

〈技術論文〉

얇은 판재에서의 초음파 종파속도 측정

안봉영* · 이승석** · 이재욱*

(1991년 7월 1일 접수)

Measurement of the Ultrasonic Longitudinal Wave Velocities in Thin Plate

B.Y. Aim, S.S. Lee and J.O. Lee

Key Words: Amplitude Spectrum(진폭 스펙트럼), Phase Spectrum(위상 스펙트럼), Frequency Domain(주파수도메인), Dispersion(분산), Phase Velocity(위상속도), Thin Plate(얇은 판재)

Abstract

The ultrasonic longitudinal wave velocities propagating normal to the surface in thin plates were measured with the amplitude spectrum method. The accuracy of the velocity measurement in 0.5mm thick plates was 0.1%. In 4.239mm thick plate the phase velocities at the frequency band of 5MHz~15MHz were measured with the phase spectrum method and the amplitude spectrum method, and the velocity difference between two methods was less than 20m/s.

1. 서 론

초음파속도의 측정은 비파괴시험분야에서의 결함 검출 뿐 아니라 재료의 탄성계수⁽¹⁾, 또는 잔류응력 측정⁽²⁾에도 널리 이용된다. 측정 방법은 크게 시간도메인(time domain)에서의 측정과 주파수도메인(frequency domain)에서의 측정으로 나눌 수 있다. 시간도메인에서의 측정시에는 주로 포음파신호의 도달시간(transit time)을 측정하여 진행한 거리로 나눔으로서 속도를 측정하게 된다. 보통 가장 많이 적용되는 방법으로는 pulse-echo overlap method, sing-around method, pulse-superposition method 등⁽³⁾이며 이들 방법은 측정정확도가 매우 뛰어나다. 그러나, 재료의 두께가 얇아서 연속되는 초음파신호가 겹치는 경우에는 이들 방법이 적용될 수 없으며, 또한 초음파신호의 형태가 재료내를 전

행하면서 변하는 재료(dispersive media)에서도 위의 방법들은 적용이 곤란하다. 주파수도메인에서의 측정방법은 주로 신호의 Fourier transform한 결과를 이용한다. 이 방법의 특징은 주파수변화에 따른 도달시간을 알 수 있기 때문에 재료에서의 위상속도(phase velocity)뿐 아니라, 군속도(group velocity)도 측정이 가능하다. 그러므로 재료의 분산(dispersion)이 측정 가능한 것이다. 측정방법으로는 위상 스펙트럼 방법(phase spectrum method)^(4,5)과 진폭 스펙트럼 방법(amplitude spectrum method)⁽⁶⁾이 있는데, 앞의 방법은 거의 연속적인 주파수성분에 대해 측정되므로, 재료의 분산측정에 매우 유리하나, 시간도메인에서의 경우처럼 신호의 완전한 분리를 요구하므로 두께가 얇은 재료에의 적용에는 문제가 있다. 반면 뒤의 방법은 불연속적인 주파수성분에 대해서 측정되므로 앞의 방법보다 분산측정 등의 정밀도는 나쁘나, 연속되는 신호를 분리할 필요가 없기 때문에 두께가 얇은 재료에의 적용이 가능하다. 그러므로 여기서는 주파수도메인

*한국표준과학연구원 비파괴평가연구소

**정회원, 한국표준과학연구원 비파괴 평가연구소

에서의 측정방법중 진폭 스펙트럼 방법에 대한 이론적 배경을 알아보고, 얇은 두께의 재료에 적용한 측정결과를 보이고자 하며, 비교적 두께가 두꺼운 재료에서의 측정결과를 위상 스펙트럼 방법으로의 측정 결과와 비교하여 측정의 정확성을 서로 비교하였다.

2. 이론

2.1 기본이론

독립된 재료에서 양의 방향으로 진행하는 고조파(harmonic wave)는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = A \exp[i(\omega t - kx - f)] \exp[-ax] \quad (1)$$

A 는 임의의 신호 진폭이고, ω 는 신호의 각주파수이며, k 는 파수이다.

