

음향방출법에 의한 탄소섬유강화 플라스틱의 파괴특성에 관한 연구 (2)

윤중희*, 이장규+, 박성완**, 우창기+, 김봉각***, 조진호****

A Study on the Fracture Characteristics of CFRP by Acoustic Emission (2)

Joung-Hwi Yoon*, Zhang-Kyu Rhee+, Sung-Oan Park**
Chang-Ki Woo+, Bong-Gag Kim***, Jin-Ho Cho****

Abstract

This study is to investigate a fracture characteristics of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) under the tensile loading as a function of acoustic emission (AE) according to the frequency analysis (transient mode) and AE source location (location mode). It was found that the fracture mechanism of AE frequency analysis was a useful tool for the estimation of different type of fracture in CFRP, i.e., matrix(epoxy resin) cracking, delamination and fiber breakage same as AE amplitude distribution.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Carbon/Epoxy Composite(CFRP, 탄소섬유강화 복합재), Fiber Orientation (섬유배향각), Frequency Analysis(주파수분석), AE Source Location(AE 위치표정)

1. 서 론

최근 신소재로 각광 받고 있는 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP) 복합재는 금속 재료에 비해 비강성(specific stiffness)과 비강도(specific strength)가 우수하여 구조물의 경량화에 아주 효과적인 재료이다. 이 때문에 예로부터 경량화가 엄격히 요구되는 항공기 구조(물)나 우주 구조물에 사용되어졌고, 최근에는 선박, 차량, 스포츠 용품 등의 부재로서 기존의 재료를 대체하여 많이 쓰여지고 있는 경향이 있다.

특히, 금속제의 구조는 미리 제조, 시판되는 봉재, 판재 등의 1차 제품을 절삭 가공이나 소성가공하고, 용접, 볼트 등 체결기구에 의해 필요한 구조로 조립하는 반면에, 복합재 구조물은 최종 형상의 것을 강화재와 수지의 소재를 이용해 직접 성형해서 만들므로, 성형과정에서 재료(재질)와 구조 형태를 동시에 만드는 제조 공정(동시 성형)을 갖고 있어, 재료 설계와 구조 설계를 겸하고 있는 이유로, 상당히 큰 대형의 복잡한 형상의 구조물을 한번에 성형이 가능한 특징이 있다.

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

또한, 복합재료는 작용 응력에 대해 강화 섬유와 매트릭스 재료의 적층 순서를 바꿀 수 있고, 또한 국소적으로 두꺼운 두께도 임의로 바꿀 수 있으므로 경제적으로 합리적인 최적 설계를 할 수 있는 장점이 있는 반면에 일반 금속 재료와는 달리 매우 복잡한 파괴 거동(모재 균열, 모재와 섬유의 분리, 층간 분리, 섬유 파단 등)을 보이므로 복합재료를 기계 구조물로써 적용하고자 할 때에는 그 안전성과 신뢰성에 대한 평가가 중요하며, 최근 구조물의 안전성 평가를 위한 방안으로 비파괴검사가 널리 실용화되고 있다.

최근 구조물의 안전성 평가를 위한 방안으로 비파괴검사가 널리 실용화되고 있다. 비파괴검사법에는 방사선투과법(radiography test, RT), 초음파탐상법, (ultrasonic test, UT), 자분탐상법(magnetic particle test, MT), 음향방출법(acoustic emission, AE) 등이 있다.

방사선투과법은 방사성 동위원소를 이용하는 위험성이 있으며, 초음파탐상법은 재료의 기하학적인 제한이 많으며, 자분탐상법은 재료가 자성체이어야 한다는 재료의 물성에 제약이 있어 실험에 한계가 있다. 특히, 이러한 방법들은 이미 발생, 형성되어 있는 결함만을 검출할 수 있으며, 결함 요인(원인)의 분석을 위해선 재료의 변형 및 구조물의 가동을 중단시킨 정적 상태에서만 사용할 수 있다. 그러나 AE는 방사선투과법, 초음파탐상법, 자분탐상법과는 달리 깨지는 소리(tin cry)를 기다렸다가 포착하는 동적인 실험방법이다. 따라서, 어떤 임의의 외력을 피시험물에 가하지 않으면, AE는 발생되지 않는다. 이 외력과 AE의 발생 경향을 피시험물의 손상과 대응시키는 것으로 AE 파라미터에 의한 비파괴검사가 가능하게 된다.

