

## 초음파 펄스의 주파수해석에 의한 재료의 음향특성 측정

### Measurements of Acoustic Properties of Materials by Spectral Analysis of Ultrasonic Pulses

하 강 열\*, 김 무 준\*, 이 종 규\*, 김 성 부\*, 中 鉢 憲 賢\*\*

(Kanglyeol Ha\*, Moojoon Kim\*, Jongkyu Lee\*, Sungboo Kim\*, Chubachi Noriyoshi\*\*)

#### 요 약

초음파펄스의 주파수해석에 의하여 재료의 음속과 감쇠계수 및 복소모듈러스를 동시에 측정하는 시스템을 구축하고 그 특성을 평가하였다. 이 시스템은 초음파현미경의 기계구동부와 공진주파수 85MHz의 ZnO 평면 트랜스듀서에 의해 구성되며, 음속은 시료의 표면과 저면에서 반사되어온 두개의 펄스가 동시에 포함되도록 게이트한 후 파워스펙트럼을 구하였을 때 생기는 주파수영역에서의 극대점(또는 극소점)간의 간격으로부터, 감쇠계수는 그 두 펄스파의 각각에 대한 파워스펙트럼준위와 표준시료 표면으로 부터의 반사파의 파워스펙트럼준위로부터 구하여진다. 구축된 시스템을 용융석영, 폴리에스테르막 등의 재료에 적용한 결과 정도 높은 측정이 가능함을 알았다.

#### Abstract

A system for measurement of ultrasonic velocity, attenuation and complex modulus of materials by using the spectral analysis method of pulses has been constructed and its performances are estimated. The system has a mechanical scanning part of an acoustic microscope with a ZnO plane wave transducer of the resonant frequency of 85MHz. Ultrasonic velocity has been obtained by the intervals of maxima (or minima) on the power spectrum of a pulse train reflected from the surface and bottom of a specimen, and attenuation has been obtained by the power spectra of three pulses reflected from the surface and the bottom of a specimen and the surface of a standard specimen. The measured results for materials such as fused quartz, polyester show that the system has very high accuracy.

#### I. 서 론

고체재료의 기계적성질은 스티프니스 정수(Stiffness Constant) 및 손실계수(Loss Factor)로 이루어지는 복소모듈러스(Complex Modulus)에 의해 평가할 수 있으며, 복소모듈러스는 그 재료에서의 음속과 음파의 감쇠량을 주파수의 함수로 측정함으로써 구할 수 있다<sup>(1, 2)</sup>

초음파에 의한 고체재료의 음속을 측정하기 위한 종래의 방법으로는 Pulse-Echo-Overlap법, Pulse Superposition법, Sing-Around법 등이 있는데, 이들은 음파가 일정 두께의 시료 내부를 통과하는데 걸린 시간을 측정하는 것을 기초로 하고 있으며, 감쇠량의 측정은 근본적으로 시료 내부를 통과한 투과파와 시료에 입사된 파와의 강도차를 구하는 것으로, 펄스신호의 스펙트럼해석법이

주로 이용되어져 왔다<sup>(3)</sup>. 따라서 종래 사용된 방법에 의하여 재료의 음속 및 감쇠계수를 구하기 위해서는 오실로스코프 등에 의한 시간영역에서의 측정과 스펙트럼분석기 등에 의한 주파수영역에서의 측정을 각각 별도로 행해야하며, 그에 따라 측정장치의 구성도 달라져, 일반적으로 두 개의 측정시스템이 필요하게 된다.

그러나, 최근 박막의 두께측정 등에 사용되고 있는 초음파간섭계의 원리<sup>(4, 5)</sup>를 이용하면 두께가 일정한 시료에 대한 음속은 주파수영역에서 측정 가능하다. 따라서, 그 원리를 종래의 감쇠측정시스템에 적용시키면 음속과 감쇠의 측정을 하나의 시스템에서 수행할 수 있게 되며, 그 시스템에 초음파현미경에서 사용하는 UHF대의 초고주파 초음파 트랜스듀서를 장치하면 정도 높은 측정을 할 수 있게 된다<sup>(6, 7)</sup>

본 논문에서는 중심주파수 85MHz의 ZnO 트랜스듀서와 초음파현미경의 기계구동부를 이용하여 얇은 판상의 시료의 음속과 감쇠계수를 주파수영역에서 동시에 측정하

\*부산수산대학교 물리학과

\*\*일본 도호쿠대학 전기공학과

접수일자: 1995년 8월 30일

여 복소모듈러스를 구하는 음향특성 측정시스템을 구축하고, 용융석영, 폴리에틸렌 등 몇몇 재료에 적용하여 얻어지는 결과를 문헌치와 비교하여 시스템의 측정정도를 평가하였다.

