

# 고강도 구조용 내화강의 피로특성 및 음향방출신호의 시간-주파수 해석

김현수\* · 남기우\*\* · 강창룡\*\*

## Fatigue Characteristics of High Strength Fire Resistance Steel for Frame Structure and Time-Frequency Analysis its Acoustic Emission Signal

Hyun Soo Kim, Ki Woo Nam and Chang Young Kang

**Key Words:** High Strength Steel for Frame Structure(고강도 구조용 내화강), Fire Resistance Steel(내화강), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 해석), Acoustic Emission Signal(음향방출신호), Fatigue Crack Growth Behavior(피로균열진전거동), Nondestructive Evaluation(비파괴 평가)

### Abstract

Demand for now nondestructive evaluation are growing to detect fatigue crack growth behavior to predict long term performance of materials and structure in aggressive environments, especially when they are in non-visible area. Acoustic emission technique is well suited to these problems and has drawn a keen interests because of its dynamic detection ability, extreme sensitivity and location of growing defects. In this study, we analysed acoustic emission signals obtained in fatigue and tensile test of high strength fire resistance steel for frame structure with time-frequency analysis methods. The main frequency range is different in the noise and the fatigue crack propagation. It could be classified that it were also generated by composite fracture mechanics of cleavage, dimple, inclusion separation etc.

### 1. 서론

재료 내부에서 변형 및 파괴가 일어날 때는 재료의 특성 및 작용응력의 형태에 따라 독특한 탄성파가 방출되는데 이러한 탄성파를 검출하여 재료내부에서 일어나고 있는 현상들을 해석해 나가는 기술이 새로운 재료평가법으로 주목받고 있다. 이것을 음향방출(Acoustic Emission)이라고 한다<sup>(1-4)</sup>.

최근 컴퓨터 및 여러 계측 장비의 급속한 발전에 따른 실시간적인 신호 검출 및 해석이 가능하

게 되었으며, 이를 이용한 비파괴 평가법도 급속하게 발전하고 있다. 특히 음향방출 신호에 대한 해석을 통하여 재료의 특성 평가와 신호가 가지는 여러 가지 정보를 분석하는 비파괴 평가 방법이 여러 연구자들에 의하여 소개되고 있다. Nakamura는 재료의 신호방출특성을 진폭분포로서 평가하였고, Ono 등은 진폭분포를 정량화하여 미시파괴과정을 평가하였다. 또한 Blanchette 등은 음향방출법과 균열진전량과의 관계를 K와 이벤트 수와의 관계로 설명하였다<sup>(5,9)</sup>. 이러한 음향방출의 이해와 응용 등은 과학과 공학적 측면에서 상호이해와 협력이 요구되며, 재료과학, 파괴역학 및 원자력 분야 등에 이용되고 있다. 음향방출은 재료강도를 연구하고 비파괴검사 방법을 개량하는데 있어서 예민도와 동적 측정의 특성 때문에

\* 부경대학교 대학원 재료공학과

\*\* 부경대학교 재료공학부

아주 확실한 기법으로 많이 사용된다. 그러나 지금까지의 연구에서는 진폭분포, 이벤트 등과 같은 음향방출 파라미터들에만 국한되어 이루어지고 있을 뿐, 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석한 결과는 거의 없는 실정이다(10).

본 연구에서는 비파괴 평가에 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하고, 피로균열진전시 발생하는 음향방출 신호들을 정확히 분별하고자, 고강도 내화강의 피로시험 및 인장시험시 발생한 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석하여 피로특성과의 상관성을 규명하였다.

## 2. 시간-주파수 해석법

시간-주파수 해석법은 신호가 가지는 시간영역과 주파수 영역의 정보를 시간-주파수의 2차원 평면상에 동시에 표현한다. 따라서 신호가 가지는 여러 가지 주파수 정보를 기존의 푸리에 변환에 비하여 신뢰성 있게 분석할 수 있는 특징이 있다. 최근까지 신호처리 분야에 이용되고 있는 시간-주파수 해석법은 선형과 비선형 계열로 분류할 수 있으며, 각각의 특성을 가지고 있다.

