

論文

Wavelet 변환을 이용한 이방성 적층판의 판파 해석과 음원 위치 결정

장영수* · 정현조**

Wavelet Analysis of Plate Waves in Anisotropic Laminates and Acoustic Source Location

Young-Su Jang* and Hyunjo Jeong**

ABSTRACT

A new approach is presented for the analysis of transient waves propagating in anisotropic composite laminates. The wavelet transform (WT) using the Gabor wavelet is applied to the time-frequency analysis of dispersive flexural waves. It is shown that the peaks of the magnitude of WT in time-frequency domain is related to the arrival times of group velocity. Experiments are performed using a lead break as the simulated fracture source on the surface of quasi-isotropic and unidirectional laminates. For predictions of the dispersion of the flexural mode, Mindlin plate theory is shown to give good agreement with the experimental results. Based on the frequency-dependent arrival times and angular dependence of group velocities of flexural waves, the problem of source location in anisotropic laminates is considered and the results are given.

초 록

이방성 적층 복합재 판의 과도적인 파동 해석을 위한 새로운 방법을 제시하였다. Gabor wavelet을 사용하는 wavelet 변환을 분산성 굽힘파의 시간-주파수 해석에 적용하였다. 시간-주파수 영역에서 wavelet 변환의 크기의 최대값은 군속도의 도달시간을 나타냄을 보였다. 음향방출원으로서 연필심 파단을 사용하여 준등방성 판과 일방향 보강 적층판에서 실험을 수행하였다. 굽힘파의 분산 예측을 위하여 Mindlin 판이론을 사용하였으며, 주파수의 함수로 몇 개의 방향에 대해 측정된 군속도 실험 결과와 잘 일치하였다. 굽힘파의 주파수 의존 도달 시간과 같은 파의 군속도 방향의존성을 이용하여 이방성 판에서의 파손 위치를 결정하였으며, 그 결과를 제시하였다.

1. 서 론

복합재 구조물의 구조적 건전성을 평가하기 위하여 음향방출(acoustic emission, AE) 시험이 자주 이용되고 있다. 이와 같이 음파를 이용하는 비파괴 평가법에

서 보, 판, 셸과 같은 구조용 부재에서의 파의 전파 특성을 이해하는 일이 먼저 필요하다. 판상 구조물의 경우에 음원으로부터 멀리 떨어진 위치에서 전파되는 파는 Lamb 방정식에 의해 지배되며 그 해를 Lamb 파라고 부른다[1]. Lamb 파는 판면에 수직인 변위 성분에

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과
** 원광대학교 기계공학부

의해 대칭 모드(symmetric mode)와 비대칭 모드(antisymmetric mode)로 크게 나누어지며, 각 모드에는 주파수와 두께의 조합에 따라 여러 가지 모드가 존재할 수 있고 모두 전파 속도가 주파수에 의존하는 분산성을 가진다. 박판의 경우에 Lamb 파의 최저차 대칭 모드(S_0)와 비대칭모드(A_0) 속도들은 저주파수 범위에서 고전판 이론으로부터 구한 해와 일치한다[2]. 이 경우에 판파의 두 모드를 각각 신장모드(extensional mode)와 굽힘모드(flexural mode)라 부르며, 이들은 서로 다른 속도로 전파하며 모두 분산 특성을 가진다. 판파의 속도를 측정하면 재료의 물성 평가나 음원 위치 결정 등에 유용하게 사용될 수 있다[3-5].

분산성이 존재하는 신호의 분석을 위하여 푸리에 변환이 널리 사용되어 왔다. 최근에는 wavelet 변환(WT)이 분산 매체에서 과도적 신호의 시간-주파수 분석을 위해 소개되고 있으며, 과학과 공학의 다양한 분야에서 wavelet의 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[6,7]. Kishimoto 등[8]은 보에서 굽힘파의 시간-주파수 분석을 위해 Gabor wavelet을 사용한 WT를 적용하였다. Suzuki 등[9]은 섬유 강화 복합재의 파단 모드에 따른 음향방출 신호를 WT를 통하여 관찰하였다. Jeong과 Jang[10]은 분산성 판파의 WT를 사용하여 등방성 판의 음원 위치 결정에 적용하였다.

