

음향방출법에 의한 탄소섬유강화 플라스틱의 파괴 특성에 관한 연구 (1)

윤종희*, 박성완+, 이장규**, 우창기**

A Study on the Fracture Characteristics of CFRP by Acoustic Emission (1)

Joung-Hwi Yoon*, Sung-Oan Park+, Zhang-Kyu Rhee**, Chang-Ki Woo**

Abstract

The object of this study is to investigate a fracture characteristics of static tensile test as a function of acoustic emission according to the fiber orientation $\theta=0^\circ$ in carbon/epoxy composites, CFRP. On tensile loading, it was recognized that the fracture characteristics of CFRP in a unidirectional composites. Using the results of the AE analysis($a=2mm$), it was found that the amplitude distributions of AE signals corresponding the matrix cracking, fiber debonding or delamination, and fiber breaking are 55~70dB(<200sec), 100dB(200~600sec), and 80dB(>600sec).

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP, 탄소섬유강화 플라스틱), Unidirectional Composites(일방향 복합재), Fracture Characteristics(파괴 특성)

1. 서론

신소재의 하나로써 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP) 복합재는 비강도, 비강성, 중량 감소의 측면에서 우수한 특성을 나타내며, 보강재의 방향을 임의로 조절하여 재료의 이방성을 변화시킬 수 있는 장점과 열팽창 계수가 작아 치수균일성이 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 적층 순서에 따라 불규칙한 파괴 양상이 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, 모재 파괴(균열), 모재와 섬유의 분리, 층간 분리, 섬유 파단 등의 복잡한 형태로 구성되어 있으므로 정확한 파괴기구의 이해가 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 탄소섬유강화 플라스틱의

* 주저자, 인천대학교 대학원 기계공학과 (yjhcall@hanmail.net)
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177
+ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과
++ 인천대학교 기계공학과

파괴거동에 영향을 미치는 중요 인자인 적층 방법과 crack의 길이 변화에 따른 파괴 거동을 AE에 의해 정성적 및 정량적으로 해석하여, 섬유강화 복합재료의 새로운 파괴 특성 평가법을 개발함에 그 목적이 있다.

2. AE란

음향 방출(Acoustic Emission, AE)이란 물체가 변형을 일으킬 때, 즉 고체에서 국부적인 내부 구조의 변화에 의한 결과로 발생하는 탄성응력파이다. 따라서 AE는 소성 변형, 균열의 발생과 성장, 마찰 기구, 개재물의 파괴 및 상변화(상변태) 등에 관한 중요한 정보를 담고 있다.

AE는 초창기에 항공기의 금속 용접에 있어서 구조 결함을 찾아내는데 주로 이용되었고, 1970년대부터는 핵발전소 구조물의 안전 진단에 이용되기 시작하였으며, 근래에는 신뢰성 평가 등에 이용되고 있다. 특히 AE는 2개의 카테고리로 나뉘어지는데 첫 번째는 재료 평가시험으로 미소결합 검출과 동시에 파괴기구의 해석에 이용된다. 두 번째는 건전성 평가로 구조물이나 부품의 제조 중(출하 검사)이나 공정 중의 비파괴 검사 수단으로써 이용된다.

- 1) 재료 평가시험
 - 1-1) 초기 결함검출
 - 1-2) 파괴기구의 해석
 - 1-3) 최종 파괴응력의 추정
 - 1-4) 건전성 평가시험의 back data의 획득용
- 2) 건전성 평가시험
 - 2-1) 조립 공정검사
 - 2-2) 부품 단품의 검사
 - 2-3) 제품 검사(출하 검사)
 - 2-4) 제조 중 검사(정기 검사, 상시 검사)
 - 2-5) 가동 중 검사: 잔여 수명평가

* 2-4)와 2-5)은 피로 시험으로 함

또한, AE는 그 발생원인으로부터 1차 AE와 2차 AE로 나뉘어지는데 1차 AE는 재료의 깨짐이나 손상을 동반하는 AE 이고, 2차 AE는 마찰 등 기계적인 원인에 의한 AE이다. 다음은 복합재의 AE 발생원인을 나타

낸다.