## II. 측정원리

### II-1. 음속 및 감쇠측정

음향특성이 일정한 재료로 만들어진 기관 위에 두께  $d$ 의 얇은 판상의 시료를 수중에 그림 1과 같이 설치하고 펄스형 초음파  $y(t)$ 를 입사시켰을 때, 시료 표면으로 부터의 반사신호를  $y_1(t)$ , 저면으로 부터의 반사신호를  $y_2(t)$ 라고 하면, 이 두 신호는 시간차에 의하여,

$$y_1(t) = R_{12}y(t) \quad (1)$$

$$y_2(t) = R_{12}(1 - R_{12}^2)\exp(-2\gamma d)y(t - \tau) \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서  $R_{12}$ 는 물에서 시료로 전파되는 경우 경계면에서의 반사계수이고,  $\gamma$ 는 시료에서의 전파정수로서 각각,

$$R_{12} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (4)$$

이다. (3)식에서  $z_1$ 과  $z_2$ 는 각각 물과 시료의 음향임피던스이며,  $\alpha$ 는 진폭의 감쇠정수,  $\beta$ 는 위상정수이다. 반사신호  $y_1(t)$ 와  $y_2(t)$ 만이 동시에 포함되도록 게이트한 펄스 열  $y'(t)$ 는

$$\begin{aligned} y'(t) &= y_1(t) + y_2(t) \\ &= R_{12}y(t) + By(t - \tau) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{단, } B = -R_{12}(1 - R_{12}^2)\exp(-2\gamma d) = B'\exp(-2\gamma d) \quad (6)$$

이며, 그 푸리에변환  $Y'(f)$ 는

$$\begin{aligned} Y'(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{12}y(t)\exp(-j2\pi ft)dt \\ &\quad + B \int_{-\infty}^{\infty} y(t - \tau)\exp(-j2\pi ft)dt \\ &= [R_{12} + B\exp(-j2\pi f\tau)]Y(f) \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 여기서,  $Y(f)$ 는 입사파  $y(t)$ 의 푸리에변환이다. 따라서,  $y'(t)$ 의 파워스펙트럼  $|Y'(f)|^2$ 은

$$\begin{aligned} |Y'(f)|^2 &= [R_{12}^2 + 2R_{12}B'\exp^{-2\alpha d} \cos(2\pi f\tau + \beta) \\ &\quad + B'^2 \exp^{-4\alpha d}]|Y(f)|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

가 된다.  $R_{12}$ 가 일정하고 시료 중의 음속의 분산이 무시되면 파워스펙트럼  $|Y'(f)|^2$  상에는 (8)식의 우변 둘째

항에 의하여  $y_1(t)$ 와  $y_2(t)$ 간의 지연시간의 역수에 해당하는 주파수 간격, 즉,  $\Delta f = 1/\tau$ 의 일정주기를 갖는 간섭파형이 나타나게 되며, 시료의 두께가 기지인 경우  $\Delta f$ 로부터 음속  $v$ 는,

$$v = 2d\Delta f \quad (9)$$

에 의해 구해진다.

한편, 감쇠계수는 주파수의 함수이며 표면반사신호와 저면반사신호가 시간적으로 분리되어 있는 경우 각각의 신호의 스펙트럼의 준위차로부터 구할 수 있다. 그림1에서의  $y_1(t)$ 와  $y_2(t)$ 의 푸리에변환을 각각  $Y_1(f)$ ,  $Y_2(f)$ 로 두고 진폭변화만을 고려하면, 임의의 주파수에서는

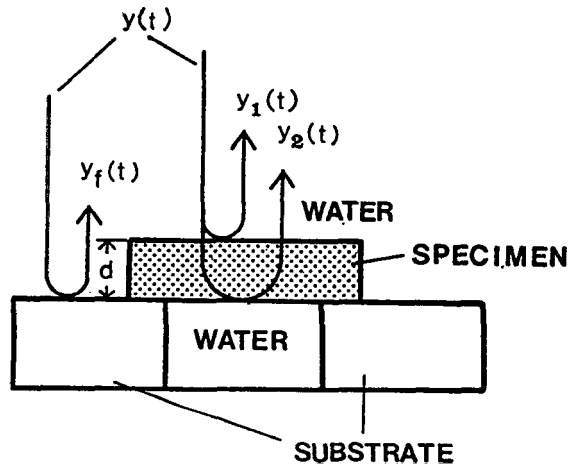


그림. 1. 시료의 설치 및 측정에 필요한 신호.  
Fig. 1. Schematic of specimen and reflection signals for measurement.

$$|Y_1/Y_2| = (1 - R_{12}^2)^{-1} \exp(2\alpha d) \quad (10)$$

로 주어진다. 또한, 음향임피던스가 일정한 재료로 만들어진 기관을 사용하여 그 표면으로 부터의 반사파를 기준신호로 이용하면, 물과 기관의 경계에서의 반사계수  $R_{ref}$ 는

$$R_{ref} = |Y_f/Y_1|R_{12} \quad (11)$$

라고 볼 수 있다. 단,  $Y_f$ 는 기관으로부터의 반사파의 파형  $y_f(t)$ 의 푸리에변환이다. (10), (11)식의 관계를 이용하면,

$$\alpha(f) = \ln[|Y_1/Y_2|\{1 - R_{ref}^2(|Y_1/Y_2|)^2\}]/2d \quad (12)$$

가 되어,  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  및  $y_f(t)$ 의 파워스펙트럼으로부터  $\alpha(f)$ 를 구할 수 있다.

