

웨이블릿 변환 노이즈 제거에 의한 AE 위치표정

An Improved AE Source Location by Wavelet Transform De-noising Technique

이경주*, 권오양**, 주영찬*

Kyung-Joo Lee*, Oh-Yang Kwon** and Young-Chan Joo*

초 록 사용하는 탄성파의 파장과 두께가 비슷하거나 보다 얇은 박판 구조에서 음향방출(acoustic emission, AE) 신호의 위치표정 정확도의 향상을 위해 새로운 신호처리 방법인 웨이블릿 변환 디노이징(wavelet transform de-noising) 기법을 도입하였다. 탐지된 AE 신호에 대하여 웨이블릿 변환과 역변환을 수행하여 상대적으로 저주파수이고 큰 진폭을 갖는 굽힘파 성분(flexural component)은 활용하고, 고주파수이고 작은 진폭의 팽창파 성분(extensional component)은 필터링하여 제거한 다음 신호를 재구성하는 디노이징 처리를 거침으로써 박판에서의 위치표정 시 발생하는 도달시간차 측정오차를 최소화할 수 있음을 확인하였다. 따라서 웨이블릿 디노이징 처리를 도입함으로써 위치표정의 정확도가 게인(gain)이나 문턱값의 설정, 판의 두께, 센서간거리, 발생원과 센서의 상대적인 위치에 무관하고 전통적인 문턱값 통과 방법에 비하여 월등하게 향상되었다. 또한 상대적으로 매우 큰 진폭을 가지는 굽힘파 성분을 활용하므로 실제적인 박판 구조물에서의 위치표정에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

주요용어: 음향방출, 위치표정, 판파, 웨이블릿 변환, 디노이징, 도달 시간차

Abstract A new technique for the source location of acoustic emission (AE) in plates whose thickness are close to or thinner than the wavelength has been studied by introducing wavelet transform de-noising technique. The detected AE signals were pre-processed using wavelet transform to be decomposed into the low-frequency, high-amplitude flexural components and the high-frequency, low-amplitude extensional components. If the wavelet transform de-noising was employed, we could successfully filter out the extensional wave component, one of the critical errors of source location in plates by arrival time difference method. The accuracy of source location appeared to be significantly improved and independent of the setting of gain and threshold, plate thickness, sensor-to-sensor distance, and the relative position of source to sensors. Since the method utilizes the flexural component of relatively high amplitude, it could be applied to very large, thin-walled structures in practice.

Keywords: acoustic emission, source location, plate wave, wavelet transform, de-noising, arrival time difference

1. 서 론

돌발형 AE 위치표정 기술은 한 점에서 발생한 탄성파를 여러 개의 센서에서 감지하여 각각의 센서에 도달하는 파형의 시간차를 통해 발생원의 위치를 측정하는 방

법이다. 2개의 센서로부터 측정된 신호에 이 알고리즘을 적용하면 하나의 쌍곡선을 형성하게 되고, 여기에 제 3의 센서를 설정하면 또 다른 쌍곡선을 형성하여 두 쌍곡선의 교점으로부터 발생원의 위치를 결정한다. 위치표정 정확도는 탄성파의 전파속도, 도달시간차 측정 및 센서 위

치의 정확도에 의존한다. 센서의 위치, 탄성파의 전파속도가 정확하다는 가정 하에 도달시간차 측정에서 발생하는 오차를 줄이는 것이 이 연구의 목적이다.

AE 위치표정 기술이 원자로 압력용기와 같은 두꺼운 구조물에 적용될 때 문턱값 통과에 기준한 전통적인 방법은 널리 활용되어 왔다. 하지만 복합재료 셀이나 알루미늄 박판으로 만들어진 항공기 구조물과 같은 얇은 벽을 갖는 구조물에 적용될 때에는 대칭모드와 비대칭모드로 나누어지는 파파의 성질 때문에 전통적인 방법으로는 더 이상 성공적인 결과를 얻을 수 없다.

박판 구조물을 전파하는 판파(plate wave 또는 Lamb wave)에는 음파가 진행 방향으로 진동하며 대칭이고 분산(dispersion)하지 않는 성질의 팽창파(extensional wave, S-mode)와 진행 방향에 수직인 두께방향으로 진동하며 비대칭이고 분산하는 성질의 굽힘파(flexural wave, A-mode)가 존재한다[1,2,3]. 팽창파는 속도가 주파수의 함수가 아니고 거의 일정한 속도를 가지게 되는데, 감쇠(attenuation) 때문에 원거리에서 문턱 전압값 설정에 의한 도달 시간을 측정하는 데에는 어려움이 있다. 균열의 시작점과 같이 적은 에너지 방출에 의한 점 음원으로부터 발생하는 판파에서 위치표정을 하기 위해서 팽창파에 비해 상대적으로 큰 진폭을 가지는 굽힘파를 이용하면 더 효과적으로 위치표정을 할 수 있다. 즉, out-of-plane displacement의 양상을 나타내는 경우에 이 방법은 더욱 효과적일 것이다. 이 굽힘파의 속도를 실제 구조물로부터 측정하고, 문턱 전압값을 굽힘파에 집중시켜 도달 시간차를 측정, 위치표정을 행하면 실제 큰 구조물에서의 위치표정에도 활용할 수 있다. Fig. 1에서 보듯이 판파에서 이 두 파형 요소의 존재는 문턱 전압값 설정에 따라서 전파속도가 다른 두 파형으로부터 도달시간차가 측정되어 매우 큰 오차를 발생하게 한다[4,5]. 이 문제점을 해결하기 위해 AE 신호처리에 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 도입함으로써 상대적으로 크기가 작고 고주파수인 팽창파 요소를 제거할 수 있음은 이미 보고한 바 있다[6].

