

# 재료물성 측정을 위한 직선집속 PVDF 초음파 트랜스듀서의 새로운 설계 및 응용

## New Design and Application of PVDF Ultrasonic Transducer for Measurement of Material Properties

홍성욱\*, 김정순\*\*, 김상윤\*\*\*, 김무준\*\*\*, 하강렬\*\*\*

(Soung-Wook Hong\*, Jung-Soon Kim\*\*, Sang-Yoon Kim\*\*\*, Moo-Joon Kim\*\*\*, Kang-Lyeol Ha\*\*\*)

\*부경대학교 대학원 음향진동공학과, \*\*동명대학교 멀티미디어공학과, \*\*\*부경대학교 물리학과

(접수일자: 2006년 3월 6일; 수정일자: 2006년 4월 11일; 채택일자: 2006년 4월 25일)

임의의 등방성재료에 대한 종파, 횡파 및 누설표면파의 음속을 알면 해석적으로 그 재료의 탄성정수와 밀도를 산출할 수 있다. 종래, 그 음속들은 각각 다른 진동모드를 갖는 세 개의 초음파 트랜스듀서에 의해 측정되어져 왔다. 본 연구에서는 하나의 트랜스듀서에 의해 그 세 가지 파의 개략적인 음속을 동시에 측정하기 위한 전극분할형 PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서를 새로이 제안하고, 설계, 제작하였다. 그리고 그것에 의한 각 파의 음속측정 방법을 확립한 후, 용융 석영 등 몇몇 등방성재료에 적용하였다. 또한, 측정된 각 파의 음속을 이용하여 탄성 강성정수 및 밀도를 산출하고, 각 값들의 오차를 검토하였는데, 얻어진 값들은 문헌치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

**핵심용어:** 초음파 트랜스듀서, PVDF (Polyvinylidene Fluoride), 직선집속, 누설표면파, 강성상수

**투고분야:** 초음파 및 탄성파 분야 (4.2)

If the velocities of longitudinal, transverse and leaky surface acoustic waves in an isotropic material are given, the elastic constants and density of the material can be deduced analytically. Those velocities have been measured using three ultrasonic transducers with different vibrational modes so far. In this paper, a line-focusing PVDF transducer with divided electrodes was newly proposed and designed for measuring approximate velocities of the three waves. The measurement method established in this study for each waves using the transducer was applied to several isotropic materials including fused quartz. The elastic stiffness constants and densities of the materials were calculated using the measured velocities, and the accuracies were discussed. It was shown that the obtained results are in good accord with the reference values.

**Keywords:** Ultrasonic Transducer, PVDF (Polyvinylidene Fluoride), Line-Focusing, Leaky Surface Acoustic Wave, Stiffness Constant

**ASK subject classification:** Ultrasonic and Elastic waves (4.2)

### I. 서론

음속 및 감쇄측정을 바탕으로 하는 음파 물성계측기술은 1950년대부터 활발히 연구, 발전되어져 왔으며, 초기에는 벌크파인 종파 또는 횡파가 이용되어져 왔다[1, 3]. 그러나, 1973년에 Quate 등에 의해 기계주사형 초음파 현미경이 개발되고,  $V(z)$ 곡선이 발견되면서, 누설표면파 (Leaky Surface Acoustic Wave: LSAW)도 활발히 이용

되게 되었다[4, 6]. LSAW는 고체재료의 탄성적 성질을 평가하는데 매우 유용하며, 그 이방성 측정을 위해서는 직선집속빔 초음파 트랜스듀서가 사용된다. 그러나 주로 ZnO로 만들어진 기존의 초음파현미경용 트랜스듀서는 제작이 까다롭고, 비교적 지속시간이 긴 tone-burst 파로 구동되기 때문에 LSAW 성분의 파형만을 추출하여 측정하기 곤란하다. 한편, PVDF 압전막은 임의의 고체에 부착시키는 것만으로 초음파 트랜스듀서로서 동작시킬 수 있으므로 제작이 용이할 뿐 만 아니라, 별도의 정합층 없이도 짧은 펄스의 초음파를 수중에 방사시킬 수 있다. 따라서, 물을 부하로 하는 시료에 있어서는 다른

책임저자: 하강렬 (hakl@dolphin.pknu.ac.kr)  
부산시 남구 대연3동 599-1 부경대학교 물리학과  
(전화: 051-620-6359; 팩스: 051-620-6359)

파형과 간섭하지 않는, 즉, 분리된 LSAW의 파형을 관찰하면서 측정할 수 있다[7-8].

