

# 음향방출을 이용한 탄소섬유강화 플라스틱의 손상 평가에 관한 연구

이장규\*, 박성환\*, 김봉각\*\*

## A Study on the Damage Estimation of CFRP using Acoustic Emission

Zhang-Kyu Rhee\*, Sung-Oan Park\*, Bong-Gag Kim\*\*

### Abstract

The object of this study is to investigate a damage estimation of single edge cracked tensile specimens (2a/W) as a function of acoustic emission (AE) according to the unidirectionally oriented carbon/epoxy composites, CFRP. AE signals were analyzed and classified 3 regions by event counts, energy and amplitude for corresponding applied load. On tensile loading and using the results of the AE analysis, it was found that the event counts, cumulative counts or energy, and amplitude distributions useful for the prediction of damage failure.

**Key Words** : Acoustic Emission(음향방출), Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP, 탄소섬유강화 플라스틱), Fiber Orientation(섬유 배향각), Damage Estimation(손상 평가)

### 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 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)

주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177

+ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과

++ 충청대학 컴퓨터응용기계설계과

파괴 거동에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나인 crack의 길이 변화에 따른 파괴 거동을 AE에 의해 해석하고, 이를 통하여 섬유강화 복합재료의 보편적인 손상 평가의 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 관련 이론

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.

특히 AE는 2개의 카테고리로 나뉘어지는데 첫 번째는 재료 평가시험으로 미소결함 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 나타낸다.

### 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 스킴

## 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  $\theta=0^\circ$  로 하여 각각 일방향이 되도록 10플라이씩 적층하고 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 ( $a=2, 4, 6, 8, 10\text{mm}$ ,  $W=40\text{mm}$ )로 하였다.

Table1 Properties of prepreg, USN2000

Tensile strength	Tensile modulus	Resin content
450 kgf/mm <sup>2</sup>	$24 \times 10^3$ kgf/mm <sup>2</sup>	36 %
Fiber density	Resin density	Thickness
1.77 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>	0.207 mm

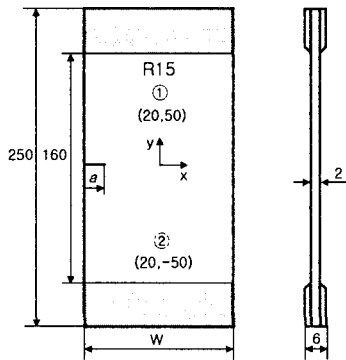


Fig.1 Geometry of specimen (unit:mm)

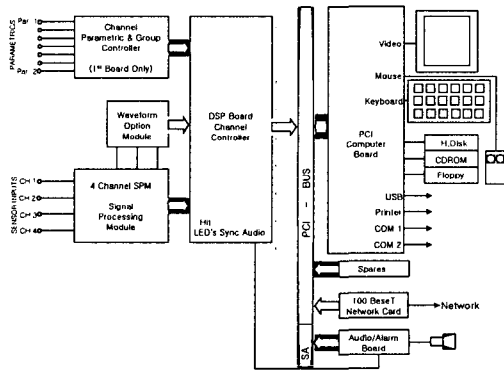


Fig.2 Schematic block diagram of single PCI4-Disp AE system

#### 4.1.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 계측시스템은 Physical

Acoustics Corporation의 PCI4-Disp AE system으로 그 구성은 Fig.2에서 보는바와 같고, MS-DOS V7.0 이상 또는 Windows 환경하에서 작동되며, 계측된 AE신호는 원시 데이터(raw signal)로 실시간에 저장 및 모니터링이 가능하다.

또한 인장시험기(Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 공히 2mm/min의 정속신장형 부하이며, 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 커넥터를 만들어 인장시험기의 아날로그 출력단자에 연결하여 인장시험기로부터 출력되는 하중값을 디지털 신호로 변환시킨 후, 그 값을 각각 인장시험기와 AE 계측시스템에 전송하였다.