보다 정확한 도달 시간차를 얻기 위해 웨이블릿 변환에 의한 잡음제거 기법을 도입, 측정된 판파에서 팽창파 요소를 제거함으로써 Fig. 1에서와 같은 측정오차를 방지하고 박판에서의 AE 위치표정의 정확도를 향상 할 수 있음을 확인하였다. 원래의 신호를 분해(decomposition)하여 생성된 Detail 신호에서 임계값의 레벨을 조절(thresholding)하여 필터링한 신호를 역변환에 의해 재구성(reconstruction)하는 디노이징의 알고리즘을 활용하여 팽창파 요소를 제거한 신호를 획득하였다. 고주파수의 팽

창파 요소를 신호에 포함되는 잡음신호로 간주하고 디노이징을 수행함으로써 보다 정확한 도달시간차를 구하는 것이다. 이와 같이 웨이블릿 변환은 AE 신호처리에 있어서 매우 큰 잠재력을 갖고 있는 것으로 보인다[7].

2. 이론적 배경

2.1. 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)

연속형 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform, CWT)은 신호 $f(t)$ 와 scale과 shift된 웨이블릿 함수 Ψ 의 곱의 시간에 대한 적분으로 정의되며, 식(1),(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(\text{scale}, \text{position}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi(\text{scale}, \text{position}, t) dt \dots\dots\dots (1)$$

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \dots\dots\dots (2)$$

즉, CWT의 결과는 scale(a)과 position(b)의 함수인 웨이블릿 계수(wavelet coefficients) C 이다.

이 변환이 효과적이고 유용하게 사용되기 위해서는 역변환 또한 가능하도록 설계되어야 하는데, 웨이블릿 방법은 이를 만족한다. 예를 들면, AE 신호(S)에서 시작하여 결과적으로 웨이블릿 계수인 $C(a,b)$ 를 구하고, 역변환으로 계수 $C(a,b)$ 에서 시작하여 신호(S)를 재구성한다. 즉, 유한한 에너지의 신호에 대해서 웨이블릿 역변환(inverse wavelet transform, IWT)을 수행할 수 있다. 식(3)은 연속형 웨이블릿 역변환(inverse continuous wavelet

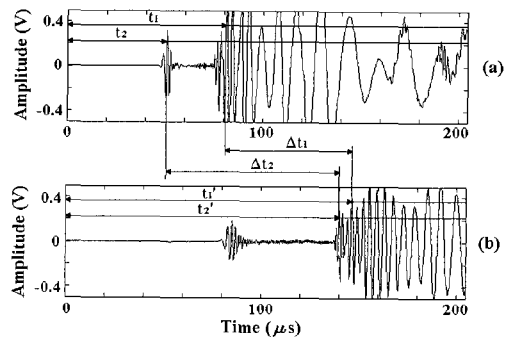


Fig. 1 Waveforms depicting the erroneous measurement of arrival time difference for plate (Lamb) wave at (a) sensor 1 and (b) sensor 2

transform, ICWT)이다.

$$S(t) = \frac{1}{K_\Psi} \int \int_R C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2} \dots\dots (3)$$

여기서 K_Ψ 는 Ψ 에 의존하는 상수이다.

실제 측정된 파형 데이터는 디지털 포맷으로 되어 있으므로 이산형 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform, DWT)에 의해 분석을 행하게 되는데, 이때 scale, a 와 position (or shift), b 를 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$ 의 형태로 하여 샘플링하게 된다.

$$C(m, n) = \sum_k S(k) \Psi_{m, n}(k) \dots\dots\dots (4)$$

$$\Psi_{m, n}(k) = a_0^{-\frac{m}{2}} \Psi\left(\frac{k - na_0^m b_0}{a_0^m}\right) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 m 과 n 은 정수이고, a_0 와 b_0 는 계산의 효율성을 위해 보통 dyadic scale & position이라고 불리는 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 의 값이 사용된다. 또한 k 는 $t=kT$ 의 관계를 가지며 T 는 샘플링 주기이다. 또한 이산형 웨이블릿 역변환(inverse discrete wavelet transform, IDWT)은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

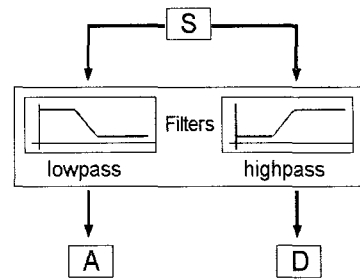
$$S(t) = \sum_m \sum_n C(m, n) \Psi_{m, n}(t) \dots\dots\dots (6)$$

디지털 필터링을 이용하여 이러한 계산을 효과적으로 수행할 수 있는 방법이 1988년 Mallat에 의해 고안되었는데, 사실 이 Mallat 알고리즘은 두 채널 subband coder로 신호처리 분야에서는 고전적인 원리이다[8]. 최초의 신호 S 는 상보적인 두 개의 필터를 통해 Fig. 2(a)에서 보듯이 두 신호로 나누어진다. Approximation, A 는 신호의 저주파 성분이며 Detail, D 는 고주파 성분이다. 분해 과정은 Approximation 성분의 계속되는 분해로 반복될 수 있다. 그래서 하나의 신호는 여러 개의 보다 낮은 분해 성분으로 나누어진다. 이것은 Fig. 2(b)에서 보듯이 웨이블릿 분해 tree라고 불린다.

