

PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서에 의한 누설탄성표면파 속도 측정

LSAW Velocity Measurement by Using a PVDF Line-Focus Ultrasonic Transducer

윤혁준*, 하강열**, 김무준**, 윤종락***

(Hyuck-Joon Yoon*, Kang-Lyeol Ha**, Moo-Joon Kim**, Jong-Rak Yoon***)

*ESTec 음향연구소, **부경대학교 물리학과, ***부경대학교 정보통신공학부

(접수일자: 2000년 8월 8일; 수정일자: 2000년 12월 6일; 채택일자: 2001년 1월 10일)

직선집속 PVDF 초음파 트랜스듀서를 이용하여 누설탄성표면파 (Leaky Surface Acoustic Wave: LSAW)의 전파속도를 측정하고, 그 결과를 이론해석 결과와 비교하였다. 시료로는 등방성 재료인 구리, 알루미늄 및 용융적영, 이방성 재료인 Z-cut α -수정을 사용하였다. 측정방법으로는 초점면에 위치한 시료를 트랜스듀서 쪽으로 접근시켰을 때 LSAW가 트랜스듀서의 중심축을 통과한 후 시료표면에서 직접 반사되어오는 종파와 분리되어지는 현상을 이용하였다. 음속의 측정결과는 이론 해석결과와 오차 1%이내에서 잘 일치하였으며, α -수정의 (0,0,1)면에서는 LSAW 외에 의사누설탄성표면파 (Leaky Pseudo Surface Acoustic Wave : LPSAW)가 전형적인 6-fold 이방성을 가지고 전파됨을 알 수 있었다.

핵심어: 직선집속 트랜스듀서, 누설탄성표면파, 의사누설탄성표면파, PVDF, 이방성

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.4)

Velocities of leaky surface acoustic waves (LSAWs) were measured by using a line-focus polyvinylidene fluoride (PVDF) transducer and compared with theoretically calculated ones. Isotropic materials of Cu, Al, fused quartz, and anisotropic one of Z-cut α -quartz crystal were used as specimens. The velocities were obtained by the separation time between wave components reflected directly from the surface of specimen and LSAW components according to the defocusing distance. The measured velocities well agree with the theoretical results within 1% error, and it was shown that the leaky pseudo-surface acoustic wave (LPSAW) as well as the LSAW propagates with the typical 6-fold anisotropy on the (0,0,1) surface of α -quartz.

Key words: Line-focus transducer, Leaky surface acoustic wave (LSAW), Leaky pseudo surface acoustic wave (LPSAW),

Polyvinylidene fluoride, Anisotropy

Subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.4)

I. 서 론

고체시료와 물이 경계를 이루고 있을 때 그 시료표면을 따라서 누설탄성표면파 (Leaky Surface Acoustic Wave: LSAW)의 전파가 가능하게 된다. 물 쪽으로 에너지의 일부를 방사시키면서 전파하는 그 파의 정량적 측정에는 종래 초음파현미경에 의한 $V(z)$ 곡선해석법이 주로 이용되어져 왔다[1~3]. 시료의 표면을 따라 전파한 LSAW 성분과

음향렌즈의 중심을 통과한 후 시료 표면에서 직접 반사한 종파 성분의 중첩에 의한 간섭으로 형성되는 $V(z)$ 곡선에서의 공간적 간섭주기는 액체/고체 경계면을 전파하는 LSAW의 위상속도에 직접 관계되며, 그 관계식은 파동론적 및 음선론적으로 이미 정립되어 있다[4,5]. 초음파 현미경의 경우 일반적으로 수백 μ m의 높은 주파수와 집속도가 큰 음향렌즈를 사용하므로 극소영역에서의 LSAW의 전파특성을 정도 높게 측정할 수 있으나 트랜스듀서의 제작이나 시스템의 운용이 어렵고 고가일 뿐만 아니라, tone-burst파의 중첩을 이용하므로 LSAW의 전파모습을 가시적으로 관찰할 수 없다는 단점을 가진다.

