

## 시간 및 주파수 영역에서의 신호 처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정

### Measurements of Ultrasonic Velocity and Attenuation by Signal Processing Techniques in Time and Frequency Domains

장영수\*, 김진호\*, 정현조\*\*, 남영현\*\*\*

Young-Su Jang\*, Jin-Ho Kim\*, Hyunjo Jeong\*\* and Young-Hyun Nam\*\*\*

초 록 초음파 비파괴검사와 관련하여 많은 측정 방법들이 사용되고 있으며, 전형적인 예로서 재료성질 결정, 미시구조 특성 평가, 결함의 탐상 등을 들 수 있다. 이러한 응용에서 속도와 감쇠계수는 가장 흔히 요구되는 초음파 측정 파라미터이다. 본 연구에서는 수침식 펄스 에코방법으로 속도 및 감쇠 측정을 위한 5가지 해석 알고리즘 (펄스 겹침법, 상호 상관법, Fourier 변환, Hilbert 변환, Wavelet 변환)을 소개하였다. 먼저 연속한 두 저면 반사파 사이의 시간 지연 측정을 위하여 펄스 겹침법, 상호 상관법, Fourier 변환에 의한 위상 기술기법 및 Hilbert 변환법을 사용하였다. 주파수 의존 위상/군속도와 감쇠계수는 Fourier 변환에 의한 위상 및 진폭 스펙트럼이 사용되었으며, 이와 더불어 시간-주파수 해석법인 wavelet 변환이 이용되었다. 사용된 시편은 분산을 무시할 수 있는 강판과 약한 분산성을 지닌 기공을 함유한 복합판재이다. 각 측정 알고리즘의 특성에 대해 논의하였으며, 측정된 결과들을 서로 비교하였다.

**Abstract** There are many ultrasonic measurement methods that are used in nondestructive testing applications. Some typical applications include material property determination, microstructural characterization, and flaw detection. Ultrasonic parameters such as velocity and attenuation are most commonly required in these applications. The accuracy and repeatability of testing results are dependent on both the hardware used to generate and receive the ultrasonic waves and on the analysis software for calculating these parameters. In this study, five analysis algorithms were implemented on a computer for measuring wave speed in a pulse echo, immersion testing configuration. In velocity measurements comparisons were made between the overlap, cross-correlation, Fourier transform, Hilbert transform, wavelet transform algorithms. Velocity measurement was applied to an isotropic steel sample using the five analysis algorithms. Frequency-dependent phase/group velocity and attenuation were also measured using the Fourier transform and wavelet transform algorithms on a composite laminate containing voids.

#### 1. 서 론

초음파에 의한 비파괴적 평가법은 높은 감도와 취급의 용이함으로 인해 유망시되고 있다. 이를 위한 측정 파라미터로는 속도, 감쇠, 후방산란, 임계각 반사, 주파수 분석, 노이즈 분석 등이 있으며, 이 중에서 속도와 감쇠는 종단성계수, 전단계수, 프와송비와 같은 재료의

물성 계산 뿐만 아니라 결함의 검출, 피로손상 정도의 파악, 그레인 크기의 결정 등 재료내부의 미시구조를 평가하기 위해 많이 사용되고 있다. 초음파 측정 결과에 대한 정확성과 반복성은 초음파 파형을 발생시키고 수신하는 시스템의 하드웨어적인 요소와 초음파 파라미터를 계산하기 위한 소프트웨어적인 알고리즘에 의존한다[1]. 현실적으로 다양한 하드웨어적인 장비를

갖추기에는 많은 비용과 어려움이 따르므로, 본 논문에서는 시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술을 이용하여 필요한 초음파 파라미터를 측정할 수 있도록 다양한 측정 알고리즘을 소개하고 시편에 적용한 결과를 서로 비교하고자 한다.

사용된 알고리즘은 펄스겹침 (pulse overlap), 상호상관 (cross-correlation), Fourier 변환, Hilbert 변환, wavelet 변환이며, 컴퓨터에서 사용하기 편리하도록 모두 프로그래밍하였다. 이 중에서 펄스 겹침법, 상호 상관법, Fourier 변환에 의한 위상 기술기법 및 Hilbert 변환법은 연속된 두 에코 사이의 시간 지연 값을 제공하므로 분산을 무시할 수 있는 재료의 초음파 속도 측정에 주로 사용되었다. 또한 Fourier 변환을 이용한 스펙트럼법과 wavelet 변환법에 의해 주파수에 따른 위상 및 군속도와 감쇠계수의 측정으로 재료내부의 산란체로 인한 분산성을 관찰하였다.

**2. 실험 장치 및 방법**

수침식 초음파 실험을 위한 장치의 개략도는 Fig. 1에 나와 있다. Panametrics V310 (중심주파수 5MHz, 지름 0.25inch) 종파 탐촉자, JSR PR35 펄서/리시버, LeCroy 9310A 오실로스코프, GPIB 케이블, PC로 구성되어 있다. Fig. 1과 같이 테스트 시편은 물 속에 잠겨 있으며, 시편의 표면과 탐촉자의 면이 평행하게 되도록 정렬하였다. 탐촉자와 시편과의 거리는 약 50mm로 유지하였으며 빔의 회절효과는 고려하지 않았다.

초음파 탐촉자는 펄서/리시버에서 발생하는 전기적인 신호를 받아 압전소자의 진동으로 펄스를 발생시킨

다. 펄스에코 방법에서 초음파 탐촉자는 시편으로부터 반사된 신호를 수신하며 수신된 신호는 증폭되고, 최대 100MHz (또는 10ns)의 샘플링율로 디지털 오실로스코프에서 디지털화된다. 이 실험에서 100MHz의 샘플링율은 Nyquist 조건을 충분히 만족하여 Fourier 변환을 왜곡시키는 aliasing 현상은 일어나지 않는다고 볼 수 있다. 내재하는 랜덤한 오차를 줄이기 위해서 수신 신호를 오실로스코프상에서 수십 또는 수백회 평균하여 취했으며, 시편의 측정 위치를 바꾸어 같은 조건으로 3회 측정하였다. 오실로스코프에 수신된 신호는 적당한 시간과 진폭 스케일로 조정되고, GPIB를 통해 컴퓨터로 연결되어 알고리즘이 실행된다.

