

음향방출기법을 이용한 PC기반 위치표정시스템 개발에 관한 연구

A Study of the Development of PC-Based Source Location System using Acoustic Emission Technique

이민래*[†], 이준현**

M. R. Lee*[†] and J. H. Lee**

초 록 구조물의 안전성평가와 관련하여 비파괴평가 방법 중에서 음향방출(acoustic emission, AE)기법에 의한 비파괴적 결함 발생 검출 기법은 다른 기법에 비해 비교적 새로운 평가기술로서 구조물의 이상 유무를 조기에 진단하고 주기적으로 감시할 수 있는 온-라인 모니터링에 적합하다. 그러나 한편, 국내에서는 아직까지 이에 대한 체계적인 연구가 미비한 실정이며, 대부분 값비싼 외국 시스템을 도입하여 사용하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 기존의 음향방출 시스템은 장치의 특성상 시스템이 매우 복잡하고 가격이 고가인 관계로 다양한 산업분야에서 실제 현장에 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존의 음향방출 시스템이 가지고 있던 불필요한 낭비적인 요소들을 제거하고 실제 산업현장에 부합하는 위치표정 시스템을 개발하고자 하였다. 한편, 기존의 AE 시스템들은 위치표정을 위한 신호분석이 난해할 뿐만 아니라 박판 구조물의 경우는 위치표정이 매우 어렵다. 본 연구에서는 시간-주파수 해석에 널리 사용되고 있는 웨이블릿 기법을 이용하여 보다 정확한 위치표정을 진단하는 기법을 수행하였다.

주요용어: 음향방출, 온-라인 모니터링, 위치표정기법, 웨이블릿, 신호분석

Abstract Acoustic emission (AE) technique has been applied to not only mechanical property testing but also on-line monitoring of the entire structure or a limit zone only. Although several AE devices have already been developed for the on-line monitoring, the price of these systems is very high and it is difficult for the field to apply yet. In this study, we developed a specially designed PC-based source location system using the A/D board. The source location technique is very important to identify the source, such as crack, leak detection. However, since the AE waveforms obtained from transducers are very difficult to distinguish the defect signals, therefore, it is necessary to consider the signal analyses of the transient waveform. Wavelet Transform (WT) is a powerful tool for processing transient signals with temporally varying spectra that helps to resolve high and low frequency transient components effectively. In this study, the analyses of the AE signals are presented by employing the WT analyses. AE results are compared the PC-based source location system using A/D board with the commercial AE system.

Keywords: acoustic emission, on-line monitoring, source location technique, wavelet, signal analysis

1. 서 론

구조물의 안전성평가와 관련하여 비파괴평가방법

중에서 음향방출(acoustic emission, 이하 AE)기법 [1]에 의한 비파괴적 결함 발생 검출 기법은 다른 기법에 비해 비교적 새로운 평가기술로서 구조물의

이상 유무를 조기에 진단하고 주기적으로 감시할 수 있는 온-라인 모니터링에 적합하다. 음향방출기법의 적용분야는 고압용기, 배관 등의 실시간 감시 [2,3] 뿐만 아니라 균열발생[4] 및 재료특성평가[5]에 널리 이용되고 있다. 특히, 음향방출기법은 기존의 비파괴 평가기법 중에서 실시간으로 이상 유무를 진단할 수 있는 동적 특징을 가지고 있는 유일한 평가기법으로 사용되고 있다. 이러한 이유로 일찍이 배관, 압력용기 등의 대형 구조물의 균열 존재 유무 및 균열진전, 균열발생위치 등의 온-라인 모니터링 평가방법으로 많은 연구가 진행되어 왔다 [6-10].

한편, 국내에서는 아직까지 이에 대한 체계적인 연구가 미비한 실정이며, 대부분 값비싼 외국 시스템을 도입하여 사용하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 기존의 음향방출 시스템은 장치의 특성상 시스템이 매우 복잡하고 가격이 고가인 관계로 다양한 산업분야에서 실제 현장에 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존의 음향방출 시스템이 가지고 있던 불필요한 낭비적인 요소들을 제거하고 실제 산업현장에 부합하는 멀티-채널(multi-channel) 위치표정 시스템을 개발하고자 하였다.