본 실험에서는 피로파괴시 방출되는 AE 신호를 실시간적으로 분석할 수 있고 적당한 분해능을 가지는 선형계열인 단시간 푸리에 변환법을 사용하였다(11). 푸리에 변환은 시간변화에 대하여 주파수 표현을 하지 못한다. 그러나 단시간 푸리에 변환법(Short Time Fourier Transform : STFT)은 짧은 시간 단위로 신호를 분리하고 푸리에 변환을 하는 방법이다. 즉, 시간과 주파수 영역에서 동시에 존재하는 창 함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법으로 식(1)과 같이 표현된다.

$$STFT(t, \omega) = \int s(\tau) \gamma_{i,\omega}^*(\tau) d\tau = \int s(\tau) \gamma^*(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

식(1)은 일반적인 내적(inner product)을 이용한 표현으로서, signal  $s(t)$ 와 기본 함수(elementary function)  $\gamma(\tau - t)e^{j\omega\tau}$  사이의 유사성을 나타낸다. 단시간 푸리에 변환법은 빠른 연산처리가 가능하여, 음향방출 신호와 같이 돌발적인 신호의 해석에 적합하다. Fig.1은 STFT의 분해능의 예시를 나타낸 것이다.

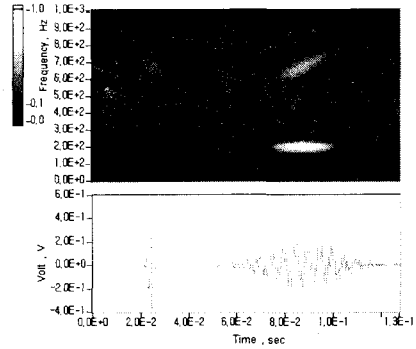


Fig.1 Resolution of STFT

## 3. 실험방법

### 3.1 실험재료

본 연구에 사용된 재료는, 기존에 사용되고 있는 재료의 기계적 물성치를 향상시키기 위하여 화학성분을 변화시켜 제조한 것이다. 기존에 사용하고 있는 건축 구조용 내화강의 0.13~0.14 탄소함량은 용접성의 향상을 위하여 0.11~0.12로 감소시켰다. 본 실험에 사용된 시험편의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 사용된 시험편은 탄소함량을 감소시키고 Ti를 첨가한 것(이하, T시험편으로 명명), Ti와 N을 첨가한 것(이하, TN시험편으로 명명) 및 B를 첨가시킨 것(이하, B시험편으로 명명)이다. 시험편의 압연조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

	C	Mn	Mo	Ti	N	B	Fe
T	0.11	0.97	0.48	0.02			Bal.
TN	0.11	1.04	0.48	0.018	0.015		Bal.
B	0.12	1.16	0.49	-	-	>0.0144	Bal.

Table 2 Rolling conditions of specimen

Specimen		R.S.T(°C)	R.F.T(°C)
T	75	1200	750
	95	"	950
TN	75	"	750
	95	"	950
B	75	"	750
	95	"	950

\* R.S.T : rolling start temperature, R.F.T : rolling finished temperature

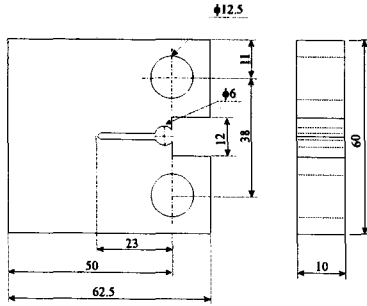


Fig.2 Dimension of CT specimen (in mm)

### 3.2 피로시험

구조용 강 of 피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 Shimadzu 社의 최대용량 10톤의 만능피로시험기를 사용하였다. 실온에서 정현파를 이용하여 모든 시편에 예비균열을 2mm 삽입한 후, 하중반복수 10Hz, 응력비  $R=0.1$ , 하중  $P=600\text{kgf}$ 의 일정하중으로 실시하였다. 균열진전은 clip gage를 사용해서 측정하였으며, 응력확대계수는 식(2)을 이용하여 계산하였다. 본 실험에 사용한 CT 시편의 형상을 Fig.2에 나타내었다.

$$K = \left[ \frac{P}{(B \cdot W^{1/2})} \right] \cdot f(x), \quad (X = a/W) \quad (2)$$

$$f(x) = (2 + X)/(1 - X)^{3/2} \cdot (0.886 + 4.64 \cdot X - 13.32 \cdot X^2 + 14.72 \cdot X^3 - 5.6 \cdot X^4)$$

이 식은  $0.2 \leq a/W < 1$ 에서 적용 가능하다. 여기서 B는 시험편의 두께, W는 판폭, a는 균열길이를 나타낸다. 인장시험은 상온에서 크로스헤드 속도를  $1\text{mm/min}$ 으로 하였다.

