinct periods during the lifetime of a single-edge-notch(SEN) specimen. The characterization of AE generated from CFRP during SEN tensile test is becoming an useful tool for the prediction of damage failure or/and failure mode analysis.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Carbon Fiber Reinforced Plastics(탄소섬유강화 플라스틱), Single-Edge-Notch Tensile Specimen(SEN인장시험편), Damage Estimation(손상평가), Bath-Tub Curve(욕조곡선), Failure Mode Analysis (고장모드 분석)

1. 서론

신소재의 하나인 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP) 복합재

는 비강도, 비강성, 중량 감소의 측면에서 우수한 특성을 나타내며, 보강재의 방향을 임의로 조절하여 재료의 이방성을 변화시킬 수 있는 장점과 열팽창계수가 작아 치수

* 인천대학교 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177번지
+ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과
++ 충청대학 항공기계설계학부
+++ 인천대학교 기계공학과

균일성이 높은 등 여러 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 및 수명의 감소를 일으킬 수 있는 불균일성 또는 재료의 제조 과정에서 발생하는 각종 형태의 결함을 내재할 가능성이 크고, 적층각 또는 적층순서에 따라 불규칙한 파괴양상이 일어나는 매우 복잡한 파괴 특성을 갖고 있는 경향이 있다. 그러므로, 복합재료를 구조용 재료로 사용하기 위해서는 재료 내부에 존재하는 각종 손상 및 결함에 대한 강도상의 신뢰성에 대한 요구도 높아지고 있다. 섬유강화 복합재료에 있어서 손상의 전개는 재래식 금속재료와는 달리 근본적인 차이점이 있으며, 모재파괴(균열), 모재와 섬유의 계면분리, 층간분리, 섬유파단 등의 복잡한 형태로 구성되어 있으므로 정확한 파괴기구의 이해가 중요하다^(1~3).

따라서, 본 연구에서는 에폭시 수지(epoxy resin)가 모재(기지재)이고 섬유배향각 θ 가 $[0^\circ]_{10}$ 인 CFRP 복합재 SEN(single-edge-notch) 인장시험편에 대하여, 파괴거동에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나인 크랙의 길이 변화에 따른 AE신호의 해석을 통하여 섬유강화 복합재료에 대한 보편적인 손상평가의 가능성을 제시함으로써 궁극적으로 현장에서의 섬유강화 복합재 손상평가에 적용하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 관련 이론

음향방출(Acoustic Emission, AE)이란 물체가 변형을 일으킬 때, 즉 고체에서 국부적인 내부 구조의 변화에 의한 결과로 발생하는 탄성응력파이다. 따라서 AE는 소성변형, 균열의 발생과 성장, 마찰기구, 개재물의 파괴 및 상변화(상변태) 등에 관한 중요한 정보를 담고 있다⁽⁴⁾.

AE 파라미터에는 정성적인 것과 정량적인 것이 있으며, 다음과 같이 구분할 수 있다^(5~7).

- 정성적인 파라미터
 - 링다운카운트(ringdown count)
 - 실효평균치전압(RMS voltage)
 - 포락선 검파(envelope)
 - 이벤트(event)
 - 최대진폭(peak amplitude)
 - 상승시간(rise time)
 - 지속시간(duration)

-에너지(energy)

- 주파수 분석(FFT, power spectrum)

- 정량적인 파라미터
 - 발생시각(time)
 - 도달시간차, 발생위치표정(location)
 - 원파형(source characterization)

또한, AE는 그 발생원인으로부터 1차 AE와 2차 AE로 구분할 수 있는데, 1차 AE는 재료의 깨짐이나 손상을 동반하는 AE이고, 2차 AE는 마찰 등 기계적인 원인에 의한 AE이다. 다음은 복합재의 AE 발생원인을 나타낸다.