LSAW의 속도를 이론적으로 산출하는 해석에 있어서는 일반적으로 고체재료의 탄성정수와 밀도, 물의 음속과 밀도를 입력 파라미터로 하고 있다[9]. 이것은 역으로, 종파, 횡파 및 LSAW 속도와 물의 음속 및 밀도를 알면 그 재료의 탄성정수와 밀도를 구할 수 있음을 의미한다. 그러나 종래, 종파의 측정에는 두께모드, 횡파의 측정에는 횡모드 진동을 하는 평면 트랜스듀서가 사용되고, LSAW의 측정에는 대개구각의 집속형 초음파 트랜스듀서가 주로 사용되므로, 그 세 가지 파의 속도를 구하기 위해서는 세 개의 트랜스듀서가 필요하다. 이에, 본 연구에서는 종파, 횡파 및 LSAW의 개략적인 속도를 하나의 트랜스듀서에 의해 측정할 수 있는 전극이 분할된 PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서를 새로이 설계, 제작하고, 그에 의한 각 파의 음속측정 방법을 확립한 후, 용융석영 등 몇몇 등방성 재료에 적용하였다. 그리고, 측정된 음속을 이용하여 그 재료의 강성상수 및 밀도를 산출, 문헌치와 비교하였다.

## II. 전극분할형 PVDF 트랜스듀서 구조

그림 1은 본 연구에서 제안하는 전극분할형 PVDF 트랜스듀서의 구조를 나타낸다. 개구인 곡면에 부착된 PVDF 압전막의 한쪽 전극을 그림과 같이 3등분한 후, 중앙을 제외한 양쪽의 전극을 서로 연결하여 동시에 동작하도록 한 것이다. 이 트랜스듀서는 그림에서 나타낸 C와 GND, (E+C)와 GND의 2가지 연결 형태로 사용할 수 있으며, C와 GND를 사용할 경우 중앙부만 구동하는 소개구각 (개구반각 13°), (E+C)와 GND를 사용할 경우 대개구각 (개구반각 50°) 직선집속 트랜스듀서가 된다.

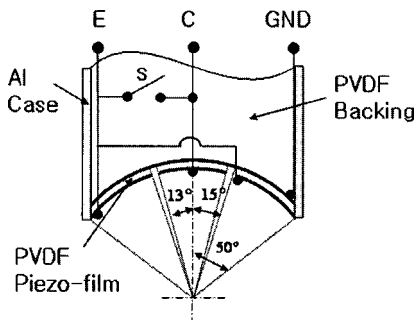


그림 1. 전극분할형 PVDF 트랜스듀서의 구조  
Fig. 1. Structure of the electrode divided transducer.

표 1. 트랜스듀서 재료의 물성치  
Table 1. Properties of the materials for the transducer.

	음속 (m/s)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	음향 임피던스 (Mrayl)	유전률 (F/m)	두께 (um)
PVDF 압전막	2200	2780	3.9	$55.8 \times 10^{-12}$	28
PVDF 배면체	2200	2780	3.9	-	$40 \times 10^3$
Epoxy	2450	1100	2.7	-	-

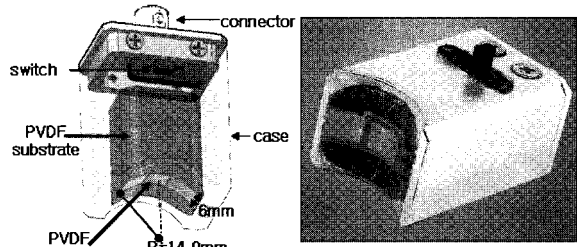


그림 2. 제작된 트랜스듀서의 모형도 및 사진  
Fig. 2. The schematics and photograph of the manufactured transducer.

제작에 있어서, PVDF 압전막은 시판되고 있는 28 μm 박막형 트랜스듀서 (Kynar Piezo Film사)를 사용하였고, 배면체로서는 주파수 대역폭을 최대한으로 하기 위하여 압전성이 없는 벌크의 PVDF 봉을 사용하였다. 곡률반경 14mm로 가공된 배면체와 PVDF 압전막은 에폭시 (EPOTEK 301)를 사용하여 접착시켰고, 배면체의 길이는 다중반사가 생기지 않도록 충분히 길게 하였다.

그림 2는 제작된 트랜스듀서의 3D 모형도 및 사진이다. 그림에는 상기한 2가지 개구각 중 하나를 선택하기 위한 스위치가 나타나있다. 한편, 사용한 PVDF 압전막 및 배면체 등의 물성치는 표 1과 같다.

## III. 전극분할형 직선집속 트랜스듀서 특성

그림 3은 제작한 트랜스듀서에 임펄스를 인가하고 소개구각 구동을 했을 때의 초점면 반사파형의 계산치와 실측치를 각각 나타낸다. 계산에 있어서는, KLM 등가회로 [10]를 이용하였는데, 집속 트랜스듀서의 초점면에서 반사되어오는 파는 기하학적으로 볼 때 모든 음선이 경로 차에 기인하는 위상변화가 없는 것을 고려하여 평면 트랜스듀서와 동일하게 응답하는 것으로 가정되었다. 그림 3(a)의 파형 및 스펙트럼의 계산치에 있어서는 매질인 물의 감쇄를 고려하지 않았다. 그림 3(b)는 실측치 (B)와 그림 3(a)의 계산치에 20°C의 물에 대한 주파수별

감쇄(11)를 고려한 것(C)을 같이 표시하였는데, 그 둘은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

본 연구에서 제작된 트랜스듀서는 PVDF 압전층과 음향임피던스가 같은 배면층을 갖는 구조이며, 이 경우 방사되는 펄스의 길이는 최소가 되는데, 그림 3의 파형에서 알 수 있는 바와 같이 제작된 트랜스듀서는 수중에 한 사이클의 중심주파수 약 14.2MHz, -6dB기준의 비대역이 약 152%인 광대역 펄스를 발생시킨다.