한편, 일반적인 위치표정 기술은 여러 개의 센서에서 감지된 탄성파의 파형 시간차(arrival time)를 이용하여 위치를 측정하는 방법이 널리 사용되어져 왔다[11,12]. 특히, 두꺼운 구조물의 경우는 측정된 신호의 도달시간차를 이용하여 일정 문턱값(threshold level)를 통과하는 신호의 전파시간을 계산함으로써 발생원 위치를 결정한다. 그러나 박판 구조물이나 복합재료와 같이 비균질 매질일 경우는 대칭모드와 비대칭모드로 나누어지는 판파특성 때문에 탄성파의 전파속도가 위치에 따라 달라지므로 특정 모드의 신호를 사용하여 결함의 발생위치를 추정하는 것은 매우 어렵다.

따라서 이러한 박판에서의 위치표정을 위해서 웨이블릿 변환 기법과 벡터법과 같은 기법들을 이용한 연구가 진행 중에 있다[13,14].

본 연구에서는 위치표정시스템의 핵심기술인 위치표정기법 개발에 연구의 목적이 있으며, 이를 위해서 본 연구는 웨이블릿(wavelet) 기법을 적용하여 위치표정기법으로서의 타당성을 평가하였다. 또한 PC를 기반으로 하는 위치표정시스템 개발을 위하여 종래의 위치표정 방식을 이용한 위치표정 기법에 대한 연구에 대해서 논의 되었으며, 현재 박판

구조물에서의 실시간 위치표정을 위한 시스템 및 위치표정기법에 대한 지속적인 연구를 수행 중에 있다.

2. 이론

2.1. 2차원 위치표정 기본 이론

2차원 AE 발생원 위치 추정은 센서의 위치선정에 따라 1차원적인 선형적(linear) 방법 및 2차원적인 삼각법(triangle), 사각법(rectangle) 등의 여러 가지 방법들이 제안되고 있지만 본 연구에서는 시험체의 규격을 고려한 예비 실험을 통해 2차원적인 삼각법 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다. 삼각법 방법은 Fig. 1와 같이 센서1, 센서2, 센서3를 시험체에 부착하고 발생원에서 센서1과 센서2에 수신되는 신호의 시간차(Δt_1), 또는 발생원에서 센서1과 센서3에 수신되는 신호의 시간차(Δt_2)와 재료의 속도(V)와의 곱은 식(1a), (1b)와 같이 항상 일정한 값을 가지기 때문에 이를 이용하면 그림과 같은 각각의 센서 방향에 대한 쌍곡선을 얻을 수 있다. 그리고 각 센서에서 AE 발생원까지의 거리는 다음 식(2a), (2b)에 의해 구할 수 있으며 이렇게 구한 세 쌍곡선의 교점을 구하면 그 교점의 위치가 AE 발생원의 위치가 되는 것이 삼각법 방법이다.

$$\Delta t_1 V = \vec{r}_1 - \vec{R} \quad (1a)$$

$$\Delta t_2 V = \vec{r}_2 - \vec{R} \quad (1b)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad (2a)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta_2)} \quad (2b)$$

여기서,

\vec{r}_1, \vec{r}_2 = AE 발생원에서 센서2, 센서3 사이의 위치벡터

\vec{R} = AE 발생원에서 센서1 사이의 위치벡터

D_1, D_2 = 센서1에서 센서2, 센서3 사이의 거리

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ = 기준선과 센서2, 기준선과 발생원, 기준선과 센서3 사이 각도

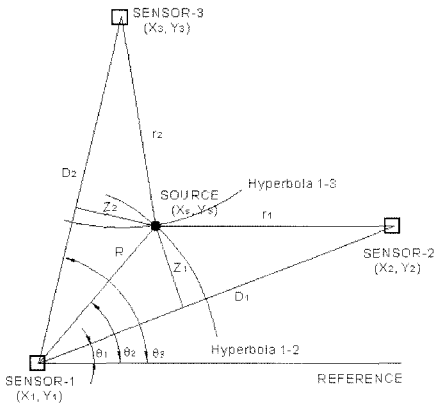


Fig. 1 AE source location in two dimension

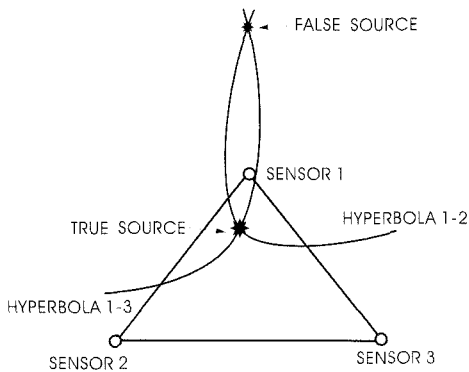


Fig. 2(a) Situation giving rise to double intersection of hyperbola and a false source indication