실험에 사용된 시편은 15.05mm의 강판과 4.9mm의 기공함유 복합판재로서, Fig. 2는 물과 시편에서 초음파의 반사와 투과에 의한 파의 진행양상을 보여준다. 초음파 탐촉자로부터  $a$  만큼 떨어진 위치에 두께  $d$  인 시편이 놓여있으며, 펄스는 시편에 수직인 방향으로 진행하지만, 편의상 기울어진 진행모습으로 도시하였다.

**3. 측정 알고리즘**

본 절에서는 펄스겹침법, 상호상관법, Fourier 변환, Hilbert 변환 및 wavelet 변환 알고리즘을 이용하여 초음파 속도와 감쇠를 측정할 수 있는 알고리즘을 소개한다. 속도 및 감쇠 측정을 위한 신호는 시편의 아랫면에서 반사되어 수신된 신호 B1, B2로 설정하였다. 원도우된 신호는 디지털 오실로스코프의 분해능에 관계되며, 오실로스코프의 시간과 진폭 스케일의 설정에는 영향을 받지 않는다.

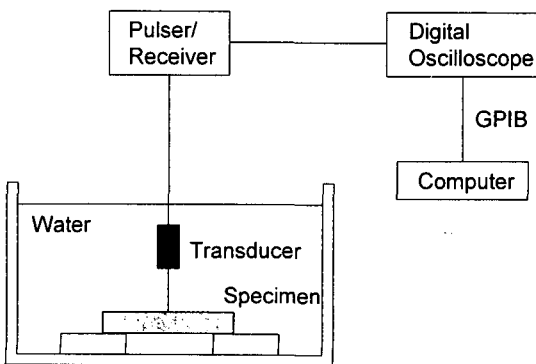


Fig. 1 Experimental setup for ultrasonic measurements

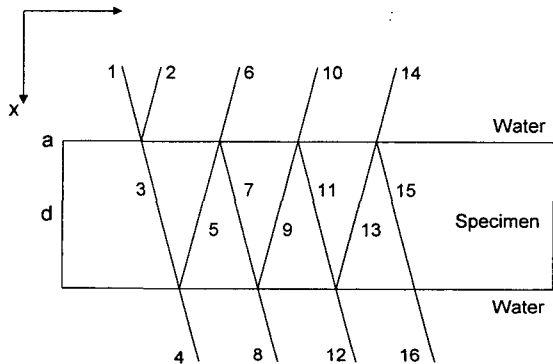


Fig. 2 Reflection and transmission of ultrasonic waves in immersion testing

3. 1. 연속한 두 에코 사이의 시간 지연 측정

3.1.1. 펄스겹침법 (Pulse Overlap Method)

Fig. 3은 5MHz 중파 탐촉자를 사용하여 15.05mm의 강판에서 수신한 초음파 파형이다. x 축은 샘플의 수와 관계된 시간축이며, 수신되는 신호는 샘플링에 의존하는 디지털 신호이다. FS는 시편의 윗면에서 반사된 신호이며, B1, B2는 시편의 아랫면에서 차례로 반사되어 수신된 신호로서, Fig. 2의  $u_2, u_6, u_{10}$ 에 해당된다. 속도측정을 위해 사용한 신호는 B1, B2이고, Fig. 4(a), (b)는 이 두 반사파를 각각 윈도우한 것이다. 펄스겹침법은 가장 간단한 알고리즘으로서 B1, B2를 Fig. 4(c)와 같이 겹침으로써, 두 신호 사이의 시간 지연을 구하는 방법이다. Zero crossing, peak crossing 등이 가능하며 시간 지연은 다음과 같이 구해진다.

$$t = t_w + t_2 - t_1 \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $t_w$ 는 두 신호의 윈도우 시간차이고,  $t_1, t_2$ 는 peak-crossing으로 B1, B2 내에서 시작점과 최대 진폭점까지의 시간이다. 시편의 두께를  $d$  라고 하면 속도는 다음 식으로 주어진다.

$$v = \frac{2d}{t} \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 샘플 수 N과 시간  $t$ 와의 관계를 구할 필요가 있다. 샘플링율이 100MS/s, 즉,  $\Delta t$ 가 10ns가 되며, B1, B2의 경우 200개의 샘플 수이므로 그에 해당하는 시간은  $200 \times 10ns = 2000ns = 2\mu s$ 로 된다. 이와

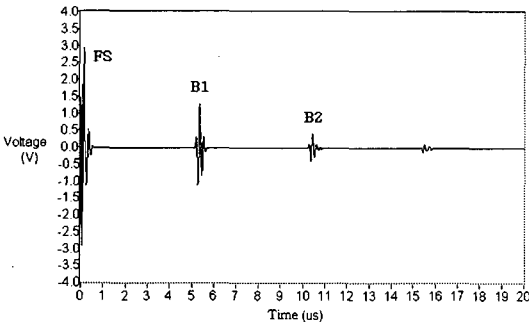


Fig. 3 Reflected waveforms from steel plate

같이 샘플링율에 따라 샘플 수의 조밀도가 결정되며, 보다 정확한 최대 피크점의 시간측정을 위해 보간법을 사용하였다. 한편 복합재에서는 기공산란으로 인한 초음파의 분산때문에 펄스겹침법은 사용하기가 곤란하다. 이와 같이 펄스겹침법은 일반적으로 분산이 있는 경우에 정량적인 값을 구하기가 어렵고, S/N비가 낮은 경우에도 사용하기 곤란하다.

3.1.2. 상호상관법 (Cross-Correlation Method)

상호상관 (cross-correlation)을 이용한 속도 측정 은 감쇠나 산란이 수신되는 신호를 크게 분산시키지 않는 한 신뢰할만한 결과 값을 준다. 두 신호  $x(t), y(t)$ 의 상호상관은 다음과 같이 정의된다.

