

CFRP적층 형태에 따른 파괴시 음향방출 신호특성

남기우* · 문창권*
*부경대학교 재료공학부

AE Signal Characteristics from Fracture by Type of CFRP Stacking Structure

KI-WOO NAM* AND CHANG-KWON MOON*

*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Acoustic Emission 음향방출, Waveform 파형, Power Spectrum 파워 스펙트럼, Carbon Fiber Reinforced Plastics 탄소 섬유강화복합재료, Fracture Mode 파괴양식, Fracture Behavior 파괴거동

ABSTRACT: Damage process of CFRP laminates was characterized by Acoustic Emission(AE). The main objective of this study is to determine if the sources of AE in CFRP laminates could be identified from the characteristics of the waveform signals recorded during monotonic tensile test. The time history and power spectrum of each individual wave signal recorded during test were examined and classified according to their special characteristics. The waveform and frequency of AE signal from a specimens is an aid to the determination of the extent of the different fracture mechanism such as matrix crack, debonding, fiber pull-out and fiber fracture as load is increased. Four distinct types of signals were observed regardless of specimen condition. The result showed that the AE method could be effectively used for analysis of fracture mechanism in CFRP laminates.

1. 서 론

최근 연구자들은 구조물의 안전성 문제에 비파괴적 기법을 응용하기 위하여 많은 연구를 하고 있다(Nam and Kim, 2001; 남기우, 2001; 김선진과 전창환, 2001). 음향방출법도 많은 연구자들에 의하여 비파괴평가법의 하나로서 구조물의 안전성 평가와 재료시험의 평가수단으로서 사용되고 있다(김귀식 등, 2001). 그 중에서 복합재료로 된 구조물의 결함검출 및 평가기술을 개발하는데 음향방출법이 많이 적용되고 있다. 단성파로 정의되는 음향방출은 복합재료의 주 파괴기구인 기지재 균열(matrix crack), 섬유 파단(fiber fracture), 섬유 인발(pull-out), 층간분리(delamination), 박리(debonding) 혹은 이들의 복합적 손상영역의 발생원 등에 민감하게 작용하기 때문에, 파괴기구를 해석하는데 유용한 도구로서 많은 연구가 이루어져 왔다(Yuyama, 1986; 이상국 등, 1995; 이종호 등, 1996; Guo et al., 1996; 남기우와 안석환 등, 2001; 남기우 등, 2001; 안석환과 남기우, 2001). 음향방출 신호의 파라미터들을 이용하여 복합재료의 파괴거동을 해석하는 방법들이 많이 이용되었지만, 이러한 연구들은 복합재료의 비등방, 비균질의 특성 때문에 파괴거동의 해석에는 정확한 결과를 얻어내기가 어려운 실정이다. 최근에는 이러한 결점을 보완하여 검출된 음향방출의 신호를 파형과 파워 스펙트럼으로 구별하여 파괴특성을 규명하는 연구가

많이 실시되고 있다(Nam and Mal, 2001; Nam and Moon, 2001; Ahn and Nam, 2001). 따라서, 본 연구에서는 복합재료의 주 파괴기구인 기지재 균열, 섬유 파단, 층간분리, 박리, 섬유 인발 등과 같은 파괴특성을 해석하는 도구로서 음향방출법을 이용하여, 파괴에 따라 검출된 음향방출 신호를 파형과 주파수로 분석하여 각각의 파괴양상을 규명하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(한국화이바 : CU125NS)를 사용하였고, Table 1에는 그 기계적특성을 나타낸다. 이와 같은 재료를 핸드레이업(Hand Lay-up)법을 사용하여 $[0^0]_{4s}$, $[0^0/90^0_2/0^0]$, $[0^0/90^0_4/0^0]$, $[10^0]_{8s}$ 로 적층하였다. 적층시에는 프리프레그를 한 장씩 등근 유리병으로 적당하게 압력을 가하면서 적층하고 실리콘 오일의 이형제가 칠하여진 금형에 넣은 후 진공상태로 30분간 유지시켰다. 그리고 열 프레스에서 130℃, 2.88기압의 압력하에서 90분간 유지하여 잔류기공을 제거한 후, 성형이 완료된 후 적층판을 실온상태에서 120분간 냉각하여 30°이하로 떨어진 상태에서 개방하였다. 성형된 CFRP 적층판을 가공하여 Fig. 1과 같은 형상으로 시편을 제작하였다.