본 연구에서는 복합재 적층판에서 과도적 신호 분석을 위하여 wavelet 변환을 적용하였다. 먼저 Gabor wavelet을 이용한 WT 이론을 간단히 소개하고 분산성 파동 전파에 적용할 때 WT 크기의 극대값을 이용하여 각 주파수에서의 군속도 도착 시간을 구할 수 있음을 설명한다. 다음으로 굽힘파를 발생시키기 위해서 graphite/epoxy 적층판 표면에 연필심을 파단시켜 군속도를 측정하는 실험 내용을 다룬다. 측정된 굽힘파의 군속도를 Mindlin 판 이론[11]에 의한 예측값과 비교한다. 마지막으로 굽힘파의 주파수의존 도달시간과 방향의존 군속도를 이용하여 이방성 복합재판에서의 음원 위치 결정법을 소개하고 그 결과를 제시한다.

2. Wavelet 변환

함수 $f(t)$ 에 대한 wavelet 변환(WT)은 다음과 같이 정의된다[4].

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

여기서 $a > 0$ 이고, 기호 $\bar{}$ 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 식 (2)와 같으며, Fourier 변환은 식 (3)과 같다.

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

$$\hat{\psi}_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp\left[-\frac{(\gamma/\omega_0)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \quad (3)$$

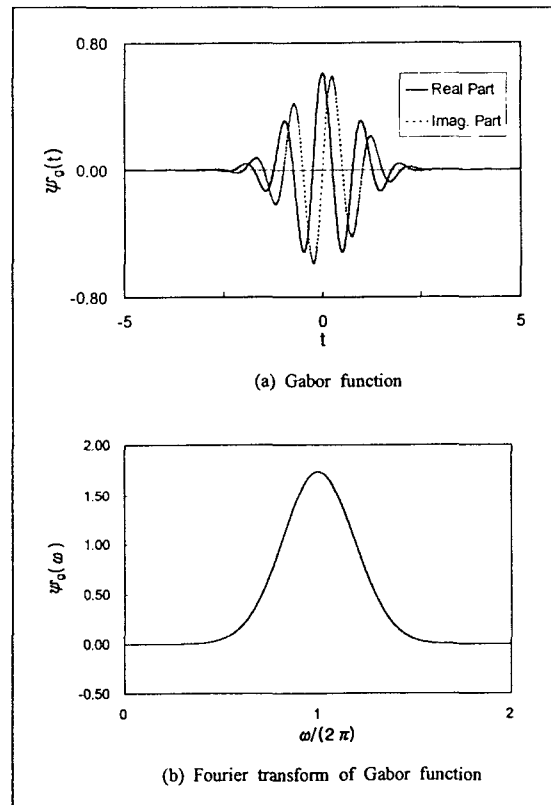


Fig. 1. Gabor function and its Fourier transform

여기서 ω_0 와 γ 는 양의 상수이며, 기본 wavelet 함수는 발산하지 않고 일정 영역의 값을 가져야 하므로 다음의 허용조건을 만족해야 하며

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

여기서 $\hat{\psi}(\omega)$ 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 Fourier 변환 결과를 보여주며 $\omega_0 = 2\pi$ 로 두었을 때 중심주파수가 1이 됨을 알 수 있다.

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

수학적으로 WT 변환을 파동전파에 적용하기 위해서 단위 크기와 주파수 ω_1 과 ω_2 를 가지고 x 방향으로 전파하는 두 개의 조화진행파를 고려한다.

$$u(x, t) = e^{-i(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{-i(k_2 x - \omega_2 t)} \quad (5)$$

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

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

$$\begin{aligned} \text{여기서 } k_c &= (k_1 + k_2)/2, \quad \omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2, \\ \Delta k &= (k_1 - k_2)/2, \quad \Delta \omega = (\omega_1 - \omega_2)/2 \end{aligned}$$

$\Delta \omega$ 가 충분히 작다면 주파수 ω_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

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

이고, 식 (8)의 크기는 다음과 같다.

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

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

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

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 ω_c 에서 WT의 절대값이 극대가 되는 시간을 구하면 전파되는 파의 군속도를 계산할 수 있다.