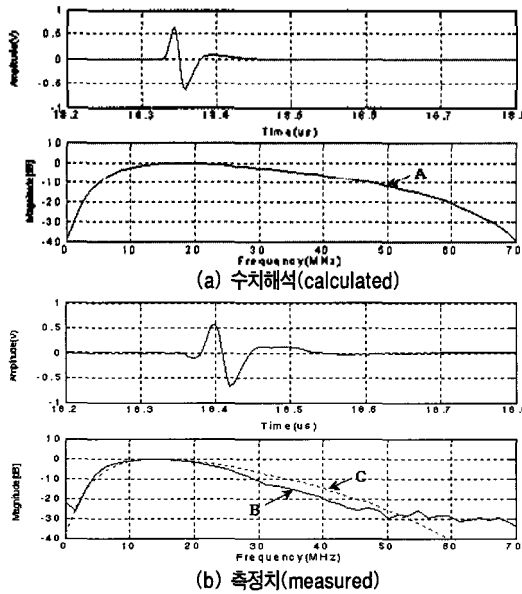


그림 3. 제작된 트랜스듀서의 임펄스응답. (A: 계산된 스펙트럼, B: A에 대해 수중손실 고려, C: 측정된 스펙트럼)

Fig. 3. Impulse response of the designed transducer. (A: calculated spectrum, B: considering attenuation in water for A, C: measured spectrum).

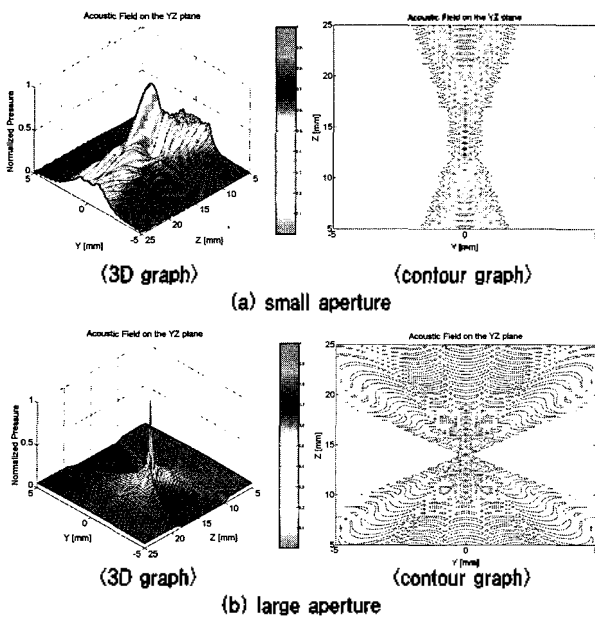


그림 4. 제작된 트랜스듀서의 음장 해석결과  
Fig. 4. Calculated acoustic fields for the designed transducer.

제작된 트랜스듀서가 소개구각과 대개구각으로 각각 구동될 경우의 음장계산 결과를 그림 4(a) 및 (b)에 각각 나타내었다. 음장의 계산에 있어서는 Rayleigh-Sommerfeld의 회절공식[12]를 이용하였다. 소개구각 구동의 경우 초점 부근에서 평면파에 가까운 음장영역이 형성됨을 알 수 있는데, 그 초점심도는 약 6.5mm 이다. 반면 대개구각 구동에서의 초점심도는 0.35mm로 매우 짧으며, 일반적인 고체 재료에 대한 전반사 임계각을 내포하고 있는 것으로 추정된다.

#### IV. 측정방법

##### 4.1. 종파 및 횡파의 음속 측정

벌크파인 종파 및 횡파의 음속측정에는 기본적으로 펄스반사법을 이용한다. 즉, 트랜스듀서를 소개구각으로 구동시켜 음향에너지의 일부를 시료내부로 투과시킨 다음, 밀면에서 반사되어오는 파의 시간차와 시료의 두께를 이용하여 측정하는 것이다. 그림 5는 측정에 사용되는 펄스와 관련된 모식도로서, 매우 짧은 펄스를 발생시키는 광대역 트랜스듀서의 초점면에 두께 d인 얇은 시료의 표면을 일치시켰을 경우와 시료를 Δz 만큼 트랜스듀서 쪽으로 접근시켰을 때의 음선경로 및 수신파열을 나타낸다. 초점면과 시료표면이 일치할 경우, 그림 5(c)에서 나타낸 것처럼, 시료표면에서의 직접 반사파인 D가 매우 크게 나타나며, 시료를 투과하여 밀면까지 종파로 전파한 후 다시 종파로 반사된 파 (1st P-P) 및 그 다중 반사파 (2nd P-P) 등이 미약하게 수신된다. 여기서, D가 큰 이유는 기하학적으로 볼 때 모든 음선이 경로차가 없어 동위상으로 수신되기 때문이며, 미약한 P-P파들은 시료내부로 투과된 음향에너지 중 트랜스듀서의 중심부에서 방사된 일부 성분만이 트랜스듀서로 되돌아오는데 기인한다.