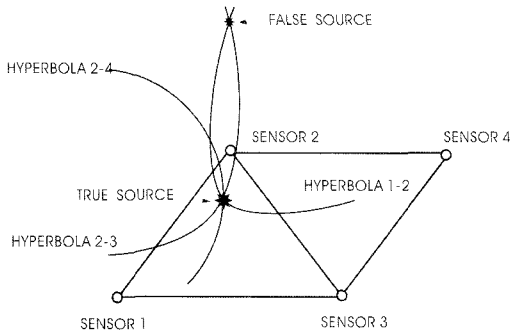


Fig. 2(b) Addition of a fourth sensor to define the true source when double intersection of hyperbola occurs

한편, 오차보정은 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이, 2개의 센서로부터 측정된 신호에 의해서 하나의 쌍곡선을 형성하게 되고, 여기에 제 3의 센서를 설정하면 또 다른 쌍곡선을 형성하여 두 쌍곡선의 교점으로부터 발생원의 위치를 결정한다. 하지만 Fig. 2(a)와 같이 쌍곡선의 교점이 2개인 경우에는 오차를 보정하기 위해서 Fig. 2(b)와 같이 제 4의 센서를 설정하여 세 쌍곡선의 교점을 이용하여 보다 정확한 발생원의 위치를 평가한다.

2.2. 웨이블릿 변환기법 기본이론

웨이블릿(wavelet, 이하 WT)은 주파수 내의 창으로 변환하기 위한 시간 영역 내의 조정이 용이한 점이 단시간 주파수변환 스펙트로그램(short time fourier transform spectrogram, 이하 STFT)와 유사하지만, WT는 주파수 내의 단일 함수를 판단하기 위해 시간 영역 내에서 scaling을 사용한다. 이 함수를 일반적으로 mother wavelet $h(t)$ 라고 하며 square integral signal $s(t)$ 에 대한 WT 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$w_s(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) h_{a,b}^*(t) dt \quad (3a)$$

그리고

$$h_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} h\left[\frac{(t-b)}{a}\right] \quad (3b)$$

여기서, 기호 *는 공액 복소수를 의미하며, $a(>0)$ 와 b 는 각각 주파수의 지연 scale과 시간 변위를 나타낸다. 한편 $h(t)$ 는 기본 WT 함수(mother wavelet)로서 Gaussian 창함수를 씌운 복소수 sine 형태의 함수로서 다음과 같다.

$$h(t) = \pi^{\frac{1}{4}} \frac{\sqrt{\omega_0}}{\gamma} \exp\left[-\frac{(\omega/\gamma)^2 t^2}{2}\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (4a)$$

여기서, ω_0 , γ 는 양의 상수이며, WT 함수는 발산하지 않고 일정한 영역의 값을 가져야 하므로 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{h(\omega)}{\omega} d\omega = c < \infty \quad (4b)$$

여기서, $\omega = 2\pi f$ 는 각(angular)주파수이며, $h(\omega)$ 는 mother wavelet $h(t)$ 의 Fourier 변환이다. 한편 본 연구에서 사용한 Gabor함수 $h(t)$ 는 중심시간이 $t=0$ 이고 중심 주파수가 $\omega = \omega_0$ 이며 $h(\frac{t-b}{a})$ 는 중심시간이 $t=b$ 이고 중심 주파수가 $\omega = \omega_0/a$ 가 된다. 이산화된 a 와 b 값은 다음 식 (5)와 같이 주어진다.

$$a = 2^{m/4}, \quad b = n\Delta t \tag{5}$$

여기서 m, n 은 정수이고 Δt 은 시간 이동간격이다. 즉 주파수 분해간격은 2의 지수승으로 증가되며 주파수 분해간격을 줄이기 위해서는 4보다 큰 값으로 m 을 나누어주면 된다.

