

맞대기 용접 이음재 인장시험에서 발생한 음향방출 신호의 웨이블릿 변환과 응용

이장규*, 윤종희+, 우창기+, 박성완**, 김봉각***, 조대희****

A Study on the Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals Generated from Fusion-Welded Butt Joints in Steel during Tensile Test and its Applications

Zhang-Kyu Rhee*, Joung-Hwi Yoon+, Chang-Ki Woo+,
Sung-Oan Park**, Bong-Gag Kim***, Dae-Hee Jo****

Abstract

This study was carried out fusion-welded butt joints in SWS 490A high strength steel subjected to tensile test that load-deflection curve. The windowed or short-time Fourier transform (WFT or STFT) makes possible for the analysis of non-stationary or transient signals into a joint time-frequency domain and the wavelet transform (WT) is used to decompose the acoustic emission (AE) signal into various discrete series of sequences over different frequency bands. In this paper, for acoustic emission signal analysis to use a continuous wavelet transform, in which the Gabor wavelet base on a Gaussian window function is applied to the time-frequency domain. A wavelet transform is demonstrated and the plots are very powerful in the recognition of the acoustic emission features. As a result, the technique of acoustic emission is ideally suited to study variables which control time and stress dependent fracture or damage process in metallic materials.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Load-deflection Curve(하중-일변형 곡선), Fusion-Welded Butt Joints(맞대기 용접 이음), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 분석), Windowed or Short-Time Fourier Transform(국소 푸리에 변환), Continuous Wavelet Transform(적분 웨이블릿 변환), Gabor Wavelet(가보 웨이블릿), Gaussian Window Function(가우시안 창문함수)

* 주저자, 인천대학교 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)

주소: 402-749 인천시 남구 도화동 177

+ 인천대학교 기계공학과

++ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과

+++ 충청대학 항공기계설계학부

**** 발표자, 인천대학교 교육대학원 기계교육전공

1. 서론

물체가 내부 또는 외부의 응력에 의해 변형되면 작용응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 독특한 소리를 내게 된다. 이처럼 물체의 변형 또는 파괴 시에 발생하는 물리적인 현상을 공학적인 측면에서 이용하려는 노력이 계속되어 음향방출법(AE, acoustic emission)으로 자리잡게 되었는데⁽¹⁾, 음향방출의 신호처리에서 물리적인 파라미터가 시간과 주파수 모두에 관련될 경우에는 물리적인 파라미터를 어떠한 방법으로 추출하느냐 하는 것이 관건이 된다.

신호처리법의 일종인 푸리에 변환(FT, Fourier transform)은 주어진 함수 혹은 신호의 주파수에 대해서는 완전한 정보를 제공하기 때문에 신호처리 및 미분방정식의 해법에 많이 사용되었으나, 신호가 발생한 시간에 대해서는 아무런 정보도 가지고 있지 않아 특성상 주파수 영역에서만 신호를 분석할 수밖에 없어 신호의 시간 정보와 주파수 정보를 동시에 파악할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 그래서, 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 고전적인 푸리에 변환이 가지는 단점을 보완하여 푸리에 빌딩블록에 창문함수(window function)라 불리는 시간에 의존하는 가중함수를 붙인 시간-주파수 분석법인 국소 푸리에 변환이 도입되었는데, 그 대표적인 것이 가우시안 함수(Gaussian function)를 창문함수로 이용한 가보 변환(Gabor transform)이다⁽²⁾.