- 1차 AE(primary AE)
 - 수지의 균열발생과 소성변형
 - 수지의 깨짐
 - 수지와 섬유의 계면분리
 - 섬유의 뽑힘
 - 층간분리
 - 섬유파단
- 2차 AE(secondary AE)
 - 수지와 섬유의 마찰
 - 균열의 개폐
 - 섬유의 스킵

특히 AE는 2개의 카테고리로 나뉘어지는데, 첫 번째는 재료 평가시험으로 미소결함 검출과 동시에 파괴기구의 해석에 이용된다. 두 번째는 건전성 평가로 구조물이나 부품의 제조 중(출하검사)이나 공정 중의 비파괴 검사 수단으로 이용된다^(5~7).

- 재료 평가시험
 - 초기결함검출
 - 파괴기구의 해석
 - 최종 파괴응력의 추정
 - 건전성 평가시험의 보조자료 획득용

- 건전성 평가시험
 - 조립공정검사
 - 부품의 단품검사
 - 제품검사(출하검사)
 - 제조 중 검사*(정기검사, 상시검사)
 - 가동 중 검사*(잔여수명평가)
 - 여기서 *는 피로시험으로 함

3. 실험 및 실험방법

3.1 실험재료 및 시험편

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

또한, 섬유배향각은 $\theta=[0^\circ]_{10}$ 가 되도록 적층하여 오토클레이브(autoclave)로 진공백 성형한 후, 인장시험 시 시험편에 균일분포 하중이 걸리도록 ASTM Standard E 647을 참조하여 Fig. 1의 길이 $L=160\text{mm}$, 폭 $W=40\text{mm}$ 로 가공하였으며, 양쪽에 45mm의 탭(tab)을 두었다. 한편 시험편 폭에 대한 크랙의 비($2a/W$)는 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 부여하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 계측시스템은 Physical Acoustics Corporation의 Spartan 2000 AE system으로 그 구성은 Fig. 2에서 보는바와 같고, MS-DOS V6.5 이상에서 작동되며, 계측된 AE신호는 원시 데이터로 실시간에 저장 및

Table 1 Prepreg specifications, USN 200A

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

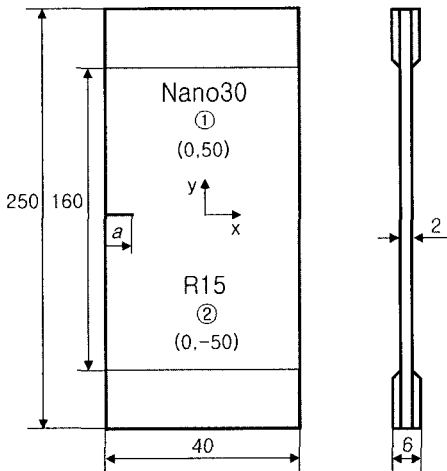


Fig. 1 Geometry of SEN specimen (unit:mm)

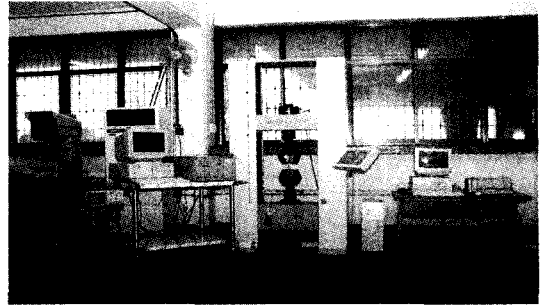


Fig. 2 Photograph of experimental setup

모니터링이 가능하다.

또한 인장시험기(Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하 속도는 모두 2mm/min의 정속신장형 부하이며, 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 5730140 컨넥터⁽⁸⁻¹⁰⁾를 만들어 인장시험기의 아날로그 출력단자에 연결하고, 인장시험기로부터 출력되는 하중값을 각각 인장시험기와 AE 계측시스템에 전송하였다.

