

# Wavelet 변환을 이용한 분산성 판파의 군속도와 음원 위치 결정

장 영 수\* · 정 현 조\*\*  
(1999년 7월 23일 접수)

## Determination of the Group Velocity and Source Location of Dispersive Plate Waves using Wavelet Transform

Young-Su Jang and Hyunjo Jeong

**Key Words:** Wavelet Transform(웨이브렛 변환), Plate Wave(판파), Dispersion(분산), Fourier Transform(푸리에 변환), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 분석), Group Velocity(군속도), Source Location(음원위치)

### Abstract

The plate waves propagating in thin plates have dispersive nature showing the dependence of velocities on the frequency. Wavelet transform (WT) using Gabor function can be used to analyze the dispersive waves in the time-frequency domain, and then to find the arrival time of the waves propagating in the plate. Plate waves in the aluminum plate of 3 mm thickness were identified and generated by pencil lead breaks and the lowest order symmetric ( $S_0$ ) and antisymmetric ( $A_0$ ) modes were analyzed by the WT method. The measured group velocities agreed very well with theoretical predictions in the frequency range of 50-400 kHz. The pencil breaks were also used to simulate acoustic emission sources in the plate, and the source location algorithm using the wavelet transform of dispersive plate waves was found to give accurate results.

### 1. 서 론

판파(또는 Lamb파)는 판의 평면 내에서 전파하는 유도파의 일종으로서 일반적으로 낮은 주파수에서 생성되어 감쇠 없이 비교적 먼 거리를 전파할 수 있는 특성을 가지며, 주파수와 판의 두께 및 재질에 따라 속도와 진행형태가 변하는 분산성을 가진다.<sup>(1,2)</sup> 판파는 두께 방향의 모든 입자를 가진하며 길이 방향으로 판 전체를 퍼져나가기 때문에 한번 탐상으로 파동 전파영역 내의 전 부

위를 효율적으로 검사할 수 있으며 항공기 동체, 선박, 교량, 압력용기와 같은 판 형태의 구조물에 대한 적용 연구가 진행되고 있다.<sup>(3,4)</sup>

분산성 판파의 주파수별 속도를 실험적으로 구하기 위해 여러 가지 방법이 사용되고 있다. Rogers<sup>(5)</sup>는 판파의 모드별 위상속도를 측정하기 위하여 가변각 탐촉자와 톤버스트 신호를 사용하고 탐촉자의 이동거리에 따른 위상일치 방법을 적용하였다. 이러한 공진법을 이용한 실험은 각 주파수마다 반복적 실험이 요구된다. Kishimoto 등<sup>(6)</sup>은 보에서 발생된 굽힘파에 대해 wavelet 변환법을 적용하여 주파수별 군속도와 충격지점을 측정하였으며, 한번의 실험으로 이러한 파라미터를 결정할 수 있었다.

음향방출법(AE)은 음원의 발생 위치 측정<sup>(7,8)</sup> 등에 주로 응용된 바 있다. 음향방출 신호의 분

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 회원, 원광대학교 기계공학부

E-mail : hjeong@wonms.wonkwang.ac.kr

TEL : (0653)850-6690 FAX : (0653)850-6691

석에서 푸리에 변환 (FT)은 유용하게 사용되어져 왔다. 주파수 분석 정보 이외에 FT는 패턴인식법이나 음원 특성 알고리즘의 요소로서 중요하게 사용된다. 그러나 FT에 사용되는 지수함수  $\exp(-i\omega t)$ 의 전 시간영역에 대한 확장성으로부터 결과값의 시간의존성이 없어지는 단점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해 단시간 푸리에 변환 (STFT)이 사용되며 원신호에 창함수  $w(t-\tau)$ 를 곱하여 FT를 수행하고 결과적으로 시간에 대한 주파수 분석을 가능하게 한 형태이다. STFT는 시간과 주파수에서 일정 크기의 분해 간격을 가지므로 저주파수와 고주파수에서의 분해능에 실질적인 문제점이 있다. 주파수에 따라 시간창의 크기가 달라지는 wavelet 변환(WT)은 기본 wavelet의 적절한 변형에 의해 효율적인 분해가 가능하다. 즉, 신호의 한 시점에 대한 주파수 분해가 STFT에 비해 정확하다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 두께 3 mm의 알루미늄 판에서 연필심 파단에 의해 발생한 판파의 여러 가지 모드 중  $A_0$  mode (또는 flexural wave)와  $S_0$  mode (또는 extensional wave)에 대한 균속도를 wavelet 변환으로 구하고 그 결과를 이론적인 예측값과 비교하였다. 또한 이들 결과 비교의 정확성에 기초하여 wavelet 변환을 이용한 음향 방출원의 위치 표정 알고리즘을 구성하고 그 타당성을 시험하였다.