한편, 시료표면이 트랜스듀서 쪽으로 접근했을 경우, 그림 5(b)에서 나타낸 것처럼, D는 급격히 작아지고, 상대적으로 1st P-P와 2nd P-P가 커지면서 그 두 신호 사이에 P-S (또는 S-P), S-S파 등 다른 신호가 나타난다. 여기서, P-S (또는 S-P)는 시료표면에서 밀면까지 종파 (또는 횡파)로 전파된 후 횡파 (또는 종파)로 반사된 파, S-S는 시료표면에서 밀면까지 횡파로 전파한 후 횡파로 반사된 파를 말하며, 이들은 고체 경계면에서 투과나 반

사가 있을 때 모드변환에 의해 종파 및 횡파를 각각 발생시키기 때문에 생기는 현상이다. 따라서, 시료밀면에서 반사된 음파의 모드는 4개가 존재하며, 그 경로는 각각 다르나, P-S와 S-P는 동일한 시간에 수신된다. 또한, 그들 각각의 신호의 진폭은 defocus량에 따라 변하는데, 시료내부로 투과된 파가 시료의 밀면에 집속되었을 때 그에 해당하는 신호성분이 극치를 나타낸다. 기하학적으로 볼 때  $\Delta z$  만큼 이동시켰을 때 임의의 파가 시료의 밀면에 집속되었다고 하면, 굴절각  $\theta_i$ 는

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{d} \tan \theta_s\right) \quad (1)$$

이다. 여기서,  $\theta_s$ 는 입사각,  $d$ 는 시료의 두께이다. 그리고, 그 파의 음속은 Snell의 법칙에 의해 다음의 식으로 산출되어진다.

$$v = \frac{v_w}{\sin \theta_i} \sin(\tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{d} \tan \theta_s\right)) \quad (2)$$

단,  $v_w$ 는 매개 매질인 물의 음속이다. 그러나, 입사각  $\theta_i$ 는 수직입사인  $0^\circ$ 에서부터 개구반각인  $13^\circ$ 까지의 모든 각도 성분을 포함하고 있어, (2)식에 대입하기 위한 값을 정하기 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 입사각을 개구반각인  $13^\circ$ 로 가정하고, 시료의 개략적인 음속 및 두께와 물에서의 음속으로부터 밀면에 집속되기 위한  $\Delta z$ 를 추정, 먼저 그 만큼 defocus 시켜 수신되는 각 파의 성분을 확인한 다음, 다시 초점면에 시료의 표면이 오도록 이동시키면서 일정 간격으로 A-모드의 파형을 측정, 기록하였다. 그리고, 기록된 A-모드 파형의 진폭을 칼라코드로 변환하여 B-모드 형태의 상을 얻은 다음,

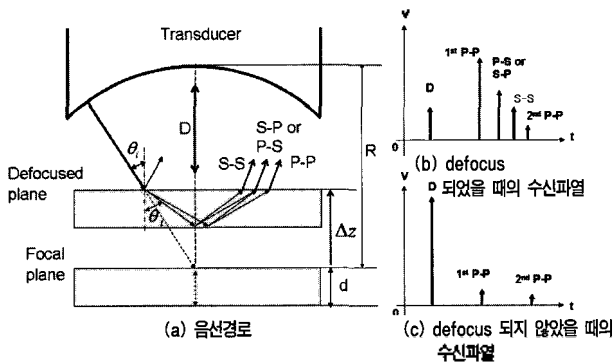


그림 5. 소개구각 구동시의 음선경로와 수신파열의 모식도  
 Fig. 5. Schematics of the rays and received pulse trains for the operation by small aperture angle.

그 변화로부터 초점면이 시료표면과 일치했을 때의 P-P 및 P-S (또는 S-P) 성분의 도달시간을 도출, 그 시간과 시료두께로부터 종파 및 횡파의 음속을 구하였다. 이 경우 P-P 및 P-S (또는 S-P) 성분은 중심축 부근은 음선만에 의한 것으로 간주될 수 있어, 종파의 음속  $v_l$ 은 시료표면에서의 직접반사파와 P-P로 전파한 파와의 시간차  $t_{pp}$ 에 의해,

$$v_l = \frac{2d}{t_{pp}} \quad (3)$$

횡파의 음속  $v_s$ 는  $t_{pp}$  및 시료표면에서의 직접반사파와 P-S(또는 S-P)로 전파한 파와의 시간차  $t_{ps}$ 에 의해,

$$v_s = \frac{2d}{t_{pp} + 2t_{ps}} \quad (4)$$

또는, S-S로 전파한 파와의 시간차  $t_{ss}$ 에 의해,

$$v_s = \frac{2d}{t_{ss}} \quad (5)$$

로 구해진다.