2.2 실험방법

인장 실험에 사용한 시험기는 Instron사의 용량 10ton의 전기유압식 만능시험기를 사용하였으며, crosshead speed는

제1저자 남기우 연락처 : 부산광역시 남구 용당동 100
051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

2mm/min로 제어하여 실온에서 행하였다.

시험편의 파단에 따라 발생하는 음향방출 신호의 검출은 Fracture Wave Detector(model F4000, Digital Wave Corp., Englewood, Co.)를 사용하였다. FWD는 발생하는 모든 음향방출 파형을 디지털화시켜 저장한다. 검출되는 음향방출 신호의 디지털화 속도는 하한계 값 0.1V로 하고, 샘플링 속도는 12.5MHz이고, 샘플링 크기는 1024개이다. 음향방출을 검출하기 위한 센서는 Fig.1 시험편의 중앙에서 20mm 떨어진 위치에 부착하였다. 사용된 센서는 넓은 범위의 주파수 응답 특성을 가지는 PAC광대역 센서인 30kHz-2MHz plug-in filter이며, 40dB 전치증폭기(AET 140B)를 거쳐 검출하였다.

그리고, 시험편에서 발생하는 신호를 민감하게 측정하기 위해서 시험편과 센서사이에 접촉매질인 그리스를 얇게 바른 후 테이프로 압착하였다. 시험편에서 지그가 잡는 부분에는 시험편의 손상을 막고 마찰에 의한 소음을 제거하기 위해 두께 1mm의 알루미늄박판(tap)을 부착해서 사용하였으며, 기계적 잡음이나 원하지 않는 신호를 제거하기 위해 필터 제거 방법과 진흙을 이용하여 제거하였다.

Table 1 Mechanical properties of prepreg

Material	CU125NS		
Tensile strength	axial 0°	kg/mm ²	164
	transverse 90°		12
Tensile modulus	axial 0°		12,681
	transverse 90°		850
Fiber volume fraction	vol %		46

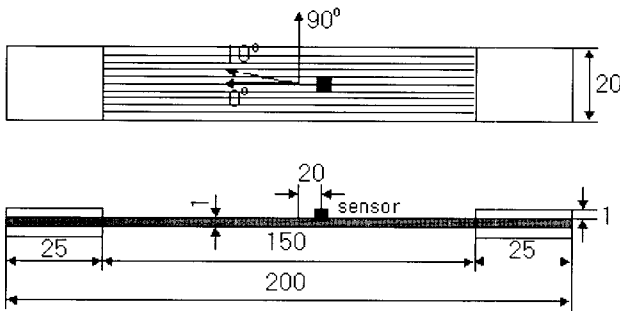


Fig. 1 Dimensions of specimen (unit : mm)

3. 실험결과 및 고찰

연필심파괴는 시험편의 표면위에 직접 하중을 부하하는 기법이다(ASTM, 1985; ASTM, 1984). 이것은 하중의 대칭적인 성분과 비대칭적이 성분을 가지며, 대칭적인 판파와 비대칭적인 판파를 발생한다. 그리고 이것은 직접파와 반사파를 가지게 된다(Prosser, 1996).