II-2. 복소모듈러스<sup>(1)</sup>

입의 일정주파수에 있어서 용력  $T$ 와 변형률  $S$ 는 복소모듈러스  $C^*$ 에 의해,

$$T = C^* S = (C' + jC'')S = C'(1 + j\eta)S \quad (13)$$

로 주어진다. 여기서,  $C'$ 는 스티프니스 정수이고,  $\eta$ 는 손실계수이며  $\eta = C''/C'$ 에 의해 구해진다.  $C^*$ 에 의한 파동 방정식은,

$$C^* \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (14)$$

이다. 단,  $u$ 는 변위,  $r$ 은 위치,  $t$ 는 시간을 나타내며,  $\rho$ 는 밀도이다. 평면진행파를 고려할 경우 이 방정식의 해는

$$u = u_0 e^{j(\omega t - \gamma r)} = u_0 e^{-\alpha r} e^{j(\omega t + \beta r)} \quad (15)$$

로 들 수 있다. 여기서  $\gamma$ 는 (4)식의 전파상수로서,

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \left[ \frac{\rho}{C' + jC''} \right]^{1/2} \quad (16)$$

인 관계가 있다. (16)식에 음속(위상속도)  $v = \omega/\beta$ 를 고려하면

$$C' = \frac{\rho v^2 (1 - \alpha^2 v^2 / \omega^2)}{(1 + \alpha^2 v^2 / \omega^2)^2} \quad (17)$$

$$C'' = \frac{2\alpha \rho v^3 / \omega}{(1 + \alpha^2 v^2 / \omega^2)^2} \quad (18)$$

가 되며, 음속  $v$ 와 감쇠량  $\alpha$ 을 주파수별로 구하면 복소모듈러스를 구할 수 있다.

III. 장치 및 방법

그림 2는 본 연구에서 구축한 시스템의 구성도이다. 여

기서 임펄스발생기는 최대출력 진폭이 50V이며 폭 0.7ns ~ 100ns인 짧은 단일 펄스를 발생시키며, 그 전기적 임펄스신호는 방향성결합기를 통해 트랜스듀서에 인가된다.

트랜스듀서는 직경 20.0mm, 길이 12.0mm의 용융석영봉의 한쪽 단면의 중앙에 압전물질 ZnO를 원형으로 형성시키고, 다른 쪽 단면에는 용융석영과 몰파의 음향적 정합을 위하여 9 $\mu$ m의 PVDF 막을 부착시켜 만든 것<sup>(8)</sup>으로서, ZnO막의 직경은 5.0mm, 두께는 33.5 $\mu$ m이며, 수중에 방사되는 초음파의 중심주파수는 약 85MHz이었다. 이 트랜스듀서에서 나온 초음파는 물을 거쳐 시료의 내부로 전파되고, 시료의 표면 및 저면의 경계로부터 반사된 다중반사신호인 펄스열은 다시 트랜스듀서에서 전기신호로 변환된다.

본 실험에서는 측정시 트랜스듀서와 시료 및 트랜스듀서와 기관간의 상대적 위치를 정확히 유지하는 것이 중요한데, 이를 위하여는 정밀한 스캐닝장치 및 Goniometer가 필요하다. 이를 위하여 본 시스템에서는 스테핑모터로 구동되는 초음파현미경시스템의 기계구동부를 이용하였는데, 그 이동정도는 XY 방향으로 1.0 $\mu$ m/step, Z 방향으로는 0.025 $\mu$ m/step이며, Goniometer에 의한 각도 조정에 있어서는 0.01°이상의 정도를 가졌다. 한편, 시료의 두께는  $\pm 0.5\mu$ m의 정도를 갖는 마이크로미터로 측정하였다.

음속측정시에는 시료에서의 반사신호 중에서 첫번째와 두번째 신호만을 동시에 게이트하여 증폭한 후 슈퍼헤터로다인 방식의 스펙트럼분석기에서 파워스펙트럼을 구하고, 그 결과인 비디오출력을 저역통과 필터를 거치게 하여 피크홀더(P/H)와 게이트회로에서 생기는 잡음을 제거한 후 A/D변환하여 컴퓨터에 입력시키고, FFT를 행하여 간섭주기  $\Delta f$ 를 구한 다음, 시료의 두께를 대입하여 음속을 구한다.

감쇠계수의 측정에 있어서는  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  및  $y_f(t)$ 의 신호를 각각 개별적으로 게이트하여 파워스펙트럼을 구한 후 식(12)에 의한  $\alpha(f)$ 를 구하였는데, 기준신호  $y_f(t)$

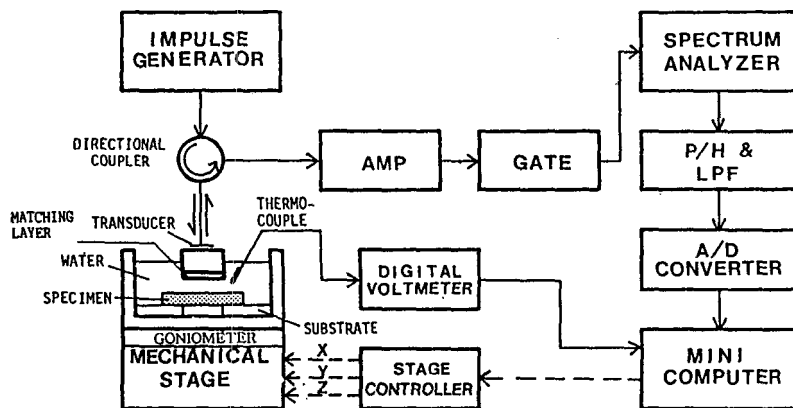


그림 2. 측정장치의 구성도.

Fig. 2. Block diagram of measurement system.