방사선투과법, 초음파탐상법, 자분탐상법의 방법이 정적인 결함검출 방법이라 하면, AE는 동적인 결함검출 방법이다. 그리고, 검사방법이 AE 센서를 피시험물에 밀착시키는 것만으로도 좋으므로 피시험물의 형태, 크기에는 상관이 없으며, 재료가 불안정한 상태(전위의 운동, 균열의 전파)에 있을 때 결함이 발생, 형성 등 소성변형 중 탄성에너지가 해방될 때 방출되는 탄성응력파를 검출할 수 있기 때문에 재료내의 동적인 구조 변화와 실시간으로 모니터링 할 수 있어 근래에 신뢰성 진단에 이용되기 시작했다.

따라서 AE법을 이용하면 가동 중인 구조물의 결함 위치(발생원, source) 뿐만 아니라 결함의 크기 및 분포까지도 파악이 가능하다.

2. AE란

AE는 재료의 재료 내부에 변형이 일어날 때 즉, 재료의 국부적인 내부 구조의 변화의 결과로 형성되었던, 축적된 변형 에너지가 방출될 때 발생하는 탄성응력파이다.

따라서 AE는 소성변형, 균열의 발생과 성장, 마찰 기구, 개재물의 파괴 및 상변화(상변태) 등에 관한 중요한 정보를 담고 있으며, 이런 탄성응력파의 주파수 대역은 가칭 주파수에서 수 MHz에 이른다.

그 중에서 비교적 환경잡음의 영향을 받기 힘든 20kHz~1MHz의 초음파 대역이 일반적으로 AE 계측에 사용되고 있다. 이러한, AE파의 검출은 압전소자 등을 이용한 AE 센서를 시험체에 부착하는 것으로, 피시험물 표면의 진동을 전기신호로 변환한다.

AE 센서로 검출된 미소한 전기신호는 전치증폭기(pre-amplifier)와 주증폭기(main amplifier)에서 증폭되고, 주파수 필터를 통해서 AE 파라미터 처리가 행해진다. 아래에 AE 계측과정을 표시하였다.

1. 부하 형태

- 1-1) 응력 : 최대 사용응력, 최종 파괴
- 1-2) 부하 방법 : 인장, 압축, 굽힘, 전단 시험
정수압 시험
열 변형시험

2. 잡음 대책

- 2-1) 부하 장치 : 기계적 잡음, 전기적 잡음
- 2-2) 환경 잡음 : 기계적 잡음, 전기적 잡음

3. 계측 시스템의 교정

- 3-1) 센서 : 주파수 특성, 감도
- 3-2) 계측기 : 주파수 필터, 이득값(gain), 문턱전압값(threshold)

*AE 센서의 교정법

- 절대 감도교정 : 상호 교정법
샤프심 압절법
- 상대 감도교정 : 접촉법(face to face)
수류 음원법(수도관법)
전기 임펄스법

4. 센서 부착형태의 교정 : 감도, 접촉매질 사용 (공기층 제거)

5. 계측 시작

Table.1 은 AE 파라미터와 정보에 관한 내용을 요약한 것이다.