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 R15(resonant frequency 150kHz, PAC) 센서를 시험편의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 Fig.1에서 보는바와 같이  $\pm 50\text{mm}$  위치에 고진공 그리스(Dow corning high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고 절연테이프를 고정 한 후 캘리브레이션(calibration)을 실시하였다. 또한, 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain을 60dB로 설정하여 대역필터(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  $\theta$ 를  $0^\circ$ 로 적층한 single edge crack을 갖는 평판에 등분포 하중이 시험편의 길이 방향으로 작용할 경우, AE 실험을 이용해 얻은 결과를 분석하면 다음과 같다.

Fig.3~Fig.7에 섬유 배향각  $\theta = 0^\circ$ 로 시험편 폭  $W$ 를 40mm와 길이를 고정하고, 시험편의 중앙좌측에 crack 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 도시하였으며, Fig.8은 Fig.3~Fig.7의 [2]를 각 조건에 대하여 총합한 그림이다.

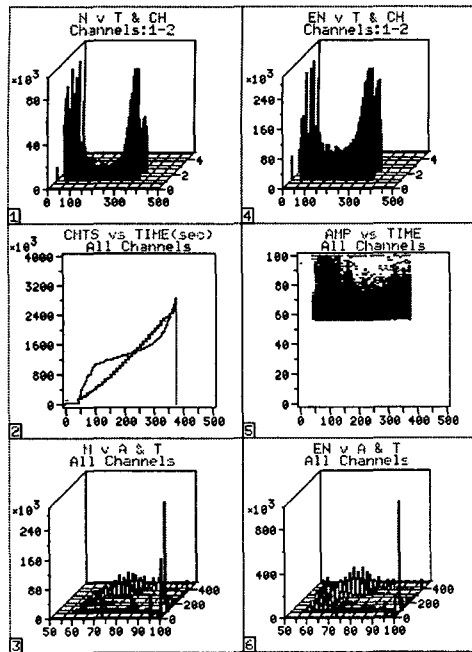


Fig.3 Results of detected AE signals ( $2a/W=0.1$ )

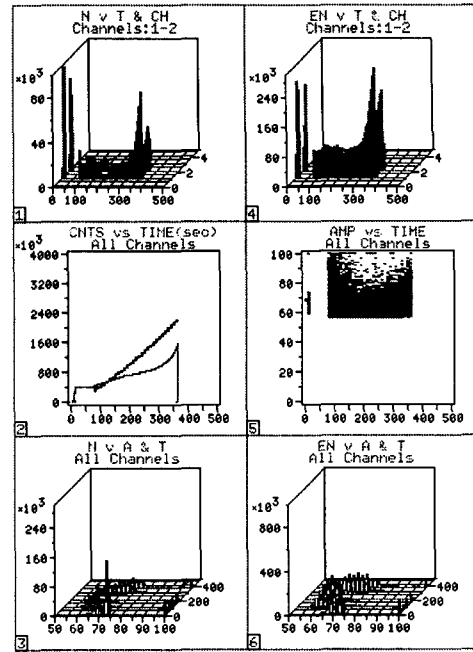


Fig.5 Results of detected AE signals ( $2a/W=0.3$ )

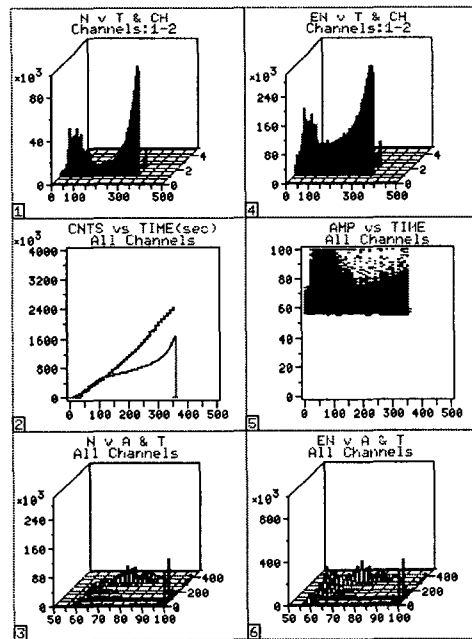


Fig.4 Results of detected AE signals ( $2a/W=0.2$ )