3. 굽힘파의 분산 예측

Graphite/epoxy 복합재 적층판에서 굽힘모드의 판파에 대한 분산 예측을 위하여 Mindlin 판이론을 이용하였다. 이 이론은 전단 변형과 회전 관성 효과를 포함하며 Tang과 Henneke [11], Prosser와 Gorman [12]에 의해 사용되었다. 분산 관계식은 단일 방향 적층판의 경우에 x 방향으로 전파하는 파에 대하여 식(11)을, y 방향으로 전파되는 파에 대해서는 식(12)를 만족한다.

$$(D_{11}k^2 + A_{55} - I\omega^2)(A_{55}K^2 - P^*\omega^2) - A_{55}^2 K^2 = 0 \quad (11)$$

$$(D_{22}k^2 + A_{44} - I\omega^2)(A_{44}K^2 - P^*\omega^2) - A_{44}^2 K^2 = 0 \quad (12)$$

대칭 준등방성 적층판의 경우에는 x 와 y 방향에 대하여 각각 다음 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} (D_{11}k^2 + A_{55} - I\omega^2)(D_{66}k^2 + A_{44} - I\omega^2)(A_{55}k^2 - P^*\omega^2) \\ - (D_{16}k^2)^2(A_{55}K^2 - P^*\omega^2) - (A_{55}k)^2(D_{66}k^2 + A_{44} - I\omega^2) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} (D_{22}k^2 + A_{44} - I\omega^2)(D_{66}k^2 + A_{55} - I\omega^2)(A_{44}k^2 - P^*\omega^2) \\ - (D_{16}k^2)^2(A_{44}K^2 - P^*\omega^2) - (A_{44}k)^2(D_{66}k^2 + A_{55} - I\omega^2) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 k 는 파수, ω 는 각주파수, $(\rho^*, I) = \int_{z=-h/2}^{z=h/2} \rho(l, z^2) dz$

, ρ 는 밀도, D_{ij} , $i, j=1, 2$, 또는 6는 굽힘강성이다.

$$A_{i,j} = x_i x_j \int_{z=-h/2}^{z=h/2} (Q_{ij})_r dz, \quad i, j=4, 5 \text{ 이고 } Q_{ij}, \quad i, j=4, 5 \text{ 는}$$

횡방향 전단강성을 나타낸다. x_i 는 전단보정계수로서 3차원 탄성이론과 가장 잘 일치하는 $x_i^2 = 5/6$ 이 사용되었다. 하첨자 r 는 적층판의 r 번째 층을 나타낸다.

식(11-14)에서 ω 의 함수로서 파수에 대한 해는 여러 개가 나오지만 단 하나의 근만이 주파수가 0으로 접근할 때 0이 되는 정해가 된다. ω 의 함수로서 파수가 알려지면 위상속도는 $c_p = \omega/k$ 의 관계식으로부터 구해질 수 있으며 이로부터 군속도 $c_g = dw/dk$ 를 구할 수 있다.

4. 군속도 측정 실험

본 연구에 사용된 복합재 적층판은 graphite/epoxy로 제작된 단일방향 적층판([0]₂₄)과 준등방성 적층판([0/+45/-45/90]_{3S})이다. 이 판들은 24개의 플라이로 구성되었고 공칭 두께는 3mm, 판의 치수는 600mm × 600mm이다. Lamina의 공칭 물성치는 Table 1과 같으며, 이 값을 이용하여 이론적 분산 관계 계산에 필요한 굽힘 강성 값을 구하였다.

군속도 측정을 위한 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 판파의 두 모드중 굽힘파를 발생시키기 위하여 연필심(HB 0.5mm)을 판에 수직으로 파단시켰다. 직경 1/2인치, 중심주파수 5 MHz의 광대역 초음파 센서로부터 판파를 수신하고 예비증폭기로 40dB, 본체(MISTRAS 2001, PAC)에서 40dB 증폭시켜 PC에서 신호분석을 하였다.

PC에서는 앞에서 언급한 WT 알고리즘을 이용해 주파수에 따른 군속도를 계산하였다. 속도 측정을 위해서 Fig. 2와 같이 충격지점과 일직선상에 2개의 센서를 배치하였다. 센서 S₁에서 200mm 떨어진 위치에서 음원을 발생하였으며, 두 센서 사이의 거리는 100mm이다. 식 (10)에서 WT 크기의 최대가 발생하는 (a, b)는 주파수 $f=1/a$ 일 때 파의 도달 시간 $b=x/c_g$ 인 관계가 있다. 그러므로 각각의 주파수에서 군속도는 다음 식과 같이 두 센서 사이의 거리를 도달 시간차로 나누어줌으로써 구해진다.

$$c_g(f) = \frac{l_2 - l_1}{b_2(f) - b_1(f)} \tag{15}$$

두 적층판에 대하여 모두 0°, 45°, 90° 방향으로 군속도를 측정하였다. 식 (1)에서 수치적 적분 계산을 위해 sampling rate와 같은 시간 간격으로 trapezoidal rule을 이용했으며, 변수 a 와 b 는 다음과 같이 증분시켰다.

$$a = 2^{m/4}, \quad b = n \Delta t_s \tag{16}$$

여기서 m 과 n 은 정수이다.

