공학석사 학위논문

재료물성 측정을 위한 PVDF 초음파 트랜스듀서의 새로운 설계 및 응용

2006년 2월

부경대학교대학원

음향진동공학협동과정

홍 성 욱

공학석사 학위논문

재료물성 측정을 위한 PVDF 초음파 트랜스듀서의 새로운 설계 및 응용

지도교수 하 강 렬

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2006년 2월

부경대학교대학원

음향진동공학협동과정

홍 성 욱

홍성욱의 공학석사 학위논문을 인준함.

2006년 12월 22일

주 심 공학박사 김 천 덕 (인)
위 원 공학박사 윤 종 락 (인)
위 원 공학박사 하 강 렬 (인)

목	차
---	---

ABSTRACT 1
제 1 장 서론2
제 2 장 전극분할형 직선집속 PVDF 초음파 트랜스듀서의 설계 및 제작
2.1 기존의 직선집속 초음파 트랜스듀서의 구조 및 특성5
2.2 전극분할형 PVDF 초음파 트랜스듀서의 제작7
제 3 장 전극분할형 직선집속 PVDF 초음파 트랜스듀서의 특성평가
9
3.1 임펄스응답 특성9
3.1.1 KLM 모델에 의한 해석9
3.1.2 KLM 모델에 의한 해석 결과12
3. 2 음장특성14
3. 2. 1 Rayleigh-Sommerfeld 회절이론에 의한 해석14
3. 2. 2 이론 결과16
제 4 장 벌크파 및 탄성표면파 측정18
4.1 종파 및 횡파 측정18
4. 1. 1 측정방법18
4. 1. 2 측정결과21

 측정	• •	표면파	난성.	틴	2	4.
)법 ·	ŀ	측정	. 1	2.	4.	
 릴과 ·	7	측정	. 2	2.	4.	

		산출에의	및 밀도	정수	탄성	장	에 5	제
			3	적 배기	이론	1	5.	
	••••••	전파이론	igh파의	Rayl	1. 1	5.		
)의 전파이론	파(LSAW)	탄성표면	누설	1. 2	5.		
•••••• 43			•••••	결과	계산	2	5.	

- 참고문헌 ------50 감사의 글 ------52

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

Soung-Wook, Hong

Interdisciplinary Program of Acoustic and Vibration Engineering, Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Ultrasonic transducers made of polyvinylidene fluoride (PVDF) polymer is able to radiate very short ultrasound pulses into water due to the good acoustic impedance matching between the PVDF and water. Such short pulses are easily applied to the measurement of elastic properties of materials. So far, the plane transducers vibrating with the thickness mode or the transverse mode have been using for the measurement of bulk waves. And, the line-focusing transducers with very high frequency have been using for measurement of leaky surface acoustic waves(LSAWs) in a scanning acoustic microscope.

In this paper, we have designed a line-focusing transducer of which electrode is divided by two parts for measurement of bulk (longitudinal and shear) waves as well as LSAWs. The transducers consisted of piezoelectric PVDF films and PVDF substrates for obtaining short pulses. Two methods for measurement of the velocities of the bulk and LSAW waves using the transducer were introduced, and the velocities of them were measured for several isotropic solid materials. It is revealed that the results obtained by the methods established in this paper have good accuracies.

제 1 장 서론

우수한 특성과 높은 신뢰성을 가진 전자재료의 개발은 최근의 전 자산업의 급속한 발전의 밑바탕을 이루고 있으며, 재료자체의 물성 및 내부결함 등의 상태를 정확히 평가하기위한 기술로서, 초음파는 료의 점탄성적 성질 및 내부결함을 비접촉, 비파괴적으로 계측할 수 있는 유일한 수단이라고 할 수 있다.

재료의 점탄성적 특성을 평가하기 위한 초음파계측기술은 1950년 대부터 활발히 연구, 발전되어져 왔는데, 그 기술은 음속 및 감쇄측 정을 바탕으로 하며, 초기에는 주로 벌크파(종파 또는 횡파)가 사용 되었다. 벌크파에 의한 음속 및 감쇄의 측정법으로는 펄스-에코 중첩 법(Pulse-*E*cho Overlap Method), 펄스중첩법(Pulse Superposi- tion Method), Sing-Around 법, Buffer Rod를 이용하는 방법 등이 알려 져 있다[1].