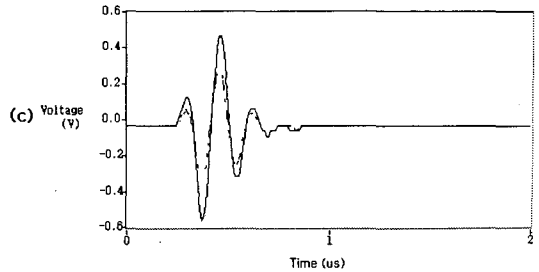
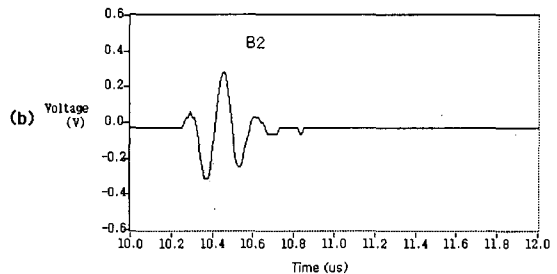
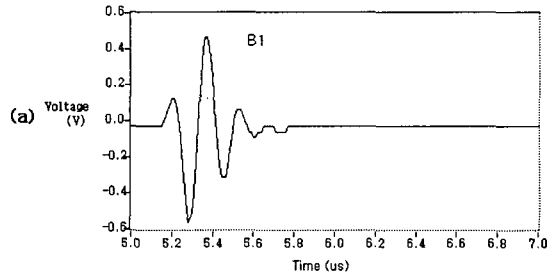


Fig. 4 Reflected waveforms from the back surface of steel plate: (a) B1, (b) B2, and (c) overlap of B1 and B2

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\tau$ 는 시간지연이다. 만일,  $y(t)$ 가  $x(t)$ 로 대체된 다면, 다음과 같은 자기상관(auto-correlation)으로 된다.

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \dots\dots\dots (4)$$

$x(t)$ 의 자기상관은 모든  $\tau$ 에 대해서  $R_{xx}(0) = R_{xx}(\tau)$ , 즉  $\tau=0$ 에서 최대값을 가지므로,  $y(t)$ 가  $x(t)$ 의  $\delta t$  만큼 이동한 신호라면, 그때 상호상관  $R_{xy}(t)$ 는  $\delta$  만큼 이동한 자기상관이 된다. 따라서 분산이 거의 없는 두 신호 B1, B2의  $\delta$ 가 시간지연이 된다. 시간영역에서 두 신호의 상호상관 함수는 정의된 식(3) (또는 (4))으로부터 직접 계산할 수 있지만, Fourier 변환을 이용하여 스펙트럼 밀도함수를 계산하고, 다시 그것의 역 Fourier 변환을 통해 효율적으로 구할 수 있다[2]. Fig. 5는  $x(t)$ ,  $y(t)$ 를 각각 B1, B2로 하였을 때, 상호상관의 결과를 보인다.

Fig. 5에서 0부터 200개를 샘플했으므로, 199번째 값과 상호상관 최대 피크점의 사이가  $\delta$ 이며, 여기에 원도우 시간차  $t_w$ 를 더해서 식 (2)로부터 속도를 구할 수 있다. Hull과 Coll[3], Aussel과 Monchelin[4]에 따르면 상호상관의 시간은 광대역 주파수내의 몇 가지 위상시간의 평균값과 대응된다. 따라서 감쇠가 있는 재료를 통한 분산은 측정된 속도에 영향을 주게 되지만, 어느 정도의 낮은 분산이나 S/N비에 대해서도 합리적인 결과를 준다. 복합재에 대해서는 분산으로 인해 펄스검침법과 같이 바람직한 결과를 기대하기 힘이 들

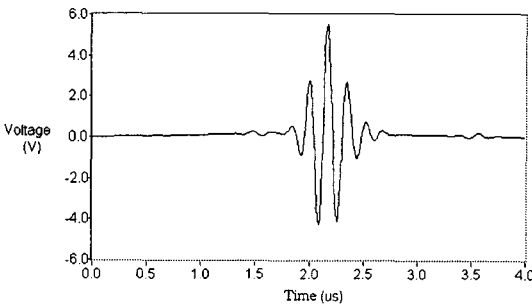


Fig. 5 Cross-correlation of waveforms B1 and B2 in steel plate

지만, 유효 밴드폭내 주파수 성분의 평균 위상속도로 생각될 수 있다.

3.1.3. Fourier 변환에 의한 위상기울기법

Fig. 2를 참고로 하여, 초음파 탐촉자에서 발생하는 신호  $u_1$ 을 다음과 같이 정의하며,

$$u_1 = f_0(\alpha x - k_0 x) \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $\omega$ 는 각주파수(=  $2\pi f$ ),  $k_0$ 는 물에서의 파수이다. 펄스이코 방법이므로 시편의 저면에서 반사되어 수신되는 신호들만을 대상으로 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} u_2 &= R_{12} f_0(\alpha x - 2k_0 a) \\ u_6 &= T_{12} R_{21} T_{21} f_0(\alpha x - 2k_0 a - 2kd) \dots\dots\dots (6) \\ u_{10} &= T_{12} R_{21}^3 T_{21} f_0(\alpha x - 2k_0 a - 4kd) \\ &\dots \end{aligned}$$

여기서  $a$ 는 탐촉자에서 시편까지의 거리,  $d$ 는 시편의 두께이다. 아래첨자 1과 2는 각각 물과 시편을 나타내며,  $R_{ij}$ 는  $j$  매체에서  $i$  매체로 반사되는 반사 계수,  $T_{ij}$ 는  $i$  매체에서  $j$  매체로 투과되는 투과 계수로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \frac{\rho_i c_i - \rho_j c_j}{\rho_i c_i + \rho_j c_j} = -R_{ji}, \\ T_{ij} &= \frac{2\rho_i c_i}{\rho_i c_i + \rho_j c_j} = 2 - T_{ji} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

임의의 함수  $f(t)$ 의 Fourier 변환  $F(f)$ 와 역 Fourier 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} F(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i 2\pi f t} dt, \quad -\infty < f < \infty \\ x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i 2\pi f t} df \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

관심의 대상이 되는 신호로 시편의 아랫면에서 처음과 두 번째로 반사된 파  $u_6, u_{10}$ 을 선택하여  $f(t), g(t)$ 라고 하고 각각을 Fourier 변환하면

$$\begin{aligned}
 f(t) &= T_{12}R_{21}T_{21} f_0(\omega t - 2k_a - 2kd) \\
 g(t) &= T_{12}R_{21}^3T_{21} f_0(\omega t - 2k_a - 4kd) \\
 F(f) &= T_{12}R_{21}T_{21} e^{-i2k_a} e^{-i2k_d} F_0(f) \dots\dots\dots (9) \\
 G(f) &= T_{12}R_{21}^3 T_{21} e^{-i2k_a} e^{-i4k_d} F_0(f) \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