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 ① Nano30(공진주파수 300kHz, PAC)와 ② R15(공진주파수 150kHz, PAC) 센서를 시험편의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 Fig. 1에서 보는바와 같이 ±50mm 위치에 고진공 그리스(Dow coming high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고 절연테이프를 고정 후 자동센서테스트(Auto Sensor Test, AST) 옵션을 실행시켜 캘리브레이션(calibration)을 실시하였다^(9,10). 또한, 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain을 60dB로 설정하고 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하였으며, 250nsec 간격의 샘플링 주기로 검출된 아날로그 AE신호를 주증폭기에서 다시20dB 증폭하여 디지털 데이터로 변환·기록시킨 후 PC에 전송하였으며, 이때 threshold는 55dB로 고정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

탄소섬유강화 플라스틱의 섬유배향각 θ 가 $[0^\circ]_{10}$ 인 single edge crack을 갖는 평판에 균일분포 하중이 시험편의 길이 방향으로 작용할 경우, 인장시험으로부터 얻은 AE신호의 결과를 분석하면 다음과 같다.

우선 Fig. 3~Fig. 7에 섬유배향각 θ 가 $[0^\circ]_{10}$ 인 SEN 인장시험편의 중앙좌측에 크랙의 길이 a 를 2, 4, 6, 8, 10mm로 성장시켰을 경우, 즉 $2a/W$ 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로

부여한 경우에 대한 결과를 도시하였다. 또한 Fig. 8은 Fig. 3~Fig. 7의 [2]를 각 조건에 대하여 총합한 그림으로 [1]에 대한 누적AE이벤트수 및 인장시험기로부터 전송된 하중-시간의 관계를 나타낸 것이다. 한편 Fig. 3~Fig. 7 [2]의 굵은 실선(녹색)은 인장시험기의 로드셀 용량을 $20 \times 10^3 \text{kg}$ 풀 스케일(full scale)로 설정했을 경우, AE 측정시스템에 의하여 병합된 5V의 외부입력신호에 의해 도시한 것이며, 이해하기 쉽도록 Fig. 8에 실적으로 다시 도시하였다.

Fig. 3~Fig. 7의 각 그림에서 [1]은 시간에 따른 AE이벤트수(counts)와의 관계를 채널별로 나타낸 것이다. 대체적으로 초기~100sec에서는 많은 양의 AE이벤트가 발생하다가 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 100~300sec에서는 AE이벤트수가 계속 감소하여 거의 일정한 수준을 유지하고 있고, 그 이후부터 AE이벤트수가 다시 급격하게 증가하여 최종파단에 이르는 것을 보여주고 있다.

Fig. 8의 첫 번째 그림은 시간이 경과함에 따라 발생하는 인장시험기의 하중 특성을 나타낸 것으로 통상의 연성재료는 소성변형으로 인해 비선형으로 나타나지만, 모재가 예폭시 수지인 탄소섬유강화 플라스틱 SEN 인장시험편에서는 취성재료의 성질인 선형에 가까운 형태를 보이고 있다. 한편 Fig. 8의 두 번째 그림은 초기~100sec까지는 크랙 선단으로부터 파단이 시작된 지역(Region I)이고, 100~300sec까지는 시험편에 걸리는 하중으로 인하여 변형이 발생한 지역(Region II)이며, 300sec 이후부터는 섬유파단으로 인한 시험편의 크레이징(crazing) 현상으로 기지재에 하중이 걸리는 지역(Region III)이다.

이와 같이 Fig. 3~Fig. 7의 각 그림으로부터 [1]의 일반적인 경향을 분석해 보면, 비록 가속화된 실험(accelerated test)일지라도 Fig. 9와 같은 전형적인 욱조곡선(bath-tub curve)으로의 표현이 가능하다. 어떠한 기계도 그 요소나 재료가 사용 중에 열화하여 최종적으로 초기의 기능을 발휘하지 못하며 사용 환경에 견디지 못하는 때가 있는데, 이것을 미시적으로 보면 구성 재료가 변질하거나 마멸하여 초기의 강도를 상실해 가기 때문이다. 이는 인간에 대한 환경의 노화작용과 아주 흡사하며, 그 열화 프로세스의 설명에 자주 인용되는 것이 바로 욱조곡선이다. 욱조곡선은 Fig. 9에서 같이 (I) 조립·제조상의 문제, 재료의 결함 등에 의한 제품의 본질적 약점이 사용 시의 외부 스트레스에 견디지 못하고 고장을 일으키는 초기의 고장률 감소형(decreasing failure rate, DFR), (II) 사용 중에 부재에 걸리는 외부 스트레스(열, 응력, 진동 등)가 우발적으로 커지고, 부재의 강도를 초과함으로써 고장을 일으키는 고장률 일정형(constant