Fig. 3는 단일방향 적층판에 수직으로 연필심을 파단할 때 센서 S₁에서 수신한 파형을 보여준다. 파단지점과 센서간의 거리는 0° 방향으로 200mm이고 굽힘파가 약 180μs에서 관찰되었다. 굽힘모드임을 확인하기 위하여 두 개의 센서를 판의 상하에 부착하고 동시에 신호를 수신해본 결과 위상이 서로 반대가 되는 비대칭모드인 굽힘모드임을 확인할 수 있었다. Fig. 3는 또한 한 시간-주파수 영역에서 WT의 크기 분포와 등고선 모양의 contour plot을 보여주고 있다. Fig. 4는 점원으로부터 300mm 떨어진 센서 S₂에서의 파형과 WT 결과를 보여준다.

앞에서 언급한바와 같이 Fig. 3와 4에서 WT의 크기의 최대값은 군속도로 이동하는 굽힘파의 도달시간을 나타낸다. 특정 주파수 f 에서의 최대값 발생 시간 $b_1(f)$

Table 1. Properties of graphite/epoxy single lamina

E ₁₁ (GPa)	E ₂₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	ν ₁₂	ρ(kg/m ³)
134.0	9.6	4.8	0.28	1.6

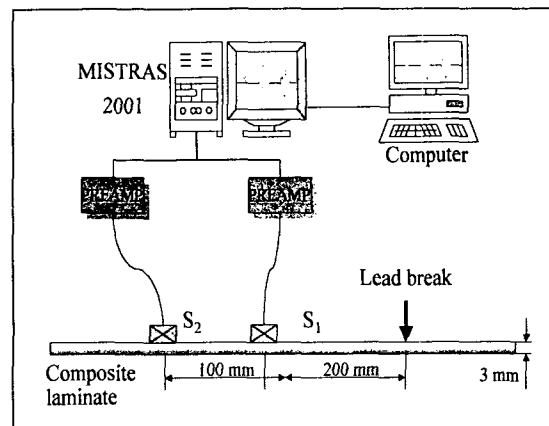


Fig. 2. Experimental setup for the measurement of plate wave velocities

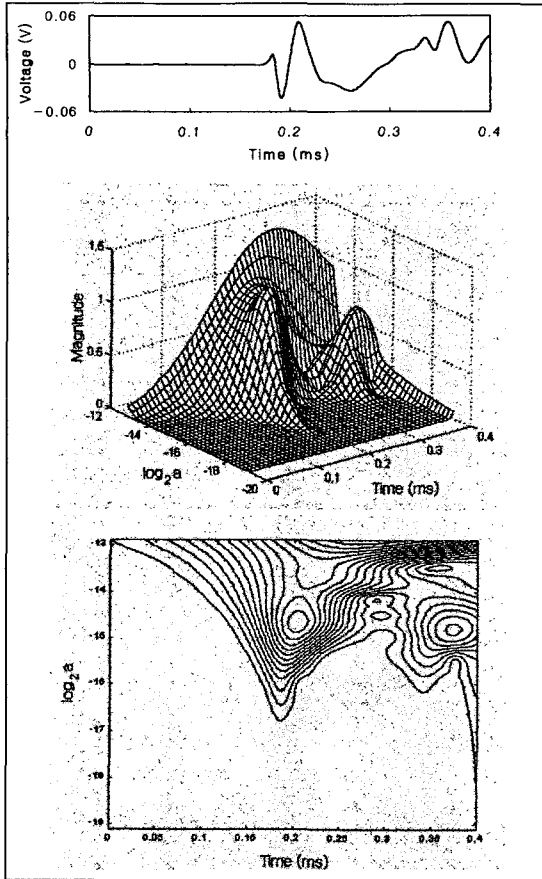


Fig. 3. Waveform detected at sensor S1: the magnitude of the WT; and its contour plot