연필심파괴에 의하여 복합재료 적층판에서 얻어진 신호의 대표적인 예를 Fig. 2에 나타낸다. 이것은 신호원에서 15mm 떨어진 센서에서 검출한 것이다. 이 그림에서 신호의 첫부분은 extensional wave로 저진폭, 고주파수를 나타내며, 뒷부분은

flexural wave로 고진폭, 저주파수를 나타낸다. 신호의 첫부분은 신호원에서 발생하는 파가 먼저 수신센서에 도착하므로 뒷부분보다 더 높은 상속도를 갖는 파이다. 따라서 신호의 첫부분은 직접파이고, 뒷부분은 반사파이다. 직접파와 반사파의 스펙트럼 그래프에서도 고 스펙트럼 진폭값을 갖는 저 주파수 성분인 반사파와 저 스펙트럼 진폭값을 갖는 고 주파수 성분인 직접파를 볼 수 있다.

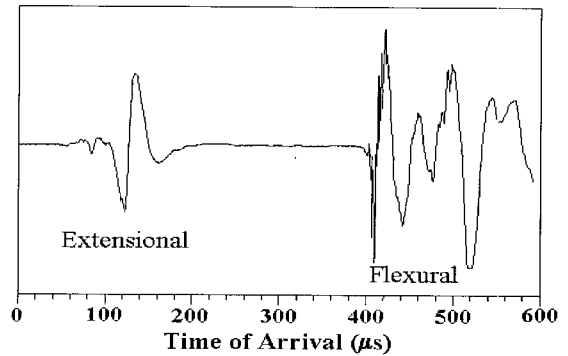


Fig. 2 Typical signal from pencil lead fracture (Vertical scale ; arbitrary)

그리고, 직접파와 반사파 사이는 신호원과 센서 사이의 거리가 증가함에 따라서 반사파가 더 멀어지고, 더 쉽게 구별된다. 따라서 이동 거리가 클수록, 속도차는 빠른 직접파와 늦은 반사파 사이에 더 큰 지연이 나타난다.

복합재료 적층판에서의 파괴특성은 초기영역의 기지 손상으로 구성된다. 이러한 균열 등은 거의 등거리로서, 특정 한계치까지 균열밀도가 증가하게 된다. 하중이 계속 증가하게 되면 다른 파손기구의 성장과 함께 기지와 섬유와 박리와 횡단면에서의 미시적 층간 박리에 의해서 파괴가 발생하고, 최종적으로는 전 범위에 걸쳐 파손을 일으키는 섬유파괴의 형태로 관찰된다. 이러한 복합재료의 파괴기구에 대하여 음향방출법을 이용하여 시험한 결과, 신호특성을 아래에 나타낸다.

실험에서 얻어진 파단하중과 검출된 음향방출수의 무차원화 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 그리고 파단외관을 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 3에서 적층판의 형태에 따라서 음향방출수와 파단하중에는 차이가 있음을 알 수 있다. 프리프레그를 일방향으로 4장 적층한 [0°]_{4s} 경우가 가장 높은 파단하중을 나타내며, 동시에 가장 많은 음향방출수가 발생하였다. 이것은 섬유의 배열이 인장방향에 대하여 평행하므로써, 작용하중에 대하여 최대의 저항값을 보여준다. 한편, 인장방향에 대하여 10° 기울어진 상태의 시험편 [10°]_{8s}는 프리프레그를 일방향으로 8장 적층하였지만, 섬유는 하중에 대하여 저항하지 못하고 섬유와 섬유 사이인 매트릭스가 파단하므로써 가장 낮은 저항값과 음향방출수를 보였다. 그리고 [0°/90°₂/0°] 시험편과 [0°/90°₄/0°] 시험편은 인장방향에 대하여 평행한 적층면은 같지만, 수직인 적층면이 많은 시험편이 낮은 값을 보여주고 있다. 이것은 내부에서 먼저 매트릭스의 파괴가 발생하고, 하중 방향에 대하여 평행한 적층면과 수직인 적층면 사이의 다양한 파괴현상에 기인한다. 이와같은 파괴 현상들은 Fig. 4에서 볼 수 있다. [0°]_{4s} 시험편은

파단시의 충격으로 많은 분리현상이 나타났으나, $[10^\circ]_{8s}$ 시험편은 섬유사이의 10° 방향으로 파단되어 깨끗한 외관을 나타내었다. 그러나 $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]$ 시험편과 $[0^\circ/90^\circ_4/0^\circ]$ 시험편은 하중방향에 대하여 수직인 적층량에 따라서 파단외관이 다름을 볼 수 있다.