를 얻기 위한 기관으로서의 음향임피던스가 수온변화에 영향을 받지 않는 안정된 재료가 적합한데, 본 실험에서는 중앙에 직경 10.0mm의 구멍을 뚫은 두께 약 3mm의 용융석영판을 사용하였으며, 물의 음향임피던스는 문헌치<sup>(9)</sup>의 음속과 밀도를, 용융석영의 음향임피던스는 여기서 구한 음속과 정밀천칭을 사용하여 구한 밀도 측정치를 이용하여 산출하였다. 물의 음향임피던스는 수온에 따라 변하므로 본 시스템에서는  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 정도를 갖는 열전대를 사용하여 실험시의 수온을 측정하여 보정하였으며,  $y_f(t)$ 를 측정할 때에는 트랜스듀서를 시료의 두께만큼 접근시켜 트랜스듀서로부터 기관까지의 거리가 트랜스듀서로부터 시료까지의 거리와 같도록 하였다.

이상에서 구해지는 음속과 감쇠의 값을 (17)식과 (18)식에 대입하여 스태프니스정수 및 손실계수를 출력하도록 시스템을 구성하였고, 구하여진 각각의 값을 문헌치와 비교하여 시스템의 정도를 고찰하였는데, 이 때 (17) 및 (18)식의  $\alpha(f)$ 는 단위는  $\text{Np/m}$ 이므로 (12)식에 의한 결과  $\text{dB/mm}$ 를 변환하여 대입하였다.

IV. 측정결과 및 고찰

실험에 있어서는 감쇠가 거의 없는 대표적 재료로서 용융석영, 유리, Z-cut 사파이어를 사용하였고, 감쇠가 있는 재료로서 폴리에스테르막을 선정하였다. 그림 3은 등방성 물질인 두께 887 $\mu\text{m}$ 인 용융석영과 두께 347 $\mu\text{m}$ 인 폴리에스테르막에 대한  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  및  $y'(t)$ 의 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서  $y_2$ 는 시료경계면에서의 반사 및 투과에 따라  $y_1$  보다 작은 값을 나타내며  $y'$ 에서는  $y_1$ 과  $y_2$ 의 시간차에 의한 간섭형태가 나타나 있음을 알 수 있다. 그림 4는 그림 3에서의 극대점(또는 극소점)간의 간격인  $\Delta f$ 를 구하기 위하여  $y_1$ 의 스펙트럼에서  $y_2$ 의 스펙트럼을 뺀 것과 그 FFT 결과를 나타낸다. 그림 3에서 용융석영

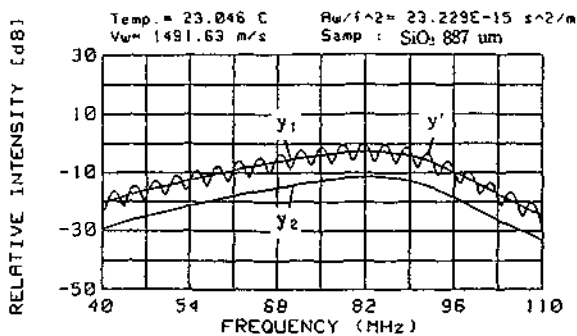
의 경우는 감쇠가 거의 없어 전주파수대에서 일정한 진폭을 나타내나 폴리에스테르막은 주파수가 높아질수록 감쇠량이 커져 진폭이 감쇠함을 알 수 있으며, FFT 결과는  $\text{rad/Hz}$ 로 나타나 있는데,  $2\pi\text{rad}$ 에 대한 값인  $\Delta f$ 는 용융석영의 경우 3.377MHz, 폴리에스테르의 경우 3.326MHz 이고, 이에 따른 음속은 각각 5991  $\text{m/s}$  및 2308  $\text{m/s}$ 이었다.

사진 1은  $y_1$ 과  $y_2$ 의 파형 및 시간 간격을 나타내는데, 그 시간간격(Time of Flight : TOF)으로부터 구해지는 음속을 본 시스템에서의 주파수 해석에 의한 음속과 비교하기 위하여 촬영한 것이다. 그림에서 앞의 파형은 표면에서, 뒤의 파형은 저면에서 반사되어 온 것이며, (6)식에서와 보는 바와 같이 역위상으로 나타나게 된다.

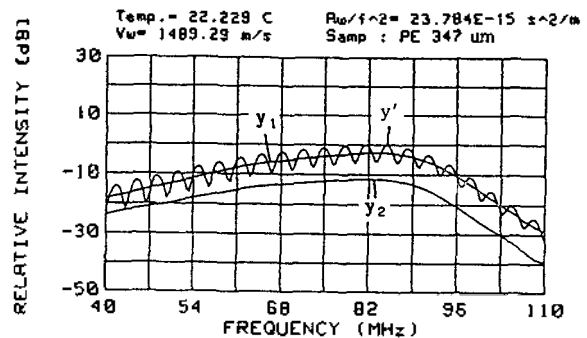
표 1은 음속의 측정결과를 TOF에 의한 값 및 문헌치와 비교하여 나타낸 것이다. 표로부터 본 연구에서 구축한 시스템에 의한 음속측정치와 TOF 측정치에 의한 값과는 0.1% 이하로 거의 일치하며, 문헌치와는 0.4% 이하의 오차를 가짐을 알 수 있다. 여기서, 문헌치의 값은 시료가 동일하지 않는 점을 고려할 때 본 시스템의 음속측정 정도는 매우 높다고 하겠다.