ϕ 는 위상이고, α 는 재료내에서의 초음파의 감쇠 상수이다.

식(1)의 고조파를 이용하여 재료내에서 진행하는 모든 가능한 신호형태를 나타내면 식(2)와 같다.

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) \exp[-i\phi] d\phi \right\} \exp[i(\omega t - kx)] \exp[-ax] d\omega \quad (2)$$

$x=0$ 인 경우에 위의 식은 아래 식(3)과 같다.

$$u(0, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) \exp[-i\phi] d\phi \right\} \exp[i\omega t] d\omega \quad (3)$$

순방향(forward)과 역방향(inverse)으로 fourier transform을 적용하면 $x=0$ 에서 $u(0, t)$ 는 식(4)와 같다.

$$u(0, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} u(0, t) \exp[-i\omega t] dt \right\} \exp[i\omega t] d\omega \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 비교하면 $x=0$ 에서의 fourier transform이 식(3)의 내부 적분과 같아야 하므로 식(5)의 관계를 갖는다.

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) \exp[-i\phi] d\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} u(0, t) \exp[-i\omega t] dt = F(u(0, t)) \right\} \quad (5)$$

위의 식에서 F 는 fourier transform operator이다.

그러므로 식(2)는 식(6)으로 표시되며, 다시

식(7)로 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u(0, t)) \exp[-i(\omega t - kx)] \exp[-ax] d\omega \quad (6)$$

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{ F(u(0, t)) \exp[-ikx] \exp[-ax] \} \exp[i\omega t] d\omega \quad (7)$$

최종적으로 거리 x 를 진행한 초음파 $u(x, t)$ 와 $u(0, t)$ 의 fourier transform 결과들 사이에는 식(8)⁽⁴⁾과 같은 관계가 있다.

$$F(u(x, t)) = F(u(0, t)) \exp[-ikx] \exp[-ax] \quad (8)$$

2.2 진폭 스펙트럼 방법

초음파의 속도를 측정하고자 할 때, 탐촉자의 갯수나 위치, 그리고 배열에 따라 여러가지 방법이 있으나, 여기에서는 하나의 탐촉자를 사용하여 송수신을 함께 하는 pulse-echo 방법을 사용하였다.

pulse-echo 방법을 사용했을 때 일반적으로 수신된 신호는 Fig. 1의 모양을 갖는다.

그림에서 F 는 재료의 표면에서 반사된 신호(front face reflection)이고, $B1$, $B2$, 등은 재료의 저면에서 연속적으로 반사된 신호(back face reflection)들을 나타내며, 표면 반사 신호와 저면 반사 신호들 사이에는 음향임피던스의 차이에 따라 180° 의 위상차가 생긴다.

측정대상 재료의 두께를 L 이라 하고, 첫번째 저면반사신호를 $u(0, t)$ 라 하면, 표면반사신호는 식(9)로 생각할 수 있다.

$$U(t) = -qu(-2L, t); q > 0 \quad (9)$$

식(9)에서 q 는 상수이고, 음의 부호는 두 신호 사이의 180° 의 위상차를 나타낸다. 앞의 식(8)로부터 표면반사신호의 fourier transform은 식(10)과 같다.

$$F(U(t)) = F(-qu(-2L, t)) = -qF(u(0, t)) \exp[ik2L] \exp[a2L] \quad (10)$$

식(10)에서 $a2L$ 은 시스템의 damping을 나타내는 것으로, 재료내에서의 감쇠와 재료와 접촉매질의 임피던스 차에 따라서 변하는데, 여기서는 상수 Q 로 표시하여, 식(10)을 식(11)로 나타내었다.

$$F(U(t)) = -QF(u(0, t)) \exp[ik2L] \quad Q > 0 \quad (11)$$

여기서 Q 는 $q \exp[a2L]$ 이며 0보다 크다.