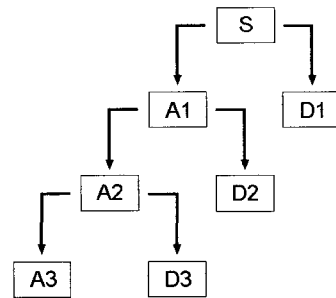
Fig. 2를 수식으로 나타내면 다음과 같다. 즉, 식(6)에서 m 을 고정하고 n 에 대한 합을 구하면 식(7)과 같은 Detail항을 얻는다. 그 후 m 에 대한 합을 구하면 신호는 식(7)과 같이 Detail 항의 합과 같다.

$$D_m(t) = \sum_n C(m, n) \Psi_{m, n}(t) \dots\dots\dots (7)$$

$$S = \sum_m D_m \dots\dots\dots (8)$$



(a)



(b)

Fig. 2 An efficient algorithm of wavelet transform (a) filtering process and (b) decomposition tree [7,8]

$$A_M = \sum_{m>M} D_m \dots\dots\dots (9)$$

Detail 항은 reference level M 에 따라 두 가지의 Detail 항으로 나누어진다. $m \leq M$ 이면 fine Detail이고, $m > M$ 이면 식(9)과 같이 coarse Detail을 나타낸다.

2.2. 디노이징(De-noising)

일반적으로 웨이블릿 변환의 특성으로 인해 잡음은 분해 tree의 하위 레벨로 갈수록 영향이 적어지는데, 여기에 임계화(thresholding)를 적용한 다음 상위 레벨로 역변환시켜 나가면 효과적으로 잡음을 제거 할 수 있다. 이러한 변환은 높은 주파수 성분에 대해서는 시간영역의 해상도는 높고 저주파 영역의 해상도는 낮은 반면에, 낮은 주파수 성분에 대해서는 주파수 영역의 해상도는 높고 시간영역의 해상도는 낮게 된다. 따라서 신호의 전체적인 구조는 낮은 주파수 영역에서 나타나게 된다. 많은 신호에 있어서 저주파 성분이 신호의 정체(identity)를 알

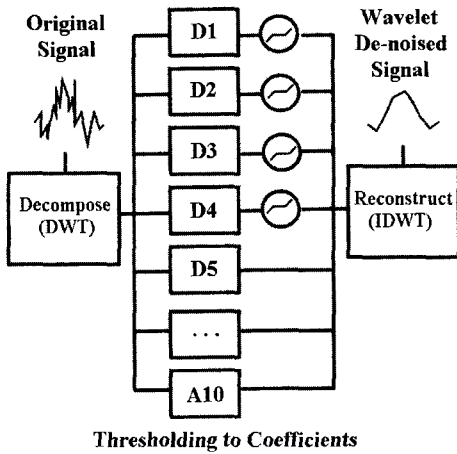


Fig. 3 The wavelet transform de-noising procedure [8,9]

려주기 때문에 가장 중요한 부분이다. 반면에 고주파 성분은 독특한 성질(flavor)이나 미묘한 차이(nuance)를 나타낸다.

디노이징에서는 웨이블릿 분해에 의해 얻어진 Detail 신호들의 진폭에 레벨을 설정하여 잡음이라고 간주한 신호는 제거하고 원래의 신호는 잡음의 영향만큼 축소시키거나 유지하여 재구성을 하게 된다.

Fig. 3은 웨이블릿 변환 디노이징에서 널리 사용되는 알고리즘을 나타내며, 다음과 같이 분해(decomposition), 임계화(thresholding), 재구성(reconstruction)의 세 단계로 이루어진다[9,10,11].

1. 신호를 웨이블릿 변환(DWT)을 통해 분해한다.
2. 분해를 통해 형성된 Detail 계수들을 이용하여 디노이징을 수행한다. 통계학적인 임계화 함수에는 부드러운 임계화(soft-thresholding)와 강한 임계화(hard-thresholding)가 있으며 각 신호에서 다음과 같은 연산을 수행한다.

- 부드러운 임계화(soft-thresholding)

$$S = \begin{pmatrix} \text{Sign}(x)(|x| - t) & \text{if } |x| > t \\ 0 & \text{if } |x| \leq t \end{pmatrix}$$

- 강한 임계화(hard-thresholding)

$$S = \begin{pmatrix} x & \text{if } |x| > t \\ 0 & \text{if } |x| \leq t \end{pmatrix}$$

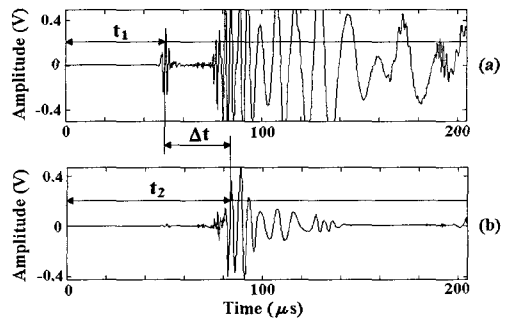


Fig. 4 Effect of the wavelet transform de-noising on the arrival time measurement for plate (Lamb) wave (a) original signal and (b) wavelet de-noised signal

이는 필터로서 가장 일반적이며 간단한 방법이지만 웨이블릿 변환에서는 강력한 잡음제거 성능을 나타낸다. 위 식에서 t 는 분해된 Detail 신호의 각 레벨에서 다르게 나타난다.

3. 디노이징된 신호 S 를 웨이블릿 역변환(IDWT)을 통하여 재구성한다.