## 2. Wavelet 변환

Wavelet 변환은 신호처리 분야에서 하나의 새로운 방법으로서 다양한 분야에 적용되고 있으며 계속 연구중에 있다. 분산성 신호의 시간-주파수 해석을 위한 wavelet 변환에 대해 간단히 소개한다.<sup>(10)</sup>

함수  $f(t)$ 에 대한 wavelet 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$(Wf)(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

여기서  $a > 0$  이고, 기호  $\overline{\phantom{x}}$ 는 공액복소수를 의미한다.  $\psi(t)$ 는 기본 wavelet 함수로서 연구된 여러 가지 함수들이 있지만 본 연구에서는 Gabor 함수를 사용하였다. Gabor 함수는 불확정성의 원리에 의해 가장 뛰어난 시간, 주파수 분해능을

가지고 있으며 Gaussian 창함수를 씌운 복소수 sine 형태의 함수로서 다음과 같다.

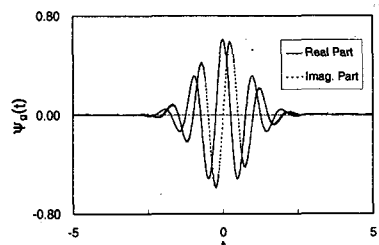
$$\psi_g(t) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\omega_0}}{\gamma} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2 t^2}{2}\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (2)$$

여기서  $\omega_0$ 와  $\gamma$ 는 양의 상수이며, wavelet 함수는 발산하지 않고 일정 영역의 값을 가져야 하므로 다음의 허용조건을 만족해야 한다.

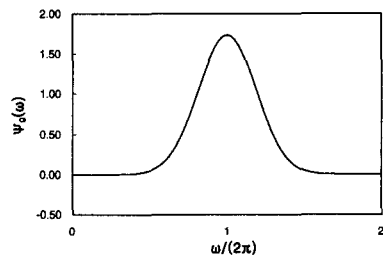
$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\widehat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

여기서  $\widehat{\psi}(\omega)$ 는  $\psi(t)$ 의 Fourier 변환이다.

Gabor 함수는 이 조건을 엄밀히 만족하지 않지만  $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2} = 5.336$ 로 두면 근사적으로 만족한다. Gabor 함수의 Fourier 변환은 중심주파수가  $\omega = \omega_0$ 가 되고 본 연구에서는  $\omega_0 = 2\pi$ 로 두어  $a$  값을 파동의 주기와 같게 설정하였다. 그러므로 주파수값은  $a$ 의 역수가 된다. Fig. 1은 Gabor 함수와 FT의 결과를 보여주며  $\omega_0 = 2\pi$ 로 두었을 때  $2\pi$ 로 정규화된 중심주파수가 1이 됨을 알 수 있다.



(a) Gabor function



(b) Fourier transform of Gabor function

Fig. 1 Gabor function and its Fourier transform

식 (1)에서  $a$ 와  $b$ 는 각각 주파수 간격(scale)과 시간 이동(shift)을 의미한다. 즉, 본 연구에서 사용한 Gabor 함수  $\psi_g(t)$ 는 중심시간이  $t=0$ 이고 중심 주파수가  $\omega = \omega_0$ 이며,  $\psi_g(\frac{t-b}{a})$ 는 중심 시간이  $t=b$ 이고 중심 주파수가  $\omega = \omega_0/a$ 가 된다. 이산화된  $a$ 와  $b$ 의 값들은 다음과 같이 정의할 수 있으며

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

$m$ 과  $n$ 은 정수이고,  $\Delta t$ 는 시간 이동 간격이다. 주파수 분해 간격은 2의 지수승으로 증가되며 주파수 분해 간격을 줄이기 위해서는 4보다 큰 값으로  $m$ 을 나누어 주면 된다. 앞에서 설명한 STFT는 WT와 주파수 분해능에서 차이가 있다. Fig. 2는 FT, STFT, 그리고 WT에서 원신호 (a)를 변환할 때의 분해되는 창을 나타낸다. FT에서는 시간의존성이 없어지는 반면, STFT와 WT에서는 시간 주파수 분석이 가능하며 WT에서는 주파수에 따라 분석되는 시간 간격이 달라진다. 즉 저 주파수에서는 넓은 범위의 시간 간격을 요구하는 반면, 고주파수로 갈수록 간격이 줄어든다.