그림 5는 그림 3에서의  $y_1$ ,  $y_2$  및  $y'$ 의 각각의 파워스펙트럼 측정에 의하여 구하여진 감쇠계수의 주파수 의존성을 나타낸다. 용융석영의 경우 감쇠계수는 측정범위내의 전주파수대에 걸쳐 0.2  $\text{dB/mm}$  이하로 매우 작으며, 주파수에 따른 변화도 나타나지 않았다. 그러나 폴리에스테르막의 경우는 주파수의 증가에 따라 감쇠계수가 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

이러한 측정결과는 용융석영의 경우 감쇠량은 100MHz에서 0.02  $\text{dB/mm}$  이하인 문헌치<sup>(11)</sup>와 일치하며, 고분자 물질에서의 감쇠계수는 선형적으로 나타내어짐<sup>(12)</sup>을 고려할 때 정확한 값을 알 수 있다. 그러나, 용융석영에서 생기는 감쇠가 점성에 기인하는 경우는 일반적으로  $f^2$ 에 비례하여 감쇠량이 증가하는데, 여기서의 측정결과로부터

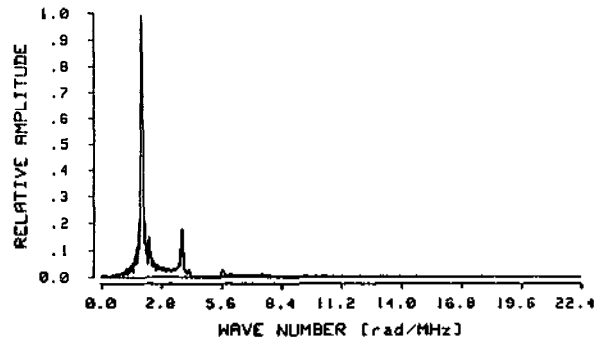
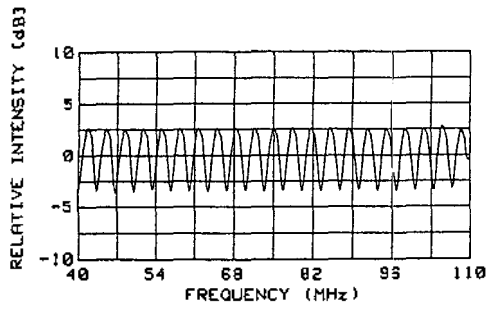


(a) Fused Quartz (d=887 $\mu\text{m}$ )

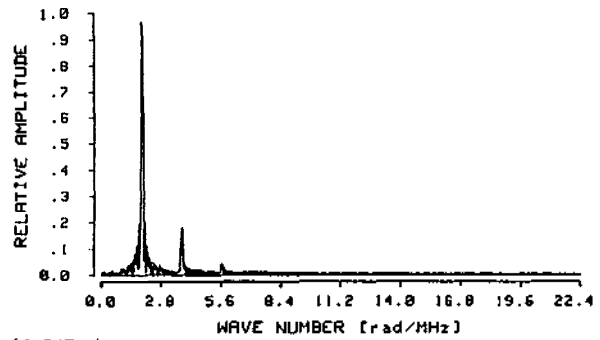
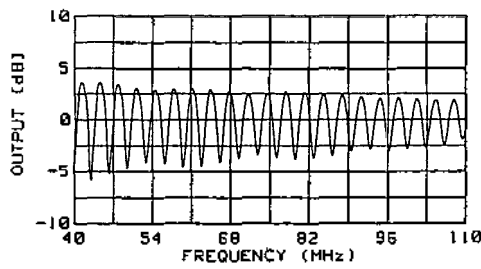


(b) Polyester (d=347 $\mu\text{m}$ )

그림 3. 시료로부터의 반사파의 파워스펙트럼 ( $y_1$ =표면,  $y_2$ =저면,  $y'=y_1+y_2$ ).  
 Fig. 3. Power spectra of reflected waves from specimens  
 ( $y_1$  = surface  $y_2$  = bottom,  $y' = y_1 + y_2$ ).



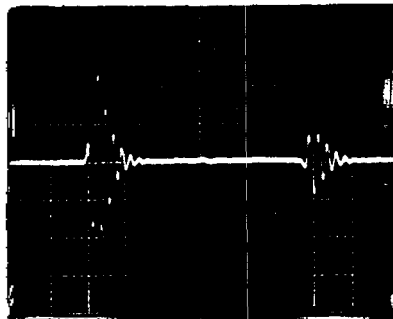
(a) Fused Quartz ( $d=887\mu\text{m}$ )



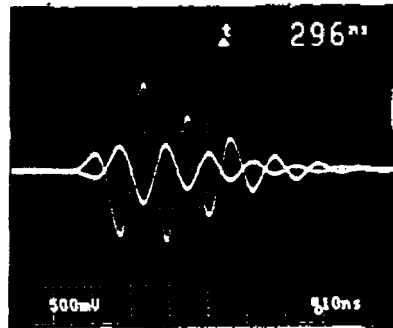
(b) Polyester ( $d=347\mu\text{m}$ )

그림 4. 간섭성분의 파워스펙트럼과 그 FFT 결과

Fig. 4. Power spectra of interference components and their FFT results.

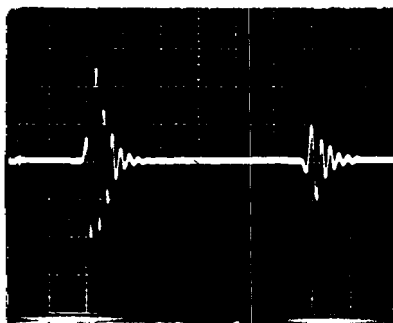


(H: 50ns/Div. V: 0.5V/Div.)