Table 1 AE parameter and information

해석 수법	정 보	AE parameter
포락선 검파처리 해석	1. 손상의 발생수	1. 총사상수(total events)
	2. 손상의 크기, 종류	2. 총계수(total count), 총에너지(total energy)
	3. 손상의 진행과정, 손상의 빈도	3. 사상율(event rate), 계수율(count rate)
	4. 손상의 형태 및 진행과정	4. 진폭분포, 지속시간 분포, 에너지분포
	5. 잡음의 식별	5. 상승시간분포, 지속시간분포
	6. 사상의 성질	6. 주파수 spectrum
	7. 사상의 발생지역	7. 복수 이상의 센서 도달시간
원파형 해석	1. 사상의 발생위치	1. 복수의 센서 도달 시간차
정성적 파라미터	2. 미시 균열의 체적	2. AE 원파형의 진폭
	3. 미시 균열 진전속도	3. AE 원파형의 상승 시간
	4. 파괴 모드	4. 복수 센서에 의한 종파의 위상차

3. 실험 및 실험방법

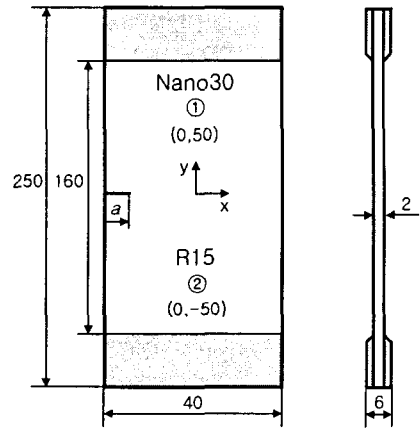
3.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 (주)SK에서 제작된 USN 200A의 프리프레그(prepreg)로 사양은 Table 1과 같다.

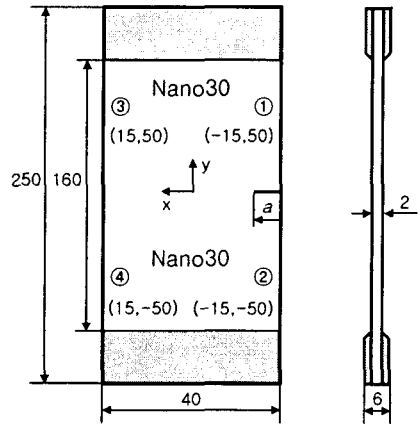
Table1 Specifications of prepreg, USN 200A

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

또한 프리프레그의 탄소섬유를 0°, ±45° 및 90°로 각각 10플라이씩 적층하여 오토클레이브(autoclave)로 제작하였으며, 시험편의 형상은 Fig.1과 같으며, 양쪽에 45mm의 탭(tab)을 두었다. 시험편 폭(W=40mm)에 대한 crack의 비(2a/W)는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 (a=2, 4, 6, 8, 10mm)으로 하였다.



(a) transient mode (right side view)



(b) location mode (left side view)

Fig.1 Geometry of specimen (unit:mm)

3.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 계측시스템은 Physical Acoustics Corporation의 Spartan 2000 및 PCI-DiSP4로 그 장치구성은 Fig.2에서 보는바와 같고, MS-DOS 환경하에서 계측된 AE신호는 원시 데이터(raw data)로 실시간에 저장 및 모니터링이 가능하다.

또한 인장시험기(Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 모두 0.5mm/min의 정속신장형 부하이며, 별도의 컨넥터를 제작하여 인장시험기로부터 출력되는 아날로그 하중값을 디지털 신호로 변환시킨 후, 그 값을 각각 인장시험기와 Spartan 2000 AE system에 전송하였다.

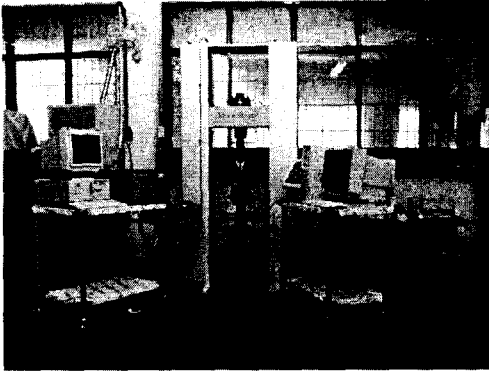


Fig.2 Photograph of experimental setup

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 Nano30(resonant frequency 300kHz, PAC)과 R15(resonant frequency 150kHz, PAC) 센서를 시험편의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 Fig.1 (a), (b)에서 보는바와 같은 위치에 고진공그리스로 시험편에 대칭이 되도록 자체 제작한 고정구를 사용하여 압착시킨 후, 캘리브레이션을 실시하였다. 또한, 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain을 60dB로 설정하여 100~300kHz 및 100~1200kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, 샘플링 주기 10MSPS 간격으로 검출된 아날로그 AE신호를 주증폭기에서 20dB로 증폭하여 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, A/D 컨버터로 PC에 전송하였으며, 이 때 threshold는 55dB로 고정하였다.