3. 위치표정시스템의 개발

3.1. 시스템 구성

교량이나 원자로 압력용기와 같은 대형 구조물들은 안전을 유지하기 위하여 상시 모니터링이 필수적이지만 현재 선진 외국 기술 의존도 매우 높은 실정이다. 따라서 현 시점에서 이러한 연구개발은 기존의 고가 장비의 낭비적인 요소들을 절감할 수 있을 뿐 아니라 관련 산업에 기술 축적을 통해서 설비 안전성 및 유지 보수에 크게 기여할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 음향방출기법을 이용한 위치표정 시스템을 개발하고자 하였으며 Fig. 3은 A/D보드(analog/digital board)를 이용한 위치표정 시스템의 전체적인 개요도를 나타낸 것이다.

시스템의 전체 구성은 1) 신호입력부, 2) 신호증폭부 및 3) 신호처리부로 구성하였으며 현재 구현된 신호 입력부에서는 기존의 상용장비와 같은 감도를 나타내기 위해서 파워 서플라이(power supply)를 통하여 일정 전압(28 V)이 공급되도록 구현하였다.

먼저 AE센서를 이용하여 측정된 AE신호는 프리앰프를 통하여 40 dB로 증폭시켰으며 주변잡음을 제거하기 위하여 100-300 kHz의 대역필터를 통하여 필터링 시켰다. 그런 다음 20 MHz 샘플링의 고속 A/D보드를 통하여 신호를 취득한 후 AE신호에 대

한 도달시간차를 계산하여 위치표정을 평가하였다.

본 실험에 사용된 센서는 공진형 센서 (R15, PAC) 및 광대역 센서(WD, PAC)를 각각 사용하였으며, 향 후 박판구조물이나 복합재료의 경우 음향 방출 신호의 특성이나 주파수성분이 여러 가지로 혼재되어 있기 때문에 신호를 계측할 경우 보다 광범위한 광대역 센서를 사용하는 것이 타당하리라 판단된다. Fig. 4는 본 연구에서 개발 중인 위치표정 시스템의 전체 사진을 나타낸 것이다.

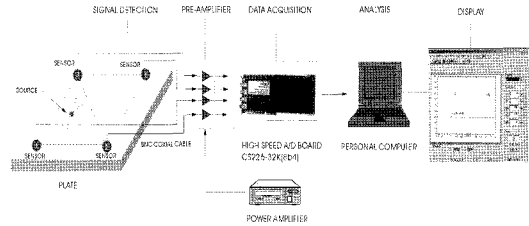


Fig. 3 Schematic diagram for source location system

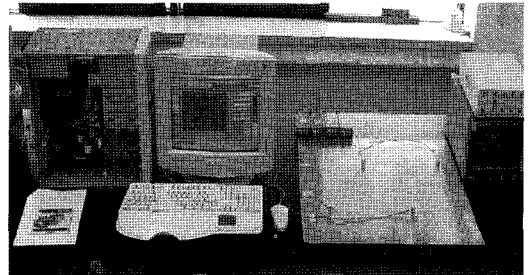


Fig. 4 Photograph of PC-based source location system

3.2. 프로그램 구성

본 연구의 시스템은 위치표정 목적 이외에도 평상시 누설신호와 같은 데이터를 진단하는 목적을 가지고 있다. 따라서 개발 중인 AE 모니터링 시스템의 프로그램은 현재 누설 신호와 같은 연속신호들을 화면에 실시간으로 표시해 주는 기능을 가지고 있으며, 또한 본래의 목적인 AE위치표정 기능을 수행하기 위한 도구를 제공하고 있다. 특히 위치표정모드로는 1차원 위치표정모드(one dimensional mode)와 2차원 위치표정모드(two dimensional mode)로 되어있으며 2차원 위치표정 모드에는 오차 보정을 위한 웨이블릿 변환 모드와 벡터법 변환 모드가 내장되어있다.

Fig. 5는 실시간 파형분석을 위한 화면을 나타낸 그림이며 Fig. 6은 위치표정을 위한 메인 화면을 나타낸 그림이다.