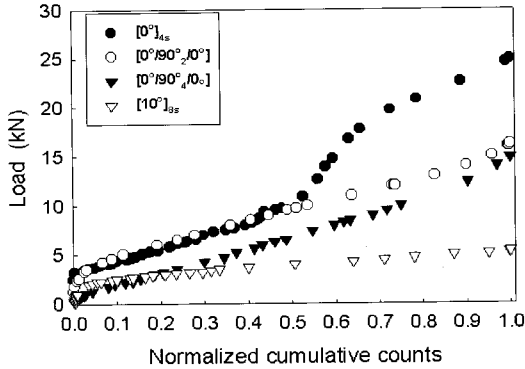


Fig. 3 Relationship of load and cumulative counts

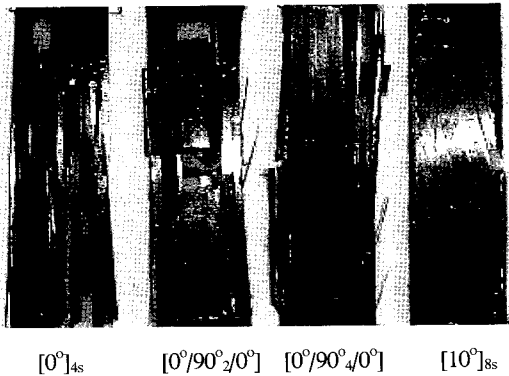


Fig. 4 Fracture appearance

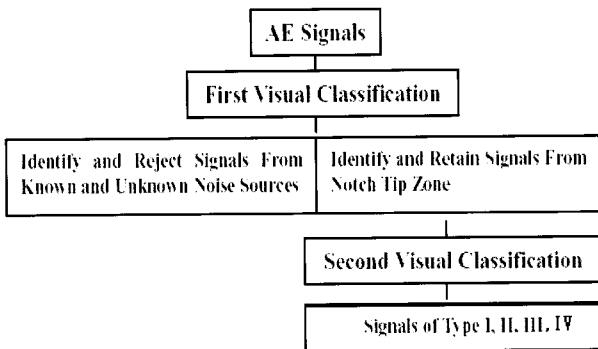


Fig. 5 Flow chart of visual classification of AE signals

복합재료 적층판의 인장에서 파단으로 인한 신호와 노이즈 신호가 많이 검출되었다. 이러한 노이즈 신호는 기계적 잡음 등으로 인하여 파형이 전혀 형성되지 않고, 주파수는 전 범위에 걸쳐서 미약하게 나타난 것으로 규정하여 제거하였다. 실험에서 얻어진 다양한 신호형태는 각 적층판에 대하여 파형과 파워 스펙트럼으로 분류하였다. 센서에 검출된 모든 신호형태

를 특성화하고, 그룹화하기 위해서 시각적 분류방법이 사용되었다. 인장시험에서 얻어진 신호의 시각적 분류방법을 Fig. 5에 나타낸다.

본 연구에서는 4종류의 적층판 시험편에서 얻어진 신호를 분류하여 Fig. 6에 나타낸다. 각 적층판 시험편의 신호 형태는 파형 및 스펙트럼 특성에 의하여 4종류로 나눌 수 있었다. 4종류 시험편에서 Type I, Type II, Type III 및 Type IV의 신호가 검출되었다. 4종류 시험편에서 얻어진 신호의 백분율을 Table 1에 나타낸다. 한편, Ono 등(Ono and Huang, 1994)은 탄소섬유강화 복합재료에서 6종류의 파형을 분류하였으며, Suzuki 등(Suzuki et al., 1996)은 유리섬유강화 복합재료에서 4종류의 파형을 분류하였으며, 김 등(김귀식 등, 2001)은 플라즈마 용사재의 인장에서 파형을 분류하였다.