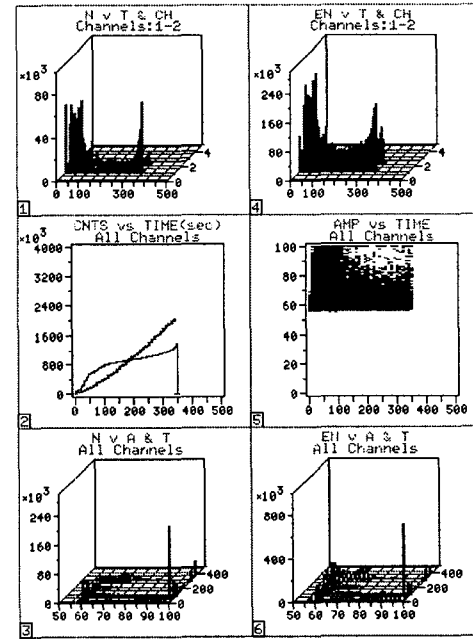


Fig.6 Results of detected AE signals ( $2a/W=0.4$ )

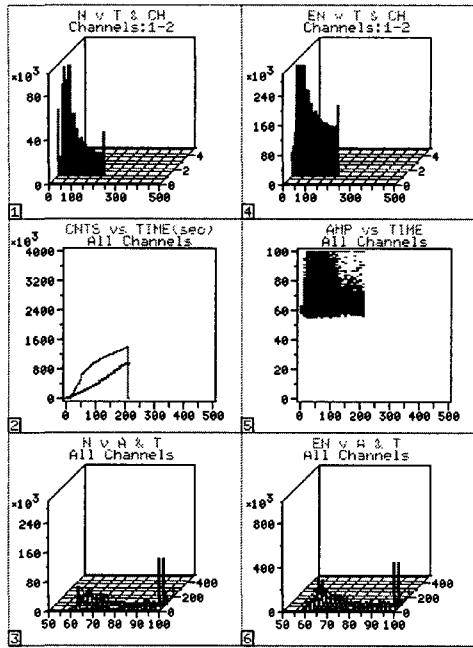


Fig.7 Results of detected AE signals ( $2a/W=0.5$ )

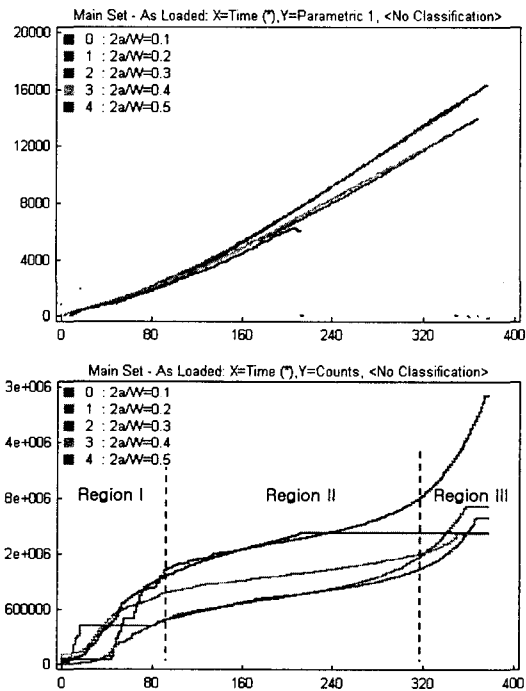


Fig.8 Plots of load and AE counts as a function of time

①은 시간에 따른 count 수와의 관계를 채널별로 나타낸 것이다. 전반적으로 초기~100초까지는 점차적으로 count 수가 증가하다가, 100~300초 사이에서는 count 수가 급격하게 감소하며, 그 이후부터 count 수가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 초기에 crack이 진전되면서 소성 변형으로 인해 잠재되어 있던 에너지의 방출에 의한 영향으로 count가 증가한다.