이며,  $F_0(f)$ 는  $f_0$  함수의 Fourier 변환이다. 식 (10)을 (9)로 나누면,

$$\frac{G(f)}{F(f)} = R_{21}^2 e^{-i2k_d} \dots\dots\dots (11)$$

복소수 파수  $k=k_1 + ik_2$ 를 (11)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned}
 e^{-i2k_d} &= e^{-i2d(k_1 + ik_2)} = e^{2k_2d} e^{-i2k_1d} \\
 &= \frac{1}{R_{21}^2} \frac{G(f)}{F(f)} = M e^{i\phi} \\
 k_1(f) &= -\phi/2d, \quad k_2(f) = (\ln M)/2d \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

여기서  $\phi$ 는 위상 스펙트럼,  $M = \left| \frac{1}{R_{21}^2} \frac{G(f)}{F(f)} \right|$ 은 진폭 스펙트럼이다.

Fourier 변환을 위하여 계산속도의 향상을 가져다 주는 고속 Fourier 변환(FFT)를 사용하였다. 연속된 위상 스펙트럼을 구하기 위해서 phase unwrapping 알고리즘이 사용되었으며 이 알고리즘은  $(-\pi, \pi)$  구간에서 계산된 위상 값에 대하여 라디안 이상의 점프가 있을 때마다 2 라디안 (또는 360°)을 삽입한 것이다.

Fig. 6은 강판에서의 두 신호 B1, B2에 대한 위상 및 진폭 스펙트럼을 보여준다. 중심주파수는 5MHz 근방이며, 유효 밴드폭은 3-8MHz 정도임을 알 수 있다.

한편 Fig. 6(a)에서 유효밴드폭내의 연속된 위상 스펙트럼은 거의 선형이므로 위상 기울기 (phase slope)를 이용하여 시간 지연을 구할 수 있다. 기울기 차이는 두 에코 사이의 시간지연과 관계되므로 속도는 다음 식으로 주어진다.

$$c = \frac{4\pi d}{(d\phi_2/df - d\phi_1/df) + 2\pi\tau_w} \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $d\phi_1/df, d\phi_2/df$ 는 각각 B1, B2의 위상 스펙트럼의 기울기이고,  $\tau_w$ 는 두 신호의 윈도우 시간차를 나

타낸다. FFT를 이용하여 변환할 때 B1, B2가 같은 부호의 기울기를 가지기 위해서  $x$  축의 가운데 점을 축으로 왼쪽이나 오른쪽 어느 한 방향으로 윈도우하면 계산을 위해 편리하다.

앞에서 언급한 것과 같이 시간 영역에서 수신된 신호의  $x$  축은 샘플 수를 나타내며 샘플링율에 의존하는 디지털 신호이다. Fourier 변환된 주파수 영역의  $x$  축도 샘플 수로 표시되므로 주파수와와의 관계를 구하는 것이 필요하다.  $\Delta f = 1/N\Delta t = 1/T$ 이며 각각의 에코에 200개의 데이터를 윈도우하였으므로  $\Delta f$ 는 0.5MHz이다. 이 때 오실로스코프의 성능에 의존하는 샘플링을  $\Delta t$ 가 일정한 경우에는 같은 주파수 영역에서 동일한  $\Delta f$ 를 얻기 위해 샘플 수  $N$ 을 크게 잡아야 하지만, 시편의 두께가 얇은 경우에는 두 에코 사이의 거리가 가까워서 곤란하므로, 임의의  $N$ 에 "0" 값을 갖는 배열을 첨가하면 (이 경우  $N$ 이 증가) 전체  $T$ 가 크게 되므로 분해능이 향상된 주파수 영역의 스펙트럼을 구할 수 있다.

### 3.1.4. Hilbert 변환법 (Hilbert Transform Method)

실수값을 가지는 함수  $x(t)$ 의 Hilbert 변환,  $\bar{x}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

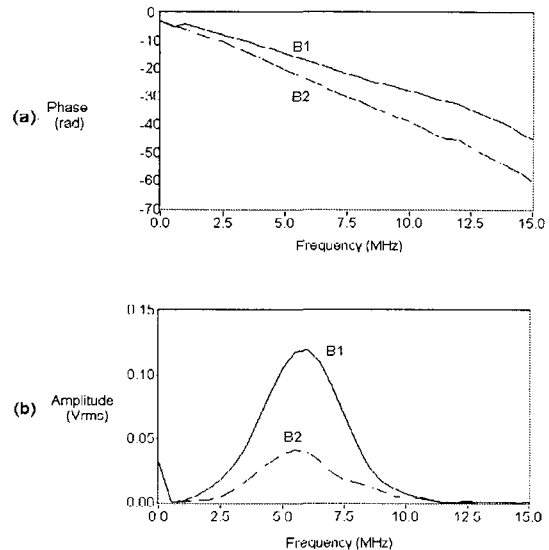


Fig. 6 (a) Phase, and (b) amplitude spectra of waveforms B1 and B2 in steel plate

$$\bar{x}(t) = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du = x(t) * (1/\pi t) \dots (14)$$

즉,  $\bar{x}(t)$ 는  $x(t)$ 와  $1/\pi t$ 의 convolution으로 정의되며, Fourier 변환과 같이 선형 연산자이다. Hilbert 변환  $\bar{x}(t)$ 를 이해하고 계산하기 위한 유용한 방법으로서  $x(t)$ 와 관계된 해석가능한 신호  $z(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$z(t) = x(t) + i \bar{x}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \dots (15)$$

여기서  $A(t) = [x^2(t) + \bar{x}^2(t)]^{1/2}$ ,  $\theta(t) = \tan^{-1}(\frac{\bar{x}(t)}{x(t)})$ 이며  $A(t)$ 는  $x(t)$ 의 envelope 신호,  $\theta(t)$ 는  $x(t)$ 의 순간 위상 신호라고 한다.  $z(t)$ 의 Fourier 변환  $Z(f)$ 를 구해보면,

$$\begin{aligned} Z(f) &= F[z(t)] = F[x(t) + i \bar{x}(t)] \\ &= F[x(t)] + iF[\bar{x}(t)] = X(f) + i \bar{X}(f) \\ &= [1 + \text{sgn } f]X(f) \dots (16) \end{aligned}$$