### 3.3 음향방출

피로시험 중 발생하는 음향방출신호의 측정 시스템을 Fig.3에 나타내었다. 피로시험과 단순인장 시험에서 발생하는 음향방출 신호는 PAC社의 1200A model(1 channel)을 사용하여 검출하였다. AE센서는 1MHz 광대역 센서를 사용하였고, 음향방출 신호는 100~1200kHz 아날로그 필터가 내장된 Pre-amp.에서 40dB 증폭 후 Main-amp.에서 32dB 증폭하였다. 검출된 음향방출 신호는 GAGE社의 CS2125 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시킨 후, 시간-주파수해석법으로 실시간적으로 분석하였다.

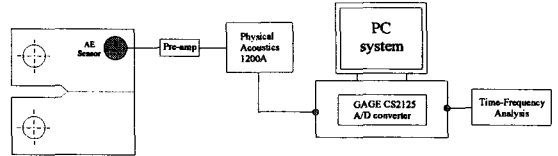


Fig.3 Schematic diagram of AE system

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 피로균열진전특성

3종류의 시험편에서 얻어진 미세조직을 Fig.4에 나타낸다. 이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 T와 TN시험편에서는 페라이트의 기지조직에 소량의 펄라이트와 베이나이트가 공존하고 있다. 그러나 B시험편에서는 경화능이 큰 B의 첨가에 의해 마르텐사이트의 기지조직에 미세한 탄화물들이 석출되어 있음을 알 수 있다. 또한, T와 TN시험편은 압연종료온도가 높아짐에 따라서 페라이트와 펄라이트의 체적분율이 낮아지는데 반하여 베이나이트 조직의 체적분율은 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 B시험편은 압연종료온도 변화에 따른 제2상의 체적분율 변화는 인식될 만큼 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 미세조직 관찰에서 합금원소, 압연종료온도 변화는 미세조직에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 따라서 합금원소, 압연종료온도 변화 및 조직의 이방성은 피로특성에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

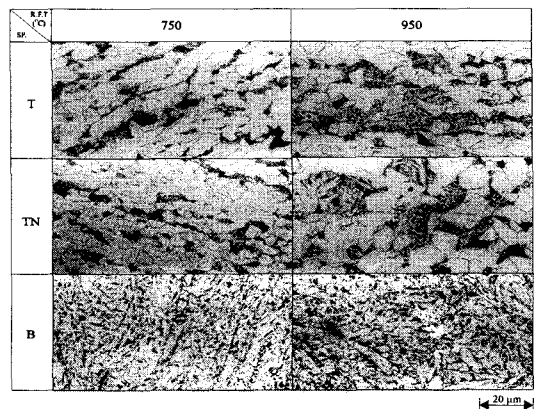
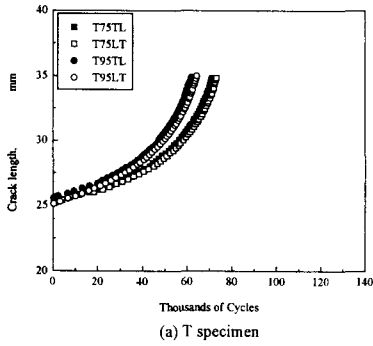
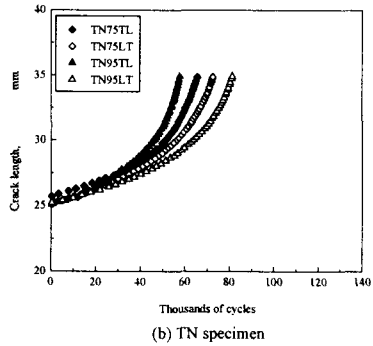