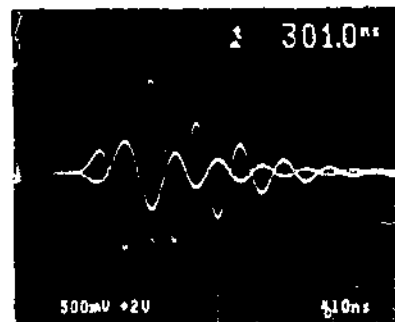


(H: 10ns/Div. V: 0.5V/Div.)

(a) Fused Quartz ( $d=887\mu\text{m}$ )



(H: 50ns/Div. V: 0.5V/Div.)



(H: 10ns/Div. V: 0.5V/Div.)

(b) Polyester ( $d=347\mu\text{m}$ )

사진 1. 용융석영 및 폴리에스테르막에서의 반사펄스열

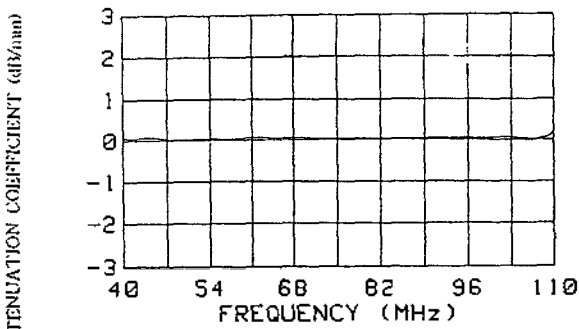
Photo. 1. Pulses reflected from a fused quartz and Polyester film.

표 1. 음속측정결과와 문헌치와의 비교

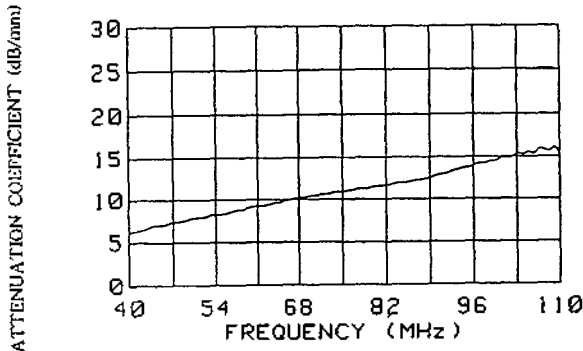
Table 1. Measured velocities compared with reference values

	Measured(m/s) (v)	TOF(m/s) (v <sub>T</sub> )	Ref. (m/s) (v <sub>R</sub> )	$\left[ \frac{v_T - v}{v_T} \right] \times 100(\%)$	$\left[ \frac{v_R - v}{v_R} \right] \times 100(\%)$
Fused Quartz	5991	5993	5973 <sup>+</sup>	0.03	0.30
Polyester	2308	2306	2310 <sup>(10)</sup>	0.09	0.09

+ Calculated from the stiffness constant by reference<sup>(9)</sup>



(a) Fused Quartz (d = 887 μm)



(b) Polyester (d = 347 μm)

그림 5. 감쇠계수의 주파수의존성

Fig. 5. Frequency dependences of attenuation coefficients.

터는 그러한 경향을 알 수가 없다. 이것은 본 시스템의 진폭측정의 정도가 게이트의 설정등의 시스템에서 생기는 잡음으로 인하여 ±0.2 dB 정도로 제한되기 때문이다. 따라서 용융석영과 같이 감쇠가 매우 작은 물질의 경우의 감쇠량의 절대치의 정밀한 측정은 곤란하다.

그림 6은 용융석영의 복소모듈러스를 나타낸다. 이 그림에서 감쇠는 전주파수대역에서 α=0.2dB/mm로 일정하게 둔 것이다. 그림에서 스티프니스정수는 7.896 × 10<sup>10</sup> N/m<sup>2</sup>로 거의 일정하고, 손실계수는 주파수의 증가에 따라 약 0.7에서 0.2까지 감소하는 것으로 나타났다.

감쇠를 무시하여 0으로 두었을 경우 (17)식 및 (18)식으로부터 복소모듈러스는 C' = ρ v<sup>2</sup>, C'' = 0가 되어 실수부인 스티프니스정수만 남게 되는데, 표 2는 α=0.2dB/

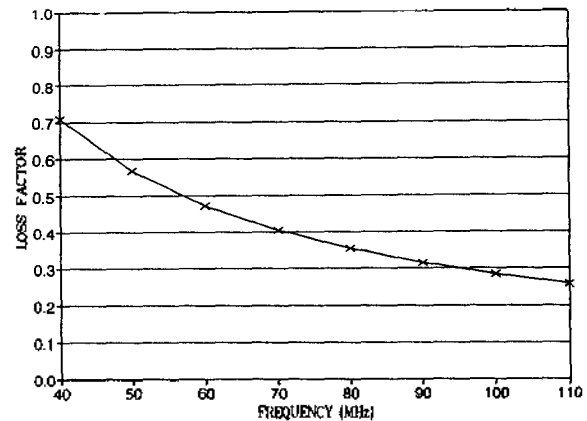
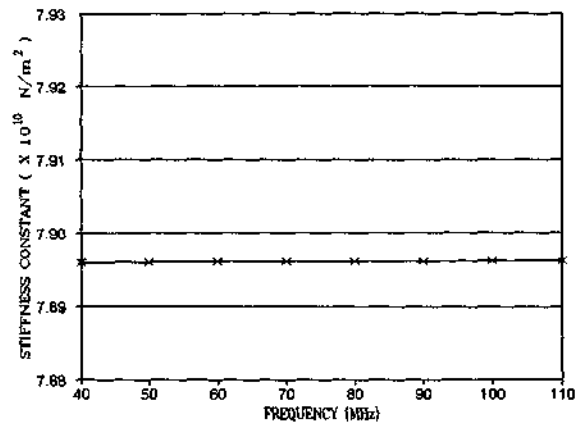