따라서  $Z(f)$ 는  $X(f)$ 에 의해서 다음과 같이 구해질 수 있으며,

$$Z(f) = \begin{cases} 2X(f) & \text{for } f > 0 \\ 0 & \text{for } f < 0 \end{cases} \dots (17)$$

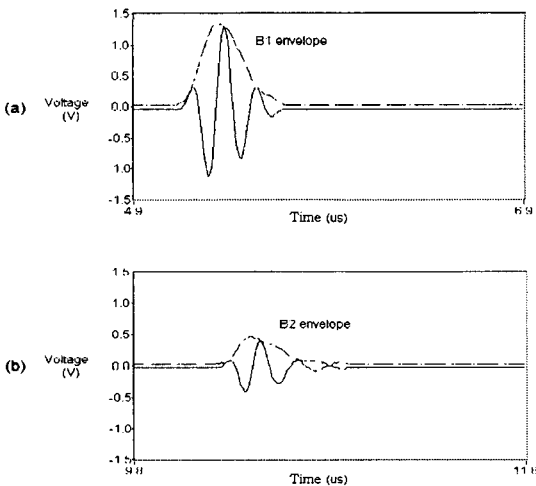


Fig. 7 Envelope signals for (a) B1, and (b) B2 in steel plate

$Z(f)$ 의 역 Fourier 변환에 의해  $x(t), \bar{x}(t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{Re} [2 \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df], \\ \bar{x}(t) &= \text{Im} [2 \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df] \end{aligned} \dots (18)$$

Fig. 7은 B1, B2에 대한 envelope 신호를 보여주며, Fig. 8은 강판에서 B1, B2에 대한 Hilbert 변환이다. 이와 같이 Hilbert 변환은 시간영역에서 시간영역으로의 변환이다. Hilbert 변환에 의한 시간 지연은 식 (15)에 의한 envelope 신호  $A(t)$ 를 이용하여 구할 수 있다[5,6]. 상호상관 함수의 Hilbert 변환을 이용하여 시간지연을 구할 수도 있는데, 재료가 분산적인 경우에는 envelope 신호의 피크점이 주파수에 따른 함수가 되어 주파수에 따른 피크점의 위치를 구해야 한다. 기공을 함유한 복합재에 대해서는 Hilbert 변환은 시간영역으로의 변환으로 분산을 띄므로 펄스점침법이나 상호상관법과 같이 합리적인 결과를 주지 못한다.

### 3.2. 주파수 의존 속도 및 감쇠의 측정

#### 3.2.1. Fourier 스펙트럼법

식 (12)에서 위상속도  $c(f)$ 와 감쇠계수  $\alpha(f)$ 는 각각

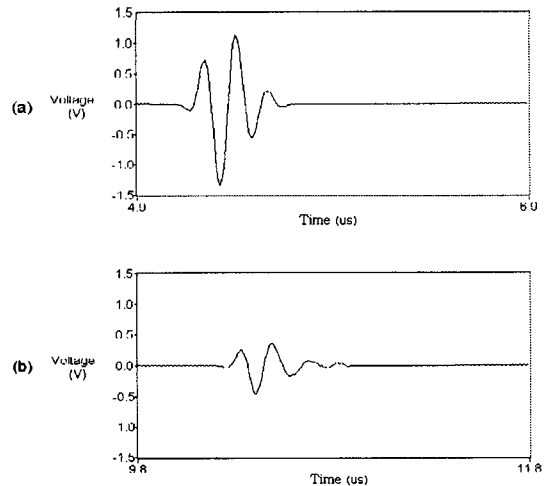


Fig. 8 Hilbert transforms of (a) B1, and (b) B2 in steel plate

$k_1 = \omega/c(f)$ ,  $k_2 = \alpha(f)$ 이므로  $c(f)$ 와  $\alpha(f)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$c(f) = \frac{2\pi f}{-\phi/2d}, \quad \alpha(f) = \frac{\ln M}{2d} \dots\dots\dots (19)$$

식 (19)의 연속 위상 스펙트럼은 phase unwrapping 알고리즘에서  $2\pi$  라디안을 삽입하여 계산되므로 초음파 신호의 스펙트럼이 0 주파수까지 미치지 않는 낮은 주파수에서  $\pm 2\pi m$  ( $m$ 은 정수)의 불확실성이 발생할 수 있다. 따라서 연속적인 위상 스펙트럼은 항상  $2\pi$ 의 정수배에 해당하는 오차를 가질 수 있으므로 위상속도 (phase velocity) 계산시에 주의가 필요하다. 여기서 위상 스펙트럼의 오차 보정은 Jeong과 Hsu가 제안한 방법[7]을 사용하였다.

식 (19)를 이용하여 강판에 대한 위상속도와 감쇠계수를 주파수의 함수로 계산한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 시험에 사용된 강판은 사용 주파수 범위에서 장파장 한계에 있고 분산을 무시할 수 있으므로 감쇠나 속도는 주파수에 의존하지 않고 탐촉자의 유효밴드폭 내에서 거의 일정함을 알 수 있다. 또한 위상 기울기로부터 구한 속도값은 Fourier 위상 스펙트럼법에 의해

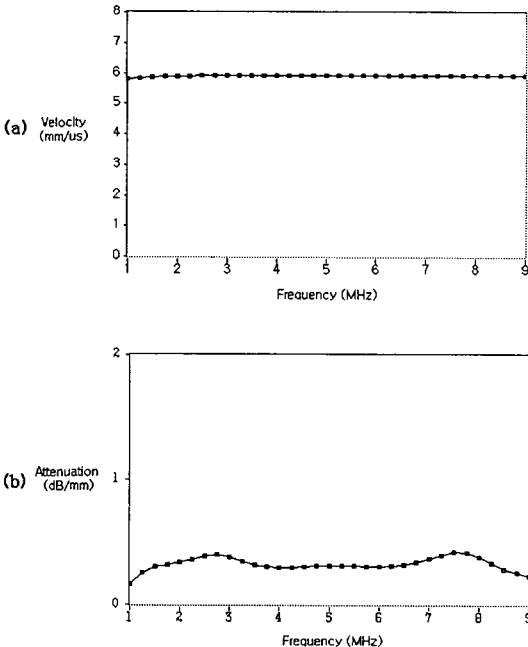


Fig. 9 (a) Phase velocity, and (b) attenuation of steel plate

구한 중심 주파수 근처에서의 값과 거의 같아야 함을 알 수 있다.