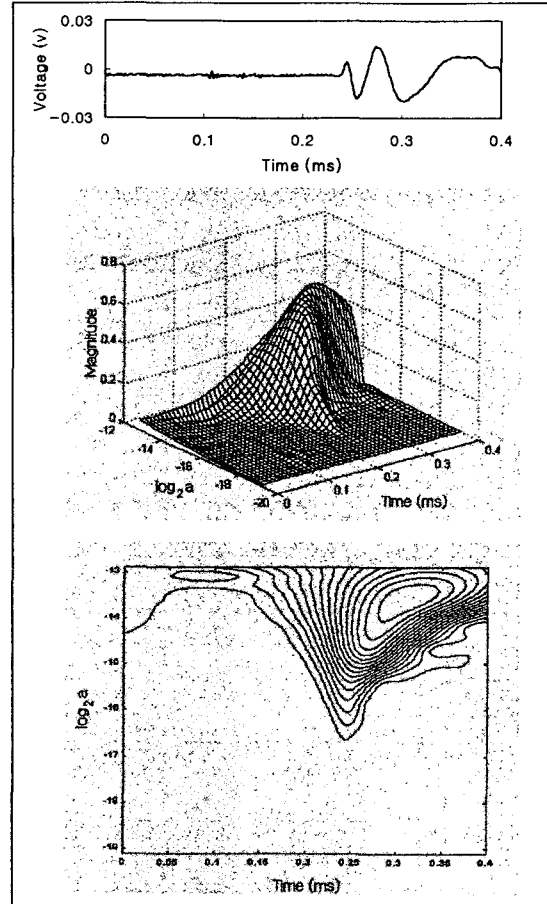


Fig. 4. Waveform detected at sensor S2: the magnitude of the WT; and its contour plot

와 $b_2(f)$ 은 별도의 컴퓨터 프로그램으로부터 자동적으로 구한 다음, 식 (15)에 의하여 알고 있는 두 측정지점 사이의 거리를 두 지점에서의 파의 도달시간 차이로 나누어 줌으로써 각각의 주파수에서 군속도를 계산하였다.

Fig. 5에는 단일 방향 적층판에서 0°방향(섬유방향)으로 전파하는 굽힘모드의 군속도 측정 결과가 나와 있다. 또 Mindlin 판이론[식 (11)]에 의해 구한 파수 (k)로부터 계산한 군속도 ($c_g = d\omega/dk$) 결과 함께 나와 있다. Fig. 6와 7은 단일방향 적층판에서 45°와 90°방향으로 전파하는 굽힘모드의 측정 군속도와 이론값의 비교이다. 측정값은 0~500kHz의 주파수 범위에서 이론값과 잘 일치함을 알 수 있으며, 따라서 연필심 파단에 의해 발생된 Lamb 파가 저주파수 굽힘모드임을 확인할 수 있다. 군속도는 섬유방향으로 전파될 때 가장 빠르며 90°로 갈수록 속도가 감소한다.

준등방성 적층판에서는 0°, 45°, 90°방향의 속도 측정값이 거의 동일하므로 0°방향에 대해서만 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Mindlin 판이론으로부터 구한 군속도 값과 잘 일치한다.

5. 음원위치 결정

2차원에서 음원의 발생위치를 결정하기 위해서는 3개의 센서가 필요하다. 센서를 삼각형으로 배열하고, 센서 사이의 거리와 음원으로부터 각 센서에 도달한 시간을 이용하여 음원의 위치를 구할 수 있다. 두 센서 사이의 도달 시간 차이로부터 가능한 음원의 궤적을 구할 수 있으며, 다른 두 센서에 대해서도 궤적을 구하면 두 궤적의 교점이 진정한 음원의 위치가 된다. 등방성 재

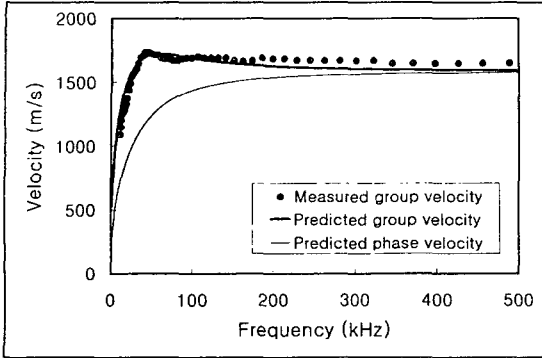


Fig. 5. Measured and theoretical flexural dispersion for 0° direction in unidirectional laminate

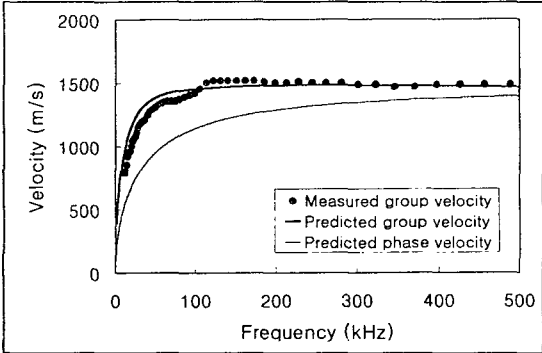


Fig. 6. Measured and theoretical flexural dispersion for 45° direction in unidirectional laminate