그림 6. 용융석영의 복소모듈러스

Fig. 6. Complex modulus of fused quartz.

mm 이하인 몇몇 재료에 대하여 감쇠를 무시하고 구한 스티프니스정수를 문헌치와 비교하여 나타낸 것이다. 표에서 밀도는 제작사의 공칭치 또는 문헌치이며, 비교란에는 구해진 스티프니스의 요소를 나타내었는데, 용융석영 및 파이렉스유리는 등방성 재료이므로 측정된 스티프니스 정수는 c<sub>11</sub> (=c<sub>33</sub>) 이고, Z-cut 사파이어는 c<sub>33</sub>에 해당된다. 감쇠를 무시한데 따른 스티프니스정수의 오차는 그림 7과 같다. 이 결과로부터 오차는 ±0.06% 이하로 감쇠를 무시하여도 측정치에는 영향을 미치지 않음을 알

표 2. 감쇠가 작은 재료의 스티프니스 정수 측정치  
Table 2. Stiffness constants of low loss materials

	Velocity(m/s)	density(kg/m <sup>2</sup> )	Stiffness Constant (c' : × 10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )		note
			Mesured	Ref.	
Fused Quartz	5991	2200	7.90	7.85 <sup>+</sup>	c' = c <sub>11</sub> = c <sub>33</sub>
Glass <sup>++</sup>	5556	2230	6.88	6.97 <sup>++</sup>	c' = c <sub>11</sub> = c <sub>33</sub>
Z-cut Sapphire	11240	3986	50.36	49.31 <sup>+</sup>	c' = c <sub>33</sub>

+ Calculated from the velocity and density or the compliance constant by reference<sup>(9)</sup>.  
++ Corning 7740.  
+++ From maker.

수 있다. 감쇠를 무시하고 구한 표 2의 스티프니스정수와 문헌치와는 약 2% 정도의 비교적 큰 오차가 생기는데 이는 밀도가 정확하지 못함에 그 원인이 있는 것으로 추정된다.

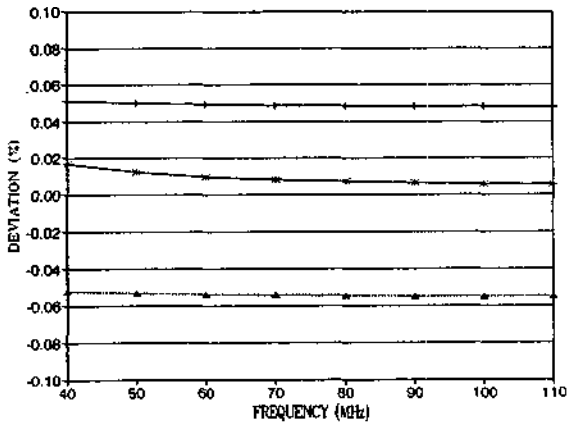


그림 7. 감쇠를 무시한데 따른 스티프니스정수의 오차  
(++ : 용융석영, --▲--▲ : 유리, \*-- : Z-cut 사파이어)  
Fig. 7. Errors in stiffness constants caused by the omission of attenuation.  
(++ : Fused Quartz, --▲--▲ : Glass, \*-- : Z-cut Sapphire)

그림 8은 감쇠가 큰 재료인 폴리에스테르막의 복소모듈러스 측정결과이다. 폴리에스테르막의 경우는 감쇠계수가 측정주파수대역내에서 약 6.3~16.1 dB/mm이고 주파수의 증가에 따라 선형적으로 증가하는데, 이에 따라 스티프니스정수는 주파수의 증가에 따라 약 5.72 × 10<sup>9</sup>에서 5.73 × 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>로 다소 증가하며, 손실계수는 0.083으로 거의 변함이 없는 것으로 나타났다.

V. 결 론

수중에 놓인 얇은 판상의 시료로부터 반사되어 오는

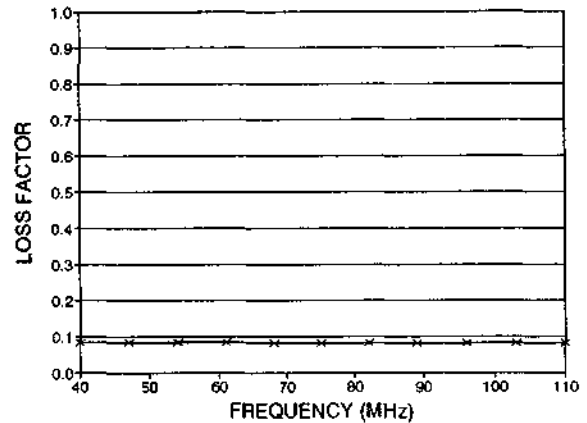
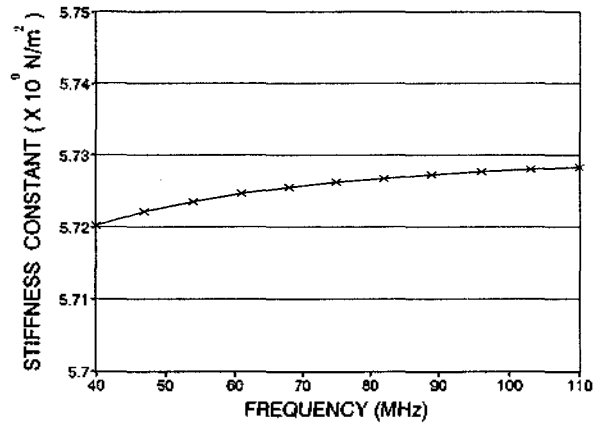