재료내부에 결함 또는 손상이 있는 경우 속도와 감쇠

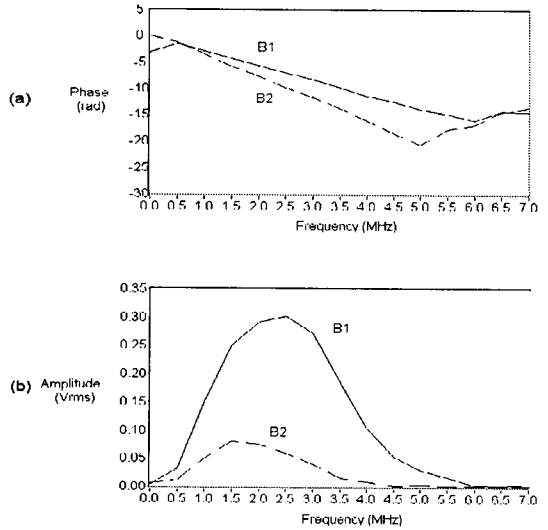


Fig. 10 (a) Phase, and (b) amplitude spectra of waveforms B1 and B2 in porous composite laminate

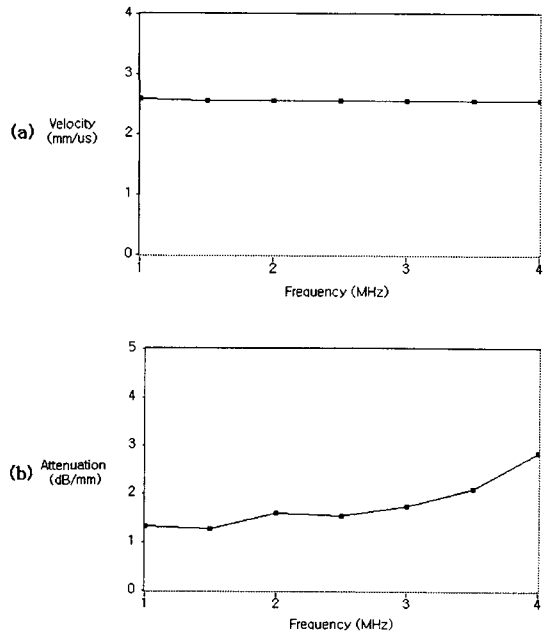


Fig. 11 (a) Phase velocity, and (b) attenuation of porous composite laminate

계수는 흔히 주파수에 의존하는 특성을 가지며, Fourier 스펙트럼법은 이러한 주파수 의존 파라미터 측정에 유용한 도구가 될 수 있다. Fig. 10은 부피분율로 약 5%의 기공을 함유하는 탄소/에폭시 복합재 적층판(두께 4.9mm)의 두 신호 B1, B2의 위상 및 진폭 스펙트럼을 보여주고 있다. 중심주파수는 2MHz 근방이며, 유효 밴드폭은 1-4MHz 정도가 됨을 볼 수 있다. 진폭 스펙트럼의 유효 밴드폭은 강판의 경우보다 낮는데 이는 높은 주파수에서 기공에 의한 산란이 심하였음을 보여 준다. 식 (13)으로부터 구한 위상속도와 감쇠계수를 Fig. 11에 나타내었다. 1-4MHz 주파수 범위에서의 위상속도와 감쇠계수는 강판의 경우와 달리 주파수에 따라 증가함을 보여 주고 있다. 이와 같이 Fourier 변환에 의한 위상 및 진폭 스펙트럼을 이용한 방법은 재료의 분산 특성을 구할 수 있으며, 시편의 두께가 얇아서 시간 영역에서 반사된 신호의 분리가 어려운 경우에도 유용하게 사용될 수 있다[8].

3.2.2. Wavelet 변환법

함수  $f(t)$ 의 wavelet 변환(WT)은 다음과 같이 정의된다.

$$(Wf)(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \dots\dots\dots (20)$$

여기서  $a > 0$  이며 over bar는 Keller 복소수를 나타낸다. 함수  $\psi(t)$ 는 기본 wavelet으로 다음의 허용조건을 만족한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \dots\dots\dots (21)$$

여기서  $\Psi(\omega)$ 는  $\psi(t)$ 의 Fourier 변환을 나타낸다. 기본 wavelet으로 불확실성 원칙에 의해 확증된 시간-주파수 분해능이 좋은 Gabor 함수를 채택하였다[9]. Gabor 함수는 다음과 같다.

$$\psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\omega_0}}{\gamma} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \dots (22)$$

여기서  $\omega_0$ 와  $\gamma$ 는 양의 상수값이다. 엄밀히 말해 Gabor 함수는 식 (21)의 허용조건을 만족하진 않지만,

$\gamma$ 가 충분히 크다면 근사적으로 조건을 만족한다[10]. 여기서는  $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2} \approx 5.336$ 과  $\omega_0 = 2\pi$ 를 사용하여 허용조건을 만족하고 있으며, 상수값  $a, b$ 는 각각 주파수와 시간을 나타내는 파라미터로 다음과 같이 표시된다.

$$a = 2^m/4, \quad b = n \Delta t \dots\dots\dots (23)$$

여기서  $m, n$ 은 정수이다. Fig. 12는 강판에서의 wavelet 변환으로 (a)와 (b)는 각각 시간-주파수 분포와 그의 contour를 나타낸다.  $x$  축은 시간축이며,  $y$  축은 로그 스케일의 주파수 축을 표시한다. 중심주파수는  $\log_2(a) \approx -22.4$ 로 약 5.5MHz 근방이며, 분산이 거의 없으므로 Fig. 14의 복합재보다 집중된 영역을 보인다.