이와 같은 시간-주파수 표현은 푸리에 변환과 같은 선형 표현과 에너지 분포로 정의되는 2차 표현인 파워 스펙트럼으로 분류할 수 있다. 선형표현에는 국소(또는 단시간) 푸리에 변환(WFT or STFT, windowed or short-time Fourier transform), 가보 확장(Gabor expansion), 웨이블릿(wavelet) 등이 있으며, 에너지 개념으로 사용되는 2차 표현은 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution) 등이 있다. 여기서, 국소 푸리에 변환 및 위그너-빌 분포와 같은 기법들은 재료내의 초음파 결합신호의 시간과 주파수 특성을 나타낼 수 있어 탄성파의 전파거동을 각 주파수 성분마다 분해할 수 있기 때문에 분산관계를 용이하게 분석할 수가 있다. 그러나, 국소 푸리에 변환은 시간-주파수 분해능이 일정하기 때문에 광범위한 주파수에 대한 분석에 있어서 불편하고, 또한 위그너-빌 분포는 적절한 시간-주파수 분포를 얻기 위하여 부가적인 처리를 필요로 하는 등, 종래의 시간-주파수 분석법에는 제한이 있었다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위한 새로운 신호처리법으로 시간-주파수 분석에 있어 웨이블릿 변환(WT, wavelet transform)⁽²⁾이 각광을 받게 되었다.

Serrano 등⁽³⁾은 음향방출 신호의 분석에 웨이블릿 변환이

사용될 수 있음을 보였고, Qi 등⁽⁴⁾은 복합재의 인장시험에서 발생하는 음향방출 신호의 분석에 이산 웨이블릿 변환을 사용하여 웨이블릿 변환의 결과와 음향방출 신호의 이벤트와의 관계를 연구하였으며, 이산 웨이블릿 변환에 기초한 음향방출 신호의 분석이 복합재의 파괴 거동을 예측하는데 있어 기존의 방법보다 우수하다고 보고하였다. 또한 Suzuki 등⁽⁵⁾은 적분(또는 연속) 웨이블릿 변환을 이용하여 GFRP 복합재의 인장시험에서 발생하는 음향방출 신호를 분석하여 시간-주파수 평면에 도시하여 웨이블릿 변환의 유효성을 보였으며, Abbate 등⁽⁶⁾은 초음파 신호에 적분 웨이블릿 변환을 적용한 잡음저감법(noise reduction)으로 신호에 포함된 잡음 제거(denoising)를 통하여 원 신호를 복원하는데 웨이블릿 변환이 효과적임을 보였고, Wang 등⁽⁷⁾은 적분 웨이블릿 변환을 이용하여 기어박스에서 발생하는 진동신호를 분석하여 결함을 추적하였다.

본 연구에서는 용접재의 주 파괴원인인 열영향부와 함께 용접비드부에 대하여 인장시험시 검출된 음향방출 신호의 시간-주파수 분석을 통해 전체 파괴기구의 특징을 규정지을 수 있도록 하였다.

2. 관련 이론

Fig. 1에서와 같이 국소 푸리에 변환은 주파수 영역과는 독립적인 창문함수를 기존의 푸리에 변환에 가중함수로 붙여 사용하므로, 분석 영역이 시간-주파수에 대해 항상 일정하다. 따라서 시간의 변화에 따라 확실적인 특성이 변하는 약정상 신호(non-stationary signals)를 효율적으로 분석할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

웨이블릿 변환은 이러한 단점을 보완하여 국소 푸리에 변환보다 더 효율적인 시간-주파수 분석을 가능하게 한다. 웨이블릿 변환은 적절히 주어진 기본함수(basis function)를 팽창 또는 수축으로 척도구성(scaling)하고 이동(shift)한 결과로 생기는 함수들을 (쌍대)빌딩블록으로 이용하기 때문에 분석영역이 시간-주파수 축에 대해 유연하다. 팽창은 척도구성 모수(scaling parameter)에 의해 조절되고, 이는 적당한 주파수 대역(frequency band)에 대응된다. 이동은 시간축에 대한 것이며 이동 간격은 척도구성 모수에 따라 다르다.

한편 최근에 시간-주파수 국소화를 효율적으로 구현할 수 있는 새로운 적분변환이 등장했는데, 적분 웨이블릿 변환이 그것이다. 어떤 고정된 함수 ψ 에 대하여 이 함수를 일반적으로 웨이블릿(wavelet) 또는 모웨이블릿(mother wavelet)이라 한다.