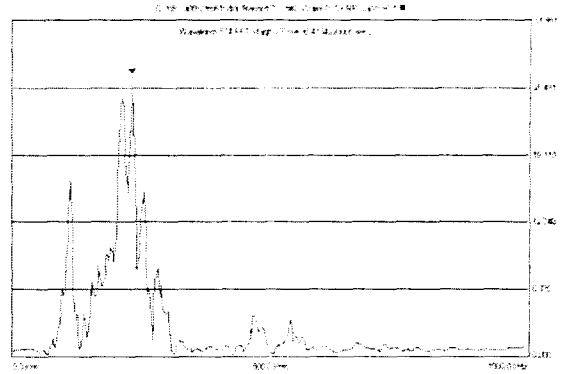
4. 실험결과 및 고찰

4.1 섬유배향각 θ 에 따른 주파수분석

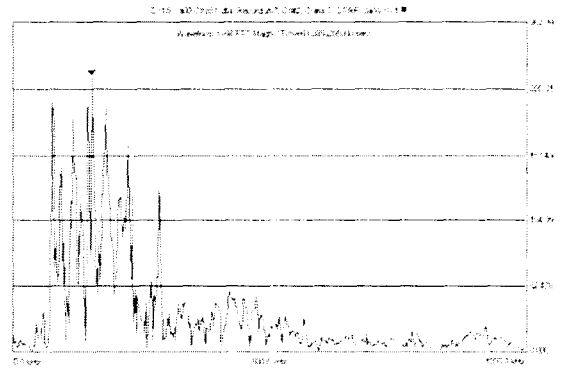
섬유강화 복합재료의 섬유배향각 θ 를 각각 0° , $\pm 45^\circ$ 및 90° 로 하여 10플라이씩 적층한 single edge crack을 갖는 평판에 등분포 하중이 시험편의 길이방향으로 작용할 경우, AE 실험을 이용해 얻은 결과를 분석하면 다음과 같다.

복합재의 인장 변형하에서 다수의 AE가 발생하는 것을 확인할 수는 있지만, 이와같은 AE의 발생요인을 조사하여 파괴원인을 규명하기 위하여 AE 검출파형에 대한 주파수분석을 실시하였다.

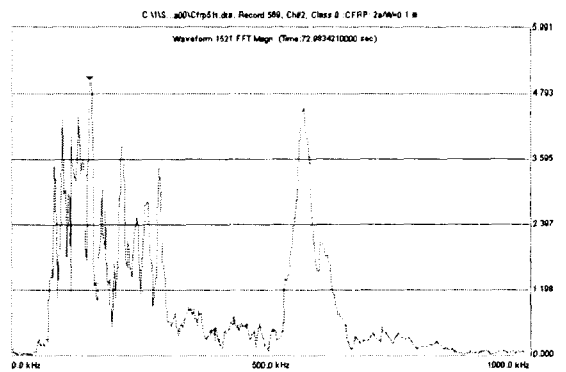
Fig.3은 하중(시간)의 증가에 따른 AE 신호의 주파수와 진폭의 변화를 나타낸 것으로 초기에는 미세균열의



(a) epoxy resin cracking



(b) delamination



(c) fiber breakage

Fig.3 Typical example of FFT as a function frequency vs. magnitude in CFRP

발달로 저진폭을 갖는 신호가 발생되어 고주파수 대역을 보이고 있으나 하중이 증가할수록 고진폭의 AE 신호가 검출됨에 따라 저주파수 대역을 보인다.