failure rate, CFR), (III) 베어링의 마멸손상과 같이 시간의 경과와 함께 고유한 강도가 열화하기 때문에 고장을 일으키는 고장률 증가형(increasing failure rate, IFR)의 3구간으로 구분된다.

따라서 내재되어 있는 초기 크랙(노치 선단)의 미소변형에 의한 손상으로 인하여 AE이벤트가 발생하기 시작하고, 하중 증가에 따른 모재의 누적손상으로 인하여 이벤트 발생량이 점차 증가하여 피크를 나타내는 것은 모재와 섬유사이의 계면분리가 시작됨을 의미한다. 이후 시험편의 거시적인 누적손상으로 인하여 이벤트 발생량은 비교적 낮은 범위에서 일정하게 유지되고 있다. 또한 모재파괴, 섬유파단, 층간 분리 및 모재와 섬유의 계면분리로 인하여 다시 이벤트 발생량이 증가하고, 시간이 경과하여 크랙의 길이가 길어짐에 따라 AE이벤트수가 급격하게 상승하는데, 이는 크랙 선단에서 소성변형이 일어날 때 재료에 잠재되어 있는 에너지가 방출됨을 의미한다.

한편, [4]는 시간과 에너지와의 관계를 채널별로 나타낸 것으로 [1]의 경우와 동일한 경향을 보이고 있다. 따라서 에너지 역시 누적AE이벤트수가 급변하기 시작하는 지점 근방에서 방출되기 시작하며, 이는 크랙 선단에서 소성변형이 일어날 때 재료에 잠재되어 있던 에너지가 방출되기 때문이다. 그러므로 AE이벤트의 발생량이 많은 부분에서 AE진폭, 에너지 등의 인자들도 유사한 거동을 보이는 것으로 생각할 수 있다. 특히 크랙이 진전될수록($2a/W$ 가 클수록) 시간에 따른 에너지의 크기가 작아짐을 예측할 수 있는데, 이는 크랙이 진전됨에 따라 재료가 갖는 잠재적인 에너지가 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

[3]과 [6]은 각각 AE이벤트수, 에너지 및 AE진폭과의 관계이며, [5]의 경우를 보다 명확히 하기 위해 시간대 별로 구분하여 나타낸 그림이다. 마찬가지로 Fig. 10과 Fig. 11 역시 [5]의 경우를 보다 명확히 하기 위한 그림으로 그 내부에 굵은 점선에 의해 3개의 영역을 구분하였다. [5]는 시간에 대한 AE진폭과의 관계로 내재되어 있는 초기의 인공 결함(노치)에 의하여 초기~100sec(Region I)까지는 85~100dB 범위의 신호가 주로 발생하고, 100~300sec(Region II)까지는 비교적 낮은 에너지 레벨로 모재의 미소 균열 발생 및 성장에 의하여 55~75dB 범위의 신호가 주로 발생하며, 300sec~파단 직전(Region III)까지는 탄소섬유강화 플라스틱의 섬유파단 등에 의하여 75~85dB의 신호가 주로 발생하는 것으로 나타났다. 또한 각 그림으로부터 threshold 값을 55dB로 고정하였음을 알 수 있다.