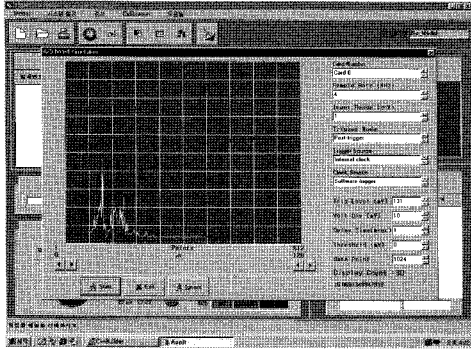


Fig. 5 Display window for AE on-line monitoring

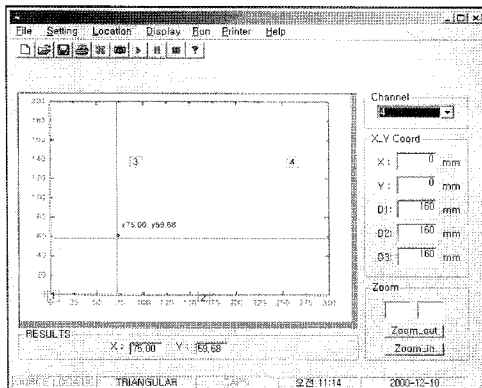


Fig. 6(a) Source location display

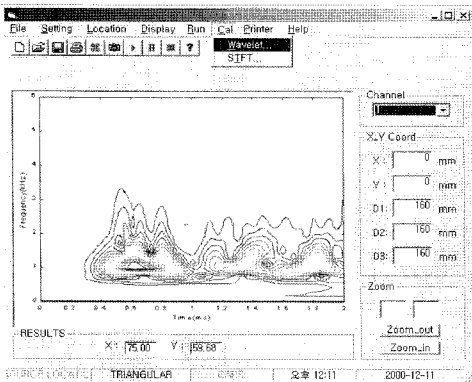


Fig. 6(b) Wavelet transformation display

Fig. 6 Main windows for source location and wavelet transformation

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 위치표정 결과

본 연구에서 개발 중인 위치표정 시스템을 이용한 위치표정 실험을 수행하여 시스템의 타당성을 평가하였다.

먼저 위치표정을 위한 시험체는 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 두께 50 mm, 가로×세로 300 mm × 300 mm인 일반 구조용 강판(SM500)을 사용하여 기존의 2차원 위치표정에 사용되고 있는 삼각법(triangular location) 및 사각법(planner location)을 이용한 위치표정과 WT 변환기법을 이용한 위치표정 실험을 수행하였다.

센서의 부착 위치는 각 센서 간 수평거리는 150 mm이며, 수직거리는 120 mm로 설정하였으며, 연필심 파단(pencil lead break) 실험(ASTM E610-82)으로 측정하였다[15]. 위치표정 계산을 위한 시험체의 전파속도 측정은 임의의 두 센서로부터 측정하였으며 본 시험편의 경우는 전파속도가 약 5900 m/s정도로서 종파성분에 의해서만 계산되었다.

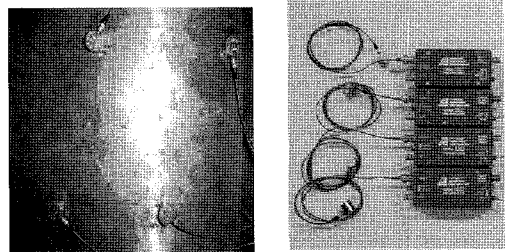


Fig. 7 Photograph of specimen and AE sensor

Fig. 8은 임의의 발생원으로부터 각 센서에서 도달된 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 임의의 발생원으로부터 각 센서까지 종파의 도달시간차가 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 현재 개발 중인 PC기반 위치표정시스템을 이용하여 각 센서에서의 도달시간차와 전파속도로 부터 위치표정을 수행하였다. 위치표정 결과는 Fig. 9에 나타내었고 오차는 10 mm 이하로 정확함을 알 수 있다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 동일 조건 하에서 기존의 상용 AE장비를 사용한 결과값(Fig. 10)과 비교해 볼 때 잘 일치함을 알 수 있다.