그러나 1973년에 Quate 등[2]에 의해 기계주사형 초음파현미경 (Scanning Acoustic Microscope : SAM)이 개발되면서, 누설탄성표 면파(Leaky Surface Acoustic Wave : LSAW)를 이용한 재료의 점 탄성적 특성평가가 활발히 이루어지게 되었다. SAM은 음향렌즈에 의해 집속한 초음파 빔을 시료 면에 2차원적으로 주사하여, 그 반사 파 또는 투과파를 검출하여 화상으로 나타내는데 주로 사용되었으나, 1979년 Weglein에 의해 V(z)곡선이 발견되면서 재료의 특성화 (Material Characterization)에 더 많이 응용되게 되었다[3]. V(z)곡선 은 SAM에 있어서 음향렌즈와 시료사이의 거리(z)를 변화시켰을 때 나타나는 트랜스듀서의 출력으로서 시료에 따라 특유한 곡선 형상을 나타내며, 그 곡선에 나타나는 주기는 시료 표면을 전파하는 누설탄 성표면파의 위상속도와 관계된다. V(z)곡선에 의한 LSAW의 측정은 고체, 특히 전자재료의 탄성적 성질을 평가하는데 매우 유용하게 사 용되어지고 있는데, 그 응용에 있어서는 이방성(Anisotropy) 측정이 가능한 직선접속빔(Line Focus Beam: LFB) 초음파 트랜스듀서가 주 로 이용되고 있다[4]. 기존의 SAM용 초음파 트랜스듀서는 ZnO, LiNbO₃ 등의 압전체를 음향렌즈에 부착하여 제작하기 때문에 물과의 정합을 위해 calcogenide glass 등을 코팅시킨 구조로 돼있어 제작이 까다롭고, 연속파 또는 tone-*b*urst로 구동시키기 때문에 LSAW 성분 만의 파형을 관찰하거나, 그 성분만 추출하여 측정할 수는 없다.

한편, 고분자 압전 재료인 PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 압전막 은 압전 세라믹인 PZT(PbZrTiO₃)에 비해 전기기계 결합계수가 낮고 안정성은 다소 떨어지나, 음향 임피던스가 작고 주파수 대역폭이 넓 기 때문에 별도의 정합층 없이도 짧은 펄스의 초음파를 수중이나 인 체 중에 방사시킬 수 있다. 따라서 PVDF을 고체의 배면체에 접착시 킨 LFB 초음파 트랜스듀서를 제작하면 LSAW의 파형을 관찰하면서 측정 가능하다[5, 6].

본 연구에서는 벌크파와 LSAW 속도를 동시에 측정할 수 있는 PVDF LFB 초음파 트랜스듀서를 새롭게 설계·제작하고, 그 특성과 성능을 평가하였다. 제작된 트랜스듀서는 벌크파를 측정하기 위한 소 개구각 구동과 LSAW를 측정하기 위한 대개구각 구동으로 구분하여 동작시킬 수 있는 특징이 있다. 본 논문에서는 제작된 LFB 초음파 트랜스듀서의 임펄스 응답특성과 음장 특성을 이론 및 실험을 통해 분석하였으며, 벌크파 및 LSAW 측정법을 확립하고, 그 유용성을 평

- 3 -

가하였다. 임펄스 응답특성에 관한 이론해석에는 KLM등가회로를 이 용하였고, 음장특성해석에는 Rayleigh-Sommerfeld의 회절이론[7]을 사용하였다. 또한, 측정된 각 전파속도로부터 탄성 스티프네스 (stiffness)정수 및 밀도의 산출에는 Campbell and Jones의 방식[8]을 적용하였다.