Table 1 Acoustic emission events classification (%)

	Type-I	Type-II	Type-III	Type-IV
$[0^\circ]_{4s}$	4	21	33	42
$[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]$	11	18	28	43
$[0^\circ/90^\circ_4/0^\circ]$	22	39	13	26
$[10^\circ]_{8s}$	50	28	16	6

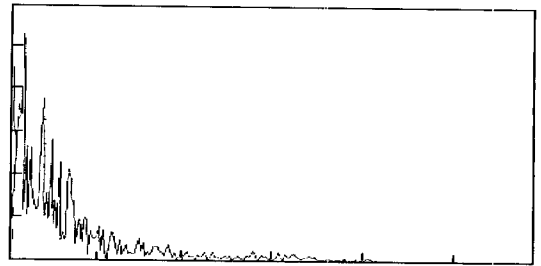
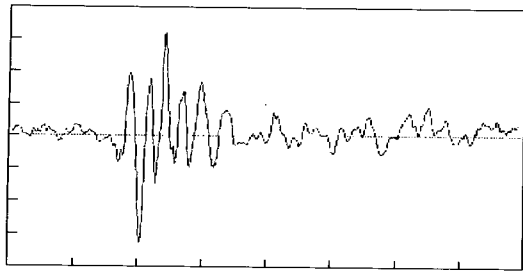
Type I신호는 매트릭스 파괴에서 발생한 것이고, Type II신호는 섬유와 매트릭스의 분리 및 박리에서 발생한 것이다. 그리고, Type III신호는 매트릭스에서 섬유가 인발 될 때의 것이며, Type IV신호는 섬유가 파단될 때의 것이다. Type I, Type II 및 Type III신호의 파형은 급격한 상승과 함께 나타나는 extensional 형태이다. 그러나, Type IV신호의 파형은 초기에는 extensional 형태이지만, 후반부에는 여러 곳에서 반사되어 나타나는 flexural 형태를 나타낸다.

파워 스펙트럼에서는 Type I 신호는 대략 0.5MHz이하에서 뛰어난 값을 가지며, Type II 신호는 약 0.5MHz 근처에서 뛰어난 값을 가진다. Type III신호는 약 0.75MHz 근처에서 뛰어난 값을 가지지만, Type IV 신호는 0.75MHz 근처와 1.2MHz 근처에서 뛰어난 값을 가진다. 이것은 4종류의 시험편에서 얻어진 모든 신호에서 공통적으로 얻어진 결과이다.

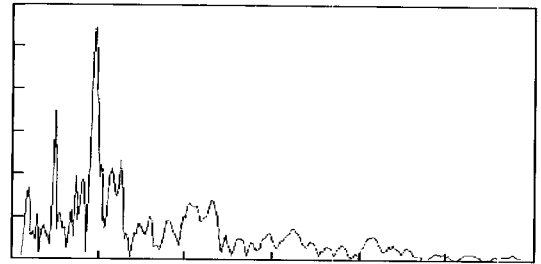
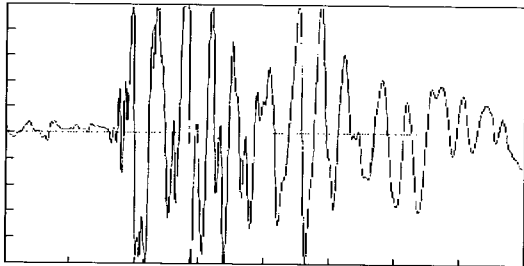
이와 같은 특성은 신호의 Type을 백분율로 나타낸 Table 1에도 잘 나타나있다. $[0^\circ]_{4s}$ 와 $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]$ 는 Type III와 Type IV신호가 주파파원이며, Type II 신호가 일부 나타나고 있다. $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]$ 에서는 인장방향에 수직인 적층으로 인하여 매트릭스 파괴의 신호인 Type I이 검출되고 있다. 한편 $[0^\circ/90^\circ_4/0^\circ]$ 는 4종류의 신호가 분산되어 나타남을 알 수 있다. $[10^\circ]_{8s}$ 는 매트릭스 파괴인 Type I이 주파파원이며, Type II와 Type III가 일부 나타나고 있다. 이와 같은 파형과 스펙트럼의 분류로서 복합재료 적층판의 파괴에 따른 파괴특성을 파악할 수 있다고 생각한다.