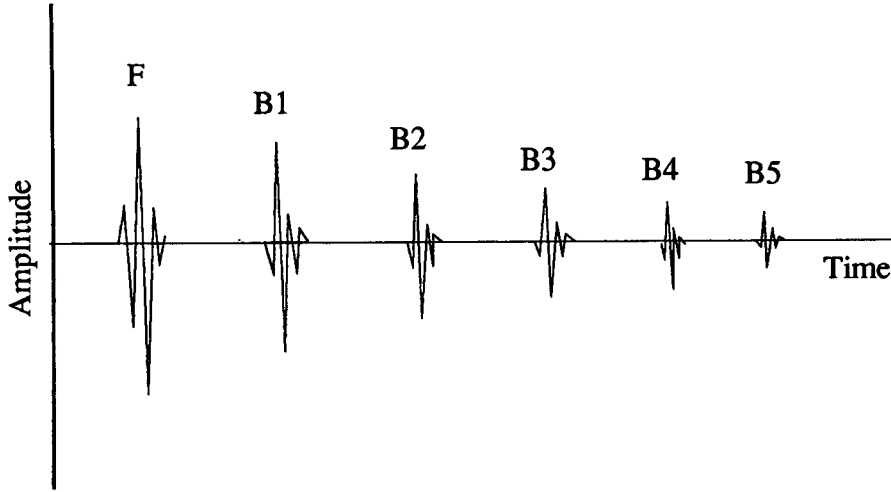


Fig. 1 The signals detected with pulse-echo method in time domain

표면반사신호와 첫번째 저면반사신호의 시간도메인에서의 표현은 $U(t) + u(0, t)$ 이므로, 이의 fourier transform한 결과는 식(12)와 같다.

$$F\{u(0, t) + U(t)\} = |F(u(0, t))| \{ \exp[i\phi] - Q \exp[i(\phi + k2L)] \} \quad (12)$$

식(12)에서 진폭 스펙트럼은 $|F(u(0, t))|$

$(1 - Q \exp[ik2L])$ 으로 나타낼 수 있으며, 여기서 $|F(u(0, t))|$ 는 연속적으로 변하는 함수이고, Q 는 0보다 크므로, 진폭 스펙트럼의 최소값들은 $\exp[ik2L] = 1$ 인 경우에 나타난다. 즉,

$$2L\omega/c = 2\pi m; \quad m = 0, 1, 2, \quad (13)$$

그러므로 진폭 스펙트럼에서 최소값을 가지는 주파수가 측정되고, 각 주파수에서의 m 값을 알면,

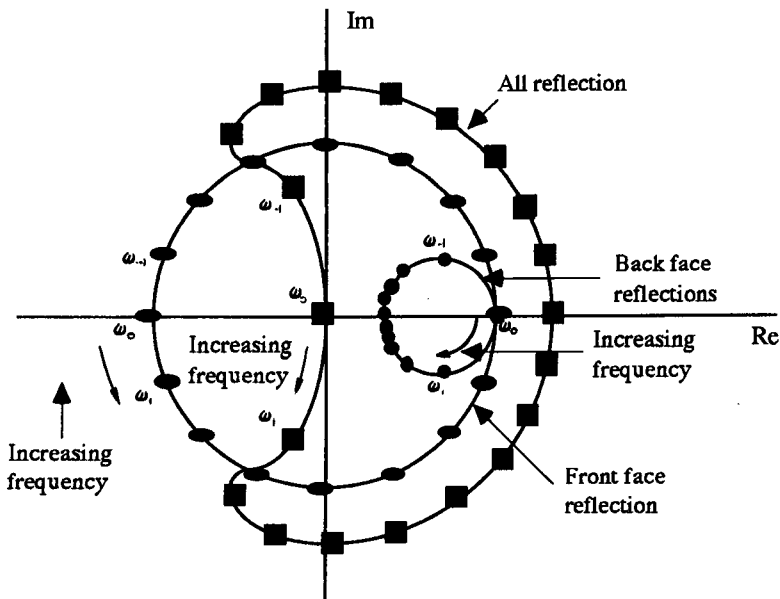


Fig. 2 Nyquist plot characterizing the spectra

식 (14)에 의해 재료의 위상속도가 결정된다.

$$c=2L\omega/2\pi m=2Lf/m \quad (14)$$

여기서 $f=\omega/2\pi$ 이다.