한편, 최근 Xiang 등[6,7]에 의해 보고되고 있는 PVDF

책임저자: 하강열 (haki@dolphin.pknu.ac.kr)
부산지 남구 내연3동 599-1
부경대학교 물리학과
(전화: 051-620-6359; 팩스: 051-620-6359)

트랜스듀서에 의한 LSAW 측정법은 사용하는 초음파의 주파수가 낮아 측정정도가 초음파현미경에 의한 방법에 비해 떨어지기는 하나, 트랜스듀서의 제작이 비교적 간단하고 LSAW 모드로 전파한 파형을 시료 표면에서의 직접반사와 성분과 분리하여 시간영역에서 관찰하면서 측정할 수 있다는 장점을 가진다. 이에 본 연구에서는 Xiang 등의 방법에 따라 중심주파수 약 5MHz의 PVDF 직선집속 트랜스듀서를 제작, 그 초음파 집속특성을 평가한 후 등방성 재료인 용융석영, 알루미늄, 구리 등과 이방성 재료인 α -수정 결정의 (0,0,1)면에 있어서의 LSAW 전파 속도를 측정하고, 그 결과를 이론해석 결과와 비교 분석함으로써 측정정도 및 유용성을 파악하였다.

II. LSAW 전파이론

그림 1과 같이 고체시료와 물이 경계를 이루고 있을 때 임의의 입계각으로 입사하는 파가 여진시키는 탄성표면파의 속도는 고체시료 및 물에서의 응력과 입자변위를 각각 구하여, 그들이 경계에서 연속이 되는 조건을 만족시킴으로써 이론적으로 해석할 수 있다. 즉, 고체시료 및 물에서의 응력과 변형의 관계는 다음과 같이 나타내어진다.

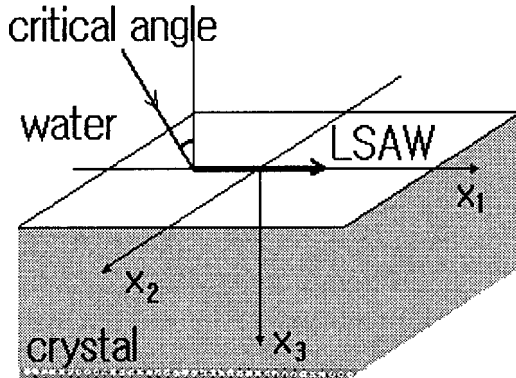


그림 1. 물/고체 경계에서의 LSAW 전파
Fig. 1. Propagation of the LSAW on water/solid interface.

고체: $T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}$ (1)

물: $T_{ij}^* = C_{ijkl}^* S_{kl}^*$ (1')

여기서 T_{ij} 는 응력텐서, S_{kl} 는 변형텐서, C_{ijkl} 는 탄성 스티프네스 정수 텐서이며 첨자 *는 물에 대한 변수임을 나타낸다. 탄성 스티프네스 정수 C_{ijkl} 는 6×6 의 대칭행렬로 나타내어지는 4차 텐서이며 고체 결정의 경우 그 대칭성에 따라 독립요소가 정해지는데, 일반적으로 결정축을 기준으로한 값이 문헌에 주어지므로 이방성 시료에 있어서 음파의 전파방향을 달리할 경우 좌표축의 회전을 고려하여 변환한 값을 사용하여야 한다[8]. 한편 물은 전단변형이 없는 등방성 물체이므로 음속 v_w 를

$$v_w = \sqrt{\frac{C_{ij}^*}{\rho_w}} \cdot (i, j=1-3) \quad (2)$$

단, ρ_w 는 물의 밀도

라고 두었을 때, $\{ C_{ij}^* ; i, j=1-3 \} = 2.25 \times 10^9 [N/m^2]$ 인 9개의 요소만 존재하고 그 외는 0이 된다.