제 2 장 전극분할형 직선집속 PVDF 초음파트랜스듀서 의 설계 및 제작

2.1 기존의 직선집속 초음파트랜스듀서의 구조 및 특성

기존의 직선접속형의 초음파 트랜스듀서는 그림 1(a)와 같이 원통 형 음향렌즈의 한쪽 단면에 ZnO, LiNbO₃ 등의 압전체를 부착시킨 형태와 그림 1(b)와 같이 원통형 개구 자체에 PVDF 등의 압전체를 부착시킨 형태로 나눌 수 있다. 각 형태에 있어서 초음파 빔은 일직 선상으로 접속되며, defocus했을 때 시료면상의 표면파는 그림 2와 같이 한 축 방향으로만 전파하면서 커플러(coupler)인 수중으로 재 방사하게 된다. 따라서 시료가 이방성을 가질 경우 시료 또는 트랜스 듀서를 회전을 시키면서 측정하면 그 특성을 알 수 있게 된다.



(a) 음향렌즈형



(b) 개구부착형

그림 1. 직선집속 초음파 트랜스듀서



그림 2. LSAW 전파 모습

음향렌즈형 트랜스듀서에 있어서는 렌즈재료로서 주로 사파이어나 용용석영을 사용하는데, 그러한 재료는 물과의 음향임피던스 차이가 크기 때문에 경계면에서의 반사손실도 매우 크다. 따라서 정합층으로 calcogenide glass 등을 코팅해서 사용하는 것이 일반적이다. 한편, 개구부착형 트랜스듀서에서는 주로 PVDF 압전막이 사용되는데, 이 경우 물과의 음향임피던스 차이가 작으므로 배면체를 렌즈모양으로 가공하면 별도의 정합층이 필요 없다. PVDF 압전체의 경우 대역폭 이 넓어서 짧은 펄스를 구현할 수 있기 때문에 결정면에서 직접 반 사된 파와 LSAW를 거쳐서 수신되는 파를 시간적으로 분리 가능하 고 실시간으로 시각화 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 종래의 개 구부착형 PVDF 트랜스듀서는 단일요소형으로 되어 있고, LSAW를 측정하기 위하여 항상 개구각를 크게 만들고 있어, 시료 내부에서의 반사파를 이용한 계측은 곤란하다. 2.2 전극분할형 PVDF 초음파트랜스듀서의 제작

그림 3은 본 연구에서 제안하는 전극분할형 PVDF 트랜스듀서의 구조를 나타낸다. 개구면에 부착된 PVDF 압전막을 그림과 같이 3등 분하고, 중앙을 제외한 양쪽의 압전막은 전극을 서로 연결하여 동시 에 동작하도록 한 것이다.



그림 3. 전극분할형 PVDF 트랜스듀서의 구조

그림 3의 트랜스듀서는 C와 GND, (*E*+C)와 GND의 2가지 연결 형태 로 사용할 수 있으며, C와 GND를 사용할 경우 개구각 13°에 의한 내부반사파 측정이 가능하며, (*E*+C)와 GND를 사용할 경우 종래의 대개구각 LFB 트랜스듀서가 된다.

제작에 있어서, PVDF 압전막은 시판되고 있는 Kynar Piezo Film 사의 28µm 박막형 트랜스듀서를 사용하였고, 배면체로서는 압전성 이 없는 벌크의 PVDF 봉을 가공하여 사용하였다. 배면체와 PVDF 압전막은 에폭시(*E*POT*E*K 301)를 사용하여 접합시키고, 배면체의 길 이는 다중반사가 생기지 않도록 40mm로 충분히 길게 하였다.

그림 4는 제작된 트랜스듀서의 규격 및 사진이다. 그림에서는 개구 각을 선택하기 위한 스위치가 나타나있다. 한편, 사용한 PVDF 압전 막 및 배면체 등의 물성치는 표 1과 같다.