시간 t 의 함수 $f(t)$ 의 웨이블릿 변환 [WTS]는 식 (1)로 정의된다⁽²⁾.

$$[WTS](a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

식 (1)에서 보는바와 같이 웨이블릿 변환의 결과인 웨이블릿 계수는 a, b 의 함수이며, a 는 주파수와 관련된 척도구성으로 양수이고, b 는 시간 축에서의 이동을 나타내며, $\bar{\psi}$ 는 모웨이블릿 ψ 의 공액복소 성분을 나타낸다.

본 연구에서는 모웨이블릿으로 가우시안 함수(Gaussian function)를 창문함수로 이용한 식 (2)와 같은 가보 함수(Gabor function)를 사용하였으며, 그에 대한 푸리에 변환은 식 (3)과 같다⁽⁵⁾.

$$\psi(t) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{w_0}{\gamma}} e^{-\frac{t^2}{2}\left(\frac{w_0}{\gamma}\right)^2 + iw_0 t} \quad (2)$$

$$\hat{\psi}(w) = \sqrt{2\pi} \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{w_0}{\gamma}} e^{-\frac{t^2}{2}\left(\frac{w_0}{\gamma}\right)^2 (w-w_0)^2} \quad (3)$$

여기서, w_0 는 모웨이블릿의 중심주파수이다.

한편 가보 함수는 엄밀하게 말하면 모웨이블릿이 될 수 없지만, $\gamma = \pi\sqrt{\frac{2}{\ln 2}} \approx 5.336$ 으로 하여 근사적인 모웨이블릿으로 많이 사용된다.

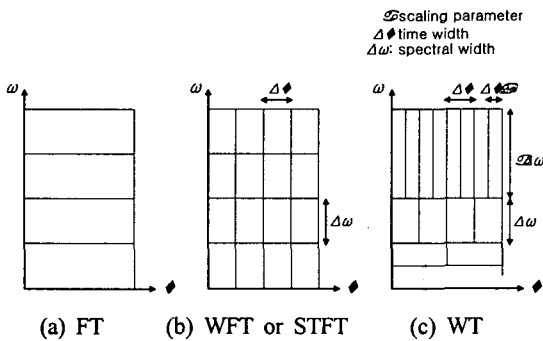


Fig. 1 The corresponding resolution on the time-frequency plane

3. 실험 재료 및 방법

3.1 실험재료 및 시험편

인장시험편은 POSCO에서 생산한 SWS 490A 고장력강을 모재(base metal)로 하여 시료를 채취한 후, KS B 0833(2001. 1. 16 개정) 및 KS B 0864(2001. 1. 16 폐지)

「강의 맞대기 용접 이음-인장 시험 방법」 규격⁽⁸⁾에 따라 Fig. 2와 같이 제작하였다. 실험에 사용한 시험편의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다.

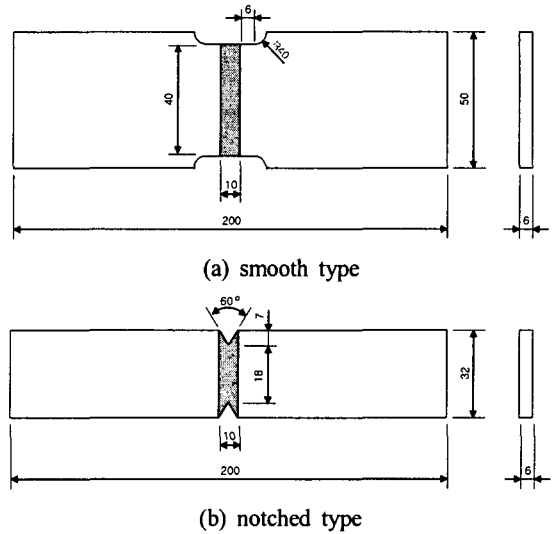


Fig. 2 Geometry of test specimen(unit:mm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SWS 490A(wt.%)

C	Si	Mn	S	P
0.086	0.065	1.29	0.018	0.004
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)
380		493		23

3.2 실험방법

본 연구에서는 Autograph 25-TG(Shimadzu, Japan) 인장시험기의 크로스헤드 속도를 2mm/min로 설정하고, 인장시험시 발생하는 AE 원 신호를 Spartan 2000(PAC, USA)의 TRA-212 모듈을 통하여 획득하였다.

AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 R15(공진주파수 150kHz, PAC) 센서를 용접부의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 각각 30mm 떨어진 위치(센서#1 (0, 30), 센서#2 (0, -30))에 고진공 그리스를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고, 샤프심 압철을 통하여 캘리브레이션 실시, 압착여부를 확인하였다⁽⁹⁻¹¹⁾. 또 전치증폭기(1220A, PAC)의 이득(gain)을 40dB로 설정하고, 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하여 신호대 잡음비(SNR,

signal-to-noise ratio)를 높였으며, 검출된 아날로그 AE 신호는 주증폭기에서 20dB로 2차 증폭하여 웨이브 메모리에 디지털 데이터로 변환하여 저장하였다. 본 실험에서의 AE 계측조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental condition

Threshold (dB)	Gain (dB)	PDT (μsec)	HDT (μsec)	HLT (μsec)
Fixed, 40	20	300	600	1,000

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 맞대기 용접 이음한 평활재 및 노치재 인장시험편의 인장시험 결과로부터 구한 하중-에너지-진폭 및 시간의 대표적인 선도이며, 시간-주파수 영역에 대한 고찰을 위하여 주파수 분석(TRA-212 module) 실험에서 얻은 결과 중 고찰의 대상이 되는 부분에 대하여 하중-시간 그림 내에 알파벳 순으로 표기하였다.

Fig. 3 (a)의 평활재 인장시험편 즉, 열영향부의 경우에는 AE 신호가 초기부터 심하게 발생하여 재료의 항복점 근처에서 높은 AE 에너지 값을 보이며, 그 후에도 상당한 양의 AE 에너지가 검출되고 최대하중을 넘어서는 영역에서는 AE 에너지가 점차 감소하면서 최종 파단에 이르고 있다. 그러나, Fig. 3 (b)의 노치재 인장시험편 즉, 용접비드부의 경우에는 인장 초기부터 파단 시까지 비교적 낮은 AE 에너지 값을 보이며 거의 편차 없이 최종 파단에 이르고 있다.

여기서 AE 에너지를 균열발생에 관한 정보량으로, AE 진폭을 micro-crack의 상대적인 크기로 표현할 수 있다. 열영향부의 경우에는 40~100dB의 진폭을 보이고 있는데 반해, 용접비드부의 경우에는 40~80dB의 진폭에 걸쳐 분포하고 있다. 다시 말해, 열영향부가 용접비드부에 비해 최대진폭이 보다 큰 값을 보이고 있다. 이와 같이 열영향부의 경우 AE 진폭이 보다 크게 나타난 것은 일정한 인가하중에서 발생한 micro-crack의 크기가 용접비드부에 비해 크다는 것을 의미한다.

또한, Fig. 3의 적분 웨이블릿 변환 결과인 Fig. 4로부터 강재의 경우 탄·소성변형에 의해 방출되는 AE 주파수는 약 100~300kHz이고, 그 중심주파수는 약 130~180kHz인 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 인장시험을 실시하자마자 높은 수치를 갖는 AE 신호가 방출되는 경우는 거의 없으며, 어느 정도의 가해주는 응력에 의해 변형이 수반되고 난 후부터

AE 신호가 검출된다는 점에서 볼 때, 본 실험의 경우 시험 초기에서부터 AE 신호가 검출되는 것은 평활재 및 노치재 인장시험편 모두 기계적인 변형에 의한 것은 아니라고 생각된다.

Fig. 4 (a)의 평활재 인장시험편에 대하여 a는 저진폭 크기에 중심주파수가 약 180kHz이며, b는 a에 비하여 진폭의 크기는 다소 감소했으나, 약 100~300kHz의 중심주파수를 갖는 것으로 나타났다. 그림에서 보는바와 같이 a~b까지는 특이할 만한 AE 신호가 거의 나타나지 않다가, 이후부터 여러 가지 형태의 AE 신호가 다수 발생하는 점으로 보아 초기에 하중이 가해지는 단계에서는 용접재에 가해진 응력에 충분히 견디는 구간으로 볼 수 있으며, 이는 micro-crack이 형성되고 있지 않음을 의미한다.