전체적인 wavelet 변환 알고리즘은 다음과 같다 (Fig. 3 참조).

① 원신호의 시작점을 기준으로 하여  $b$  시간 동안의 신호를 wavelet 변환하고 그 크기를 계산

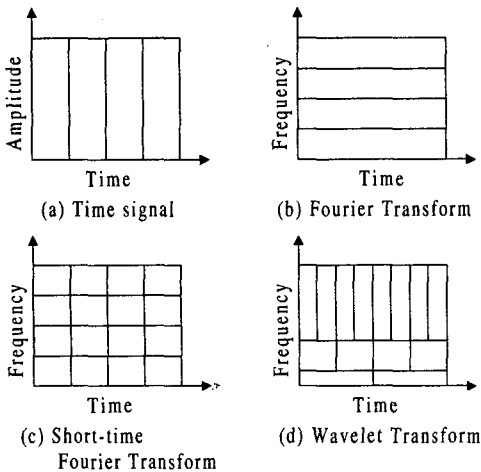


Fig. 2 Comparison of transform domains

한다. 이 값은 wavelet 변환으로 계산된 복소수의 절대값으로서 해당 신호부분이 wavelet의 중심주파수 성분을 얼마만큼 가지고 있는가를 정량적으로 나타낸다.

② wavelet을 오른쪽으로  $\Delta t$ 만큼 이동 ( $b$  증가)시켜 ①의 과정을 수행하고 전신호 영역까지 반복한다.

③ wavelet의 크기를 변화 ( $a$  증가)시켜 ①, ②의 과정을 수행하고 변환하고자 하는 주파수 영역까지 반복한다.

수학적으로 WT 변환을 파동진파에 적용하기 위해서 단위 크기와 주파수  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 를 가지고  $x$  방향으로 전파하는 두 개의 조화진행파를 고려한다.

$$u(x, t) = e^{-i(k_1x - \omega_1t)} + e^{-i(k_2x - \omega_2t)} \quad (5)$$

여기서  $k_1$ 과  $k_2$ 는 파수이고 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = 2\cos(\Delta kx - \Delta\omega t)e^{-i(k_c x - \omega_c t)} \quad (6)$$

여기서  $k_c = (k_1 + k_2)/2$ ,  $\omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2$ ,  
 $\Delta k = (k_1 - k_2)/2$ ,  $\Delta\omega = (\omega_1 - \omega_2)/2$ .

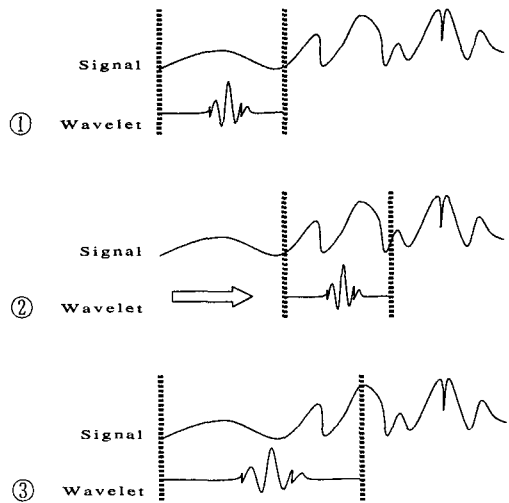


Fig. 3 Schematic representation of wavelet transform algorithm

$\Delta\omega$ 가 충분히 작다면 주파수  $\omega_c$ 에서 위상속도  $c_p$ 와 군속도  $c_g$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$c_p = \omega_c / k_c, \quad c_g = \Delta\omega / \Delta k \quad (7)$$

$u(x, t)$ 의 WT는

$$(Wu)(x, a, b) = \sqrt{a} [e^{-i(k_1 x - \omega_1 b)} \widehat{\psi}(a\omega_1) + e^{-i(k_2 x - \omega_2 b)} \widehat{\psi}(a\omega_2)] \quad (8)$$

이고, 식 (8)의 크기는 다음과 같다.

$$|(Wu)(x, a, b)| = \sqrt{a} [(\widehat{\psi}(a\omega_1))^2 + (\widehat{\psi}(a\omega_2))^2 + 2\widehat{\psi}(a\omega_1)\widehat{\psi}(a\omega_2)\cos(2\Delta kx - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \quad (9)$$