그림 4. 제작된 트랜스듀서의 규격 및 사진

표	1.	트랜스듀서	재료의	물성치
---	----	-------	-----	-----

	음속 [m/s]	필도 [kg/m³]	음향임피 던스 [Mrayl]	유전율 [F/m]	두께 [um]
PVDF 압전막	2200	2780	3.9	55.8×10 ⁻¹²	28
PVDF 배면체	2200	2780	3.9	_	40×10^{3}
Epoxy	2450	1100	2.7	_	_

제 3 장 전극분할형 직선집속 PVDF 초음파트랜스듀서

의 특성평가

3.1 임펄스응답 특성

3. 1. 1 KLM 모델에 의한 해석

직선집속 초음파 트랜스듀서의 특성은 defocus된 상태에서는 경로 차에 의해 간섭이 발생하므로 임펄스응답 등 전기적 특성을 계산하 기가 어렵지만 초점면에서 반사되어오는 경우는 모든 음선이 경로차 의 간섭을 받지 않기 때문에 평면 트랜스듀서처럼 취급할 수 있고, 그 파형 특성을 비교적 간단히 계산할 수 있다.

여기서는 초점면에서 반사되어 오는 파의 파형계산을 위하여 먼저, 제작한 직선집속 초음파 트랜스듀서의 구조를 평면형으로 간략화한 후, 그것의 KLM 등가회로를 그림 5에 나타내었다.



그림 5. 초점면에서의 직선집속 초음파 트랜스듀서의

KLM 등가회로

등가회로의 요소들은 아래와 같은 값을 갖게 된다.

 $Z_0 = PVDF의 음향임피던스, Zw = 부하의 음향임피던스$ $Zb = 배면체의 음향임피던스, <math>K_{\ell} = 전기기계결합계수$ $c = PVDF 내부의 음속, \ell = PVDF의 두께, A = 단면적$ $C_0 = PVDF 제동용량, <math>\epsilon^s = 유전율, \omega = 각주파수$

$$Z_{c} = Z_{0} \times A$$

$$X = \frac{-C_{0}}{K_{\ell} \sin(\frac{\omega}{\omega_{0}})} \qquad C_{0} = \frac{\varepsilon^{s} A}{\ell}$$

$$\Phi = K_{0} \sqrt{\frac{\pi}{\omega_{0} \rho_{0} Z_{0}}} \cdot \sin c(\frac{\omega}{2\omega_{0}})$$

압전체의 전달 함수는 수신과 송신을 했을 때 각각에 대해서 계산 이 되어지고, 실제 실험상으로는 펄스-에코법을 사용해서 압전체가 송신과 수신을 동시에 함으로써 구현된다. 그러므로 회로에 대한 계 산을 할 때는 송신할 때의 동작회로와 수신할 때의 동작회로가 별도 로 고려되어야하며, 트랜스듀서의 임펄스 응답과형은 계산된 주파수 특성을 역 푸리에 변환함으로써 계산할 수 있다.

여기서 정확한 응답 파형을 구하기 위해, 전압으로 구해진 복소수 값들의 공액치를 대칭이 되게 주파수영역의 뒤쪽에 나열한 후 보강

간섭 시키고, 에너지 보존법칙 (Parseval 정리)에 따라 보강간섭 시 킨 것에 해당하는 값을 곱해서 역 푸리에 변환을 하면 임펄스 응답 파형을 구할 수 있다.

이 계산에서는 음향부하로부터 평판 반사체까지의 에너지전달은 주 파수에 독립적이고, 부하 매질에서의 흡수와 회절에 의한 에너지 손 실은 포함되지 않았다. 다만, 트랜스듀서의 내부 손실과 전기기계결 합계수(k_t)는 1997년에 Kynar Piezo Film 사에서 제공한 PVDF 샘 플에 대한 탄성 탄젠트 손실 tanδ_m 과 유전 탄젠트 손실 tanδ_e 을 이용하였는데, 그 값은 표 2 에 나타나 있다. PVDF는 내부 손실이 압전세라믹보다 크기 때문에 계산에 넣지 않을 경우 실제 측정치와 오차가 많다.

표 2. PVDF의 탄젠트 손실 및 전기기계결합계수

		$tan \delta_m$			$tan \delta_e$	K_t	
	(탄성	탄젠트	손실)	(유전	탄젠트손실)	(전기기계결합계수)	
PVDF		0.133			0.256	0.146	

3. 1. 2 KLM 모델에 의한 해석 결과

제작된 전극분할형 직선접속 초음파 트랜스듀서는 압전층과 음향 임피던스가 같은 배면층을 갖는 구조이다. 이 경우 방사되는 펄스의 길이는 최소가 되는데, 그림 6은 소개구각 구동에 대한 초점면 반사 파형의 계산치와 실측치를 각각 나타낸다. 계산에 있어서는 KLM 등 가회로를 사용하였으며, 초점면에서는 경로차에 의한 위상변화가 없 는 점을 고려하여 평면 트랜스듀서로 근사하였다.