식 (12)는 표면반사신호와 첫번째 저면반사신호만을 고려하였을 경우이므로, 신호의 분리가 용이한 경우를 가정한 것이다. 그러나, 진폭 스펙트럼 방법은 신호 분리가 용이하지 않는 경우에도 적용될 수 있으므로, 모든 저면반사신호와 표면반사신호가 합쳐진 형태로 측정될 경우를 고려하여야 한다.

수신용 탐촉자에 수신된 모든 신호를 $R(t)$ 라고 한다면 이는 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$R(t)=U(t)+\sum_{n=0}^{\infty}u(2Ln,t) \quad (15)$$

식 (15)의 우측항은 저면반사신호를 나타내며, 이의 fourier transform은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} F\left\{\sum_{n=0}^{\infty}u(2Ln,t)\right\} &= \sum_{n=0}^{\infty}F\{u(2Ln,t)\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty}\{F(u(0,t))\exp[-ik2Ln] \\ &\quad \exp[-a2Ln]\} \\ &= F(u(0,t))\sum_{n=0}^{\infty}\{ \exp[-ik2Ln] \\ &\quad \exp[-a2Ln]\} \\ &= F(u(0,t))\left\{1-\exp\left[-2L\left(\frac{i\omega}{c}+a\right)\right]\right\}^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 수신된 전 신호의 fourier transform은 식 (17)과 같다.

$$F\{\sum u(2Ln,t)+U(t)\}=F(u(0,t))\{1-\exp[-2L(i\omega/c+a)]\}^{-1}-Q\exp[i2L\omega/c] \quad (17)$$

식 (17)에서 $Q\exp[i2L\omega/c]$ 는 복소면(complex plane)에서 반경이 Q 이고, 원점에 중심을 둔 원을 이룬다. $\{1-\exp[-2L(i\omega/c)+a]\}^{-1}$ 은 $\{1-\exp[-2L(i\omega/c)+a]\}$ 의 inverse mapping으로 부터 역시 복소면에 표시될 수 있다. 이를 복소면에 그린 결과는 Fig.2⁽⁶⁾와 같다.

Fig. 2에서 보면 큰원으로 표시된 표면반사신호의 fourier transform 결과의 진폭은 주파수에 관계없이 일정한 크기를 가지며, 작은원으로 표시된 저면반사신호들의 결과는 식 (13)을 만족하는 주파수에서 최대값들을 갖는다. 한편 수신된 전 신호의

fourier transform의 진폭은 식 (13)을 만족하는 주파수에서 최소값들을 갖는다.

그러므로 재료의 두께가 얇아서 연속되는 신호의 분리가 불가능한 경우에도 시간도메인에서의 신호를 fourier transform한 결과를 이용하면 식 (13)으로 부터 재료의 초음파속도를 측정할 수 있다.

3. 실험방법

실험은 재료를 물속에 담그고 수침용 탐촉자를 이용하여 수행하였다. 실험장치의 사진은 Fig. 3과 같으며 각 장치의 규격은 Table 1과 같다.

사용된 탐촉자는 KB-Aerotech사 제품으로 Immersion type이며 중심주파수는 10MHz이고, 직경은 6.35mm이었다. 측정에 사용된 재료는 두께 4.239mm와 0.605mm인 AISI-2024 알루미늄과 0.469mm의 JIS-S45C 스틸, 그리고 0.490mm의 AISI-304 스테인리스 스틸이었다. 시편크기는 가로 50mm, 세로 50mm이었고 상용제품에서 잘라서 사용하였다. 신호는 10ns의 분해능을 갖는 Lecroy사 Digital oscilloscope로 측정하였으며, 이 신호를 컴퓨터로 전송하여 FFT하였다. FFT를 수행할 때 주파수 분해능(frequency resolution)을 높이기 위하여 측정데이터에 영을 더하여 8192개의 데이터값으로 처리하였다. 이때 FFT후의 주파수 분해능은 12.2kHz였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 두께 4.239mm인 알루미늄에 대하여 측정한 결과로 (a)는 표면반사신호와 첫번째 저면반사신호를 FFT한 결과이고, (b)는 표면반사신호를 제외한 전 신호를 FFT한 결과이며, (c)는 전 신호를 FFT하여 얻어진 결과이다.