Fig. 4는 디노이징에 의해 펄스폭에 의한 도달시간 측정상의 오차 Δt 를 없애 줄 수 있음을 보여주는 그림이다[9,11]. 본 연구에서는 각각의 센서로부터 탐지된 신호들을 Biorthogonal wavelet(3.9)을 mother 웨이블릿으로 하여 레벨 10으로 분해하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 시편 및 실험장치

위치표정 실험은 각각 두께 3mm(Al6061)와 1.5mm(Al5052)의 알루미늄 판에서 수행하였으며, 판의 크기는 약 1200×1200mm이었다. 위치표정에 이용되는 탄성파는 표준 연필심(HB 0.5 ϕ; JSNDI-006) 파괴에 의한 모의 발생원으로부터 발생되었다. 4개의 광대역(broadband) 고성능 압전센서(B1025; Digital Wave)가 한개의 사각형 센서 배열을 형성하는데 사용되었다. 센서들은 고진공 그리스(grease)를 접촉매질(couplant)로 하여 판 위에 고정되었다. 탐지된 신호는 전치증폭기(pre-amplifier)에 의해 증폭되고, 그 후에 신호조절모듈(FTM4000)로 들어간다. 파형 신호는 PC에 있는 A/D 보드(CS225; Gage)를 통해 디지털화 되고 저장된다. 전통적인 문턱값 통과 방법과

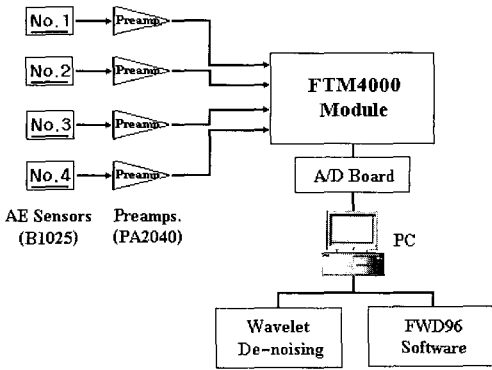


Fig. 5 A schematic diagram of experimental setup

상호상관함수(cross-correlation function)방법은 내장된 FWD96[®] 소프트웨어를 사용해 계산하였다. 디노이징된 신호를 이용하는 문턱값 통과와 또 다른 방법은 Matlab[®]의 웨이블릿 변환 기능을 이용하여 수행하였으며, 도달시간차를 이용한 2차원 위치표정의 연립방정식은 Mathematica[®]를 통해 그 근(R, θ)을 구했다. Fig. 5는 실험장치에 대한 구성도를 보여준다.

3.2. 센서 어레이와 발생원의 좌표

4개의 센서로 하나의 사각형을 만들었다. 서론에서 언급한 바와 같이 2차원 위치표정의 알고리즘은 최소한 3개의 센서로 이루어진 어레이를 필요로 한다. 네 번째 센서는 알고리즘에 의해 발생하는 2중 위치표정의 오류를 보정하기 위해 선택되었다. 센서의 위치는 판의 두께에 따라서 센서간 거리를 300mm와 600mm로 하는 사각형으로 구성하여 실험하였다. 이는 센서간 거리가 위치표정의 정확성에 미치는 영향을 검토하고, 디노이징에 의한 방법의 효과를 알아보기 위함이다. 센서의 이론적인 좌표는 Table 1과 같다.

발생원의 위치는 0에서 5까지 6개의 좌표를 임의로 설정하였다. 발생원의 정확한 위치는 Table 2와 같다.

3.3. 상호상관함수에 의한 속도측정

굽힘파는 음파의 속도가 주파수의 함수로 나타나는 분산(dispersion)을 하므로 이론적인 식에 의해 속도를 구하기는 어려워진다. 따라서 위치표정에 필요한 음파의 속도는 실험에 의해 측정된 값이 사용되었다. 실험에서는 1

Table 1 The nominal coordinates of AE sensors

Sensor No.	300 mm (x, y)	600 mm (x, y)
1	(0, 0)	(0, 0)
2	(300, 0)	(600, 0)
3	(0, 300)	(0, 600)
4	(300, 300)	(600, 600)

Table 2 The exact coordinates of AE sources

Source No.	300 mm (x, y)	600 mm (x, y)
0	(150, 150)	(300, 300)
1	(200, 200)	(400, 400)
2	(60, 180)	(120, 360)
3	(150, 75)	(300, 150)
4	(100, 100)	(200, 200)
5	(150, 0)	(300, 0)

차원 위치표정으로 두 센서사이의 도달 시간차를 구하여 2차원 위치표정에 필요한 속도를 결정하였다. 이때 팽창파의 영향을 배제 할 수 없으므로, 상호상관함수 방법을 통해 이전 실험의 데이터를 참고하고 반복실험을 통해 각각의 판 두께에 맞는 주파수(3.0mm: 200kHz, 1.5mm: 250kHz)를 선정, 전통적 방법에 의한 위치표정보다 정확한 속도를 측정할 수 있었다[3,4,6]. 알루미늄 판에서 음파의 속도는 각각 0° 부터 90° 까지 10° 간격으로 측정하였다. 박판의 경우 압연에 의해 제조되므로 미시적으로 집합조직이 나타나서 각 방향으로 음파의 속도차이가 있을 수 있으나, 실험에서는 등방성(isotropic)재료로 간주하기에 충분한 오차범위에 속하였기에 평균속도를 사용하였다. 두께 3.0mm판에는 3014m/s의 속도를 사용하였고, 1.5mm판에는 2672m/s의 속도를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

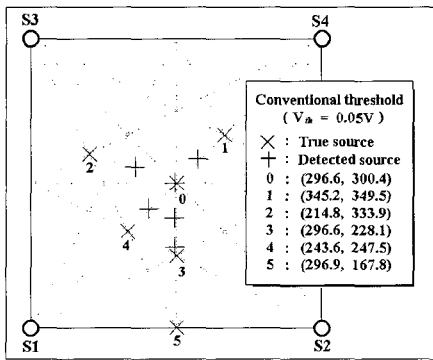
알루미늄 박판에서 전통적인 문턱값 통과 방법(conventional threshold method)과 디노이징 방법(wavelet transform de-noising method)을 사용하고, 판 두께를 1.5mm와

3.0mm로, 센서간 거리를 300mm와 600mm로, 문턱 전압값을 0.05V에서 0.2V까지 0.05V간격으로 변화시켰을 때 얻어진 결과는 다음과 같다.