$\Delta\omega$ 가 충분히 작고  $\widehat{\psi}(a\omega_1) \approx \widehat{\psi}(a\omega_2) \approx \widehat{\psi}(a\omega_c)$  이라면 식 (9)은 다음과 같다.

$$|(Wu)(x, a, b)| \approx \sqrt{2a} |\widehat{\psi}(a\omega_c)| [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \quad (10)$$

따라서  $a = \omega_0 / \omega_c$ ,  $b = (\Delta k / \Delta\omega)x = x / c_g$ 일 때 WT의 절대값은 시간-주파수 평면에서 극대(peak)가 됨을 알 수 있고, 주파수  $\omega_c$ 에서 WT의 절대값이 극대가 되는 시간을 구하면 전파되는 파의 군속도를 계산할 수 있다.

### 3. 실험장치의 구성

알루미늄 판에서 발생된 판파의 군속도를 측정하기 위해서 Fig. 4와 같이 실험장치를 구성하였다. 사용된 시편은 크기가 1200 mm×1200 mm×3 mm인 알루미늄 6061-T6이고, 가장자리에서 반사되는 파의 영향을 배제하기 위해 가능한 한 큰 판을 사용하였다. 연필심 (HB 0.5 mm) 파단을 이용하여 탄성파를 발생시켰다. 직경 1/2인치의 음향방출 센서(R15, PAC)로부터 판파를 수신하고

예비증폭기로 40 dB, 본체 (MISTRAS 2001)에서 40 dB 증폭시켜 PC에서 신호분석을 하였다.

Sampling rate는 4 MHz이고 Nyquist sampling theory에 의해 최대 2 MHz까지 분석이 가능하다. PC에서는 앞에서 언급한 WT 알고리즘을 이용해 주파수에 따른 군속도를 계산하였다. 재질은 균질, 등방성으로 가정하였으며, 속도 측정을 위해서 Fig. 4와 같이 충격지점과 일직선상에 2개의 센서를 배치하였다. 센서  $S_1$ 에서 300 mm 떨어진 위치에서 음원을 발생하였으며, 두 센서 사이의 거리는 300 mm이다. 계산에 사용된 알루미늄의 주요 물성값은 Table 1에 나와 있다.

점원에 의해 발생된 탄성파의 위치표정을 위해서 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. 2차원 위치표정을 위해서는 4개 이상의 센서가 필요하다. 센서들은 정삼각형으로 배치하였고 센서 사이의 거리는 300 mm를 유지하였으며 나머지 절차는 앞의 실험과 같다.

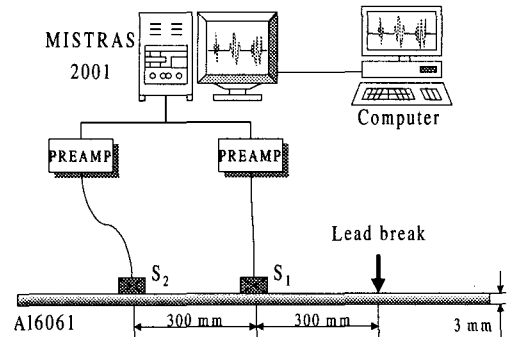


Fig. 4 Experimental setup for group velocity measurements

Table 1 Material properties of aluminum

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Longitudinal wave velocity (m/s)	Transverse wave velocity (m/s)	E (GPa)	$\nu$
Al 6061-T6	2.73	6560	3120	71.4	0.353

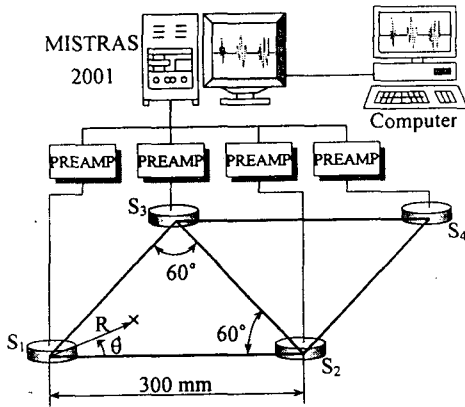


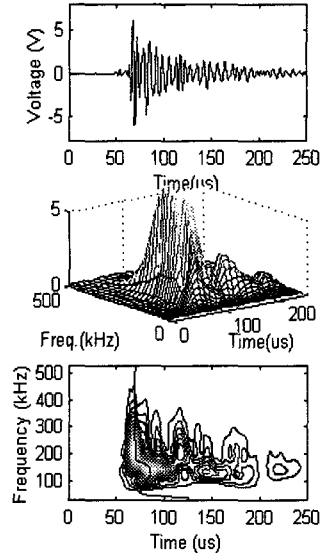
Fig. 5 Experimental setup for source location