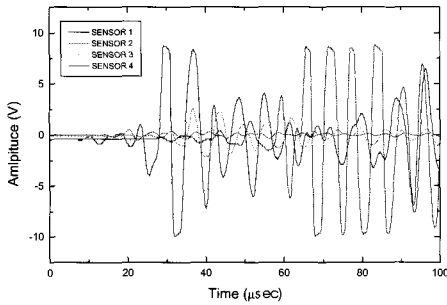


Fig. 8 Example of the typical AE waveform forms obtained from the each sensors

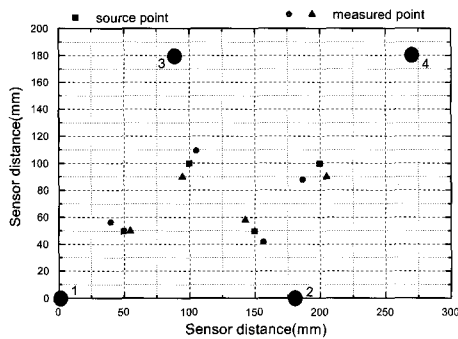


Fig. 9 Source location result obtained PC-based source location system

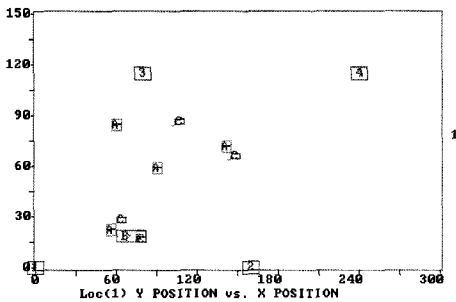


Fig. 10 Source location result obtained traditional AE system (MISTRAS2001)

4.2. WT 변환 기법 적용 결과

본 연구에 있어서 웨이블릿 변환기법의 적용 목적은 박판 구조물이나 노이즈가 심한 재료에서의 디노이징(de-noising) 기법에 의한 AE 위치표정에 목적이 있다. 즉 보다 정확한 도달시간차를 얻기 위해 WT 변환에 의한 노이즈 제거 기법을 도입함으로써 박판에서 판파에서의 위치표정 측정오차를 최소화 하는데 목적이 있다. 본 논문에서는 현재 후

판(50 mm)의 경우에 대해서 비교적 간단한 방법으로 계산된 WT 적용 사례를 나타내었다. 후판의 경우 종파속도가 비교적 확연히 관찰되어지기 때문에 디노이징 기법을 적용할 필요성은 없지만 현재 진행 중인 박판 구조물의 적용을 위한 타당성을 평가하기 위해서 간략하게 논의하였다.

Fig. 11은 일반적인 AE 파형에 대한 WT 변환기법을 이용한 결과를 나타낸 것이다. 본 경우에 있어서는 각 센서에서 측정된 파형을 단일주파수에서 AE신호의 도달시간차를 결정하기 위해서 특정 주파수 즉, 연필심 파단실험에서 공진형 센서(R15, PAC)의 응답특성을 고려하여 중심 주파수가 가장 높게 나타나는 150 kHz에서의 WT 분석을 이용하였다. 이는 시간에 따라서 150 kHz 주파수 성분이 어떻게 변화하는가를 확인할 수 있으며 최대값 발생위치가 파의 도달 시간이 되므로 이 시간값을 위치표정 계산에 사용하였다. 즉, 본 경우에 있어서는 연필심 파단 실험에서 주파수 특성이 크게 나타나는 140-160 kHz 대역 사이에서 WT 강도를 계산하였으며, 실험 결과 150 kHz에서 WT강도가 크게 매우 정확함을 알 수 있었다. 따라서 위치표정에는 주파수가 150 kHz일 때 4개의 센서에서 수신된 WT 수행하여 계산하였다. Fig. 11은 한 예로서 센서 1,2에서 검출된 신호의 150 kHz에서 WT 결과를 나타낸 것이다. 즉, 시간에 따른 특성 주파수 성분의 최대값 발생위치를 도달시간차로 이용하여 위치표정을 수행하였다.