(1) 및 (1)' 식의 응력에 의한 고체시료 및 물에서의 운동방정식은

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\rho_w \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}^*}{\partial x_j} \quad (3')$$

단, ρ 는 고체시료의 밀도

로 나타낼 수 있다. 여기서 u_i, u_i^* 는 각각 고체시료 및 물에서의 i 방향 변위인데, 그림 1에서와 같이 x_1 방향으로 전파하는 표면파의 경우 각각,

$$u_i = U_i e^{-\alpha x_2} e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (4)$$

$$u_i^* = U_i^* e^{-\beta x_3} e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (4')$$

라고 둘 수 있다. 여기서 U_i 및 U_i^* 는 각각 고체시료 및 물에서의 변위진폭, α, β 는 x_2 방향에 대한 전파상수, k 는 LSAW의 파수, ω 는 각주파수이다. 전파방향 x_1 에 대한 감쇠를 고려할 경우 파수 $k = k'(1 + j\gamma)$ 의 형태인 복소파수가 되며 이 경우 $k' = \omega / v_{ksw}$ (v_{ksw} 는 표면파의 위상속도) 이고, γ 는 감쇠계수이다.

물과 고체시료의 경계에서 만족되어야 할 경계조건은

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= u_3^* \\ T_{13} &= 0 \\ T_{23} &= 0 \\ T_{33} &= T_{33}^* \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

이며 이 경계조건을 만족시키는 k 를 구함으로써 누설탄성 표면파의 속도 v_{ksw} 가 구해지는데, 본 연구에서는 Campbell 등의 방법[9]에 따라 수치 해석하였다.

III. 시간영역에서의 LSAW 제측원리

수중에서 그림 2와 같이 반경 R 의 곡면을 갖는 집속 초음파 트랜스듀서의 초점면에 설치한 시료를 트랜스듀서 쪽으로 접근시키면 경로 I과 경로 II로 표시한 음선 성분만이 실질적으로 트랜스듀서의 출력으로 나타나게 된다. 경로 I은 트랜스듀서의 중심을 통과하여 시료표면에서

직접 반사되는 순수 종파성분이며, 경로 II는 임계각 θ_c 로 입사한 종파가 표면파로서 시료표면을 따라 전파하다가 입사파와 대칭되게 트랜스듀서로 되돌아오는 LSAW 성분을 나타낸다. 짧은 펄스의 음파를 사용하면 이 두 경로의 파는 전파속도 및 전파거리의 차에 의해 시간적으로 분리되는데 경로 II의 LSAW성분은 직접반사파와 반대되는 위상으로 직접반사파의 뒤에 나타나며, 그 시간 간격은 시료면의 초점에서부터의 이동거리 (defocusing량) z 에 상관하게 된다. 즉 트랜스듀서에서 방사된 음파가 경로 I을 거쳐 트랜스듀서로 되돌아오는데 걸리는 시간 t_w 는 식 (6)과 같이 계산되며, 경로 II를 거쳐 트랜스듀서에 되돌아오는데 걸리는 시간 t_s 는 식 (7)과 같이 계산된다.

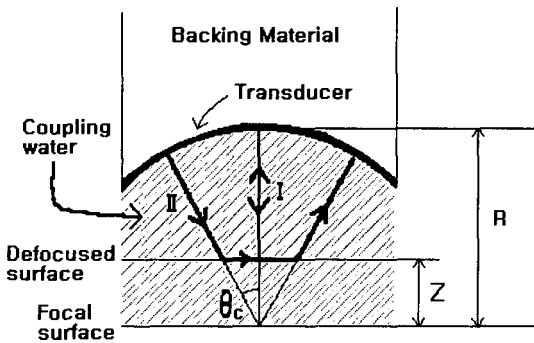


그림 2. 트랜스듀서 출력에 기여하는 두 음선
Fig. 2. Two acoustic rays in received signals.