4. 군속도 측정

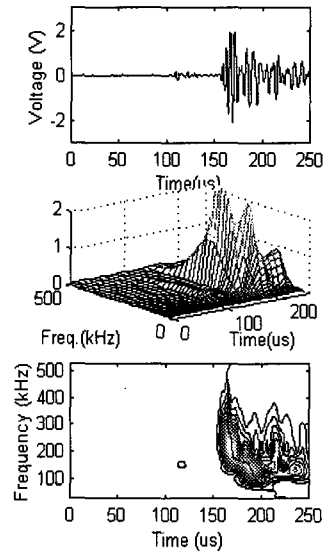
Fig. 4에서와 같이 센서  $S_1, S_2$ 에서 수신된 신호를 이용해 군속도를 측정할 수 있다. Fig. 6은 연필심을 판에 수직인 방향으로 파단했을 때 발생한 판파의 원신호와 그것의 WT, 그리고 contour plot을 나타낸다. 원신호에서 판파의 대칭 기본모드( $S_0$ )인 신장파(extensional wave)가 먼저 나타나고 그 뒤에 비대칭 기본모드( $A_0$ )인 굽힘파(flexural wave)가 나타났다.  $S_0$  모드의 WT 변환값은 아주 미약하고 검출된 주파수 범위도 아주 좁아 분석이 어려우므로, 상대적으로 신호가 크게 나타나는  $A_0$  모드에 대한 군속도 측정과 그것을 이용한 위치표정을 다루었다. 또한 연필심을 판과 수평인 방향으로 파단했을 때  $S_0$ 모드가 지배적으로 나타나므로  $S_0$  모드에 대한 군속도 측정과 음원 위치표정을 다룰 수 있었다. 이것은 source가 판의 중심평면에 대해 대칭적이어서 대칭모드의 진폭이 크게 되기 때문으로, 판과 수직하게 연필심을 눌러 부러뜨린 비대칭적인 source의 경우보다 크게되며 속도도 빨라 먼저 도달하게된다.

앞에서 언급한 바와 같이 각 주파수에서 WT의 최대값 발생 시간은 군속도의 전파시간이 되므로, 두 센서에서 도달시간 차이를 구하고 센서 사이의 거리를 나누어줌으로써 군속도를 구할 수 있다. Contour plot에서 연결된 실선은 최대값을 이은 선이다.

Fig. 7은  $A_0$  모드와  $S_0$  모드에 대한 군속도의 측정 결과이다. 점선과 실선은 이론적으로 계산한  $A_0$  모드와  $S_0$  모드의 군속도 값이고<sup>(5)</sup> ‘●’, ‘◆’은



(a) Sensor  $S_1$



(b) Sensor  $S_2$

Fig. 6 Plate waves received at sensors  $S_1$  and  $S_2$ , and their WT results

각각 실험에 의한 측정값이다. 연필심 파단일 경우에는 50~400 kHz 범위까지 군속도를 측정할 수 있었다. 그 외 범위에서는 주파수 성분이 발생되지 않았거나 아주 미약해서 분석할 수 없었다. 3차원 탄성론에 기초한 엄밀해인 이론적 예측값과 비교할 때 측정값은 이들 주파수범위 내에서 아주 잘 일치한다.

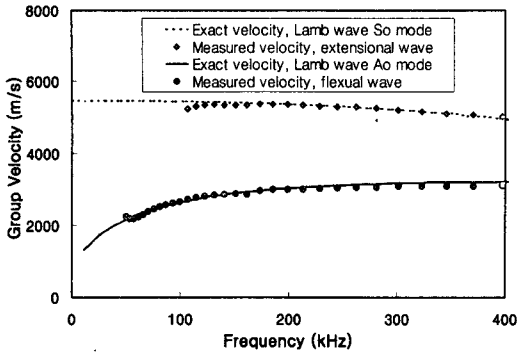


Fig. 7 Comparison of measured and predicted group velocities

### 5. 음원의 위치표정

판내의 임의 위치에서 발생된 탄성파는 Fig. 5와 같이 배치된 센서에 의해서 검출된다. 센서  $S_1, S_2, S_3$ 을 이용해 위치를 추정하면 2개의 해가 나오고 센서  $S_4$ 를 이용해서 true location을 결정할 수 있다. Fig. 5에서와 같이 극좌표를 설정하고 센서 사이의 도달시간 차이를 이용해 위치표정식을 유도하면 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{3}(E_1 - E_2)}{E_1 + E_2} \right) \pm \cos^{-1} \left( \frac{C_2 - C_1}{\sqrt{E_1^2 - E_1 E_2 + E_2^2}} \right) \quad (11)$$