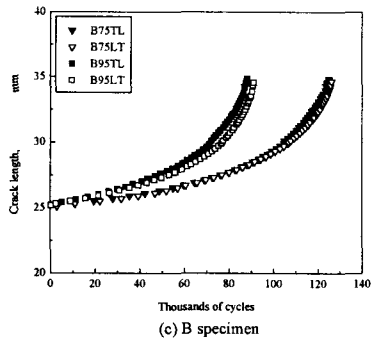
Fig.4 Optical micrographs of specimen



(a) T specimen



(b) TN specimen



(c) B specimen

Fig.5 a-N curves for chemical composition and anisotropy

Fig.5는 3종류시험편의 균열진전방향을 압연방향과 수직하게 한 시험편(LT)와 평행하게 한 시험편(TL)의 피로균열성장거동(a-N)을 나타낸 것이다. 이 그림에서 3종류 시험편 모두 압연종료 온도변화에 관계없이 피로균열진전방향이 압연방향에 평행한 시험편(TL)이 압연방향에 수직한 시험편(LT)에 비해 피로수명이 짧게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 압연방향에 평행한 시험편은 압연에 의하여 기지조직인 페라이트와 펄라이트 조직이 대체로 압연방향을 따라 길게 신연되어 있기 때문에 균열이 조직의 경계를 따라서 용이

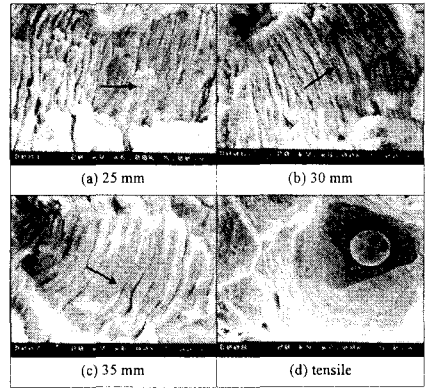


Fig.6 Fractography of T95 specimen

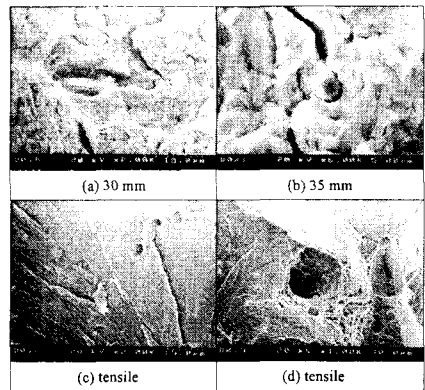


Fig.7 Fractography of B75 specimen

하게 진전하였기 때문이라 판단된다. 또한 질소의 첨가는 피로수명에 영향을 미치지 못하였다. 그러나 B시험편의 경우는 T 및 TN시험편에 비하여 피로수명은 향상되었지만, 조직이방성에 따른 피로수명의 큰 차이를 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 B시험편의 경우는 기지조직이 마르텐사이트로서 압연방향을 따라 조직이 신연되어 있지 않다. 즉, 일정한 방향을 갖지 않기 때문이라 판단된다. 피로시험과 인장시험 후 전자현미경 파면 사진을 Fig.6에 나타낸다. 이 그림은 T95시험편의 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 화살표는 피로균열 진전방향을 나타낸다. 그림에서 (a) 25mm, (b) 30mm, (c) 35mm에서 얻어진 파면은 피로파괴의 대표적인 형태인 스트라이에이션이 주로 관찰되었다. 단순인장에서 얻어진 (d)에서는 연성과피 특징인 덩플, 개재물분리 등이 관찰되었다.

이러한 경향은 T, TN 및 B시험편에서도 관찰되

었다. 그러나, B시험편의 경우에 있어서는 T 및 TN시험편에서 얻지 못했던 파단면 사진을 Fig.7에 나타낸다.