1차 AE(primary AE)

- 수지의 소성변형
- 수지의 깨짐
- 수지와 섬유의 분리
- 섬유의 뽑힘
- 층간 분리
- 섬유 파단

2차 AE(secondary AE)

- 마찰
- 균열의 개폐
- 섬유의 스침

3. AE 파라미터의 종류

AE 파라미터에는 정성적인 것과 정량적인 것이 있으며, 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) 정성적인 파라미터
 - 1-1) 사상수(count): 계수(ringdown count)
 - 1-2) 실효치(RMS): RMS 전압(RMS voltage)
 - 1-3) 포락선 검파(envelope)
 - 사상(event)
 - 최대 진폭(peak amplitude)
 - 지속시간(duration)
 - 상승 시간(rise time)
 - 에너지(energy)
 - 1-4) 주파수 분석(FFT): power spectrum
- 2) 정량적인 파라미터
 - 2-1) 발생 시각(time)
 - 2-2) 도달 시간차: 발생 위치 표정(location)
 - 2-3) 원파형: source characterization

4. 실험 및 실험방법

4.1 실험재료 및 시험편

4.1.1 시험편 재료

본 연구에서 사용된 Carbon/Epoxy 복합재 시험편의 재료는 (주)SK에서 제작된 USN2000의 프리프레그

(prepreg)로 그 기계적인 물성은 Table 1과 같다.

또한 프리프레그는 탄소섬유를 0°로 하여 각각 10플라이(ply)씩 적층하여 오토클레이브(autoclave)로 제작하였으며, 시험편의 형상은 Fig.1과 같은 크기로 가공하였고, 양쪽에 45mm의 탭(tab)을 두었다. 시험편 폭에 대한 crack의 비(2a/W)는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 (a=2, 4, 6, 8, 10mm, W=40mm)로 하였다.

Table1 Properties of prepreg, USN2000

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

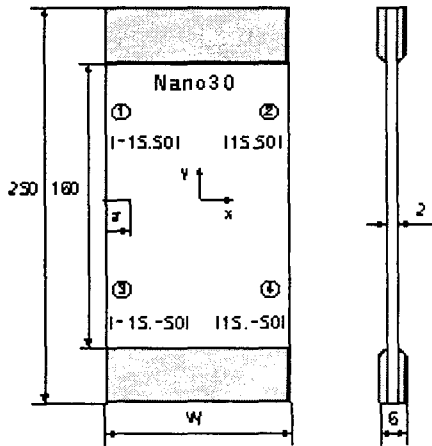


Fig.1 Geometry of specimen (unit:mm)

4.1.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 측정시스템은 Physical Acoustics Corporation의 Spartan 2000 system으로 그 구성은 Fig.2에서 보는바와 같고, MS-DOS V6.2 이상의 환경에서 작동되며, 측정된 AE신호는 원시 데이터로 실시간에 저장 및 모니터링이 가능하다.

또한 인장시험기(Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 공히 0.5mm/min의 정속신장형 부하이며, 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 컨넥터를 만들어 인장

시험기의 아날로그 출력단자에 연결하여 인장시험기로부터 출력되는 하중값을 디지털 신호로 변환시킨 후, 그 값을 각각 인장시험기와 AE 측정시스템에 전송하였다.