$$R = \frac{1}{2(C_1 + E_1 \cos(\theta - \pi/3))} \quad (12)$$

여기서  $C_1 = \frac{\Delta t_1 \cdot V}{d^2 - \Delta t_1^2 V^2}$ ,  $C_2 = \frac{\Delta t_2 \cdot V}{d^2 - \Delta t_2^2 V^2}$

$$E_1 = \frac{d}{d^2 - \Delta t_1^2 V^2}, \quad E_2 = \frac{d}{d^2 - \Delta t_2^2 V^2}$$

이고  $d$ 는 센서간의 거리,  $\Delta t_1$ 은 센서  $S_1$ 과 센서  $S_2$ 의 도달 시간차,  $\Delta t_2$ 는 센서  $S_1$ 과 센서  $S_3$ 의 도달 시간차,  $d$ 는 판의 두께, 그리고  $V$ 는 판파의 전파 속도이다. 식 (11)과 (12)는 시간차가 일정한 점의 자취를 구하는 쌍곡선 방정식으로부터 유도되었고 시간차  $\Delta t_1$ 과  $\Delta t_2$ 로부터 source를 추정하는 식이다.

이 식을 이용하기 위해서는 군속도값( $V$ )이 필요하며 이 값은 앞에서 실험적으로 측정된 데이터를 이용한다. 중심주파수가 150 kHz인 R15 음

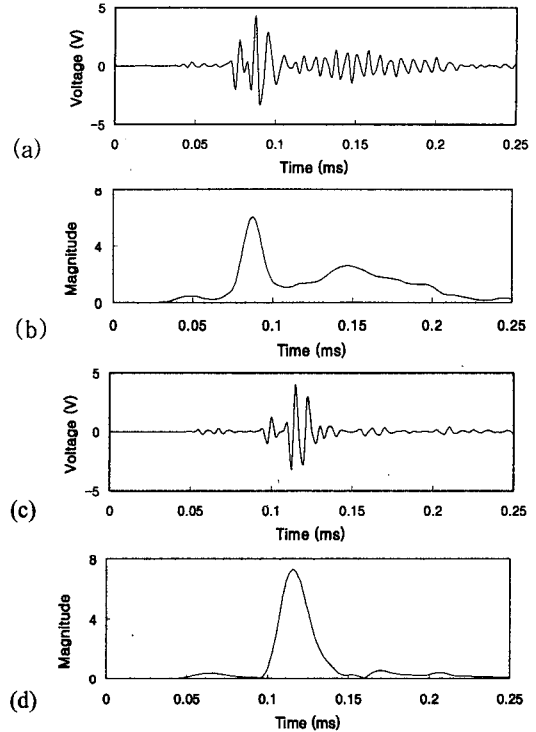


Fig. 8 (a) Signal of sensor  $S_1$  (source at A)

(b) WT of (a) at 150 kHz

(c) Signal of sensor  $S_2$  (source at A)

(d) WT of (c) at 150 kHz

향방출 센서를 사용했기 때문에 150 kHz에서 WT 강도가 가장 크고 매우 정확함을 알 수 있다. 따라서 위치표정에서 군속도값은 주파수가 150 kHz에서의 값( $A_0$ 는 2900 m/s,  $S_0$ 는 5400 m/s)을 사용하였고, 4개의 센서에서 수신된 신호도 150 kHz에서만 WT를 실행하였다.

음원의 위치 표정을 위하여 2가지 경우를 고려하였다. 먼저  $A_0$  모드만을 이용한 위치 표정을 다루고, 다음으로  $S_0$ 와  $A_0$  모드가 모두 지배적으로 나타나는 경우에 각 모드를 식별하여 위치 표정을 하는 경우를 다루었다.

Fig. 8은 첫 번째 경우로 음원에서  $A_0$  모드만이 지배적으로 나타날 때의 센서  $S_1, S_2$ 에서 검출된 신호와 150 kHz에서의 WT 결과를 보여준다. 즉, 시간에 따라서 150 kHz 주파수 성분이 어떻게 변화하는가를 확인할 수 있으며, 앞에서 설명한 것처럼 최대값 발생 위치가 판의 도달시간이 되므로 이 시간값을 위치표정 알고리즘에 사용하였다.