그러나 c에서는 돌발형 AE 신호의 발생과 함께 진폭의 크기가 급격히 증가하고 있으며, 그 중심주파수가 약 130, 180 및 230kHz대에 걸쳐 피크치가 넓게 분포하고 있는데, 이는 소성변형 초기과정에서 개재물과 같은 불연속부에 응력이 집중되어 모재와의 박리현상에 의해 공극이 생성되고, 이 때의 응력변화가 고진폭 크기의 주파수를 갖는 AE 신호로 방출되는 것으로 생각된다.

한편, d~g의 구간은 진폭의 크기가 증가와 감소를 반복하는데, 이는 소성변형에서 생성된 공극이 응력의 증가에 따라 서로 합체되고 주균열로 발전·진전함으로써 진폭크기의 증가와 감소를 유발하는 것으로 생각된다.

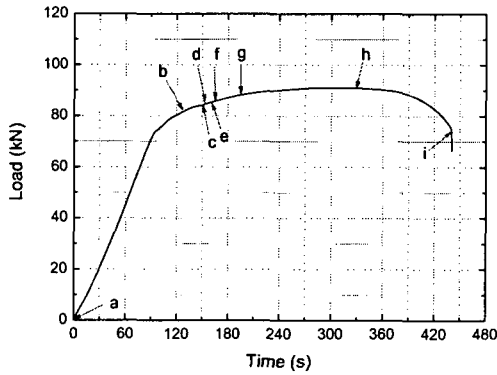
그리고 h는 모재균열이 충분히 성장한 상태로 진폭의 크기가 오히려 감소하였으며, 약 180kHz대의 중심주파수를 보이고 있다. 초기단계 이후에 작용하중의 증가와 더불어 많은 양의 AE 에너지가 최대하중까지 지속적으로 발생하고 있는데, 이는 최대하중까지 다수의 micro-crack이 지속적으로 재료내부 또는 표면에서 발생함과 동시에 균열간의 합체가 이루어지는 것으로 추정된다. 또한, 최대하중 이후에도 비교적 많은 양의 AE 에너지가 발생하고 있다. 이와 같이 용접재의 AE 활성화(AE activity)가 활발하게 이루어지고 있다는 것은 용접 열영향부의 특이성 즉, 용접 열영향부는 국부적으로 기계적 성질이 다르기 때문에 균열의 꺾임(deflection) 현상 등이 발생하고 지그재그 형태로 균열이 진전하기 때문이며, 계속된 하중에 의해 균열들의 합체가 수많은 곳에서 일어나기 때문에 비교적 높은 AE 에너지가 발생하는 것으로 생각된다.

마지막으로 i는 시험편 파단 즉, 열영향부의 파괴상태를 의미하며 파단 시 진폭크기의 급격한 증가와 더불어 넓은 중심주파수 범위를 갖는 것으로 나타났다.

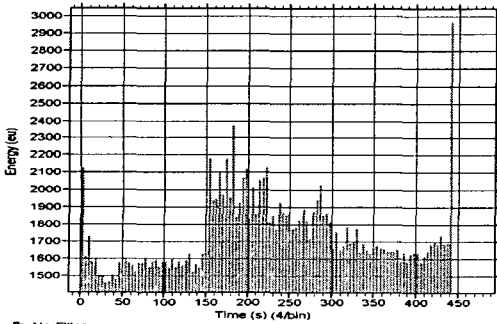
Fig. 4 (b)의 노치재 인장시험편에 대하여 a는 하중의 초기 상태로 저진폭 크기에 중심주파수가 약 180kHz이며, b는 a에 비하여 진폭의 크기가 다소 증가하였고, 약 100~300kHz의 중심주파수를 갖는 것으로 나타났다.