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

$$u(x, t) = e^{-i(k_1x - \omega_1t)} + e^{-i(k_2x - \omega_2t)} \dots\dots\dots (24)$$

여기서  $k_1$ 과  $k_2$ 는 파수이고 식 (24)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = 2\cos(\Delta kx - \Delta\omega t) e^{-i(k_c x - \omega_c t)} \dots\dots\dots (25)$$

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

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

$$c_p = \omega_c / k_c, \quad c_g = \Delta\omega / \Delta k \dots\dots\dots (26)$$

$u(x, t)$ 의 WT는

$$\begin{aligned} (Wu)(x, a, b) &= \sqrt{a} [e^{-i(k_1x - \omega_1b)} \overline{\psi(a\omega_1)} + e^{-i(k_2x - \omega_2b)} \overline{\psi(a\omega_2)}] \dots (27) \end{aligned}$$

이고, 식 (27)의 크기는 다음과 같다.

$$|(Wu)(x, a, b)| = \sqrt{a} [(\overline{\psi(a\omega_1)})^2 + (\overline{\psi(a\omega_2)})^2]$$



$$+ 2\hat{\psi}(a \omega_1)\hat{\psi}(a \omega_2) \cos(2\Delta kx - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \dots\dots (28)$$

$\Delta\omega$ 가 충분히 작고  $\hat{\psi}(a \omega_1) \approx \hat{\psi}(a \omega_2) \approx \hat{\psi}(a \omega_c)$  이라면 식 (28)은 다음과 같다.

$$|(Wu)(x, a, b)| \approx \sqrt{2a} |\hat{\psi}(a \omega_c)| [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \dots\dots\dots (29)$$

따라서 WT의 절대값은  $a = \omega_0/\omega_c$ ,  $b = (\Delta k/\Delta\omega)x = x/c_g$  일 때 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[11]. Fig. 13은 주파수에 따른 군속도와 감쇠계수를 보인 것으로 위상 스펙트럼법에 의한 값과 비교하였다. 두 방법에 의한 측정 결과는 잘 일치하며, 주파수에 따른 변화는 거의 없다. 위상속도로부터 군속도의 변환을 위하여 식 (26)의 관계를 사용하였다.

Fig. 14는 기공을 함유한 복합재에 대한 시간-주파수 분포와 contour를 나타낸다.  $\log_2(a) \approx -21.1$ , 즉 2.2MHz 근방의 중심주파수를 가지며, 산란으로 인한

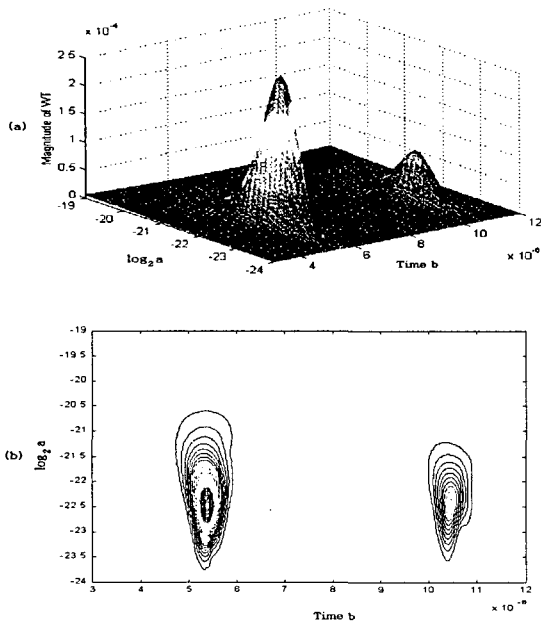


Fig. 12 Wavelet transforms of signals B1 and B2 from steel plate: (a) time-frequency distribution of magnitude; (b) its contour plot

분산특성으로 강판의 경우와 비교할 때, 전체적으로 시간과 주파수 영역에서 퍼진 영역을 가진다. Fig. 15는 군속도와 감쇠계수를 주파수의 함수로 구한 결과를 보여주며, Fourier 변환 결과와 비교하였다. 두 방법에 의한 군속도와 감쇠계수는 잘 일치하며, 주파수가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보인다. Wavelet 변환으로부터 시간영역과 주파수영역의 성분을 함께 얻을 수 있으므로 재료의 분산특성을 파악하는데 효과적인 도구가 되며[11], 초음파 신호처리분야를 포함한 공학 및 과학 분야에 널리 이용되고 있다.

4. 결 과

Table 1은 펄스검침, 상호상관, Fourier 변환, Hilbert 변환 및 wavelet 변환 알고리즘을 이용하여 측정된 강판에서의 종파 속도값을 비교한 것이다. 6가지 알고리즘의 평균 속도값은 5.9030mm/ $\mu$ s 정도로 각 알고리즘에서의 속도값은 1% 이내로 서로 잘 일치한다. 사용된 주파수 범위에서 강판은 분산을 거의 무

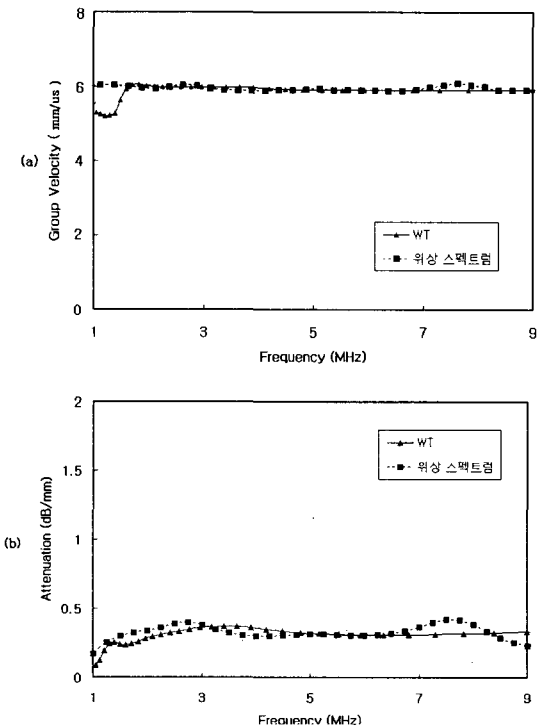


Fig. 13 (a) Group velocity, and (b) attenuation of steel plate calculated by wavelet transform and phase spectrum

Table 1 Comparison of longitudinal wave velocity of steel plate

(unit: mm/μs)