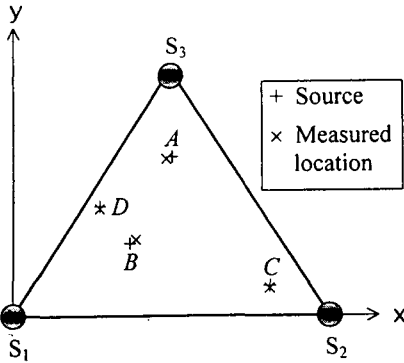


Fig. 9 Source location results of case 1

Table 2 Source location errors

Location	Source (mm)	Error (mm)	
		WT method	Cross-correlation method
A	150, 180	5.7	3.2
B	100, 80	5.3	3.0
C	270, 30	2.0	3.2
D	80, 130	2.8	6.0

이 경우에 대한 위치표정 결과는 Figure 9와 Table 2에 나타내었으며 WT를 이용한 방법과 비교하기 위해 cross-correlation 결과와 비교하였다.<sup>(11)</sup> 음원과 각 방법에 의한 오차를 Table 2에 나타내었다. 여기서 오차는 실제 위치와 표정 위치와의 차이로 계산하였다. 오차의 발생원인에는 센서의 크기, 실험시 측정 위치, WT의 최대값 결정 등이 포함된다. 위치표정 결과는 오차가 6 mm 이하로 아주 정확함을 알 수 있고 WT와 cross-correlation을 이용한 방법 모두 양호한 결과를 나타내었다.

다음으로 음원으로부터 발생된 판파가 A<sub>0</sub> 모드와 S<sub>0</sub> 모드를 모두 포함하는 경우에 대하여 이 두가지 모드를 각각 이용하여 위치표정을 하고 결과를 비교하였다. 실험에서 두 모드를 동시에 발생시키기 위하여 판의 측면에서 수평인 방향으로 연필심을 파단하였다.

Fig. 10에서는 두 번째 경우에 대해서 센서 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>에서 검출된 신호와 150 kHz에서의 WT 결과를 보여주며, 두 가지 모드에 대해서 각각의

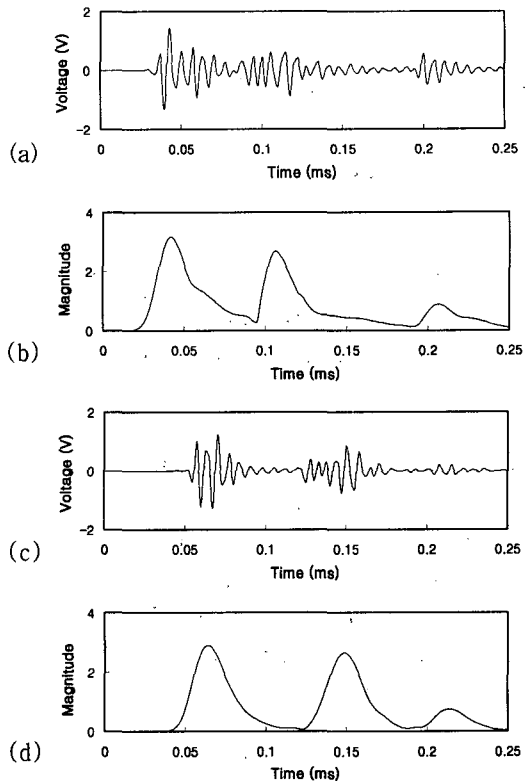


Fig. 10 (a) Signal of sensor S<sub>1</sub> (source at A)  
 (b) WT of (a) at 150 kHz  
 (c) Signal of sensor S<sub>2</sub> (source at A)  
 (d) WT of (c) at 150 kHz

최대값이 나타남을 알 수 있다. 이 경우에 수신된 신호에는 A<sub>0</sub> 와 S<sub>0</sub> 모드가 모두 나타나므로 정확한 음원 위치를 결정하기 위해서는 센서 S<sub>1</sub> 과 센서 S<sub>2</sub>의 수신 신호에서 공통적인 모드를 먼저 식별한 다음, 동일한 모드를 이용하여 도달 시간 차이를 계산하여야 한다.