한편, c는 초기 단계에 비하여 진폭의 크기는 크게 증가하는 것으로 나타났지만, 평활재 인장시험편에 비하여 상대

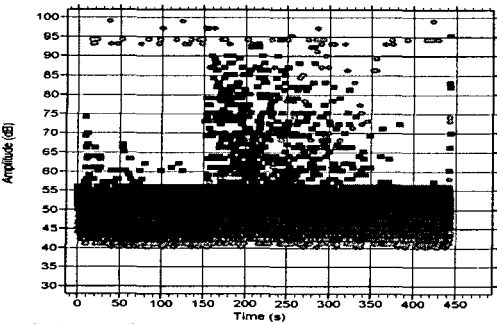
적으로 그 크기가 작으며, 중심주파수는 약 130~180kHz로 평활재 인장시험편과 유사한 것으로 나타났다. d~e의 구간에서는 진폭의 크기가 감소와 증가를 반복하며 돌발형 AE 신호가 검출되기 시작하였고, 마찬가지로 f는 시험편 파단 즉, 용접비드부의 파괴이며 평활재 인장시험편과 같이 넓은 범위의 중심주파수를 갖는 것으로 나타났다.



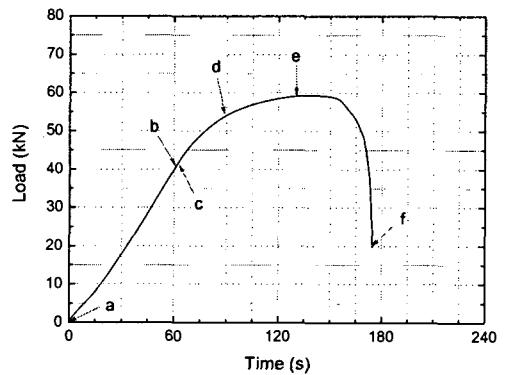
Load vs. time