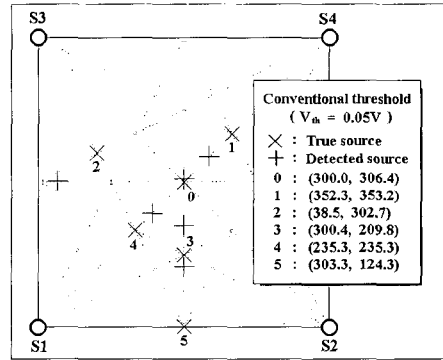
먼저 판의 두께가 탄성과 전파에 미치는 영향을 비교해 보기 위해, 센서간 간격을 600mm로 놓고 판의 두께를 1.5mm와 3.0mm로 바꾸어 실험한 위치표정의 결과를 Fig. 6에서 Fig. 9까지와 같으며, Table 3에는 각각의 발생원 위치를 기준으로 하여 두 방법 사이의 오차를 비교하였다. 문턱 전압값은 0.05V와 0.15V이다. Fig. 6과 Fig. 7은 전통적인 방법에 의한 위치표정의 결과를 나타낸다. 그림에서 보면, 모의 발생원이 모든 센서로부터 같은 거리에 있는 중앙에서는 비교적 정확한 값을 얻고 있는데, 이는 각각의 센서에 측정되는 파형이 거의 비슷하여 문턱 전압값으로부터 얻어지는 시간차가 거의 나지 않아서

이다. 하지만 모의 발생원이 어느 임의의 센서에 가깝거나 멀어질 때 전통적 방법에 의한 위치 표정의 결과는 매우 좋지 않았다. 이는 특히 1.5mm의 경우 팽창파의 크기가 3.0mm의 경우보다 크기 때문에 문턱 전압값을 높여 준다 하더라도 위치표정 결과가 향상될 수 없음을 보여준다.

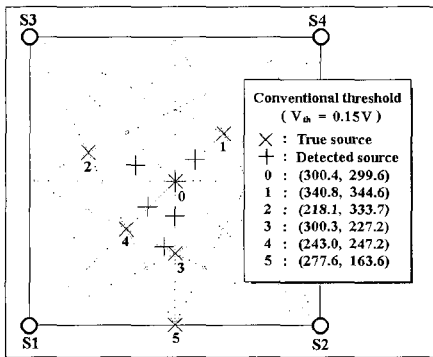
Fig. 8과 Fig. 9는 디노이징에 의해 도달시간차 측정의 오차를 줄여준 결과이다. 각 센서에 도달하는 파형에서 팽창파 요소를 제거해 줌으로써, 위치표정 값이 큰 오차를 보이지 않았다. 판의 두께가 1.5mm이고 문턱 전압값이 0.05V일 때 전통적 방법에서는 평균 오차가 81.1mm, 디노이징 방법에서는 13.8mm이었으며, 문턱 전압값이 0.15V일 때 전통적 방법에서는 81.6mm, 디노이징 방법에서는 15.9mm이었다. 특히 모의 발생원 5번의 경우 전통



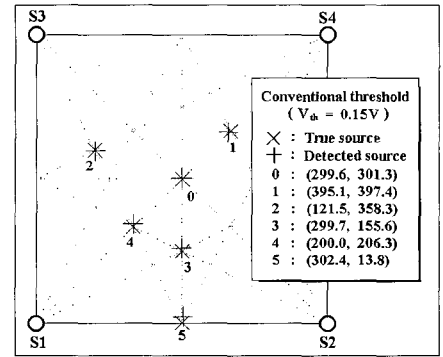
(a) $V_{th}=0.05V$



(a) $V_{th}=0.05V$



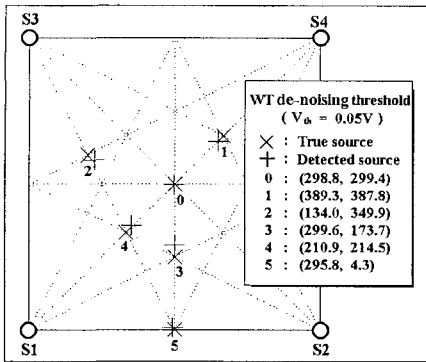
(b) $V_{th}=0.15V$



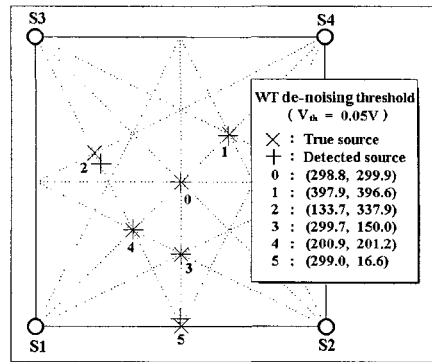
(b) $V_{th}=0.15V$

Fig. 6 Results of source location based on the conventional threshold method for 1.5mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=600mm (a) $V_{th}=0.05V$ and (b) $V_{th}=0.15V$

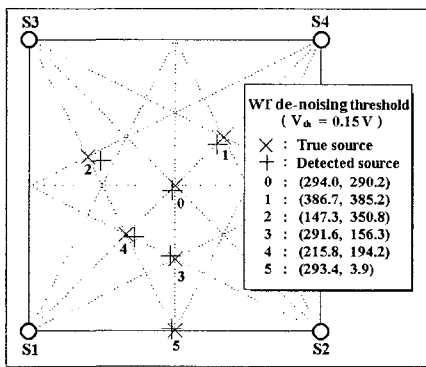
Fig. 7 Results of source location based on the conventional threshold method for 3.0mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=600mm (a) $V_{th}=0.05V$ and (b) $V_{th}=0.15V$