#### 4.2. LSAW 음속 측정

광대역 트랜스듀서의 대개구각 구동에 있어서는 시료면을 트랜스듀서 쪽으로 defocus시키면 그림 6에 나타난 것처럼 표면파에 대한 입계각( $\theta$ )로 입사하는 LSAW 성분(1)과 수직입사 성분(2)만이 트랜스듀서에 효율적으로 수신되며, 시간적으로 분리된 출력파형으로 나타나게 된다. LSAW 성분은 수직입사 성분과 반대되는 위상으로 그보다 늦게 수신되며, 그 시간 간격  $\Delta t$ 는 defocus 량  $\Delta z$ 에 비례하게 된다. 이 때, LSAW 음속  $v_{lsaw}$ 는 다음 식에 의해 구해진다[7-8].

$$v_{lsaw} = \frac{v_w}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta t v_w}{2\Delta z}\right)^2}} \quad (6)$$

여기서  $v_w$ 는 물에서의 음속이다. 식 (6)으로부터  $\Delta t$ ,  $\Delta z$ 와  $v_w$ 로부터 쉽게 LSAW의 속도를 산출할 수 있음을 알 수 있다. 실험에 있어서는  $\Delta z$ 에 따른  $\Delta t$ 의 변화를 그래프로 나타내고, 그 기울기  $\frac{\Delta z}{\Delta t}$ 를 구하여 (6)식

에 대입하였다.

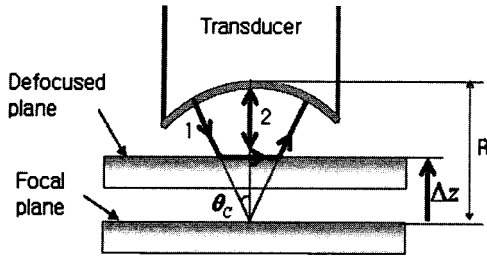


그림 6. 대개구각 구동시의 음선경로  
Fig. 6. Schematics of the rays for the operation by large aperture angle.

### 4.3. 탄성정수 및 밀도산출

고체 시료와 물이 경계를 이루고 있을 때 그 경계면을 따라 전파하는 LSAW의 속도는 고체시료 및 물에서의 응력과 입자변위를 각각 구하여, 그들이 경계에서 연속이 되는 조건을 만족시키도록 함으로써 이론적으로 계산할 수 있다[9]. 고체시료 및 물에서의 응력과 변형의 관계는 약식 표기에 따라

$$\text{고체: } T_I = C_{IJ} S_J \quad (7)$$

$$\text{물: } T_I^* = C_{IJ}^* S_J^* \quad \text{단, } I, J = 1 \sim 6$$

로 줄 수 있는데[13], 여기서,  $T_I$ 는 응력텐서,  $S_J$ 는 변형텐서,  $C_{IJ}$ 는 장상수 텐서이며, 첨자 \*는 각각 물에 대한 변수임을 나타낸다. 일반적으로  $C_{IJ}$ 는 6×6의 대칭행렬로 나타내어지는 4차 텐서이나 대칭성에 따라 0이 아닌 요소가 정해지는데, 등방성고체의 경우 독립요소는  $C_{11}$ 과  $C_{44}$ 의 두개뿐이며, 그 각각은 종파 및 횡파의 음속과 다음의 관계에 있다.

$$\text{종파: } v_l = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho_s}} \quad (8)$$

$$\text{횡파: } v_s = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho_s}}$$

단,  $\rho_s$ 는 고체의 밀도.

물은 전단변형이 없는 등방체이므로, 음속  $v_w$ 을

$$v_w = \sqrt{\frac{C_{II}^*}{\rho_w}}, (I, J = 1 \sim 3) \quad (9)$$

단,  $\rho_w$ 는 물의 밀도.

라고 두었을 때,  $\{C_{IJ}^*; I, J = 1 \sim 3\} = 2.25 \times 10^9 [N/m^2]$

인 9개의 요소만 존재하고, 모두 동일하므로  $C_{11}^*$ 만 독립요소로 존재한다고 볼 수 있다.

일반적으로 등방성의 고체에 대한  $C_{11}$ ,  $C_{44}$ ,  $\rho_s$ 와 물에 대한  $C_{11}^*$ ,  $\rho_w$ 의 5개 입력요소를 사용하여 LSAW의 음속  $v_{lsaw}$ 을 구한다. 이것은 역으로 등방성의 고체에 대한  $v_l$ ,  $v_s$ ,  $v_{lsaw}$ 와 물에 대한  $C_{11}^*$ ,  $\rho_w$ 를 사용하면  $C_{11}$ ,  $C_{44}$ ,  $\rho_s$ 를 구할 수 있음을 나타내는데, 그 수치해석과정은 근사값의 대입에 의한 행렬식의 수렴여부를 판정하는 것으로써 문헌(14)에서의  $v_{lsaw}$ 를 구하는데 사용한 프로그램을 일부 수정하여 입력요소와 출력요소를 바꿈으로써  $C_{11}$ ,  $C_{44}$  및  $\rho_s$ 를 산출하였다.