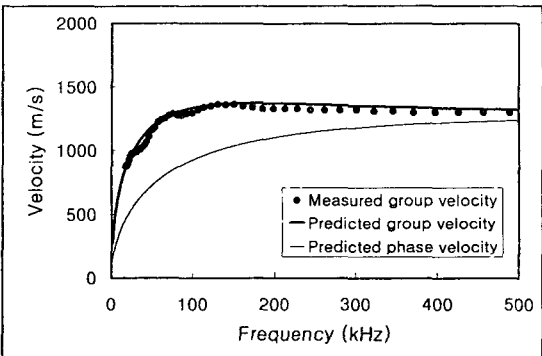


Fig. 7. Measured and theoretical flexural dispersion for 90° direction in unidirectional laminate

료에 대해서는 폐쇄형의 해가 구해져 있다^[13]. 이방성 재료의 경우에는 속도가 방향의 함수가 되므로 음원 위치 결정이 더 어렵다. 이방성 판에서 굽힘파를 이용하여 음원 위치를 결정하기 위해 Fig. 9과 같이 삼각형의 모서리에 위치한 3개의 센서 S_1, S_2, S_3 와 음원 $P(x,y)$

를 고려한다. 먼저 센서 S_1, S_2 를 고려하면 이들 센서에 도달하는 파의 시간차이는 다음으로 주어지며

$$t_1(f) - t_2(f) = \frac{l_1}{c_{1g}(f)} - \frac{l_2}{c_{2g}(f)} \quad (17)$$

여기서 c_{1g} 과 c_{2g} 는 각각 θ_1 과 θ_2 방향으로 전파하는 군속도이며, 주파수에 의존한다. Fig. 9의 기하학적 형상을 고려하면 미지의 값 l_1 과 l_2 는 θ_1 과 θ_2 , 그리고 두 센서사이의 거리의 함수로 나타낼 수 있다. 반복법을 이용해 θ_1 과 θ_2 를 0.1°씩 증가시키면서 계산에 의한 도달시간 차이가 측정값과 같게 되는 가능한 음원의 궤적을 구할 수 있다. 같은 방법으로 센서 S_1 과 S_3 를 이용하여 가능한 궤적을 구한 후, 두 궤적의 교점을 구하면 실제 음원 위치가 된다.

식 (17)에서 알 수 있듯이 이방성 판에서 음원 위치를 결정하기 위해서는 음원으로부터 각 센서에 도달하는 파

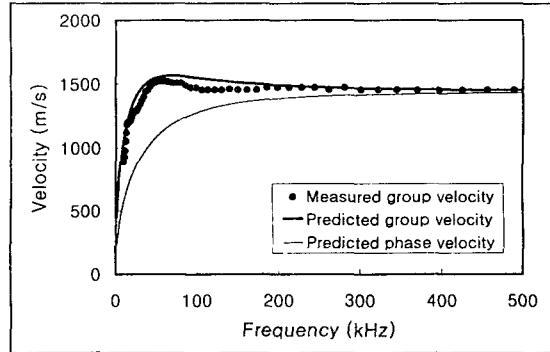


Fig. 8. Measured and theoretical flexural dispersion for 90° direction in quasi-isotropic laminate