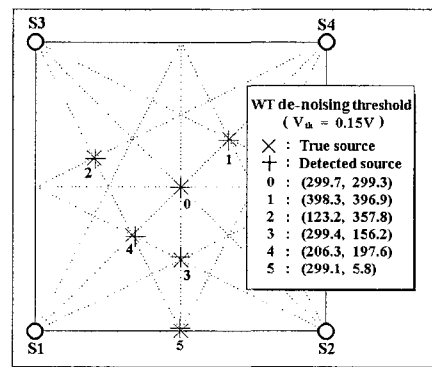
(a) $V_{th}=0.05V$



(a) $V_{th}=0.05V$



(b) $V_{th}=0.15V$



(b) $V_{th}=0.15V$

Fig. 8 Results of source location based on the wavelet transform de-noising method for 1.5mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=600mm (a) $V_{th}=0.05V$ and (b) $V_{th}=0.15V$

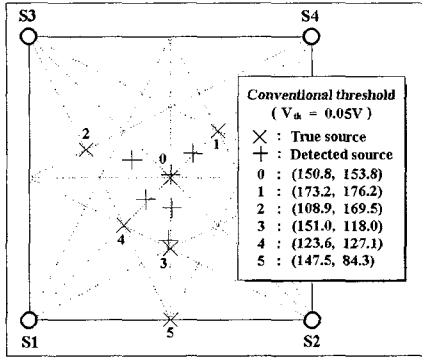
Fig. 9 Results of source location based on the wavelet transform de-noising method for 3.0mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=600mm (a) $V_{th}=0.05V$ and (b) $V_{th}=0.15V$

Table 3 Comparison of location errors with different plate thickness (sensor-to-sensor distance=600mm)

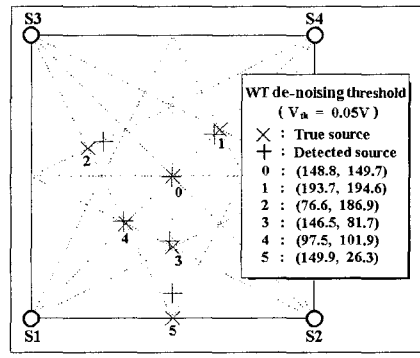
Source No.	Error (mm) ($V_{th}=0.05V$)				Error (mm) ($V_{th}=0.15V$)			
	t=1.5mm		t=3.0mm		t=1.5mm		t=3.0mm	
	Conv.	WT	Conv.	WT	Conv.	WT	Conv.	WT
0	3.4	1.3	6.4	1.2	0.6	11.5	1.4	0.8
1	74.5	16.2	66.8	4.0	81.1	19.9	5.5	3.5
2	98.3	17.3	99.6	26.0	101.6	28.8	2.3	3.9
3	78.2	23.7	59.8	0.3	77.2	10.5	5.6	6.2
4	64.5	18.1	49.9	1.5	63.9	16.8	6.3	6.7
5	167.8	6.0	124.3	16.6	165.1	7.7	14.0	5.9
Mean	81.1	13.8	67.8	8.3	81.6	15.9	5.8	4.5

적 방법을 통해서도 오차가 매우 심하였으나, 디노이징 방법을 통해 월등히 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 판의 두께가 3.0mm이고 문턱 전압값이 0.05V일 때 전통적 방

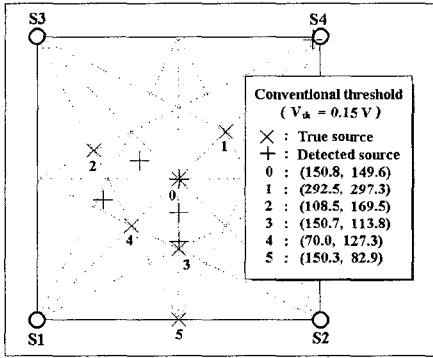
법에서는 평균 오차 값이 67.8mm, 디노이징 방법에서는 8.3mm이었으며, 문턱 전압값이 0.15V일 때 전통적 방법에서는 5.8mm, 디노이징 방법에서는 4.5mm이었다. 판의



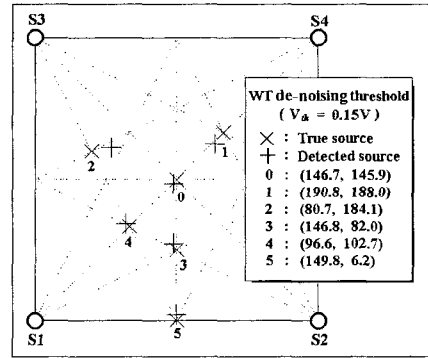
(a) $V_{th}=0.05V$



(a) $V_{th}=0.05V$



(b) $V_{th}=0.15V$



(b) $V_{th}=0.15V$

Fig. 10 Results of source location based on the conventional threshold method for 1.5mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=300mm (a) $V_{th}=0.05V$ and (b) $V_{th}=0.15V$

Fig. 11 Results of source location based on the wavelet transform de-noising method for 1.5mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=300mm (a) $V_{th}=0.05V$ and (b) $V_{th}=0.15V$

Table 4 Comparison of location errors with different sensor-to-sensor distance (plate thickness=1.5mm)