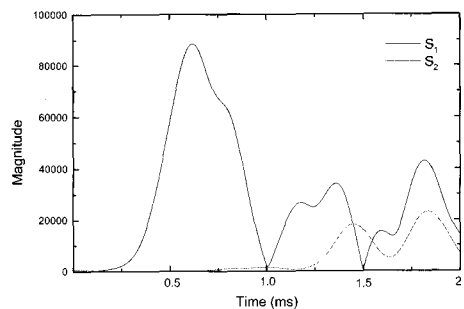


Fig. 11 Typical magnitude of WT at 150kHz

Table 1은 이러한 WT 분석을 통하여 수행된 위치표정 수행결과를 나타낸 것이다. 위치표정 결과는 오차가 10 mm 이하로서 WT 변환기법을 이용한 계산 결과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 WT기법은 신호의 디노이징 기법 뿐만 아니라 시간-주파수 분석을 통해서 위치표정에도 유용하게 이용할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Source location results using wavelet transformation method

Location	Source (mm)	Measured source(mm)	Error(mm)
A	50,50	45.1,52.3	±5
B	150,100	157,101.1	±7
C	100,50	95,50.25	±5
D	50,100	49,109.3	±9

5. 결 론

본 연구에서는 음향방출기법을 이용한 위치표정 시스템 개발을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) AE신호의 위치표정을 위한 시스템과 위치표정 알고리즘을 제안하고 이에 대한 타당성을 실험적으로 평가하였다.
- (2) 본 연구에서 특히 WT변환을 이용한 시간-주파수해석결과 즉, 단일 주파수 해석결과를 통해서 AE신호의 도달시간차를 평가할 수 있었으며 이는 향후 박판 구조물이나 복합재료와 같은 판파 모드성분이 지배하는 복잡한 신호특성을 평가하고 이에 따른 위치표정에 유용하리라 판단된다.
- (3) 본 연구결과, 산업현장에 온-라인 모니터링을 위한 보다 적합한 시스템 개발 가능성을 확인하였으며 현재, 보다 정확한 평가를 위해 위치표정 오차 및 시스템 안정성 문제와 관련된 연구를 지속적으로 수행 중에 있다.

참고문헌

[1] American Society for Nondestructive Testing, "Acoustic Emission Testing," Nondestructive Testing Handbook Vol. 5, pp. 12-19, (1987)

[2] A. A. Pollock and S. Y. Hsu, "Leak Detection using Acoustic Emission," Journal of Acoustic Emission, Vol. 1, No. 4, pp. 237-241, (1998)

[3] 이민래, 이준현, "배관의 누설탐지를 위한 음향방출기법 적용에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 284-289, (1999)

[4] J. von Stebut and F. Lapostolle, "Acoustic Emission Monitoring of single cracking events

and associated damage mechanism analysis in indentation and scratch testing," Surface and Coatings Technology. pp. 116-119, (1999)

[5] 이진경, 이준현, 이민래, 최홍섭, "Cocure/recure 경화공정에 의해 제조된 Carbon/Epoxy 복합재료의 미시적 파손거동에 대한 AE특성," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 24, No. 10, pp. 2520-2528, (2000)

[6] John Reason, "Acoustic Leak Detection Provides Early Warning of Piping Failure," in Power, pp. 372-373, (1987)

[7] A. E. Lord, Jr., J. N. Densher, and R. M. Koerner, "Attenuation of Elastic Waves in Pipelines as Applied to Acoustic Emission Leak Detection," J. of Materials Evaluation, pp. 49-60, (1976)

[8] J. M. Rajtar, R. Muthiah, "Pipeline Leak Detection System for Oil and Gas Flowlines," J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 105-109, (1997)

[9] A. A. Pollock and S. Y. Hsu, "Leak Detection Using Acoustic Emission," J. of Acoustic Emission, Vol. 1, No. 4, pp. 237-240, (1982)

[10] R. M. Lec and P. A. Lewin, "Acoustic Emission Sensor For Identification of Chemical Reactions," 1999 Joint Meeting EFTF-IEEE IFCS, pp. 978-982, (1999)

[11] Standard Definition of Terms Relating to Acoustic Emission, ASTM E610. Philadelphia, PA: American Society for Testing Materials

[12] Igor Grabec and Tadej Kosel, "Location of Continuous AE sources by sensory neural networks," J. of Ultrasonics 36, pp. 525-530, (1998)

[13] Gang Qi, "Wavelet-based AE characterization of composite materials," J. of NDT & E International 33, pp. 133-144, (2000)

[14] H. Suzukli, T. Kinjo, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signal," J. of Acoustic Emission, Vol. 14, No. 2, pp. 69-84, (1996)

[15] ASTM-E610, "Standard definition and terms relating to acoustic emission," ASTM, Philadelphia, PA, (1982)