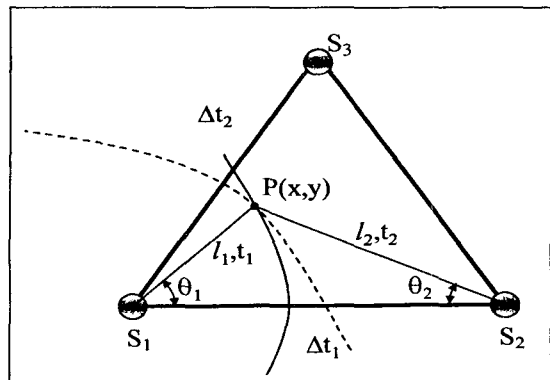


Fig. 9. Source location analysis for anisotropic laminate

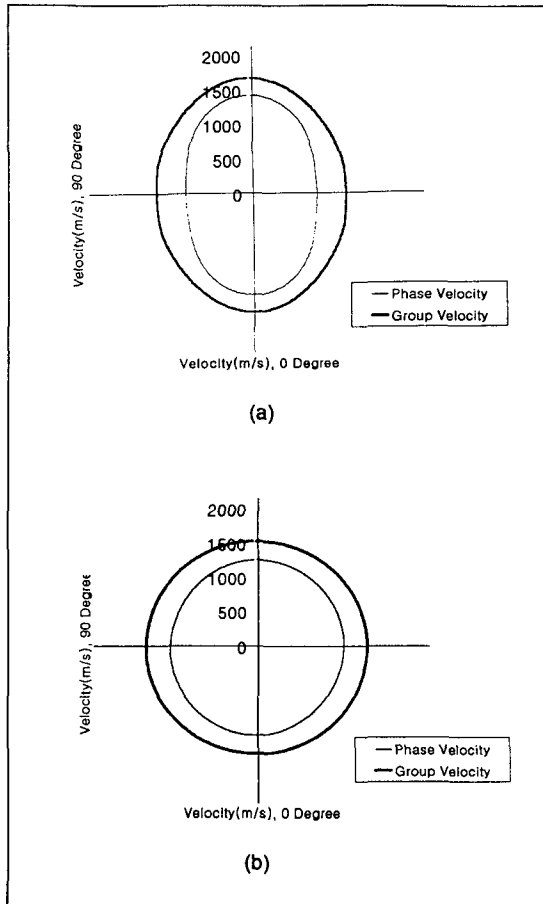


Fig. 10. Angular dependence of flexural mode velocity at 100kHz : (a) quasi-isotropic laminate; (b) unidirectional laminate

의 특정 주파수에서의 도달시간과 이 파의 특정 주파수에서 방향별 속도 값이 필요하다. 본 연구에서는 굽힘파의 주파수 분석 결과에 따라 지배적 성분이 나타나는 100kHz를 사용하였다. 방향별 군속도는 Mindline 판이론을 이용하여 주파수 100kHz에서의 위상속도로부터 계산하였으며, 그 결과를 등방성 적층판에 대하여 Fig. 10(a)에, 단일방향 적층판에 대하여 Fig. 10(b)에 나타내었다. 준등방성 적층판의 경우에는 방향에 따른 차이가 없으나, 단일방향 적층판의 경우에는 방향에 따른 속도 이방성이 크게 나타난다.

음원 위치 표정을 위해 Fig. 9에서와 같이 한 변의 길이가 200mm인 정삼각형으로 센서를 배치하고 연필심 파단에 의해 발생된 신호를 동시에 수신하였다. 연필심 파단으로 발생된 굽힘파의 각 센서 도달시간은 100kHz

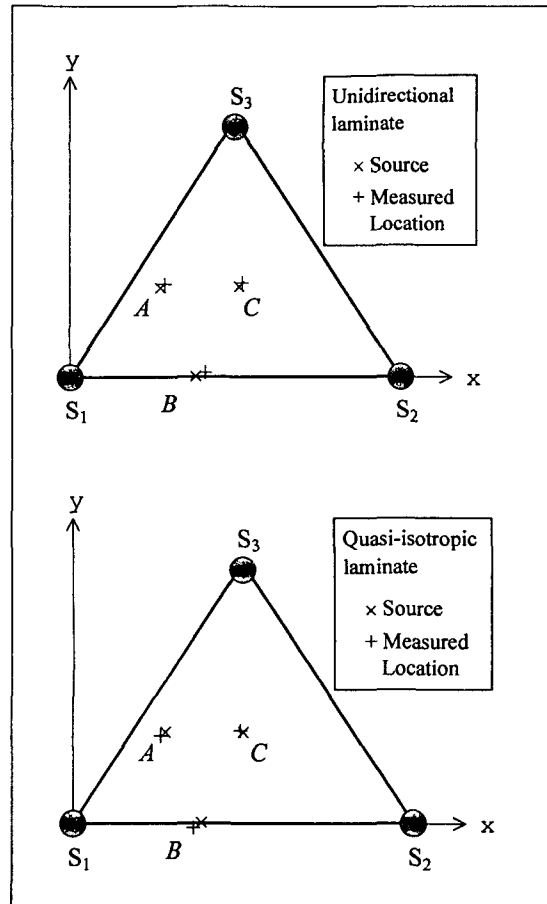


Fig. 11. Source location results : (a) quasi-isotropic laminate; (b) unidirectional laminate

Table 2. Source location errors

Source (x,y) (mm)	Error (mm)	
	Unidirectional laminate	Quasi-isotropic Laminate
A(50, 50)	2.9	1.7
B(75, 50)	3.6	2.6
C(100, 50)	2.5	1.0

에서 WT하여 구하였다. 준등방성 적층판과 단일방향 적층판에 대한 위치표정 결과를 Fig. 11에 제시하였다. 연필심 파단위치는 (x)로, 측정 위치는 (+)로 표시하였다. 또 Table 2에는 위치 표정 결과와 각각의 경우에 오차를 수록하였다. Table 2에서와 같이 실제 위치와 측정 위치의 차이는 모두 센서의 직경보다 작으므로, 여기서 제안한 방법으로 음원 위치를 정확하게 결정할 수 있다.