앞의 이론에서 언급했던 것 처럼 (a)와 (c)는 식 (13)의 주파수에서 최소값들을 가지며, (b)는 같은 주파수에서 최대값들을 가진다. 그러므로 재료내에서 신호의 감쇠가 심하여 연속되는 신호를 얻을 수 없고 단지 한두번의 왕복하는 신호만을 얻을 수 있을 경우에는 Fig. 4의 (a)와 동일한 경우이며, mainbang이 커서 표면반사신호에 영향을 미치는 경우 또는 접촉법으로의 측정할 경우에는 표면반사 신호를 제외한 나머지 신호로만 결과를 얻어야 하므로 Fig. 4(b)의 경우에 해당된다. 결국

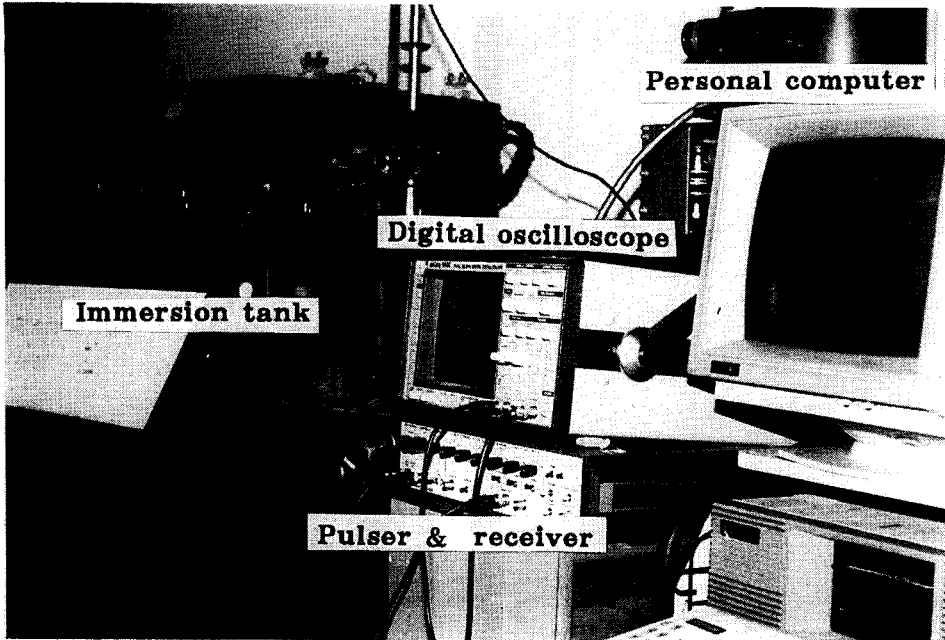


Fig. 3 Photography of experimental set-up

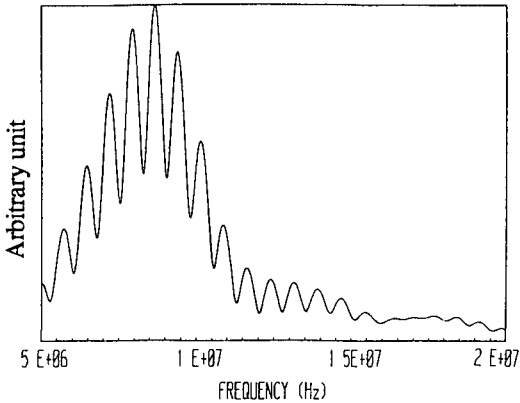
Table 1 Specification of the experimental unit

Pulser & receiver	Panametrics 5052UA
Digital oscilloscope	Lecroy 9400
Immersion Scanning System	Testech 204
Transducer	KB-Aerotech. 10MHz