## V. 측정결과 및 고찰

### 5.1. 종파 및 횡파

그림 7은 두께 1010 $\mu$ m인 황동에 대해 소개구각 구동시의 측정의 일례로서, (a)는 시료표면에 초점이 형성되었을 경우이며, (b)와 (c)는 P-P 및 P-S (또는 S-P) 성분이 각각 시료 밑면에 초점을 형성하였을 경우에 나타나는 수신펄스열이다. 그림 7(a)에 있어서 D는 표면에서의 직접반사파이며, 그 뒤에 시료내부에서의 P-P 전파에 따른 다중 반사파가 나타남을 알 수 있다. 그림 7(b), (c)에서는 P-P 또는 P-S (또는 S-P)의 성분이 집속의 영향으로 인해 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 수신파열은 실험에 사용한 용융석영, 알루미늄, 구리 등 다른 시료에 대해서도 유사하게 나타났다.

그림 8은 초점면으로부터 defocus에 따른 각 수신파의 진폭을 휘도변환하여 나타낸 예이다. 그림 8에서 화살표가 가리키는 시간은 defocus=0에 해당하며, 이 시간들에 의해 종파 및 횡파의 속도 측정을 하였는데, 표 2는 본 연구에서 사용한 시료에 대한 측정결과를 나타낸다. 표 2로부터 현재 종파는 약 1%, 횡파는 알루미늄을

표 2. 벌크파 속도 측정결과

Table 2. Measurement results of bulk waves.

specimen	thickness ( $\mu$ m)	mea. velocities		ref. velocities*	
		$v_l$ (m/s)	$v_s$ (m/s)	$v_l$ (m/s)	$v_s$ (m/s)
Fused Quartz	1,035	5,982	3,832	5,973	3,766
Al	990	6,286	3,102	6,148	3,406
Cu	770	4,705	2,378	4,650	2,288
Brass	1,010	3,854	2,120	3,830	2,050
Pyrex Glass	1,050	5,589	3,174	5,609	3,283

\*Given in ref. [15].

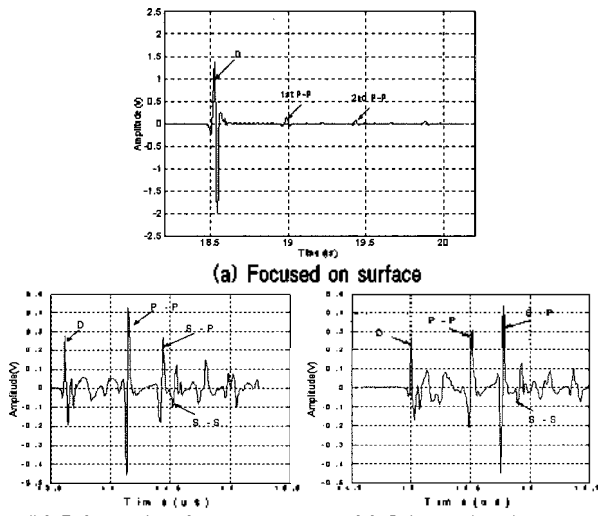


그림 7. 소개구각 구동에 의한 펄스열 측정 (시료: 두께 1010 $\mu\text{m}$ 의 황동)  
Fig. 7. Pulse train measurement for the operation by small aperture angle. (sample: brass with thickness of 1010 $\mu\text{m}$ ).

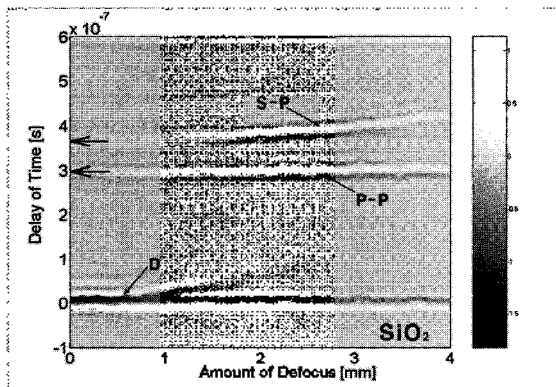


그림 8. Defocus에 따른 수신파의 진폭의 휘도변환 (시료: 두께 1035 $\mu\text{m}$ 의 용융석영)  
Fig. 8. Brightness display for the amplitude variation of received signals according to the amount of defocusing. (sample: fused quartz with thickness of 1035 $\mu\text{m}$ ).

제외하면 약 3% 이내의 오차에서 측정이 되고 있음을 알 수 있다.

5.2. LSAW

그림 9는 LSAW 측정 예로서, 수신파의 진폭을 휘도 변환하여 나타낸 것으로 LSAW가 defocus에 따라 직접 반사파(D)와 분리되는 것을 볼 수 있다. 그림에서 직접 반사파에 대한 LSAW의 기울기가 시료에 따라 달라지는데, 그림 10은 실험에 사용한 모든 시료에 대해서  $\Delta z/\Delta t$  을 구하기 위해 직선 근사한 결과이다. 각 시료에 대한 직선의 기울기를 식(6)에 대입하여 구한 LSAW의 속도를 문헌[13]에 주어진 탄성정수를 이용하여 이론적으로 계산한 값과 비교하여 표 3에 나타내었다. 각 시료에서 측정치와 계산치는 오차 1%이내로 잘 일치함을 알 수 있다.