속도의 방향성이 없는 준등방성 판에서의 결과가 더 정확하며, 연필심 파단위치가 삼각형 내부에서 멀어질수록 오차가 증가함을 알 수 있다. 오차의 원인으로서는 균속도 계산에 사용된 재료 상수의 값 (Table 1), 센서 위치와 연필심 파단 위치의 측정 오차 등을 꼽을 수 있다.

6. 결 론

이방성 적층판에서 전파되는 판파의 시간-주파수 분석을 위해 wavelet 변환을 적용하였다. Gabor wavelet을 사용한 WT은 분산성 판파의 분석에 효과적인 도구임을 확인할 수 있었다. WT 크기의 최대값을 이용하여 주파수에 따른 분산성 파의 도달 시간으로부터 균속도 분산을 구할 수 있음을 보였다. 준등방성 및 단일방향 graphite/epoxy 적층판에서 0°, 45°, 90°의 세 방향을 따라 전파하는 굽힘모드의 균속도를 측정하였으며 Mindlin 판이론값과 비교하였다. Mindlin 판 이론은 전단변형과 회전관성 효과를 포함하기 때문에 이론값은 굽힘모드의 실험값과 잘 일치하였다. 음향방출원의 위치 표정을 위하여 3개의 센서를 삼각형 형태로 배열하고, 100 kHz에서 두 센서 사이의 신호 도달 시간 차이와 방향별로 계산한 균속도를 이용하여 아주 정확하게 이방성 판에서의 음원 위치를 결정할 수 있었다.

후 기

이 논문은 1998년도 학술진흥재단의 공모과제 학술연구비 (과제번호 : 1998-001-E00140)에 의해 지원되었음.

참고문헌

1. Lamb, H., "Waves in an Elastic Plate", Proceedings of Royal Society of London, Series A, Vol. 93, 1917, pp. 114-128.
2. Graff, K. F., Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State University Press, 1975.
3. Mal, A. K., Gorman, M. R., and Prosser, W. H., "Material Characterization of Composite Laminates Using Low-Frequency Plate Wave

Dispersion Data", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 11B, 1991, pp. 1451-1458.

4. Veidt, M., and Sayir, M., "Experimental Evaluation of Global Composite Laminate Stiffnesses by Structural Wave Propagation", Journal of Composite Materials, Vol. 24, 1990, pp. 688-706.

5. Ziola, S. M., and Gorman, M. R., "Source Location in Thin Plates Using Cross-Correlation", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90 (5), 1991, pp. 2551-2556.

6. Ruskai, M. B., Belykin, G., Daubechies, I., Meyer, Y., Coifman, R., Mallat, S., and Raphael, L. (Eds.), Wavelets and their Applications, Jones and Bartlett, Boston, 1992.

7. Chui, C. K., An Introduction to Wavelets, Academic Press, San Diego, 1992.

8. Kishimoto, K., Inoue, H., Hamada, M., and Shibuya, T., "Time Frequency Analysis of Dispersive Waves by Means of Wavelet Transform", Journal of Applied Mechanics, Vol. 62, 1995, pp. 841-846.

9. Suzuki, H., Kinjo, T., Hayashi, Y., Takemoto, M., and Ono, K., "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", Journal of Acoustic Emission, Vol. 14, No. 2, 1996, pp. 69-84.

10. Jeong, H., and Jang, Y.-S., "Fracture Source Location in Thin-Plates Using the Wavelet Transform of Dispersive Waves", To appear in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.

11. Tang, B., and Henneke II, E. G., "Long Wavelength Approximation for Lamb Wave Characterization of Composite Laminates", Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 1, 1989, pp. 51-64.

12. Prosser, W. H., and Gorman, M. R., "Plate Mode Velocities in Graphite/Epoxy Plates", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 96, No. 2, Part 1, 1994, pp. 902-907.

13. Tobias, A., "Acoustic Emission Source Location in Two Dimensions by an Array of Three Sensors", Non-Destructive Testing, Vol. 9, No. 1, 1976, pp. 9-12.