Fig.8(②)은 시간대별 cumulative count 수 및 하중과의 관계를 나타낸 것이다. 두 가지 그림에서 보는 바와 같이 초기~100초 근방까지는 crack 선단으로부터 파단이 시작된 지역(Region I)이고, 100~300초까지는 시험편에 걸리는 하중으로 인하여 변형이 발생한 지역(Region II)이며, 300초 이후부터는 섬유 파단으로 인한 시험편의 크레이징(crazing) 현상으로 기지재에 하중이 걸리는 지역(Region III)임을 알 수 있다. 따라서, 시간에 대한 cumulative count 수는 crack이 진전할수록 급격하게 상승한다. 이는 crack 선단에서 소성변형이 될 때 재료에 잠재되어 있던 에너지가 방출됨을 의미한다.

Fig.8의 총합적인 두 개의 그림에서  $2a/W$ 의 값이 증가할수록 파단 시점이 빨라지는 경향을 보이는데, 이는 crack이 커지면 crack 선단에서 시험편이 갖고 있는 섬유 기지재가 작아지기 때문에 빨리 파단되며, count 수도 증가함을 알 수 있다. 에너지도 마찬가지로 cumulative count가 급변하기 시작하는 지점 근방에서 방출되기 시작함을 예측할 수 있다. 따라서 AE count 발생이 많은 부분에서 amplitude, energy 등의 인자들도 같은 거동을 보인다. 특히 crack이 증가할수록 (진전될수록) 시간에 따라 에너지의 크기가 작아짐을 예측할 수 있는데, 이는 crack이 진전됨에 따라 재료에 잠재되어 있는 에너지가 작아지기 때문인 것으로 생각된다.

또한, Fig.8은 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.

④는 시간과 energy와의 관계를 채널별로 나타낸 것으로 ①과 동일한 경향을 보이고 있다.

⑤는 시간에 대한 amplitude의 관계로 초기~100초(Region I)까지는 85~100dB, 100~300초(Region II)

까지는 55~75dB, 그 이후 파단 시(**Region III**)까지는 75~85dB의 진폭 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 이때 threshold 값을 55dB로 고정하였음을 알 수 있다. 또한, [3]과 [6]은 각각 count, energy 및 amplitude와의 관계로 [5]의 경우를 보다 명확히 하기 위하여 시간대 별로 구분하여 나타낸 그림이다.

## 6. 결 론

탄소섬유 복합재료의 파괴 거동에 영향을 미치는 중요한 인자 중에서 섬유 배향각  $\theta=0^\circ$  일 때, single edge crack을 갖는 평판에 등분포 하중이 시험편의 길이 방향으로 작용할 경우,  $2a/W$ 의 변화에 따른 파괴 거동을 AE에 의해 해석한 결과로부터 손상 평가를 세 부분의 영역으로 구분하였다. **Region I**의 초기~100초 근방까지는 crack 선단으로부터 파단이 시작된 지역으로 85~100dB 정도의 높은 진폭 범위를 갖으며, **Region II**의 100~300초까지는 시험편에 걸리는 하중으로 인하여 변형이 발생한 지역으로 55~75dB 정도의 낮은 진폭 범위를 갖으며, **Region III**의 300초 이후부터는 섬유 파단으로 인해 시험편의 하중이 걸리는 지역으로 75~85dB의 중간 정도의 진폭 범위를 갖는다.

## 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) James D. Leaird, 1997, Acoustic Emission Training Guide - How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.
- (4) R.G. Liptai, 1972, Acoustic Emission, ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, Bal Harbour, Florida.
- (5) Zhang-Kyu Rhee, 2001, "Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission", Ph.D. thesis, Incheon, Korea.
- (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.