(a) 계산치 (스펙트럼 상의 실선: 물에서의 손실 무시, 점선: 물에서의 손실 고려)



(b)실 즉치 (스펙트럼 상의 실선: 실측치, 점선: 물에서의 손실 고려한 계산치)

```
그림 6. 트랜스듀서의 임펄스응답
```

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 단일 주기의 중심주파수 약 14.2MHz, -6dB 대역폭 약 152%의 광대역 펄스를 발생시킨다. 그러 나 중심주파수가 계산치 17.5MHz와 실측치 14.2MHz로 큰 차이를 보이고 있다. 이는 Coupler(물)에서의 감쇄를 포함하지 않아서 생기 는 오차로 Coupler(물)에서의 감쇄를 포함한 계산 결과는 그림 7과 같이 나타나며, 이때의 중심주파수와 -6dB 대역폭은 표 3과 같다.



그림 7. 감쇄를 포함한 임펄스 응답특성 (스펙트럼 상의 실선: 실측치, 점선: 물에서의 손실 고려한 계산치)

표 3. 임펄스 응답특성 결과

	계산치	실측치
Center Frequency[MHz]	15.1(17.5)	14.2
-6dB Bandwidth[%]	154.2(180)	152

* ()안의 값은 Coupler(물)의 감쇄를 포함하지 않음.

3. 2. 1 Rayleigh-Sommerfeld 회절 이론에 의한 해석

초음파 음장을 해석하는 방법으로 일반적으로 많이 사용되는 Rayleigh- Sommerfeld 회절이론을 이용한다.



그림 8. 음장계산을 위한 좌표계

그림 8의 좌표계에서 나타낸 바와 같이 반경이 R 인 직선접속 초음 파트랜스듀서의 오목면 z_0 로부터 개구면 z_1 을 지나 축상에서 $z=z_2$ 거리에 있는 xy 단면 S_2 의 음장 $U_2(x_2, y_2, z_2)$ 는 Rayleigh-Sommerfeld의 회절공식에 의해 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$U_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{\lambda_w} \iint_{s} U_0(x_0, y_0, z_0) \times \frac{e^{jk_w r_{02}}}{r_{02}} ds$$
(1)

여기서 $U_0(x_0, y_0, z_0)$ 는 트랜스듀서면상의 음장이며, ds는 그 면상 의 미소 면적으로 ds = dxdy 로두고, 트랜스듀서를 피스톤음원이라 고 가정하여 $U_0(x_0, y_0, z_0) = 1$ 로 두면 식 (2) 가 성립한다.

$$U_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{\mathcal{N}_w} \iint_{s} \frac{e^{jk_w r_{02}}}{r_{02}} \, dx \, dy \tag{2}$$

그림 23에서 음원면상의 한 점의 좌표를 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 개구면의 좌 표를 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, 관측점의 좌표를 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, P_0, P_2 두 점 간의 거리를 γ_{02} 라고 하면, 음원의 좌표 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 는 집속형 트랜 스듀서의 특성에 따라 개구면의 좌표를 기준으로 해서 식 (3) 과 같 이 x_1, y_1 으로 표현된다.

$$P_0(x_0, y_0, z_0) = P_0(x_1, y_1, R - \sqrt{R^2 - y_1^2})$$
(3)

따라서 P_0, P_2 간의 거리 γ_{02} 는 식 (4) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{02} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - [R - \sqrt{R^2 - y_1^2}])^2}$$
(4)