대체로 하중 수준의 10% 이하에서는 100~250kHz 범위의 주파수를 나타내며, 그 이상에서는 100~600kHz의 대역을 보인다. 이는 진폭의 규모가 커짐에 따라(하중이 커짐에 따라) 에너지의 규모가 큰 신호가 방출됨으로 인하여 신호의 폭 또한 넓어지기 때문에 주파수가 상대적으로 낮은 것으로 생각된다.

또한, 후반부(600초~) 영역에서 나타나는 CFRP의 층간 분리시 발생하는 신호로 고진폭의 신호로써 지속시간이 매우 긴 파형 형태로 100~400kHz에서 최대진폭을 나타내었다.

Fig.4는 시간과 진폭과의 관계로 전반부(초기~200초)에서 발생하는 AE 신호는 모재(epoxy)균열의 발생과 진전시 발생하는 전형적인 신호로 낮은 에너지와 저진폭의 신호로써 지속시간이 긴 연속형에 가까운 파형 형태를 보이며, 100-250kHz에서 최대진폭을 나타내었다. 그러나 중반부(200~600초)부근 영역에서는 발생하는 섬유 파단에 의한 신호로 지속시간이 짧은 돌발형 형태의 파형을 나타내며, 중심주파수는 100~400kHz로 모재(epoxy)의 파손에 의한 신호보다 고주파수를 나타내었다.

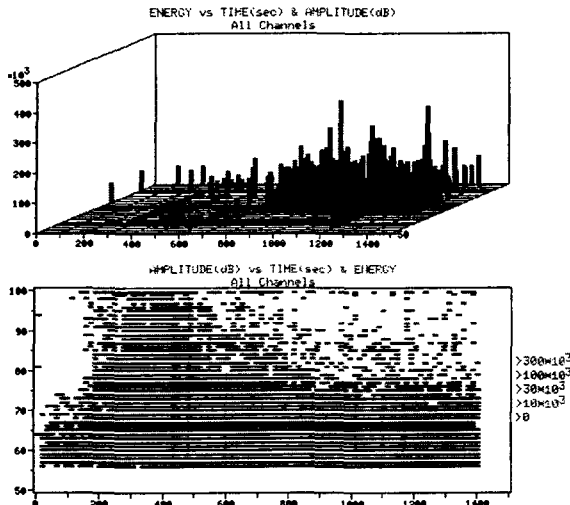
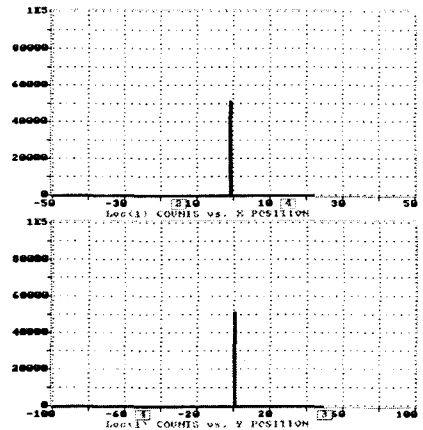
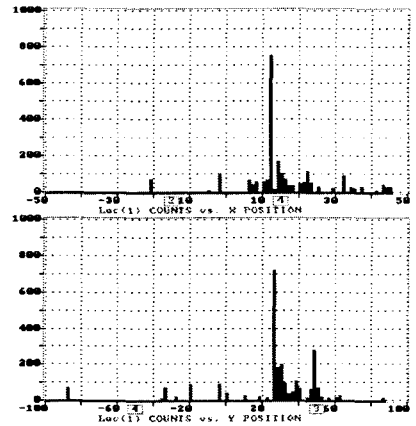


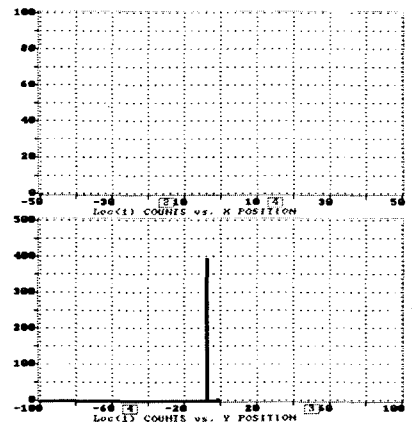
Fig.4 Relationship between amplitude vs. time and energy ($\theta=0^\circ$, $2a/W=0.1$)