Source No.	Error (mm) ($V_{th}=0.05V$)				Error (mm) ($V_{th}=0.15V$)			
	d=300mm		d=600mm		d=300mm		d=600mm	
	Conv.	WT	Conv.	WT	Conv.	WT	Conv.	WT
0	3.9	1.2	3.4	1.3	0.9	5.3	0.6	11.5
1	35.8	8.3	74.5	16.2	134.3	15.1	81.1	19.9
2	50.0	18.0	98.3	17.3	49.6	21.1	101.6	28.8
3	43.0	7.6	78.2	23.7	38.8	7.7	77.2	10.5
4	35.9	3.1	64.5	18.1	40.6	4.3	63.9	16.8
5	84.3	26.3	167.8	6.0	82.9	6.2	165.1	7.7
Mean	42.2	10.8	81.1	13.8	57.8	9.9	81.6	15.9

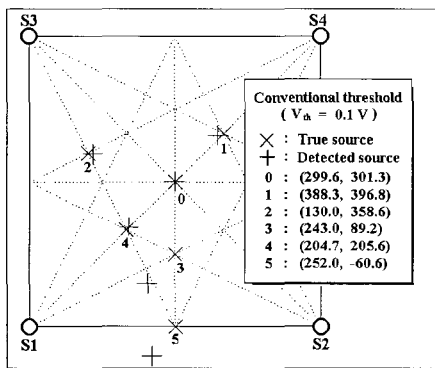
두께 3mm의 경우 문턱 전압값을 0.15V로 설정했을 때, 각 센서에서 측정되는 시간이 급히 감소에 집중되어 전통적 방법에서도 좋은 결과를 보여주었고 있으나 이는

그 만큼 문턱값 설정에 민감하다는 반증이기도 하다. 위치표정 시 문턱값 통과방법을 사용할 때 감쇠에 의해 팽창과 요소의 크기가 달라 질 수 있으므로 센서간

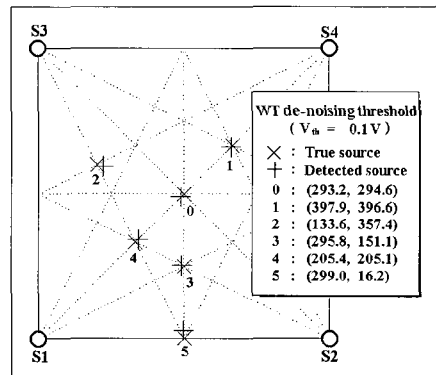
거리의 영향도 무시할 수 없다. Fig. 10과 Fig. 11은 1.5mm 두께의 판에서 센서간 거리를 300mm로 놓았을 때의 결과를 보여준다. 한편 Table 4에는 센서간 거리 300mm와 600mm일 때의 결과를 비교하였다. 센서간 거리를 Fig. 6과 Fig. 8에서 보다 줄였으므로 팽창과의 감소효과가 줄어들어, 전통적 방법일 경우의 평균오차가 600mm의 경우보다 줄어들었다. 판의 두께 1.5mm, 센서간 거리 300mm, 문턱 전압값이 0.05V일 때, 위치표정의 평균 오차가 전통적 방법에서는 42.2mm, 디노이징 방법에서는 10.8mm이었으며, 문턱 전압값이 0.15V일 때에는, 전통적 방법에서는 57.8mm, 디노이징 방법에서는 9.9mm이었다. 전통적 방법에서 센서간 거리를 조정하여 위치표정의 오차를 줄일 수 있는 것으로 나타났지만 이는 별로 바람직한 결과는 못된다. 실제적인 AE 위치표정에서 센

서간 거리를 줄이면 그만큼 필요한 센서의 수가 증가하고 AE 장비의 채널수도 늘어나야 하는 부담이 발생하기 때문이다. 디노이징 방법에서는 그림과 표에서 알 수 있듯이 위치표정 오차가 센서간 거리의 변화에 크게 영향 받지 아니하므로 매우 바람직한 결과라고 할 수 있다.

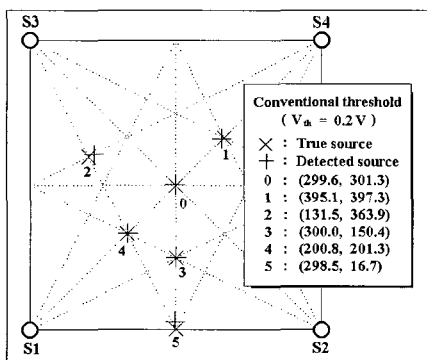
전통적인 방법에 의한 위치표정의 결과에서 가장 심각한 문제점은 위치표정의 결과가 문턱 전압값의 레벨에 크게 영향을 받는다는 점이다. Fig. 12와 Fig. 13은 판의 두께를 3mm, 센서간 거리를 600mm로 하고, 문턱 전압값을 0.1V와 0.2V로 하였을 때의 결과를 보여준다. 또한 Table 5에는 Fig. 7과 Fig. 9의 결과와 함께 비교하여 0.05V에서 0.2V까지 0.05V간격으로 정리하였다. 전통적인 방법의 경우 위치표정의 평균 오차가 문턱 전압값이



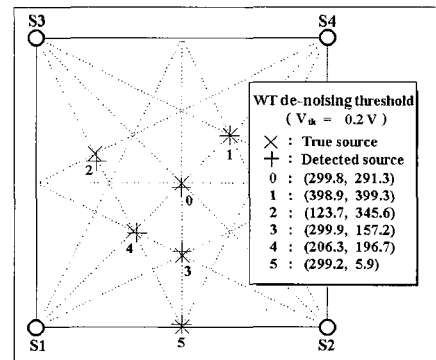
(a) $V_{th}=0.1V$



(a) $V_{th}=0.1V$



(b) $V_{th}=0.2V$



(b) $V_{th}=0.2V$

Fig. 12 Results of source location based on the conventional threshold method for 3.0mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=600mm (a) $V_{th}=0.1V$ and (b) $V_{th}=0.2V$