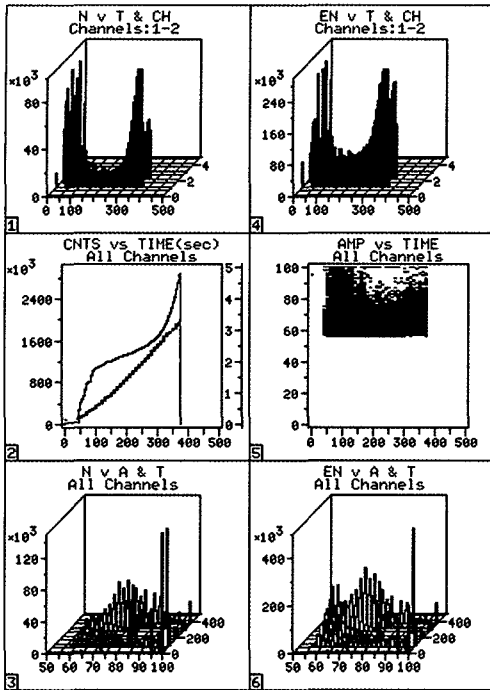


Fig. 3 Results of detected AE signals, $2a/W=0.1$

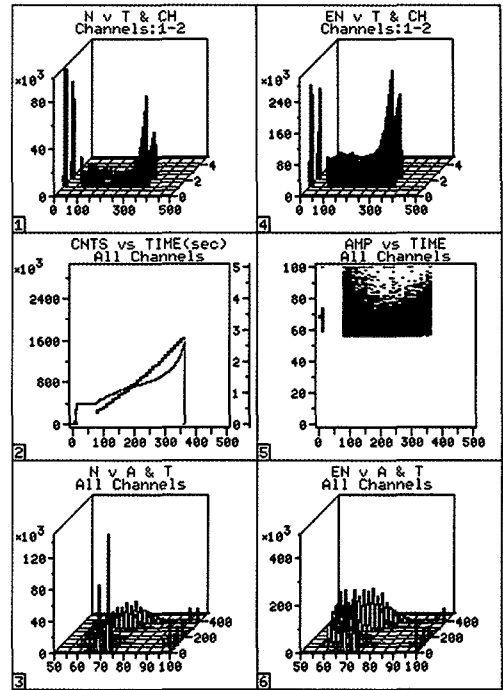


Fig. 5 Results of detected AE signals, $2a/W=0.3$

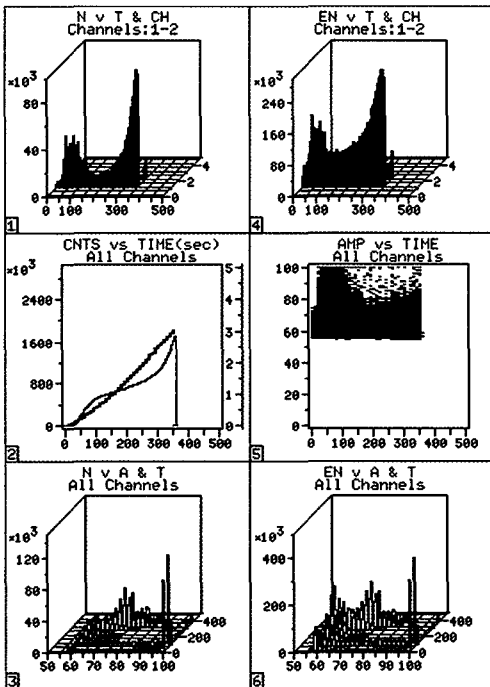


Fig. 4 Results of detected AE signals, $2a/W=0.2$