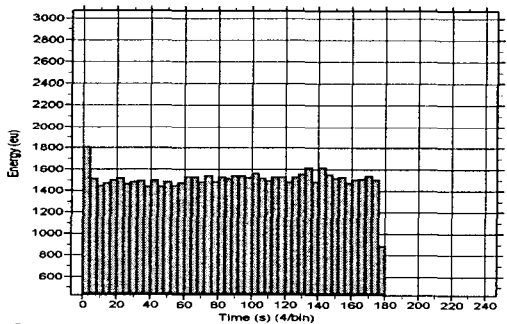
Energy vs. time



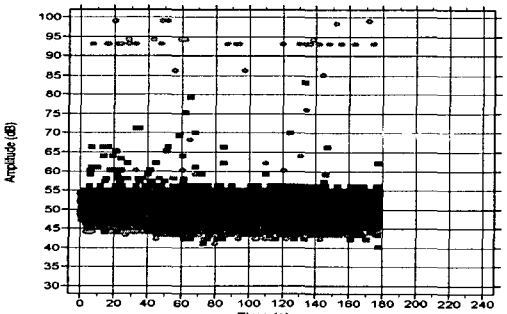
Amplitude vs. time
(a) smooth type



Load vs. time



Energy vs. time



Amplitude vs. time
(b) notched type

Fig. 3 The results of load-deflection curve

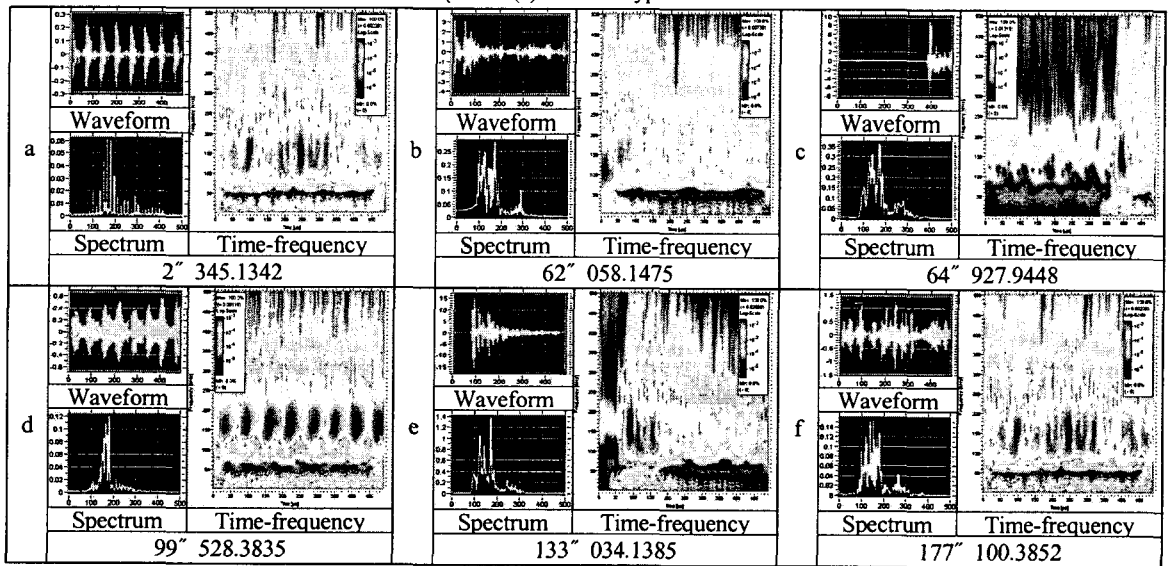
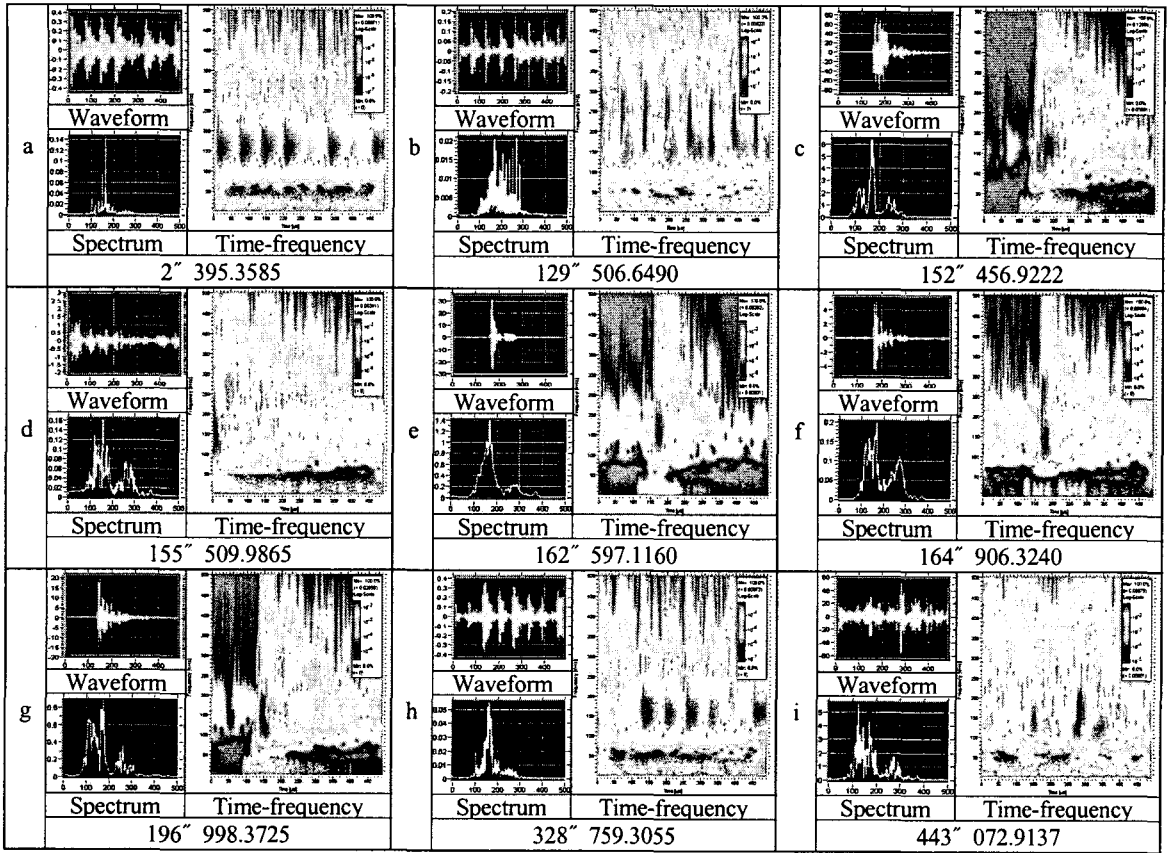