$$t_w = \frac{2(R-z)}{v_w} \tag{6}$$

$$t_s = \frac{2(R - \frac{z}{\cos \theta_c})}{v_w} + \frac{2z \tan \theta_c}{v_{lsaw}} \tag{7}$$

여기서 v_w 는 물에서의 음속이다. 위 두 식에서의 시간차는 식 (8)이 되고 Snell의 법칙 ($\sin \theta_c = v_w / v_{lsaw}$)을 적용하면 LSAW의 속도 v_{lsaw} 는 식 (9)와 같이 유도된다.

$$\Delta t = \frac{2(R - \frac{z}{\cos \theta_c})}{v_w} + \frac{2z \tan \theta_c}{v_{lsaw}} - \frac{2(R-z)}{v_w} \tag{8}$$

$$v_{lsaw} = \frac{v_w}{\sqrt{1 - (1 - \frac{\Delta t v_w}{2z})^2}} \tag{9}$$

식 (9)로부터 z 와 Δt , 또는 $(z, \Delta t)$ 그래프에서의 기울기를 알면 쉽게 표면파속도를 구할 수 있다.

IV. 실험

그림 3는 육면체의 구리마대의 한 단면을 원통형으로 가공한 후 두께 $52 \mu m$, 길이 $43.6 mm$, 폭 $18.2 mm$ 인 PVDF 압전막을 에폭시를 사용하여 집착시켜 제작한 중심주파수 약 $5MHz$ 의 직선집속 트랜스듀서를 나타낸다. 그림에서 나타낸 것처럼 배면체로 쓰인 구리는 내부 반사파가 측정에 영향을 미치지 않도록 $60 mm$ 로 길게 하였고, 압전막의 가장자리의 영향을 감소시키기 위해 원통면의 폭은 압전막의 폭보다 크게 하였다. 또한 다양한 시료에 대해 LSAW를 여진시키기 위해서는 개구각이 충분히 큰 필요가 있기 때문에 여기서는 100° 로 하였고, 직접 반사파와 LSAW를 시간적으로 분리시키기 위해서는 가끔씩 defocusing량이 커야하므로 곡률반경을 $25 mm$ 하였다. 배면체로서 구리를 선정한 것은 철, 알루미늄, 에폭시, 베크라이트 등 다른 재료에 비해 임펄스 응답파형이 비교적 짧으면서 삽입손실이 적게 나타났기 때문이다.

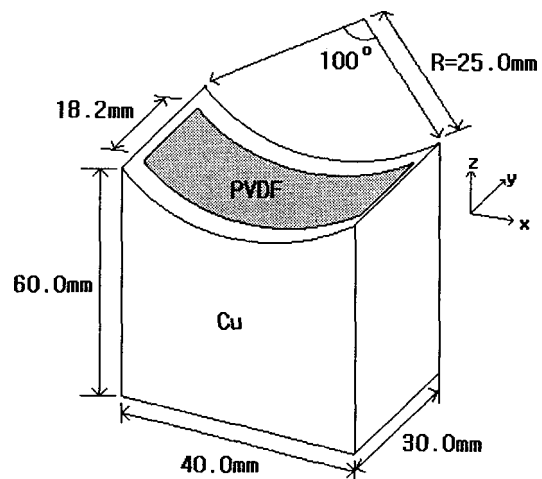


그림 3. 제작한 PVDF 직선집속 트랜스듀서의 형태
Fig. 3. The shape of the designed PVDF line-focus ultrasonic transducer.