위치표정 결과는 Fig. 11에 나타내었으며, 위치표정오차는 Table 3에 나타내었다. A<sub>0</sub> 모드를 사용한 경우와 S<sub>0</sub> 모드를 사용한 경우 모두 비슷한 오차를 보여주고 있다. 또한 센서에 도달한 판파의 신호에서 모드를 먼저 식별한 다음, 센서 사이의 도달 시간차 계산에서 공통적인 모드를 사용했기 때문에 아주 정확하게 음원 위치를 결정할 수 있었다.

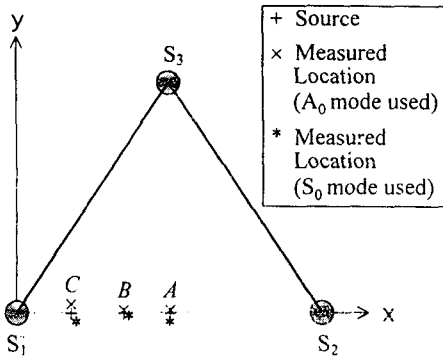


Fig. 11 Source location results of case 2

Table 3 Source location errors

Location	Source (mm)	Error (mm)	
		A <sub>0</sub> mode used	S <sub>0</sub> mode used
A	150, 0	2.8	3.8
B	100, 0	3.6	4.3
C	50, 0	5.2	5.7

#### 4. 결론

박판에서 전파되는 분산성 판파의 군속도와 음원 위치 결정을 위하여 WT를 이용하였다. Gabor wavelet을 이용한 WT는 분산성 파동의 시간-주파수 분석에 효과적인 도구였으며, 파의 군속도와 음원 위치 결정에 필요한 시간차는 시간-주파수 분포의 최대값으로부터 구할 수 있었다.

연필심 파단에 의해 발생한 신호의 굽힘모드와 신장모드는 50~400 kHz 주파수 범위가 지배적이었고, 측정된 군속도에서 A<sub>0</sub> 모드는 2200~3200 m/s, S<sub>0</sub> 모드는 5450~5020 m/s로서 이론식에 의한 계산값과 잘 일치하였다.

굽힘모드와 신장모드의 WT 결과를 이용한 음원 위치 표정 알고리즘은 정확한 결과를 제공하였고 WT와 cross-correlation 방법 모두 비슷한 결과를 나타내었다. 수신 신호가 두 모드를 모두 포함하는 경우에는 우선 각각의 모드를 식별하고 동일 모드를 사용하여 도달 시간차이를 계산하는 것이 중요하며, A<sub>0</sub>와 S<sub>0</sub>중 어떤 모드를 사용하더라도 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 간단한 등방성 박판에서의 위치 표정을 다루었으나, 좀더 복잡한 이방성 적층판에 대해서도 적용 가능할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Graff, K. F., 1975, *Wave Motion in Elastic Solids*, Ohio State University Press.
- (2) Achenbach, J. D., 1975, *Wave Propagation in Elastic Solids*, NorthHolland Publishing Company.
- (3) 조윤희, Rose, Joseph L., 1996, "대형 구조물의 비파괴검사를 위한 유도초음파 모드특성에 관한 연구" 한국 비파괴검사학회, 추계학술대회 논문집, pp. 93~101.
- (4) Prosser, W. H., Jackson, K. E., Kellas, S., Smith, B. T., Mckee, J., and Friendmen, A., 1995, "Advanced Waveform-Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites," *Materials Evaluation*, Vol. 53 pp. 1050~1058.
- (5) Rogers, W. P., 1995, "Elastic Property Measurement using Rayleigh-Lamb Waves," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 6, pp. 185~208.
- (6) Kishimoto, K., Inoue, H., Hamada, M., and Shibuya, T., 1995, "Time Frequency Analysis of Dispersive Waves by Means of Wavelet Transform," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 62, pp. 841~846.
- (7) 장경영, 이원흠, 김달중, 1998, "전파속도를 알 수 없는 재료에서의 AE 발생위치 온라인 측정," 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제3호, pp. 688~694.
- (8) Tobias, A., 1976, "Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors," *Non-Destructive Testing*, Vol. 9, pp. 9~12.
- (9) Suzuki, H., Kinjo, T., Hayashi, Y., Takemoto, M., and Ono, K. 1996, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals," *Journal of Acoustical Emission*, Vol. 14(2), pp. 69~84.
- (10) Burrus, C. S., Gopinath, R. A., and Guo, H., 1998, *Wavelets and Wavelet Transforms*, Prentice Hall, New York, NY.
- (11) Ziola, S. M., and Gorman, M., 1991, "Source Location in Thin Plates Using Cross-Correlation," *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 90, No. 5, pp. 2551~2556.