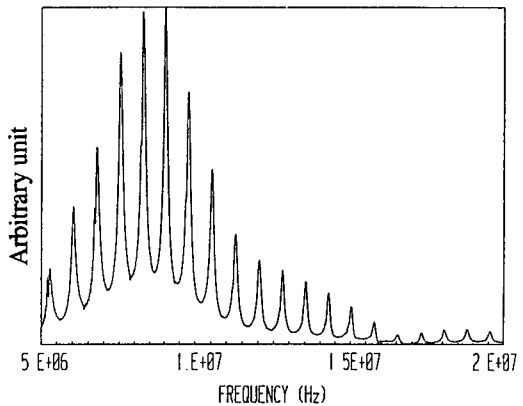
이 방법을 이용하면 재료의 감쇠정도에 크게 제약 받지 않으며 수침법 뿐 아니라 접촉법으로도 동일한 측정결과를 얻을 수 있다. Fig. 4의 (c)를 이용

하여 초음파 속도를 측정된 결과와 FFT의 위상 스펙트럼을 이용하여 속도를 측정된 결과를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 실선은 위상 스펙트럼으로 부터 측정된 결과이고, 별표는 진폭 스펙트럼으로 부터 측정된 결과이다.

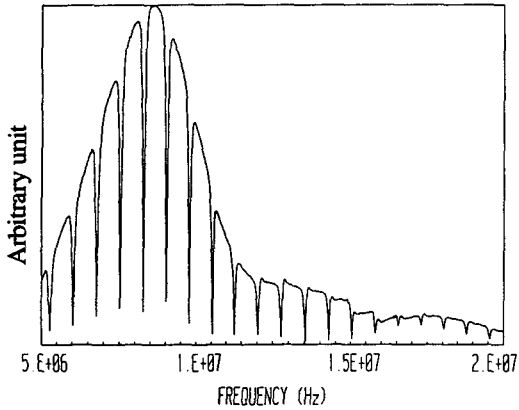
위상 스펙트럼은 측정주파수 범위에서 연속적으로 측정되어 있으나, 진폭 스펙트럼은 특정주파수에서의 측정결과만을 얻을 수 있다. 그러므로 신호의 분리가 가능한 시험편에 대해서는 위상 스펙트



(a) spectrum of front face reflection and first back face reflection



(b) spectrum of all back face reflections



(c) spectrum of front face reflection and all back face reflections

Fig. 4 Amplitude spectra in 4.239mm thick aluminum plate

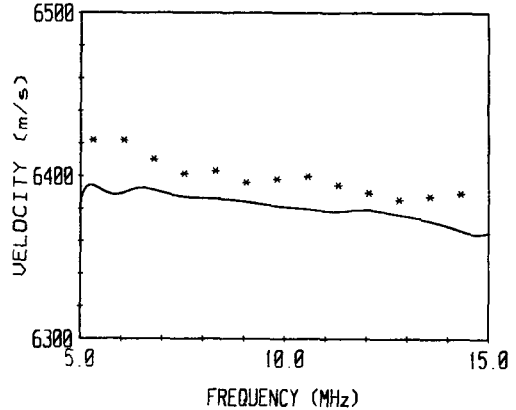


Fig. 5 Comparison of the results from amplitude spectrum method and phase spectrum method