4. 결 론

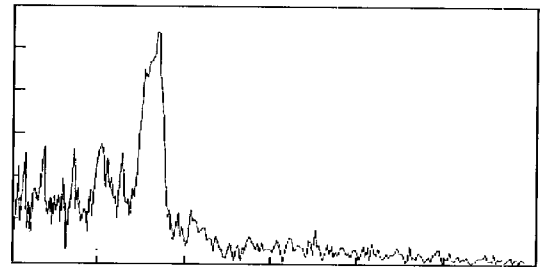
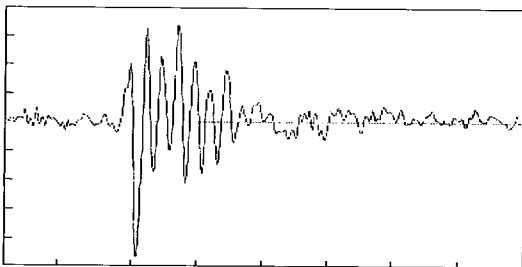
복합재료의 주 파괴기구인 기지재 균열, 섬유 파단, 층간분



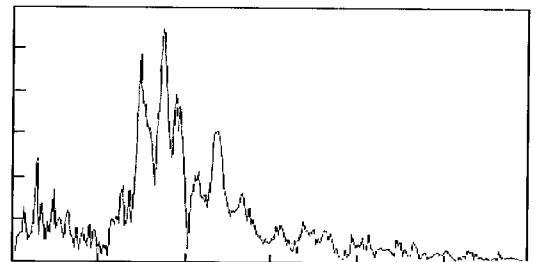
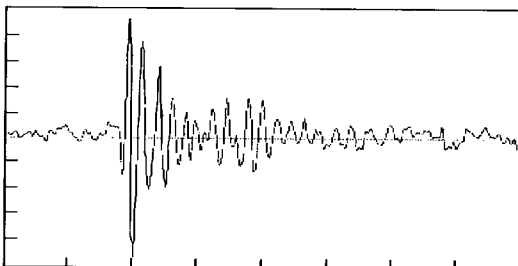
(a) Type - I



(b) Type - II



(c) Type - III



(d) Type - IV

(i) Waveform

(ii) Power Spectrum

Fig. 6 AE events detected during monotonic tensile test Horizontal scale ; i) time : 5 μ s/div., ii) frequency : 0.5MHz/div., Vertical scale : varies from signal to signal

리, 박리, 섬유 인발 등에서 검출된 음향방출 신호를 파형과 주파수로 분석하여 각각의 파괴양상을 규명하였다.

복합재료 적층판에서 검출된 신호는 적층판의 형태에 관계 없이 Type I, Type II, Type III 및 Type IV의 4종류로 분류할 수 있었으나, 4종류의 파형수는 파괴특성에 따라서 다른 분포를 나타내었다. 적층판의 형태가 다른 조건에 의한 파형과 파워 스펙트럼을 해석함으로써, 복합재료 구조부재의 다양한 손상과 결합으로부터 발생하는 균열 전파와 최종 파괴 과정을 실시간 감시 가능하리라 생각한다.