표 3. 탄성표면파 측정치와 이론치의 비교

Table 3. Comparison of the measured and the calculated velocities of LSAWs.

specimen	$\frac{z}{\Delta t}$ (m/s)	measured (m/s)	calculated* (m/s)	error (%)
Fused Quartz	$7.5758 \times 10^3$	3428	3430	0.06
Al	$5.4734 \times 10^3$	2883	2863	0.7
Cu	$2.6142 \times 10^3$	2120	2139	0.9
Brass	$2.0577 \times 10^3$	1611	-	-
Pyrex Glass	$5.8604 \times 10^3$	3064	3,031	1.08

\*By using elastic stiffness constants given in reference [13].

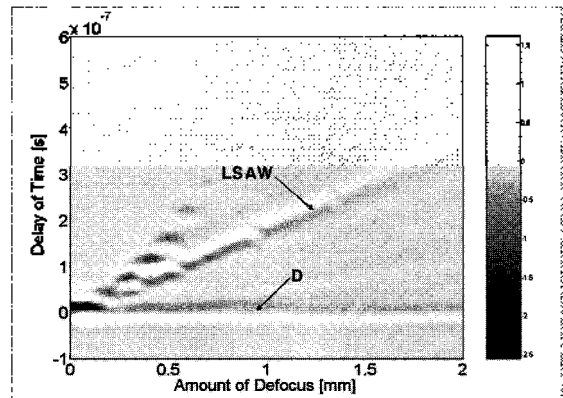


그림 9. Defocus에 따른 직접반사파로부터의 LSAW 분리  
Fig. 9. LSAW separated from the direct reflection according to the amount of defocusing. (sample: fused quartz with thickness of 1035 $\mu\text{m}$ ).

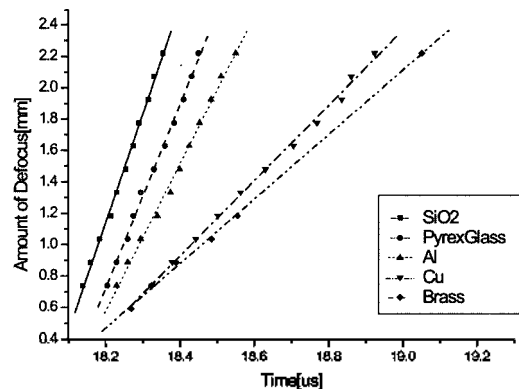


그림 10. 각 시료에 있어서  $z/\Delta t$  그래프

Fig. 10. The  $z/\Delta t$  variation depends on the specimen.

5.3. 탄성정수와 밀도

실험에 의해 구한 각 시료의 종파, 횡파 및 LSAW의 전파속도를 사용하여 수치해석에 의해 산출한 3개의 시료의 탄성정수 및 밀도를 문헌값과 비교하여 표 4에 나타내었다. 본 실험에 사용한 5개의 시료중 구리와 황동에 있어서는 탄성정수를 구하는 과정에서의 행렬식 수렴 조건이 충족되지 않아 여기에 나타내지 않았다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 구해진 탄성정수 및 밀도는 용융석영 및 알루미늄에서는  $\pm 4\%$  이내에서 문헌치와 일치

표 4. 탄성정수 및 밀도의 측정치와 이론치의 비교

Table 4. Comparison of the measured and the calculated elastic stiffness constants and densities.

specimen	parameter	obtained value	ref. value*
Fused Quartz (7)	C11 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	7.82	7.85
	C44 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	3.21	3.12
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,249	2,200
Al (6)	C11 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	10.70	11.10
	C44 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	2.60	2.50
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,755	2,695
Pyrex Glass (6)	C11 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	7.94	7.30
	C44 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	2.72	2.50
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,342	2,320

\*Given in reference [13].

하나 파이렉스 유리에서는 그보다 다소 크다. 파이렉스 유리에서 오차가 더 큰 이유는 제조사에 따른 특성차이가 다른 시료보다 크기 때문일 것으로 추정된다.

## VI. 결론

본 연구에서는 종파, 횡파 및 누설표면파 속도를 하나의 프로브에 의해 측정할 수 있는 전극분할형 PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서를 새로이 제안하고 설계·제작하여, 그 임펄스 응답과 음장해석을 통해 특성을 파악하였으며, 용융석영, 알루미늄, 구리 등 몇몇 등방성 시료에 적용하여 각 파의 음속을 측정하였다. 그리고 측정된 각 파의 음속을 이용하여 개략적인 시료의 탄성정수 및 밀도를 이론적으로 산출하였다. 그 결과, 각 파의 음속은  $\pm 3\%$ , 탄성정수와 밀도는  $\pm 4\%$  이내에서 문헌치와 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 트랜스듀서 및 그것을 이용한 측정방법은 실용적 측면에서 매우 유용하다고 할 수 있다. 금후 오차의 원인에 대한 정밀한 분석을 통한 측정정도 개선과 더불어, 비등방성 재료에의 적용을 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2004학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