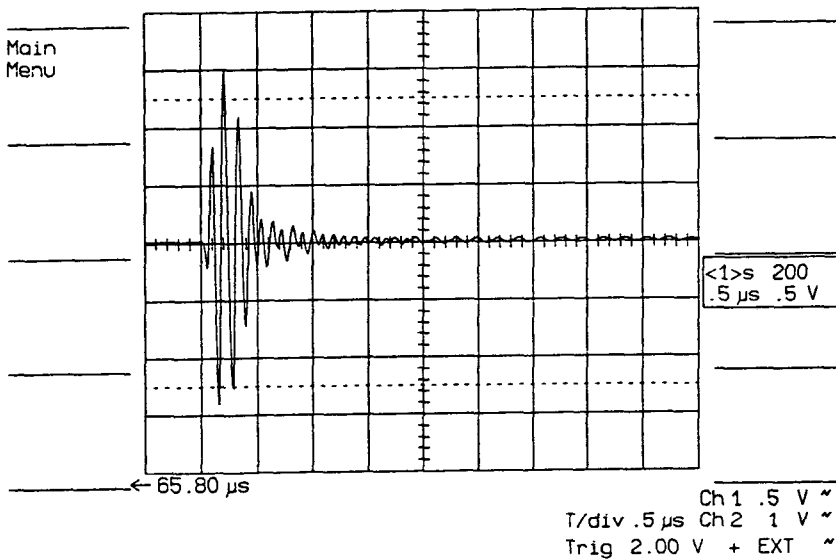


Fig. 6 The time domain signal measured in 0.469mm thick aluminum plate

럼을 이용하는 것이 더욱 유리하다. 한편 두 측정 결과사이에는 7MHz~13MHz의 주파수 범위에서 최대 20m/s의 차이가 있다. 아래 Fig.6은 두께가 0.469mm인 스틸에서 측정된 초음파 신호이다. 두께가 비슷한 알루미늄과 스테인리스스틸에서의 신호모양은 Fig.6과 거의 동일하다.

위의 그림에서 알 수 있듯이 연속되는 신호의 분리는 전혀 불가능하므로, 이런 경우에는 진폭 스펙트럼을 이용하는 방법이 절대적으로 유리하다. 두

께가 얇은 알루미늄, 스틸, 그리고 스테인리스스틸에서의 진폭 스펙트럼은 Fig.7과 같으며, 이 측정 결과로부터 계산된 속도는 Table 2과 같다.

두께가 얇아지면 각 최소주파수 사이의 간격이 넓어져서 측정 데이터의 수는 크게 줄어든다. 물론 광대역탐촉자를 이용하여 넓은 범위의 주파수를 측정하면 데이터의 수를 늘릴 수는 있을 것이나, 여기서는 10MHz의 중심주파수를 갖는 탐촉자를 이용하였으므로 5MHz~20MHz의 데이터만을 취하