참 고 문 헌

- 김귀식, 박경석, 홍용의 (2001). "플라즈마용사 세라믹코팅 파막 부식재의 음향방출 특성," 한국해양공학회지, 제15권 제3호, pp 69-74.
- 김귀식, 오명범, K. Ono (2001). "Acoustic Emission 파형분류에 의한 플라즈마 용사 코팅재의 인장해석," 한국해양공학회지, 제15권 제4호, pp 66-72.
- 김선진, 전창환 (2001). "LCR파를 이용한 압연 알루미늄판의 잔류응력 평가에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제15권 제3호, pp 82-87.
- 남기우 (2001). "알루미늄 5083의 피로균열 진전에 따른 수명에 측 및 비파괴평가," 한국해양공학회지, 제15권 제2호, pp 94-98.
- 남기우, 안석환 (2001). "리벳구멍을 갖는 2024 알루미늄 합금의 피로 균열 진전 동안 발생한 음향방출 파형 특성," 한국해양공학회지, 제15권 제1호, pp 52-56.
- 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권 (2001). "시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동," 비파괴검사학회지, 제21권 제1호, pp 39-45.
- 안석환, 남기우(2001). "음향방출 및 초음파시험을 이용한 CFRP 시험편의 파괴 거동 해석," 비파괴검사학회지, 제21권 제3호, pp 251-260.
- 이상국, 오세규, 남기우, 김옥균 (1995). "음향방출법에 의한 탄소섬유복합재료의 인장 및 파괴인성시험시의 파괴거동에 관한 연구," 비파괴검사학회지, 제15권 제1호, pp 277-290.
- 이종오, 이주석, 윤운하, 이승희 (1996). "음향방출시험에 의한 복합재료 접합부의 비파괴평가," 비파괴검사학회지, 제16권 제2호, pp 79-84.
- Ahn, S.-W. and Nam, K.W. (2001). "Characteristics of AE Signals from Fatigue Crack Propagation and Penetration of a Surface Crack in 6061 Aluminum Plate," International Journal Of Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 1, pp 44-50.
- Guo, D., Mal, A.K. and Ono, K. (1996). "Wave Theory of Acoustic Emission in Composite Laminates", J. Acoustic Emission, Vol 14, pp S19-46.
- Nam, K.W. and Mal, A. (2001). "Characteristics of Elastic Waves Generated by Crack Initiation in Aluminum Alloys under Fatigue Loading," Journal of Materials Research, Vol 16, No 6, pp 1745-1751.
- Nam, K.W. and Moon, C.K. (2001). "Classification of Acoustic Emission Signals from fatigue crack propagation in 2024 and 5052 Aluminum Alloys," International Journal Of Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 1, pp 51-55.
- Nam, K.W. and Kim, Y.U. (2001). "Nondestructive Evaluation for Artificial Degraded Stainless 316 Steel by Time-Frequency Analysis Method," 한국해양공학회지, 제15권 제3호, pp 87-92.
- Ono, K. and Huang, Q. (1994). "Pattern Recognition Analysis of Acoustic Emission Signals," Progress in Acoustic Emission VII, The Japanese Society for NDI, pp 69-78.
- Prosser, W.H. (1996). "Advanced AE Techniques in Composite Materials Research," Journal of Acoustic Emission, Vol 14, pp S1-S11.
- Suzuki, H., et al. (1996). "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals," Journal of Acoustic Emission, Vol 14, pp 69-84.
- Yuyama, S. and Kishi, T. (1986). "Application for New Materials of AE," The Japanese Society for NDI, Vol 35, pp 720~728.
- ASTM Standard E976-84 (1984).
- ASTM Standard E1067-85 (1985).

2002년 1월 15일 원고 접수

2002년 2월 19일 최종 수정본 채택