이 그림에서 피로균열길이가 30mm 및 35mm 부근에서 개재물 관통(a) 및 개재물분리(b) 등이 관찰되었다. 이것은 Fig.4의 조직사진에서도 나타나는 바와 같이 B시험편의 경우 B의 첨가에 의하여 경화능이 크게 높아지는데 기인하여 조직이 마르텐사이트 조직으로 될 뿐만 아니라, 고용되고 남은 B가 탄화물로 석출되어 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 단순인장 파면에서는 벽개파괴(c), 벽개와 덩플(d) 등이 관찰되었다. 이상의 파면관찰에서 피로시험에서는 주로 스트라이에이션이 관찰되었고, 단순인장시험에서는 벽개파괴, 덩플, 개재물분리 등의 파괴양상이 관찰되었다.

#### 4.2 주파수분석

균열진전에 따른 음향방출신호의 검출은 피로균열이 25mm, 30mm 및 35mm일 때 측정하였다. 이때 하중 반복속도는 0.5Hz로 변환하였다. 피로균열길이 25mm, 30mm 및 35mm일 때 발생하는 음향방출신호를 Joint-Time Analysis로 해석하여 Fig.8에 나타내었다. 모든 시험편에 대하여 음향방출 신호를 측정하여 주파수 분석을 하였지만, 여기서는 대표적으로 T95시험편에서 측정된 신호를 나타내었다. 이 그림에서 (a)는 균열진전이 없는 상태에서 검출된 신호로서, 주파수 분석결과 주파

수 영역이 200kHz 이하의 영역을 나타내었다. 이것은 기계적 혹은 전기적 잡음 등에 의한 노이즈로 분류하였다. (b)~(d)의 경우는 모든 시험 즉, 화학조성 변화 및 압연종료온도변화에 상관없이 피로균열이 진전할 때 나타나는 신호이다. 이것들은 200kHz 이하의 잡음이 다소 포함되어 있지만, 대부분 200~400kHz 정도의 주요 주파수 영역이 나타났다. 그리고 자세히 보면 균열길이가 증가할수록 400kHz이상의 고주파수 영역에서도 신호가 발생하고 있다. 이들 신호는 피로균열이 진전함으로써 발생하는 신호라고 판단된다. 피로 시험 중에 200~400kHz 영역에서 나타나는 음향방출신호 이외에 높은 주파수를 갖는 신호 및 단순 인장시험에서 얻어진 신호를 분석하여 Fig.9에 나타내었다. (a)는 피로균열길이가 30mm일 때 얻어진 것으로서 중심주파수가 550kHz로 피로균열 진전시 발생하는 것보다 높게 나타났다. 이것은 Fig.7의 파면사진에서 나타나는 것처럼 피로균열길이가 30mm 근방에서 개재물이 존재하고 있어서, 피로균열이 개재물을 통과할 때 나타나는 신호라고 판단된다. (b)는 피로균열길이가 35mm일 때 얻어진 것으로서 주파수 영역이 600kHz 정도로 나타났다. 이것은 Fig.7에 나타낸 것처럼 개재물의 분리시에 나타나는 신호라고 판단된다. 이런 현상은 T시험편 및 TN시험편에서도 피로균열길이가 35mm인 경우에 관찰되었다. (c)는 단순 인장 시험에서 관찰된 신호를 분석하여 나타낸