(a) $\theta=0^\circ$, $2a/W=0.2$



(b) $\theta=\pm 45^\circ$, $2a/W=0.2$



(c) $\theta=90^\circ$, $2a/W=0.5$

Fig.5 Results of AE source location

4.2 위치표정

Fig.5 (a)는 섬유배향각 θ 가 0° 인 경우 위치표정의 대표적인 예이다. 그림에서 보는바와 같이 섬유배향각 θ 가 0° 인 경우, 균열은 부하 방향에 직각으로 진전됨을 알 수 있으며, crack 길이에 무관하며 전단파괴 없이 모든 시험편이 평탄한 파괴양상을 나타낸다.

Fig.5 (b)는 섬유배향각 θ 가 $\pm 45^\circ$ 인 경우 위치표정의 대표적인 예이며, 섬유배향각 θ 가 $\pm 45^\circ$ 인 적층판은 섬유배향각 방향으로 균열이 진전됨을 알 수 있다. 이는 하중방향은 Mode I 이지만, 균열 선단에서 섬유배향각 방향으로 전단응력이 발생하며, 균열이 경사지게(섬유배향각 방향으로) 진전하는 것으로 볼 수 있다.

마지막으로 Fig.5 (c)의 위치표정결과는 섬유배향각 θ 가 90° 일 때의 대표적인 예이며, 2개의 센서의 중앙 부분에 정확하게 잘 일치하고 있음을 보여준다.

5. 결 론

탄소섬유강화 복합재료의 파괴거동에 영향을 주는 주요인자 중 섬유배향각 θ 와 crack의 변화에 따른 파괴거동 특성을 AE법에 의하여 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AE 신호의 주파수분석으로부터 저주파수 영역(100~250kHz)의 AE 신호는 모재 균열의 발생 및 진전을 나타내고, 중간주파수 영역(100~400kHz)의 AE 신호에서는 섬유간의 층간 분리, 고주파수 영역(400~600kHz)의 AE 신호는 섬유의 파단에 각각 대응되는 것으로 판단된다.

2. 섬유배향각에 따른 균열 전파는 crack 선단에서 섬유배향각 방향으로 진전되는 양상이 관측되어 탄소섬유강화 복합재료 적층판에 대한 균열전파방향의 예측이 가능하며, AE에 의한 위치표정 결과와 파단 후 실제 시험편의 파단면 위치관찰 결과 아주 잘 일치하였다. 따라서, AE법이 균열의 발생위치를 확인 및 추정하는데 있어서 아주 유용한 실험방법임을 확인할 수 있었다.

- (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) Megumu Suzuki, Hiroshi Nakanishi, Masaharu Iwamoto, Eiichi Jinen, Zenichiro Maekawa, Akira Mori and Feng Sun, 1987, "Studies on Fracture Mechanisms of CFRP by Acoustic Emission Method," *JSME A*, Vol.53, No.492, pp.1459-1466.
- (7) 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.
- (8) Jung-Hwi Yoon, Sung-Oan Park, Zhang-Kyu Rhee and Chang-Ki Woo, 2003, "A Study on the Fracture Characteristics of CFRP by Acoustic Emission (1)," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference*, pp.283-288.
- (9) Zhang-Kyu Rhee, Sung-Oan Park and Bong-Gag Kim, 2003, "A Study on the Damage Estimation of CFRP using Acoustic Emission," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference*, pp.307-312.
- (10) Chang-Hun Lee, Jin-Ho Choi and Jin-Hwe Kweon, 2004, "Resonance Type Acoustic Emission Signal Analyzing Method for the Failure Detection of the Composite Materials," *KSASS*, Vol.32, No.3, pp.30-36.