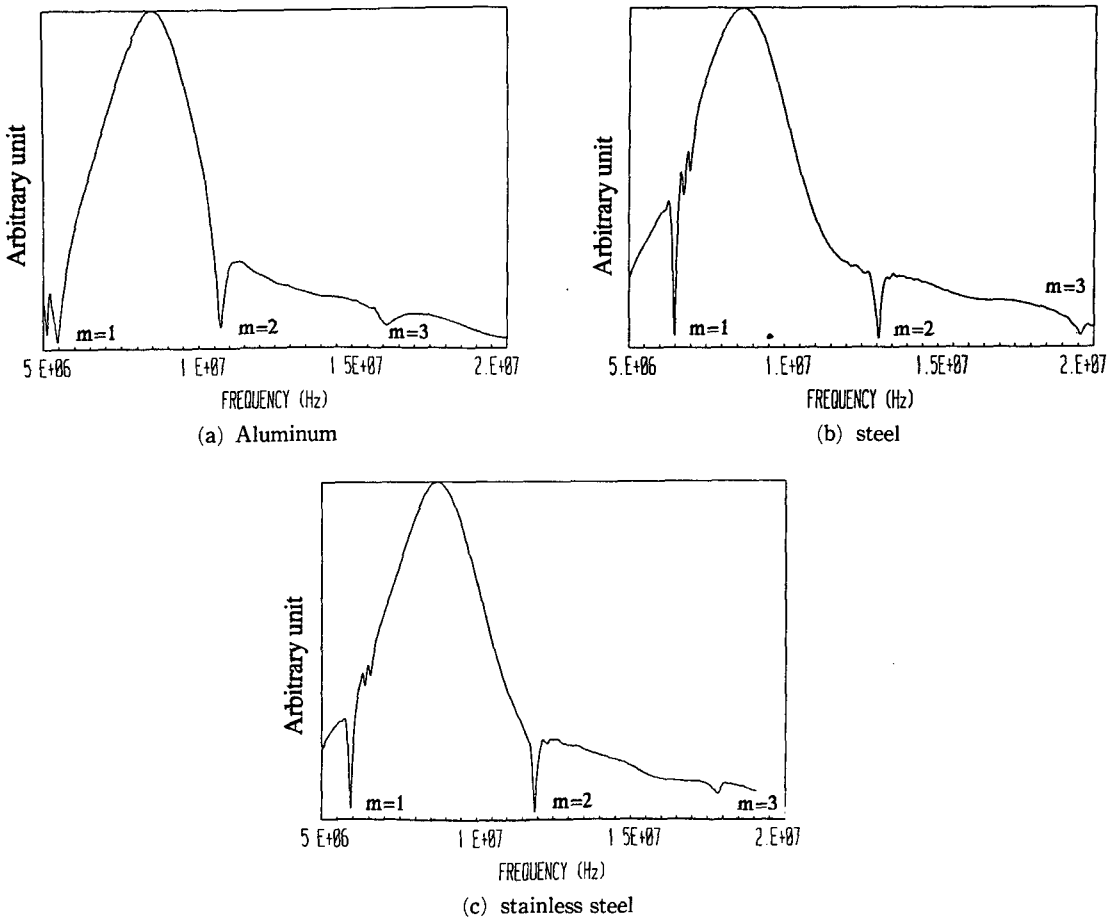


Fig. 7 amplitude spectra in three thin plates

였다.

Table 2의 결과에서는 각 재료에 대하여 세개의 데이터만을 얻었는데, 세 데이터는 최대 34m/s의 범위내에서 측정되었다. 위의 스틸 재료에서 34m/s의 속도차이는 시간차이로 계산하면 약 1ns에 해당되며, 재료의 분산이 없다고 가정하면 이를 측정

시의 오차로 생각할 수 있다. 위와 같이 박판 재료에서 정확하게 초음파 속도를 측정할 수 있으므로 앞으로 박판 재료에서의 두께방향의 잔류 응력이나 탄성계수 측정등에 이용될 수 있다.

5. 결 론

두께가 얇아서 신호의 분리가 불가능한 경우에도 진폭 스펙트럼 방법을 사용하면 약 ~0.1% 정도의 정확성으로 초음파의 속도를 측정할 수 있다.

참고문헌

- (1) Neighbors, J. R. and Schacher, G. E., 1967, "Determination of Elastic Constants from Sound-Velocity Measurements in Crystals of General Symmetry,"

Table 2 Minimum frequencies and related velocities

	Aluminum (0.605mm)		Steel (0.469mm)		Stainless steel (0.490mm)	
Index <i>m</i>	Freq. (MHz)	Vel. (m/s)	Freq. (MHz)	Vel. (m/s)	Freq. (MHz)	Vel. (m/s)
1	5.355	6480	6.494	6091	5.932	5813
2	10.171	6484	13.061	6125	11.914	5842
3	16.113	6499	19.580	6122	17.834	5830

- Journal of Applied Physics, Vol. 38, No 13, pp.5366~5375.
- (2) Pritchard, S. E., 1987, "The use of Ultrasonics for Residual Stress Analysis," NDT International, Vol. 20, No 1, pp.57~60.
- (3) Papadakis, E. P., 1976, "Physical Acoustics," Academic, New York, pp.277~374.
- (4) Sachse, W. and Pao, Y.H., 1978, "On the Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids," Journal of Applied Physics Vol. 49, No. 8, pp.4320~4327.
- (5) Allen, D. R. and Cooper, W.H.B., 1983, "A Fourier Transform Technique that Measure Phase Deays between Ultrasonic Impulses with Sufficient Accuracy to Determine Residual Stresses in Metals," NDT International, Vol 16, No 4, pp.205~217.
- (6) Pialucha, T., Guyott, C.C.H. and Cawley, P., 1989, "Amplitude Spectrum Method for the Measurement of Phase Velocity," Ultrasonics, Vol 2, Sep., pp.270~279.