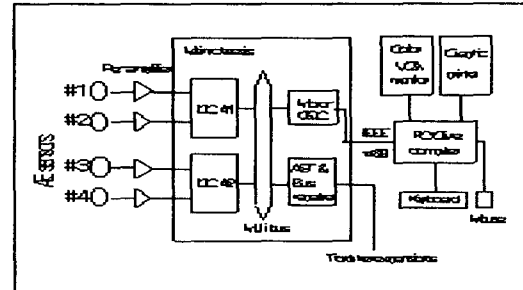


Fig.2 Schematic block diagram of Spartan 2000 system

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 Nano30(resonant frequency 300kHz, PAC) 센서를 시험편의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 Fig.1에서 보는바와 같은 위치에 고진공 그리스(Dow corning high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고 절연테이프로 고정한 후 캘리브레이션(calibration)을 실시하였다. 또한, 전치 증폭기(1220A, PAC)의 gain을 60dB로 설정하여 대역 필터(bandpass filter) 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, sampling rate 250ns 간격으로 검출된 아날로그 AE신호를 주증폭기에서 20dB로 증폭하여 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, A/D converter로 PC에 전송하였으며, 이때 threshold는 55dB로 고정하였다.

5. 실험결과 및 고찰

섬유강화 복합재료의 섬유 배향각 θ 를 0°로 적층한 single edge crack을 갖는 평판에 등분포 하중이 시험편의 길이 방향으로 작용할 경우, AE 실험을 이용해 얻은 결과를 분석하면 다음과 같다.

Fig.3은 섬유 배향각 $\theta = 0^\circ$ 로 시험편 폭과 길이를 고정하고, 시험편의 중앙좌측에 crack 길이 a를 2, 4, 6, 8, 10mm로 성장시켰을 경우에 대한 결과의 대표적인 예이다.

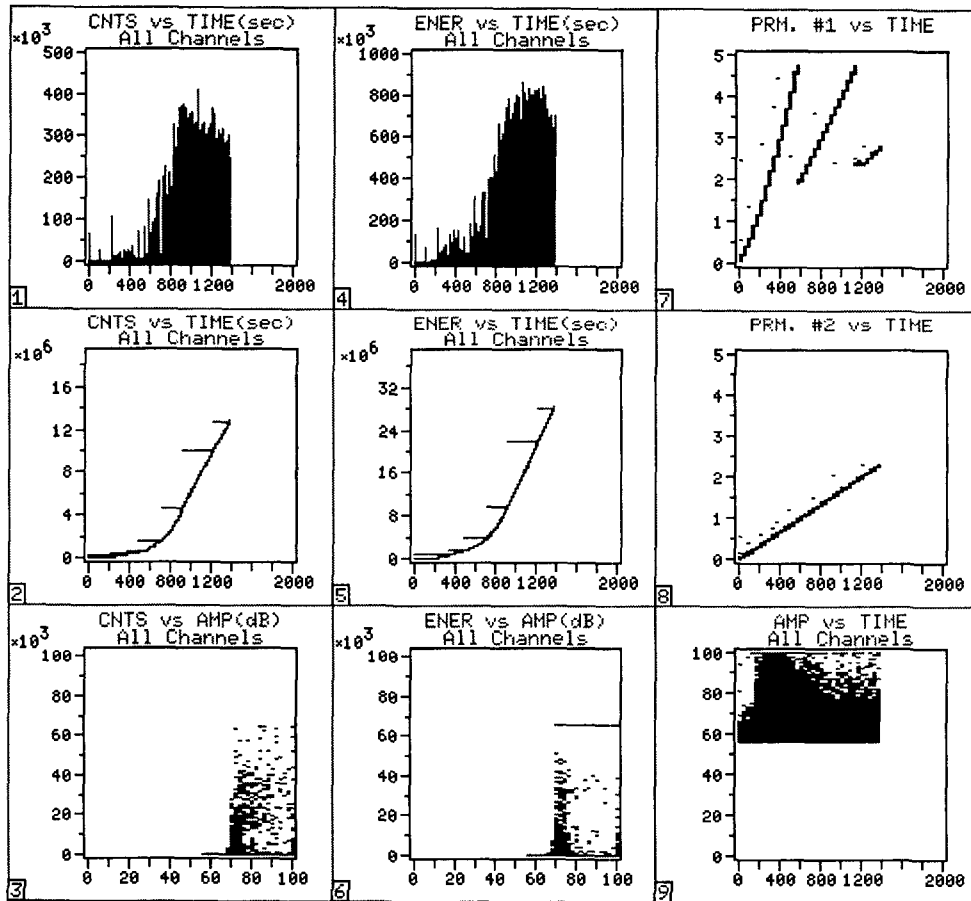
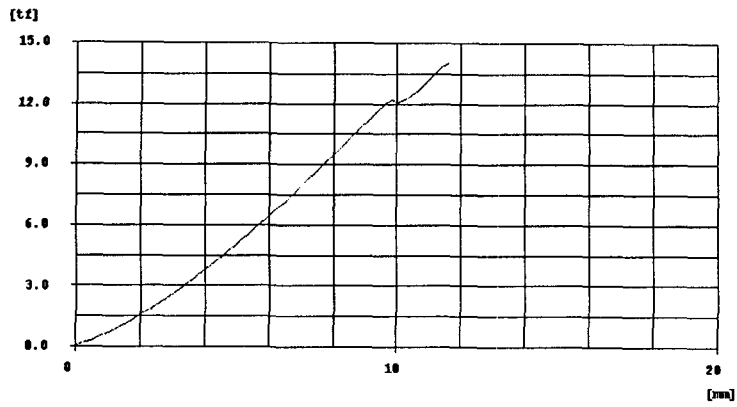