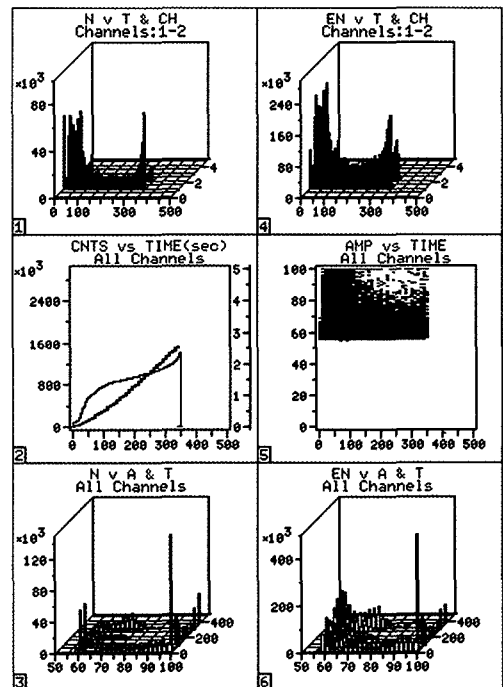


Fig. 6 Results of detected AE signals, $2a/W=0.4$

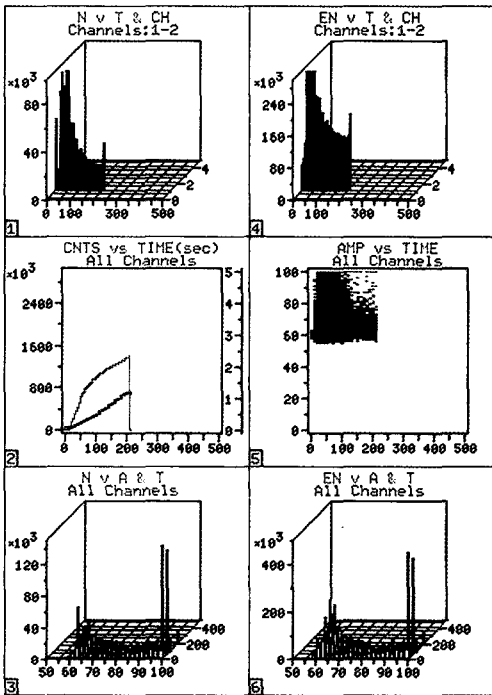


Fig. 7 Results of detected AE signals, $2a/W=0.5$

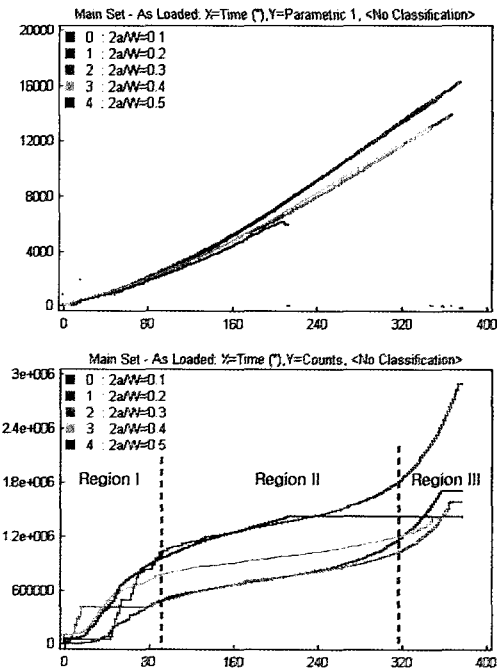


Fig. 8 Plots of load(parametric 1) and cumulative AE counts as a function of time