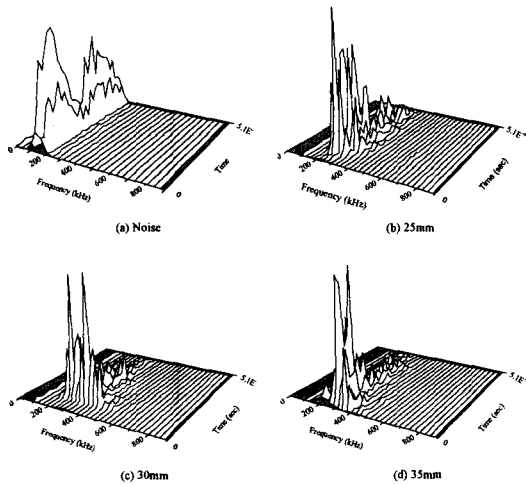


Fig.8 Time-frequency analysis for each crack length of T95 specimen

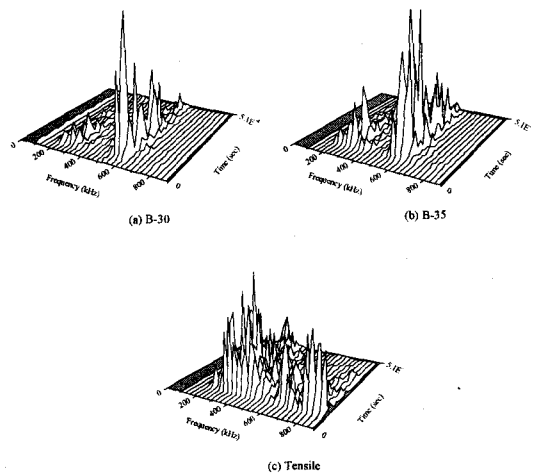


Fig.9 Time-frequency analysis for high frequency abrupt signal and tensile test of B75 specimen

낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 200kHz 이상의 모든 주파수 영역에서 신호가 관찰되었다. 이것은 Fig.7의 파면사진(c), (d)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 이 영역에서는 파괴기구가 균열진전에만 국한되어 있는 것이 아니라, 벽개, 덩플, 개재물 분리 혹은 벽개와 덩플이 동시에 나타나는 것 등의 여러 가지 복합적인 파괴기구가 동시에 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 비파괴 평가에 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하고, 피로시험과 단순 인장시험에서 발생하는 여러 가지 음향방출 신호들을 정확히 분석하고자, 고강도 내화강의 피로시험과 단순인장시험에서 발생한 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 균열 진전방향이 압연방향과 평행한 경우가 수직인 경우보다 피로수명이 짧게 나타났다. 질소 첨가는 피로수명에 영향을 미치지 못하였으며, 붕소의 첨가에 의하여 마르텐사이트 조직이 얻어진 B시편은 T, TN시험편에 비하여 피로수명이 길게 나타났다.
- (2) 검출된 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석한 결과, 잡음과 피로균열진전에 따른 주요 주파수 영역이 다름을 알 수 있었다. 또한, 벽개, 덩플, 개재물 분리 등의 복합적인 파괴기구에 의해서 발생하는 주파수 영역도 분류할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) 정희돈·권영각·장래웅·橋田俊之, 1994, "음향방출법을 이용한 글래스 복합재료의 파괴인성 및 미시파괴과정의 평가", 대한기계학회논문집, 제18권, 제6호, pp. 1338~1398.
- (2) 鄭熙敦, 高橋秀明, 1987, "AEを用いたセラミックスの熱衝撃實驗", 新素材 製品 非破壊評價シンポジウム論文集, 日本非破壊協會.
- (3) Choi, N. S. and Takahashi, K., 1990, "Characteristics of Acoustic Emission Wave Attenuation in Short Fiber Reinforced

Plastics", Composites, Vol. 24, Oct., pp. 1012~1028.

(4) Peijis, A. and Kok, J. D., 1993, "Hybrid Composites based on Polyethylene and Carbon Fibers", Composites, Vol. 24, No. 1, pp. 19~32.

(5) 오덕수·강인창, 1988, "구상흑연주철의 파괴거동에 관한 AE방법에 의한 연구(I)", 대한금속학회지, 제26권, 제3호.

(6) Y. Mori, K. Aoki, T. Magata, Y. Sakakibara, T. Ohiraand and T. Kish, 1979, "Conf. on AE and Materials Evaluation", Chelmsa College, London.

(7) Y. Nakamura, 1972, "Amplitude distribution of Acoustic Emission signals", ASTM, STP 505, pp. 164.

(8) K. Ono and H. B. Teoh, 1987, "Acoustic Emission in Fracture of structural Materials with Non-metallic inclusions", Journal of Acoustic Emission, Vol. 6, p. 1.

(9) Y. Blanchette and J. I. Dickson, 1984, "The use of Acoustic Emission to Evaluate critical values of K and J in 7050-T6H Aluminium Alloy", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 20, pp. 359.

(10) 이권찬·오정환·남기우·이주석, 1999, "열화된 SUS 강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 제19권, 제4호, pp. 270~276.

(11) Kiwoo Nam, Kunchan Lee, Jeonghwan Oh, 1999, "Application of Joint Time Frequency Analysis Methods of Nondestructive Evaluation", AMD-vol.234/NDE-vol.17, The 1999 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 14-19, 1999, Nashville, Tennessee, pp.67-74.