Fig.3 Results of tensile test and detected AE signals (crack length a=2mm)

①은 시간에 따른 count간의 관계를 나타낸 것이다. 초기에는 crack이 진전되면서 소성 변형으로 인해 가지고 있던 에너지를 방출하므로, 에너지 방출의 영향으로 count가 커짐을 알 수 있다. 초기에서 200초까지는 점차적으로 count가 커지다가, 200초에서 600초 사이에서는 count가 급격하게 커짐을 알 수 있고, 그 이후부터 count 값이 800×10^3 됨을 알 수 있다. 모재 파단, 섬유 파단, 층간 분리, 섬유와 모재의 파단의 순으로 점차적으로 에너지가 커짐을 알 수 있다.

②는 시간대별 cumulative count 수와의 관계이다. 그림에서 보는바와 같이 400초 근방에서부터 crack 선단으로부터 파단이 시작되고, 600초까지는 시험편의 하중에 대한 변형이고, 600초 이후에서는 섬유 파단으로 인한 시험편의 크레이징(crazing) 현상으로 기지재에 하중이 걸리고 있음을 알 수 있다. 시간에 대한 누적 count 수에서 crack이 진전할수록 급격하게 상승한다. 이는 crack 선단에서 소성변형이 될 때 재료에 잠재되어 있는 에너지가 방출되었음을 알 수 있다.

AE 실험 결과로 볼 때 crack 길이가 길어질수록 파단 시점이 빨라짐을 알 수 있는데, crack이 2mm일 때 1,400초, 4mm일 때 1,200초, 6mm일 때 1,100초, 8mm일 때 900초, 10mm일 때는 700초에 시험편이 파단 됨을 알 수 있다. 이는 crack이 커지면 crack 선단에서 시험편이 갖고 있는 섬유 기지재가 작아지게 되기 때문에 빨리 파단되고, count 수도 증가함을 알 수 있다. 에너지도 마찬가지로 cumulative count가 급변하기 시작하는 지점 근방에서 방출되기 시작함을 알 수 있다.

④는 시간과 에너지와의 그래프로 초기 영역(초기 ~200초)에서의 낮은 에너지 레벨은 모재(epoxy)의 미소 균열 발생 및 성장에 의한 신호로 생각되어 진다.

⑤는 시간과 누적 에너지와의 관계를 나타낸 것으로 ②와 같은 현상을 보인다. AE energy 방출이 많은 부분에서 amplitude, count 등의 인자들도 같은 거동을 나타내고 있다. 특히 crack이 증가할수록(진전될수록) 시간에 따라 에너지의 크기가 작아짐을 알 수 있는데, 이는 crack이 진전됨에 따라 재료에 잠재되어 있는 에너지가 작아지기 때문인 것으로 생각된다.