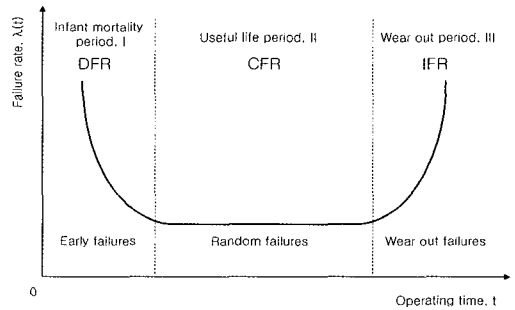


Fig. 9 Typical failure rate curve known as the bath-tub curve

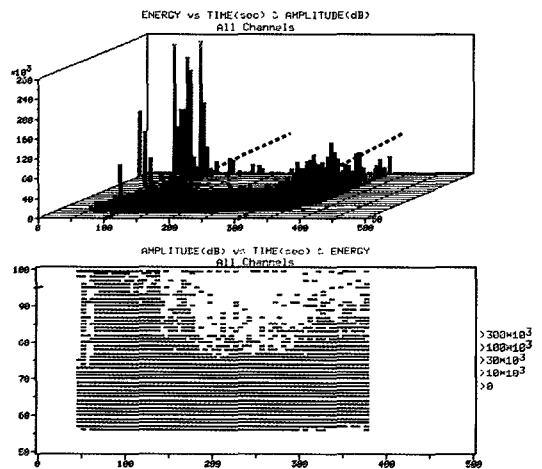


Fig. 10 Relationship between AE energy and amplitude as a function of time

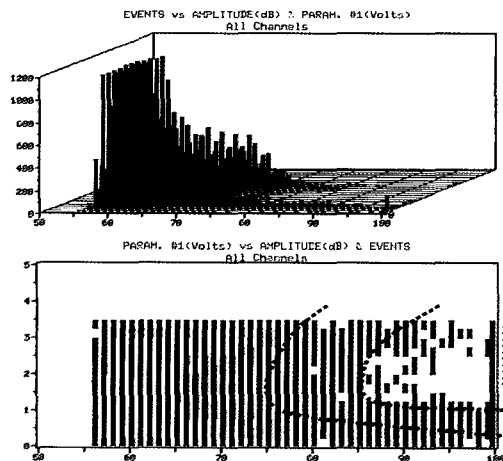


Fig. 11 Relationship between AE events and load as a function of amplitude

5. 결론

에폭시 수지가 모재이고 섬유배향각 θ 가 $[0^\circ]_{10}$ 인 CFRP 복합재 SEN 인장시험편에 대하여, 파괴거동에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나인 크랙의 길이 변화에 따른 AE신호의 해석결과로부터 손상평가를 3개의 영역으로 구분하였다. 또한 전형적인 고장률 곡선으로부터 AE에 의한 탄소섬유강화 플라스틱 부품소재 신뢰성 평가의 가능성도 함께 제시하였다. Region I의 초기~100sec까지는 크랙 선단으로부터 파단이 시작된 지역으로 85~100dB 정도의 높은 진폭 범위를 갖고, Region II의 100~300sec까지는 시험편에 걸리는 하중으로 인하여 변형이 발생한 지역으로 55~75dB 정도의 낮은 진폭 범위를 갖으며, Region III의 300sec 이후부터는 섬유파단 등에 의하여 시험편의 하중이 걸리는 지역으로 75~85dB의 중간 정도의 진폭 범위를 갖는다.

참고 문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Komai, K., Minoshima, K., and Shibutani, T., 1990, "Investigation of the Fracture Mechanism of Carbon/poxy Composites by AE Signal Analyses," *Transactions of the JSME Series A*, Vol. 56, No. 528, pp. 1792~1799.
- (4) Liptai, R. G., 1972, *Acoustic Emission, ASTM STP 505*, American Society for Testing and Materials, Bal Harbour, Florida.
- (5) Nakasa, H., 1994, *Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission*, Chijin Shokan Co., Ltd.
- (6) Miller, R. K., and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT.
- (7) Leaird, J. D., 1997, *Acoustic Emission Training Guide: How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission*, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.
- (8) 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.
- (9) Rhee, Z. K., 2001, "Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of Incheon, Incheon, Korea.
- (10) Yoon, J. H., 2004, "A Study on Fracture Mechanisms of Carbon Fiber Reinforced Plastics by Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of Incheon, Incheon, Korea.
- (11) Yoon, K. J., Hwang, I. H., Kim, T. W., and Jun, E. J., 1994, "State-of-the-Art of Technologies Related to Composite Material Structures of Aerospace Vehicles," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 22, No. 4, pp. 130~149.