제작한 트랜스듀서의 초음파 집속특성을 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4는 그림 3에서의 x 방향, 그림 5는 y 방향에 대한 초점면에서의 음장으로서, 각 그림에서 (a)는 Rayleigh-Sommerfeld의 회절이론[10]을 응용하여 계산한 결과이며 (b)는 직경 $1 mm$ 의 극소형 수중청음기 (Force Institute, MH28-10)를 사용하여 측정된 결과이다. 사용한 수중청음기의 크기 제한으로 인하여 일부 미세한 변화가 측정되지 않았으나, 이론 계산치와 측정치가 비교적 잘 일치되는 뚜렷한 직선집속 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그림 6은 LSAW 측정시스템의 구성을 나타낸다. 임펄스 파의 발생과 수신에는 RITEC사의 펄스발생기 (SP-801)와 광대역수신기 (BR-640)를 사용하였다. 구동은 $\pm 1 \mu m$ 의 정확도를 가진 x, y, z 스테이지와 $\pm 1^\circ$ 의 정확도를 가진

0 스테이지의 스테핑 모터를 컴퓨터에 연결하여 제어하였다.

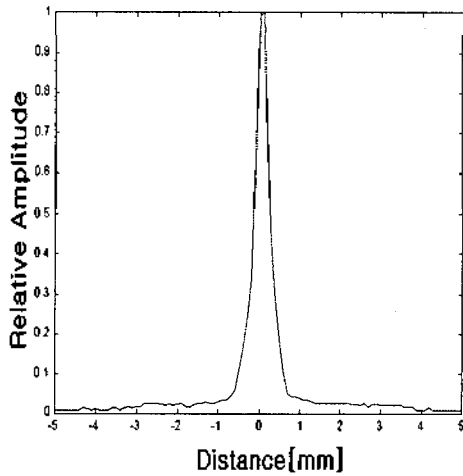
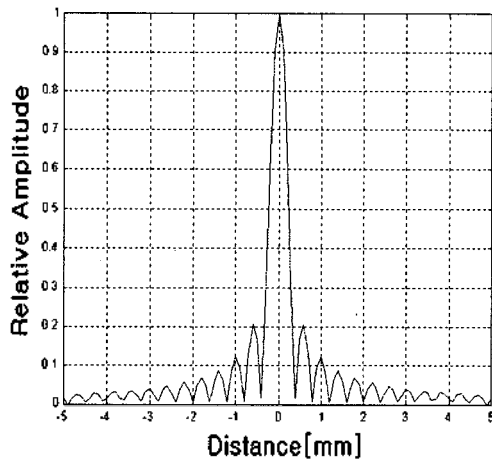


그림 4. (a) 초점면의 x축상의 음장 (이론)
 (b) 초점면의 x축상의 음장 (측정)
 Fig. 4. (a) Acoustic Field of x-axis on the focal plane (Calculation),
 (b) Acoustic Field of x-axis on the focal plane (Measurement).

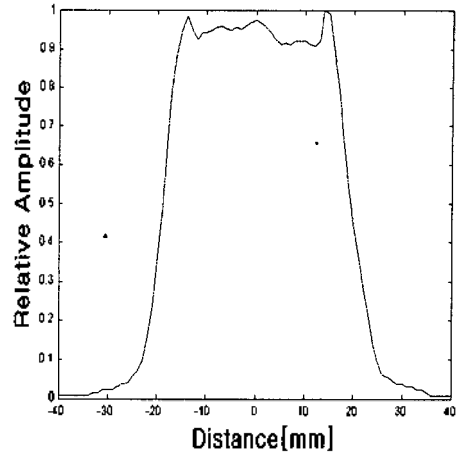
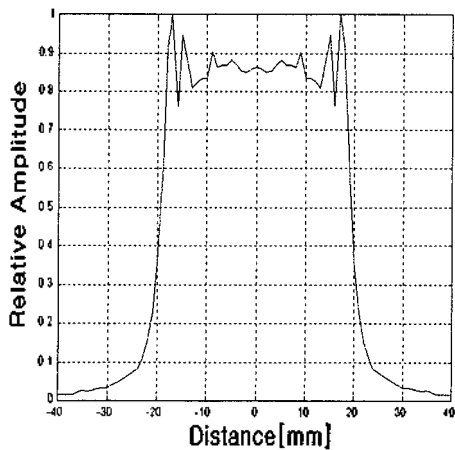


그림 5. (a) 초점면의 y축상의 음장 (이론)
 (b) 초점면의 y축상의 음장 (측정)
 Fig. 5. (a) Acoustic field of y-axis on the focal plane (Calculation),
 (b) Acoustic field of y-axis on the focal plane (Measurement).