⑥은 진폭에 대한 에너지와의 관계인데 crack이 커질수록 70~80dB에서 많은 에너지가 방출됨을 알 수 있다.

⑦은 시간이 증가함에 따라 발생하는 하중의 특성을 나타낸 것으로 연성재료는 소성변형으로 인해 비선형으로 나타나지만, 모재가 epoxy 수지로 취성 재료인 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP) 시험편에서는 선형에 가까운 형태를 보이고 있다.

⑧은 인장시험기의 스트로크(stroke)와 시간과의 관계를 나타낸 것으로 파단 시점까지 스트로크가 일정한 비율로 비례하는 것으로 보아 시험편에 정적 하중과 파단 시점을 정확히 알 수 있다.

⑨는 시간과 진폭에 대한 관계이다. 주위의 잡음으로 인하여 발생하는 신호를 제거하기 위해 설정한 threshold는 55dB로 이 보다 큰 진폭을 나타내고 있으며, 그림에서와 같이 초기에서부터 200초까지는 70dB, 200초부터 600초까지는 100dB, 그 이후 파단 시까지는 80dB로 나타나고 있다. 따라서, 초기 영역(초기~200초)에서는 모재(epoxy)의 영향으로 생각되고, 400초에서 600초 사이의 영역에서는 섬유의 파단으로 볼 수 있으며, 그 이후부터 파단 시까지는 모재와 기지재의 층간 분리로 진폭값이 모재보다는 커지만, 섬유의 파단 보다는 진폭이 작아지는 것으로 생각된다. 또한, crack이 점차 증가할수록 짧은 시간에 파단 됨을 알 수 있다.

6. 결 론

탄소섬유 복합재료의 파괴거동에 영향을 주는 주요 인자 중 섬유 배향각 $\theta = 0^\circ$ 인 경우 crack의 변화에 따른 파괴거동 특성을 AE에 의하여 정성적, 정량적으로 연구하였으며, 초기부터 200초까지는 70dB, 200초부터 600초까지는 100dB, 그 이후 파단 시까지는 80dB로 나타나고 있다.

따라서, 초기영역(초기~200초)에서는 모재(epoxy)의 영향으로 생각되고, 200초에서 600초 사이의 영역에서는 섬유의 파단으로 볼 수 있으며, 그 이후부터 파단 시까지는 모재와 기지재의 층간 분리로 진폭값이 모재보다는 커지만, 섬유의 파단 보다는 진폭이 작아지는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) Ronnie K. Miller and Paul McIntire, 1987, Non-destructive Testing Handbook (2nd ed.), Vol.5, Acoustic Emission Testing, ASNT.
- (2) Hiroyasu Nakasa, 1994, Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission, Chijin Shokan Co., Ltd.
- (3) Spartan 2000 User's manual & Technical manual, 1995, Physical Acoustics Corporation.
- (4) Zhang-Kyu Rhee, 2001, "Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission", Ph.D. thesis, Incheon, Korea.
- (5) James D. Leaird, 1997, Acoustic Emission Training Guide - How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.
- (6) Feng Sun, Megumu Suzuki, Hiroshi Nakanishi, Masaharu Iwamoto and Eiichi Jinen, 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.
- (7) Megumu Suzuki, Hiroshi Nakanishi, Masaharu Iwamoto, Eiichi Jinen, Zenichiro Maekawa, Akira Mori and Feng Sun, 1987, "Studies on Fracture Mechanism of CFRP by Acoustic Emission Method", JSME A, Vol.53, No.492, pp.1459-1466.
- (8) Kenjiro Komai, Kohji Minoshima and Toyoshige Shibutani, 1990, "Investigation of the Fracture Mechanism of Carbon/Epoxy Composites by AE Signal Analyses", JSME A, Vol.56, No.528, pp.1792-1799.