그림 8. 폴리에스테르의 복소모듈러스  
Fig. 8. Complex modulus of polyester film.

초음파펄스를 주파수해석하여 고체재료의 음속과 감쇠계수를 동시에 측정하여 복소모듈러스를 구하는 시스템을 구축하고 용융석영, 폴리에스테르막 등 몇몇 재료에 적용, 그 측정정도를 평가한 결과, 음속의 경우는 1.0% 이하, 감쇠가 작은 재료의 스티프니스정수는 %이내에서 문헌치와의 차이를 나타내었다. 그러나, 음속에 대한 TOF 측정결과와 비교할 때 그 차이는 시료가 동일하지 않는 점에서 기인하는 것으로 추정되어 구축된 시스템의 측정

정도는 매우 높은 것으로 평가된다. 또한, 감쇠가 큰 폴리에스텔의 경우 감쇠계수는 주파수에 따라 거의 선형적으로 증가하는데 이러한 경향은 문헌의 보고와 일치하는 것으로 본 측정이 정도 높게 수행되고 있음을 나타낸다.

참 고 문 헌

1. H. J. McSkimin, "Ultrasonic Methods for Measuring the Mechanical Properties of Liquids and Solids", Physical Acoustics, Vol. I-A(Academic Press), pp. 271-292, 1964.
2. 김인수, 이효근, 김성희, "음향재료의 복소수 모듈러스 추출에 관한 연구", 한국음향학회지, 10권 1호, pp. 30-36, 1991.
3. E. P. Papadakis, "Ultrasonic Velocity and Attenuation: Measurement Methods with Scientific and Industrial Applications", Physical Acoustics, Vol.XII(Academic Press), pp. 277-374, 1976.
4. M. Houze, B. Nongaillard, M. Gazalet, J. M. Rouvaen, and C. Bruneel, "Measurement of the Thickness of Thin Layers by Ultrasonic Interferometry", J. Appl. Phys., Vol. 55-1, pp. 194-198, 1984.
5. M. Houze, B. Nongaillard, J. M. Rouvaen, J. E. Lefebvre, and M. G. Gazalet, "Criteria for the Ultrasonic Measurement of Thicknesses by Interferometric Methods", J. Appl. Phys., Vol. 56-3, pp. 732-736, 1984.
6. J. Kushibiki, T. Ueda, and N. Chubachi, "Determination of Elastic Constants by LFB Acoustic Microscope", IEEE Ultrasonics Symp. Proc., pp. 817-821, 1987.
7. K. L. Ha, T. Sannomiya, J. Kushibiki, and N. Chubachi, "Measurements of Acoustic Properties of Teeth by Impulsive Wave Acoustic Microscope System", Jpn. Jour. of Appl. Phys., Vol. 29 Supplement 29-1, pp. 246-248, 1990.
8. 草刈, 三野宮, 中鉢, "溶融石英/水境界面に對する音響整合層の検討", 電気關係學會 東北支部聯合大會(平成元年), p. 261, 1989.
9. M. Chavez, V. Sosa, and R. Tsumura, "Speed of Sound in Saturated Pure Water", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 77-2, pp. 420-423, 1985.
10. 中鉢, 三野宮, 岡崎, "ビーム軸上トランスジューサ振動型超音波干涉顕微鏡", 日本音響學會講演論文集(昭和58年3月), pp. 663-664, 1983.
11. B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids-Vol. I", John Wiley & Sons, Inc., 1973.
12. B. Hung and A. Goldstein, "Acoustic Parameters of Commercial Plastics", IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-30, pp. 249-254, 1983.

▲하 강 열



1955년 1월 17일생

1978년 2월 : 부산수산대학교 어업학과 졸업(학사)  
 1978년 3월 : 국방과학연구소 연구원  
 1982년 8월 : 부산수산대학교 대학원 수산물리학과 수료(석사)  
 1990년 3월 : 일본 도호쿠대학 대학원 공학연구과 수료(박사)

1991년 3월~현재 : 부산수산대학교 물리학과 조교수

- ▲김 무 준 : 제14권 제4호 참조.
- ▲이 종 규 : 제14권 제4호 참조.
- ▲김 성 부 : 제14권 제4호 참조.

▲中 鉢 憲 賢



1934년생

1956년 : 일본 도호쿠대학 공학부 졸업  
 1965년 : 동 대학 대학원 수료(공학 박사)  
 1966년 : 동 대학 전기통신연구소 조교수  
 1979년 : 동 대학 전기공학과 교수  
 ※주관심분야 : 초음파스펙트로스코피, 초음파현미경, 외용초음파, 초음파 신호처리 등.