Fig. 4 The results of wavelet transform to load-deflection curve

Fig. 4의 적분 웨이블릿 변환에 의한 결과를 요약하면 Table 3처럼 정리되며, 여기서 진폭의 크기와 중심주파수 분포는 파괴기구와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

Table 3 The results of analysis given as Fig. 4

(a)	Center frequency(kHz)	Waveform	p-p(mV)
a	180	continuous type	small
b	100~300	"	small
c	130, 180, 230	burst type	large
d	130~180, 230~280	"	small
e	130~180	"	medium
f	110~180, 230~250	"	small
g	100~180, 250	"	medium
h	180	"	small
i	110~180, 250~280	continuous type	large

(b)	Center frequency(kHz)	Waveform	p-p(mV)
a	180	continuous type	small
b	100~200, 300	continuous type (decreasing amplitude)	medium
c	130~180	burst type	large
d	180	continuous type (increasing amplitude)	small
e	130~180	burst type	large
f	130~180, 250	continuous type	medium

5. 결론

맞대기 용접 이음한 SWS 490A 고장력강의 인장시험에서 얻은 AE 신호를 적분 웨이블릿 변환하여 시간-주파수 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

강재의 경우 탄·소성변형에 의해 방출되는 AE 주파수는 약 100~300kHz이고, 중심주파수는 약 130~180kHz인 것으로 나타났다. 그 결과 AE 신호의 진폭분포에 대한 파괴기구 및 균열진전 과정에 대하여 저진폭의 AE 신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE 신호는 모재파괴에 각각 대응됨을 확인하였다. 이처럼 AE 신호의 시간-주파수 분석에 의한 균열진전 과정의 해석을 통해 전체 파괴기구의 특징을 규정 지을 수 있음을 시사하였다.

참고문헌

(1) Miller, R. K., and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT.

(2) Chui, C. K., 1992, *An Introduction to Wavelets*, Academic Press, Inc., New York.

(3) Serrano, E. P., and Fabio, M. A., 1996, "Application of the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signal Processing," *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol. 44, No. 5, pp. 1270~1275.

(4) Qi, G., and Barhorst, A. A., 1997, "On Predicting the Fracture Behavior of CFR and GFR Composites Using Wavelet-Based AE Techniques," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 58, No. 4, pp. 363~385.

(5) Suzuki, H., Kinjo, T., Hayashi, Y., Takemoto, M., and Ono, K., Appendix by Hayashi, Y., 1996, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 14, No. 2, pp. 69~84.

(6) Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S. C., and Das, P., 1997, "Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor: Application to Ultrasonic Flaw Detection," *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 44, No. 6, pp. 1382~1394.

(7) Wang, W. J., and McFadden, P. D., 1996, "Application of Wavelets to Gearbox Vibration Signals for Fault Detection," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 192, No. 5, pp. 927~939.

(8) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0833*, KSA.

(9) Laird, J. D., 1997, *Acoustic Emission Training Guide: How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission*, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.

(10) Rhee, Z. K., Woo, C. K., Park, S. O., Yoon, J. H., Cho, J. H., Kim, B. G., and Koo, Y. D., 2004, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(1)," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 113~120.

(11) Rhee, Z. K., and Woo, C. K., 2005, "Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. ???~???