Fig. 13 Results of source location based on the wavelet transform de-noising method for 3.0mm-thick plate with sensor-to-sensor distance=600mm (a) $V_{th}=0.1V$ and (b) $V_{th}=0.2V$

Table 5 Comparison of location errors with various threshold levels (sensor-to-sensor distance=600mm, plate thickness=3.0mm)

Source No.	Error (mm)							
	$V_{th}=0.05V$		$V_{th}=0.10V$		$V_{th}=0.15V$		$V_{th}=0.2V$	
	Conv.	WT	Conv.	WT	Conv.	WT	Conv.	WT
0	6.4	1.2	1.4	8.7	1.4	0.8	1.4	8.3
1	66.8	4.0	12.1	4.0	5.6	3.5	5.6	1.3
2	99.6	26.0	10.1	13.9	2.3	3.9	12.1	14.9
3	59.8	0.3	83.3	4.3	5.1	6.2	0.4	7.2
4	49.9	1.5	7.3	7.4	6.3	6.7	1.5	7.1
5	124.3	16.6	77.3	16.2	14.0	5.9	16.8	6.0
Mean	67.8	8.3	31.9	9.1	5.9	4.5	6.3	7.5

0.05V일 때에는 67.8mm, 0.1V일 때에는 31.9mm, 0.15V일 때에는 5.9mm이고 0.2V일 때에는 6.3mm이었다. 이 결과는 문턱 전압값을 높게 설정함으로써 팽창과 요소의 영향이 적어지게 되어 일정 수준 이상의 문턱값에 대해서는 매우 좋은 위치표정 결과를 얻고 있음을 의미한다. 한편 디노이징 방법을 사용한 경우에는, 0.05V일 때 8.3mm, 0.1V일 때 9.1mm, 0.15V일 때 4.5mm이고 0.2V일 때에는 7.5mm의 평균 오차를 얻었다. 이러한 결과는 웨이블릿 디노이징 처리에 의한 새로운 신호처리 방법을 도입함으로써 AE 위치표정과 같은 실험에서 임의의 값으로 정해주어야만 하는 문턱 전압값에 의한 영향을 거의 완벽하게 제거할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

1. 사용하는 탄성파의 파장에 가까운 두께의 박판에서의 AE 위치표정에 있어서 문턱값 통과 방법을 사용할 때 야기되는 도달시간차 측정상의 오차 문제를 웨이블릿 변환에 의해 디노이징된 신호를 사용하여 해결할 수 있음을 보였다.
2. 웨이블릿 디노이징에 의해 처리된 신호를 사용하면 위치표정의 정확도는 게인(gain)이나 문턱 전압값 레벨의 설정에 거의 무관하게 독립적임을 알 수 있다.
3. 판 두께의 영향을 받는 팽창과 성분이 디노이징을 통해 제거되어 신뢰할만한 위치표정 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
4. 굽힘과 성분의 도달시간차를 바탕으로 위치표정이 이루어지므로 센서간 거리의 영향도 무시할 수 있는 수준이었으며, 굽힘파는 상대적으로 매우 큰 진폭을 가지므

로 커다란 박판 구조물에서의 위치표정에 특히 효과적으로 활용할 수 있다.

후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음. (KRF99-005-E00006)

참고문헌

- [1] R. K. Miller and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook," Vol. 5 Acoustic Emission Testing, pp. 92-120 & pp. 135-154, ASNT, (1987)
- [2] D. E. Bray and R. K. Stanley, "Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service," CRC Press, Revised Edition, pp. 71-85, (1997)
- [3] M. R. Gorman, "Plate wave acoustic emission," J. of Acoustical Society of America, Vol. 90, No. 1, pp. 358-364, (1991)
- [4] S. M. Ziola and M. R. Gorman, "Acoustic Emission Source Location in Thin Plates Using Cross-correlation," Proc. of AECM-4, pp. 411-417, ASNT, (1992)
- [5] M. R. Gorman and W. H. Prosser, "AE Source Orientation by Plate Wave Analysis," J. of Acoustic Emission, Vol. 9, No. 4, pp. 283-288, (1990)
- [6] O. Y. Kwon and Y. C. Joo, "Source Location in Highly Dispersive Media by Wavelet Transform of

- AE Signals," Proc. of FENDT'97, pp. 219-228, KSNT, (1997)
- [7] H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto and K. Ono, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals," J. of Acoustic Emission, Vol. 14, No. 2, pp. 69-84, (1996)
- [8] S. Mallat, "A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., Vol. 11, No. 7, pp. 674-693, (1989)
- [9] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. M. Poggi, "Wavelet Toolbox for Use with MATLAB®," pp. 1-31 & pp. 6-75~6-85, The MATH WORKS Inc., (1996)
- [10] D. L. Donoho, "De-Noising by Soft-Thresholding," IEEE Trans. Information Theory, Vol. 41, No. 3, pp. 613-627, (1995)
- [11] A. Brace and H. Y. Gao, "Applied Wavelet Analysis with S-PLUS," pp. 88-110, MathSoft Inc., (1996)
- [12] H. Inoue, K. Kishimoto and T. Shibuya, "Experimental Wavelet Analysis of Flexural Waves in Beams," Experimental Mechanics, Vol. 36, No. 3, pp. 212-217, (1996)
- [13] K. Kishimoto, H. Inoue, M. Hamada and T. Shibuya, "Time Frequency Analysis of Dispersive Waves by Means of Wavelet Transform," J. of Applied Mechanics, Vol. 62, pp. 841-846, (1995)