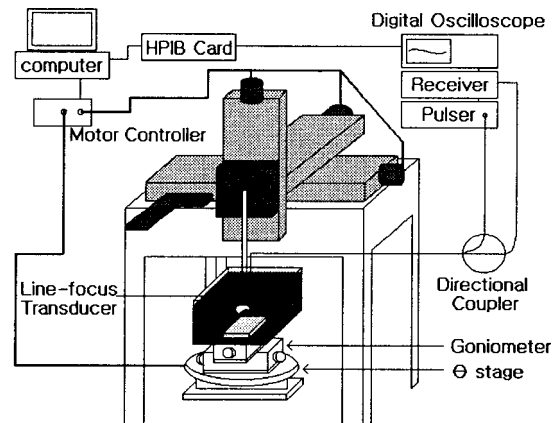


그림 6. 측정시스템의 구성도
 Fig. 6. Measurement system.

V. LSAW 측정결과 및 고찰

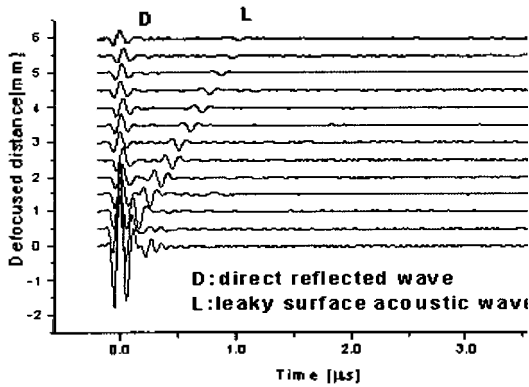
등방성 재료인 구리, 알루미늄 및 용융석영에 대해서 defocusing시켰을 때 LSAW가 직접반사파와 분리되는 모습을 그림 7에 각각 나타내었다. 그림 7에서 defocusing에 따라 LSAW 성분파 (L)가 직접반사 성분파 (D)로부터 점차 멀어져감을 알 수 있는데, $z/\Delta t$ 의 값으로부터 식 (4)에 의해 구해진 LSAW의 속도를 전술한 LSAW 전파 이론에 의한 계산 결과와 비교하여 표 1에 나타내었다. 표 1로부터 각 시료에 있어서 측정치와 이론 계산치는 오차 1% 이내로 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 8은 삼방정재 결정인 α -수정의 (0,0,1)면에 있어서 [1,0,0] 방향 (그림 8에서의 0° 방향)으로 전파하는 경우의 파형인데, 두 가지 모드 (L 및 P)의 누설탄성표면파가

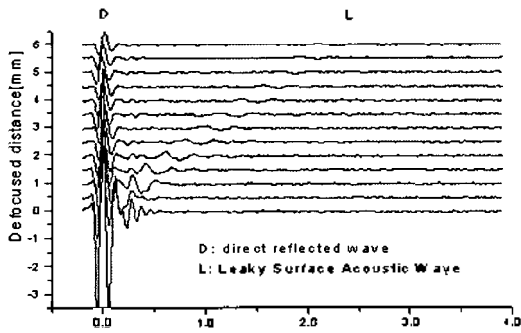
탐지됨을 보인다. 각각의 속도 측정치를 이론계산치와 비교해 본 결과, 순수한 LSAW 이외에 그보다 속도가 빠르면서 고체시료 쪽으로 에너지를 누설시키면서 전파하는 LPSAW[S] 성분이 탐지된 것을 알 수 있었다. 또한 defocusing량을 $z=12\text{ mm}$ 로 하고, 동일면상에서 z 축을 중심으로 시료를 회전시켰을 때 두개의 탄성표면파 모드는 표면파의 전파 방향에 따라 그림 9와 같이 나타났다. 그림 9는 그 면에서의 LSAW에 대한 역음속곡선 (slowness curve)과 동일한 패턴을 나타내는 것으로 삼방정계의 전형적인 6-fold의 이방성을 보인다. 그림 9로부터 얻어진 결과를 이론계산 결과와 비교하여 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 LSAW 속도 측정치는 3145%~3537%, LPSAW의 속도는 3540%~4120%이었는데 이 결과는 이론치와 상당히 잘 일치하는 것이다.