- H. J. McSkimin, "Variations of the Ultrasonic Pulse-Superposition Method for Increasing the Sensitivity of Delay-Time Measurements", *J. Acoust. Soc. Am.*, **37** (5), 864-871, (1965).
- E. P. Papadakis, K. A. Fowler, and L. C. Lynnworth, "Ultrasonic Attenuation by Spectrum Analysis of Pulses in Buffer Rods: Method and Diffraction Corrections", *J. Acoust. Soc. Am.*, **53** (5), 336-343, (1973).
- W. P. Mason and R. N. Thurston, "Physical Acoustics - Principles and Methods-", **12**, Academic Press, New York, (1976).
- C. F. Quate, A. Atalar and H. K. Wickramasinghe, "Acoustic Microscope with Mechanical Scanning -a Review-", *Proc. IEEE*, **67**, 1092-1114, (1979).
- H. K. Wickramasinghe, "Constant and Imaging Performance in the Scanning Acoustic Microscope", *J. Appl. Phys.*, **50**, 644-668, (1979).
- J. Kushibiki and N. Chubachi, "Material Characterization by Line-Focus-Beam Acoustic Microscope", *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.*, SU-32, 2, 189-212, (1985).
- D. Xiang, N. N. Hsu and G. V. Blessing, "The Design, Construction and Application of a Large Aperture Lens-less Line-Focus PVDF Transducer," *Ultrasonics*, **34**, 641-647, (1996).
- D. Xiang, N. N. Hsu and G. V. Blessing, "Statistical Error Analysis of Time and Polarization Resolved Ultrasonic Measurements", *IEEE Trans. on UFFC*, **45**, 1006-4016, (1998).
- Campbell and Jones, "A Method for Estimating Optimal Crystal Cuts and Propagation Directions for Excitation of Piezoelectric Surface Waves," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU-15, **4**, 209-217, (1968).
- V. M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices" JOHN WILEY & SONS, New York, (1983).
- J. M. M. Pinkerton, "The Absorption of Ultrasonic Waves in Liquids and its Relation to Molecular", *Proc. Phys. Soc.*, **B 20**, 129-141, (1949).
- J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill Co., London, (1968).
- B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids", 2nd Ed., Krieger Publishing Company, Malabar, (1990).
- 윤희준, 허강렬, 김무준, 윤종락, "PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서에 의한 누설탄성표면파 속도 측정", *한국음향학회지 제 20권 1호*, 62-67, (2001).
- 齊吉純一, 菊池龜充, 能本乙彦, "超音波技術便覧", 7th Ed., 日刊工業新聞社, 東京, (1989).

**저자 약력**

• **홍성욱 (Soung-Wook Hong)**



1995년: 부경대학교 물리학과 졸업 (이학사)  
 2006년: 부경대학교 대학원 음향진동공학과 졸업  
 (공학석사)  
 \*주관심분야: 초음파 트랜스듀서

• **김정순 (Jung-Soon Kim)**



1996년 2월: 부경대학교 물리학과 (이학사)  
 1999년 2월: 부경대학교 음향진동공학과 (공학석사)  
 2002년 3월: Tokyo University of Agriculture & Technology, Bio-Applications and Systems of Engineer (공학박사)  
 2003년 2월: Researcher in Tokyo University of Agriculture & Technology, Venture Business Lab.  
 2003년 9월~2005년 9월: 부경대학교 음향진동공학 연구소 연구원

2006년 3월~현재: 동명대학교 정보통신공학대학 멀티미디어공학과 전임강사  
 \*주관심분야: 의료 초음파, 초음파 영상, 음장 해석 및 측정, 음의가시화

• **김상윤 (Sang-Yoon Kim)**



2005년 2월: 부경대학교 물리학과 (이학사)  
 2005년 3월~현재: 부경대학교 교육대학원 물리전공 (석사과정)  
 \*주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 컴퓨터 시뮬레이션

• **김무준 (Moo-Joon Kim)**



1985년: 부경대학교(구, 부산수산대학) 응용물리학과 졸업 (이학사)  
 1990년: 부경대학교 대학원 응용물리학과 졸업 (이학석사)  
 1994년: 일본 도호쿠(東北)대학 대학원 공학연구과 수료 (공학박사)  
 1994년~현재: 부경대학교 물리학과 교수,  
 \*주관심분야: 압전 진동자의 특성해석 및 초음파 트랜스듀서의 설계·제작

• **하강렬 (Kang-Lyeol Ha)**

1978년 2월: 부산수산대학(현, 부경대학교) 어업학과(어업물리전공) 학사  
 1981년 8월: 부산수산대학(현, 부경대학교) 대학원 수산물리학전공 석사  
 1990년 3월: 일본 도호쿠대학 대학원 공학연구과(전기 및 통신공학전공) 박사  
 1978년 3월~1983년 2월: 국방과학연구소 연구원  
 1997년 6월~1997년 11월: 중국 난징대학 객원연구원  
 2002년 12월~2003년 11월: 미국 Univ. of South Cal. 객원교수  
 1991년 3월~현재: 부경대학교 물리학과 교수  
 \*주관심분야: 초음파 트랜스듀서 특히, 압전고분자 트랜스듀서의 설계·제작 및 응용, 초고주파 초음파의 초음파진단 및 음향집계에의 응용