펄스걸침법	상호상관법	위상 기울기법	Hilbert 변환법	위상 스펙트럼법 (at 5MHz)	wavelet 변환법 (at 5MHz)	Average
5.9051	5.9024	5.9049	5.8991	5.9052	5.9012	5.9030

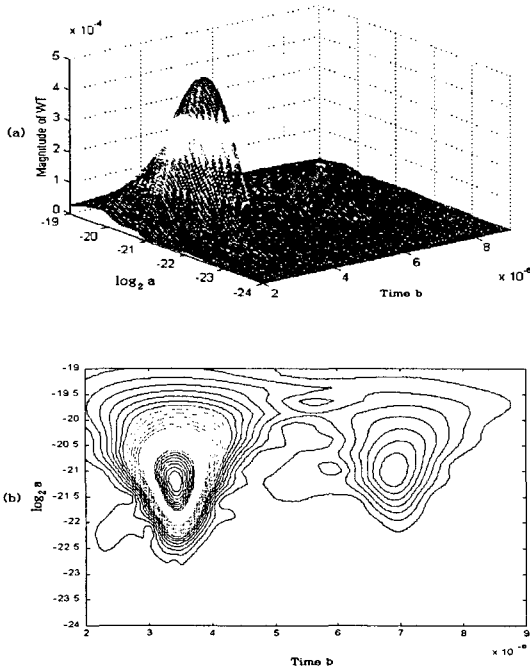


Fig. 14 Wavelet transforms of signals B1 and B2 from porous composite laminate: (a) time-frequency distribution of magnitude; (b) its contour plot

시할 수 있으므로 6가지 알고리즘으로 계산된 속도값은 좋은 일치성을 보인다고 볼 수 있다. Fourier 스펙트럼 법과 wavelet 변환법으로부터 측정된 강판의 감쇠계수도 주파수와 거의 무관하게 일정하였다. 이와 반대로 분산성을 갖는 기공성 복합재의 경우, Fourier 변환과 wavelet 변환에 의해 주파수의 함수로 측정된 군속도와 감쇠계수는 서로 잘 일치하였으며, 주파수가 증가함에 따라 군속도와 감쇠계수가 다소 증가하였다.

5. 결 론

연속한 두 반사파의 시간차이를 측정하므로써 초음파 속도를 구할 수 있는 5가지 방법을 소개하였다. 사용된 알고리즘은 펄스걸침법, 상호상관법, Fourier 변환에

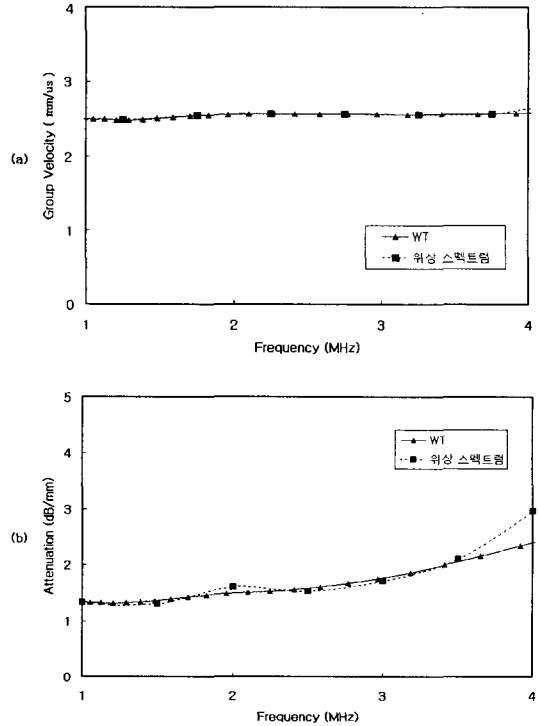


Fig. 15 (a) Group velocity, and (b) attenuation of porous composite laminate calculated by wavelet transform and phase spectrum

의한 위상 기울기법, Hilbert 변환법이다. 이들 방법으로 시간차를 계산할 수 있는 해석 알고리즘을 자세히 소개하였고 분산을 무시할 수 있는 강판에 적용하였다. 주파수에 의존하는 초음파 속도와 감쇠계수의 측정을 위하여 Fourier 스펙트럼법과 wavelet 변환법을 사용하였다. 이들 방법은 강판 뿐만 아니라 분산성을 지닌 기공성 복합재 판에 적용되었다. 강판의 경우에 각 알고리즘으로부터 구한 종파 속도값은 서로 1% 이내의 오차를 보였다. 분산을 무시할 수 있는 재료의 경우 위의 모든 측정 알고리즘을 적용할 수 있으며, 서로의 결과를 비교하므로써 보다 신뢰성 있는 측정값을 얻을 수 있다. Fourier 스펙트럼법과 wavelet 변환법으로부터 구한 복합판재의 군속도와 감쇠계수는 서로 잘 일

치하였으며, 사용 주파수 범위에서 주파수와 함께 약간 증가하는 분산성을 보였다.

#### 참고문헌

- [1] A. Saigal, S. Krikorian and G. Leisk, Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, Vol. 15B, pp. 1637-1644, (1995)
- [2] J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data Analysis and Measurement Procedures, Wiley, NY, (1986)
- [3] D. R. Hull, H. E. Kautz and A. Vary, Materials Evaluation, Vol. 43, pp. 1455-1460, (1985)
- [4] J. D. Aussel, and J.-P. Monchalin, Ultrasonics, Vol. 27, pp. 165-177, (1989)
- [5] O. Alkin, Digital Signal Processing: A Laboratory Approach Using PC-DSP, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1994)
- [6] M. Duncan, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 39, pp. 1024-1029, (1990)
- [7] H. Jeong and D. K. Hsu, Ultrasonics, Vol. 33, pp. 195-203, (1995)
- [8] V. K. Kinra and V. Dayal, Experimental Mechanics, Vol. 28, pp. 288-297, (1988)
- [9] C. K. Chui, An Introduction to Wavelets, Academic Press, San Diego (1992)
- [10] P. Goupillaud, G. Grossmann and J. Morlet, Geoprospection, Vol. 23, pp. 85-102, (1984)
- [11] 장영수, 정현조, "Wavelet 변환을 이용한 분산성 판파의 군속도 측정과 음원 위치결정에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 279-289, (1998)