표 1. 누설탄성표면파 측정치와 이론치의 비교
Table 1. Comparison of the measured and the calculated LSAW velocities.

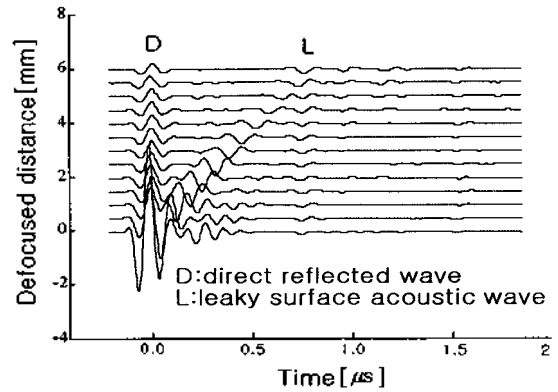
specimen	$\frac{z}{\Delta t}$ [m/s]	Measured LSAW velocity[m/s]	Calculated LSAW velocity[m/s]	error [%]
SiO2	7.5758×10^3	3428	3430	0.1
Al	5.4734×10^3	2883	2863	0.7
Cu	2.6142×10^3	2120	2139	0.9



(a) 구리 (Cu)



(b) 알루미늄(Al)



(c) 용융석영(Fused SiO2)

그림 7. Defocusing량에 따라 분리된 파
Fig. 7. Separated signals according to the defocusing distance.

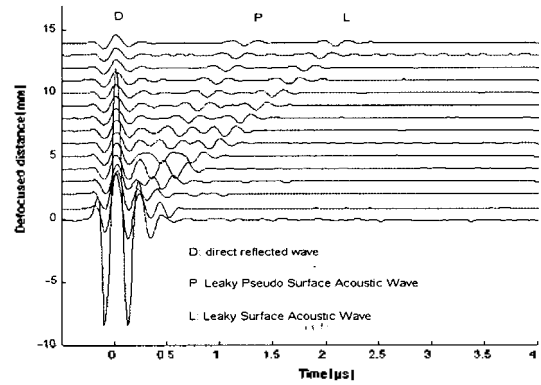


그림 8. LSAW와 LPSAW의 분리된 신호 (z-cut 수정, x 방향)
Fig. 8. Separated signals of LSAW and LPSAW (z-cut quartz, x direction).

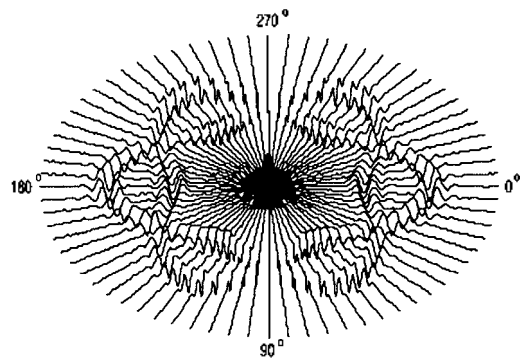


그림 9. 전파방향에 따른 LSAW와 LPSAW의 분리된 파형 (z-cut 수정)
Fig. 9. The separated LSAW and LPSAW according to propagation direction (z-cut quartz).

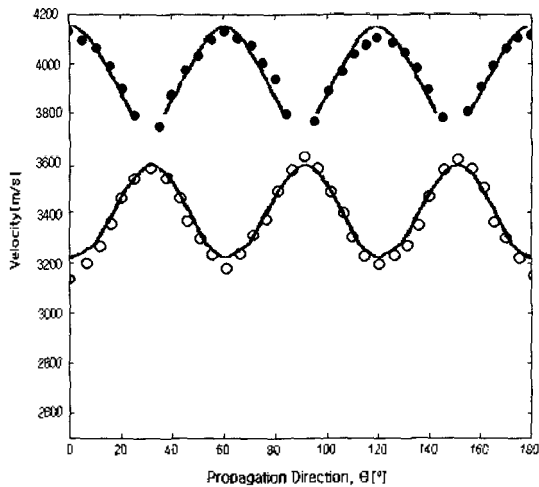


그림 10. 전파방향에 따른 LSAW와 LPSAW의 속도 변화
(z-cut 수정, ○: LSAW, ●: LPSAW, - : 이론)
Fig. 10. Velocity variation of LSAW and LPSAW on the propagation direction
(z-cut quartz, ○: LSAW, ●: LPSAW, - : theory).

VI. 결 론

PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서를 설계·제작하여 그 초음파 집속특성을 평가한 후 몇몇 등방성 재료와 이방성 재료인 α -수정 결정의 (0,0,1)면에 있어서의 LSAW 전파속도를 측정하고, 그 결과를 이론해석 결과와 비교 분석하였다. 제작된 트랜스듀서는 이론해석 결과와 잘 일치하는 뚜렷한 직선집속 특성을 나타내었으며, 그 트랜스듀서에 의한 LSAW 측정치는 이론 계산치와 잘 일치하였다. 특히 α -수정 결정에서는 LSAW와 함께 LPSAW의 전형적인 이방성을 측정할 수 있었는데, 본 논문에서 제시한 형태의 PVDF 직선집속 초음파 트랜스듀서는 여러 가지 모드의 누설성표면파의 전파특성을 정도 높게 측정할 수 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. W. Parmon and H. I. Bertoni, "Ray interpretation of the material signature in the acoustic microscope," *Electron. Lett.*, 15, pp. 684-686, 1979.
2. R. D. Weglein, "A model for predicting acoustic material signatures," *Appl. Phys. Lett.*, 34, pp. 179-181, 1979.
3. Y. C. Lee, J. O. Kim and J. D. Achenbach, "V(z) curves of layered anisotropic materials for the line-focus acoustic microscope," *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(2), pp. 923-930, 1993.
4. A. Atalar, "A physical model for acoustic signatures," *J. Appl. Phys.*, 50, pp. 8237-8239, 1979.
5. J. Kushibiki and N. Chubachi, "Material characterization by Line-Focus-Beam acoustic microscope," *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.*, SU-32(2), pp. 189-212, 1985.

6. 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, pp. 641-647, 1996.
7. D. Xiang, N. N. Hsu and G. V. Blessing, "Statistical error analysis of time and polarization resolved ultrasonic measurements," *IEEE Trans. on UFFC*, 45, pp. 1006-1016, 1998.
8. B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solid," 1, pp. 57-63, 1973.
9. J. J. Campbell and W. R. Jones, "Propagation of surface waves at boundary between a piezoelectric crystal and a fluid medium," *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.*, SU-17(2), pp. 71-76, 1970.
10. J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," McGraw-Hill Co., pp. 42-54, 1968.

▲ 윤 혁 준 (Hyuck-Joon Yoon)



1994년 2월 : 부경대학교 물리학과 졸업(이학사)
1999년 8월 : 부경대학교 음향진동공학과 졸업(공학석사)
1999년 12월 - 현재 : ESTec 음향연구소 연구원
※ 주관심분야: 음장해석, 음향신호처리

▲ 하 강 열 (Kang-Lycol Ha)

한국 음향학회지 17권 2호 참조

▲ 김 무 준 (Moo-Joon Kim)

한국 음향학회지 17권 2호 참조

▲ 윤 증 락 (Jong-Rak Yoon)

한국 음향학회지 13권 2호 참조