식 (4)를 식(2)에 대입하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$U_{2}(x_{2}, y_{2}, z_{2}) = \frac{1}{\lambda_{w}} \int_{s} \frac{\exp[ik_{w}\sqrt{(x_{2} - x_{1})^{2} + (y_{2} - y_{1})^{2} + (z_{2} - [R - \sqrt{R^{2} - y_{1}^{2}}])^{2}}}{\sqrt{(x_{2} - x_{1})^{2} + (y_{2} - y_{1})^{2} + (z_{2} - [R - \sqrt{R^{2} - y_{1}^{2}}])^{2}}} \, dxdy \qquad (5)$$

3. 2. 2 이론 결과

Rayleigh-Sommerfeld 회절이론을 이용하여 직선집속 초음파 트랜 스듀서의 소개구각과 대개구각에 대해 초점부근에서의 집속음장을 시뮬레이션한 결과를 그림 9, 그림 10에 각각 나타내었다.

계산에 의한 초점심도는 소개구각 6.5mm이고 대개구각 0.35mm이 다. 벌크파 측정을 위해서는 평면파의 가정이 필요하므로 소개구각의 경우 초점심도 범위에서 defocus하면서 측정이 가능하다.



그림 9. YX평면에서의 음장특성(소개구면)





그림 10. YX평면에서의 음장특성(대개구면)

제 4 장 벌크파 및 탄성표면파 측정

4. 1 종파 및 횡파 측정

4. 1. 1 측정방법

그림 11과 같이 실험 장치를 구성하고 펄스-에코법으로 실험을 진행하였다. 벌크파의 측정에는 평면파를 이용해야하므로 소개구각 트랜스듀서를 사용하여 초점심도 범위인 3mm 내에서 측정하였다. PVDF는 송신효율이 낮아서 매우 높은 전압을 걸어줘야 하므로 R/TEC사의 SQUARE WAVE PULSER SP-801을 이용하고 반사된 신호를 R/TEC사의 BROAD WAVE RECEIVER BR-640로 수신을 했다. 이 때 사용한PVDF의 특성상 1 µm당 30V 가 최대 동작 전압 으로 되어있기 때문에 1560V 이하의 전압을 걸어주어야 한다.



그림 11. 벌크파 측정시스템 구성도

광대역 특성을 갖는 소개구각 트랜스듀서의 초점에 시료표면을 일 치시킨 후 전기적 펄스를 인가하고, 그림 12에 나타낸 것처럼 트랜스 듀서 쪽으로 접근시키면,



그림 12. 소개구각 구동시의 수신파열

D: 시료표면에서의 직접반사파,

P-P: 시료저면까지 종파로 전파한 후 종파로 반사된 파, P-S(S-P): 시료저면까지 종파(또는 횡파)로 전파된 후 횡파

(또는 종파)로 반사된 파,

S-S: 시료저면까지 횡파로 전파한 후 횡파로 반사된 파 와 같이 4개의 펄스가 시간적으로 구분되어 수신된다. 또한, 그들 각 각의 신호는 defocus의 정도에 따라 크기가 달라지는데, 집속된 초점 이 시료의 저면에 닿았을 때 가장 크게 나타난다. 시료의 저면에 종 파(또는 횡파)가 집속되었을 경우 굴절각 θ_i는 입사각θ_i 및 defocus 량 Δ₂와 시료의 두께 _Q에 의해

$$\Theta_{i} = \tan^{-1}(\frac{\Delta z}{d} \tan \Theta_{i}) \tag{6}$$

로 주어지며, θ_i는 트랜스듀서의 개구반각에 해당한다. 따라서 집속 된 종파(또는 횡파)의 음속은 Snell의 법칙에 의해 다음의 식으로 산 출되어진다.

$$v_s = \frac{\sin \Theta_t}{\sin \Theta_i} \cdot v_w \tag{7}$$

여기서, v_w 는 매개 매질인 물에서의 종파 음속이다. 이 측정에 있어 서 임의의 파가 시료저면에 집속되었는지의 여부는 신호의 크기에 의해 정해지므로, defocus에 따른 변화의 정도를 정확히 측정하는 것 이 중요하다. 4. 1. 2 측정결과

그림 13, 그림 14는 벌크파 측정의 예로서 등방성 재료인 황동에 대해서 소개구각의 트랜스듀서를 defocus시켜, 시료표면의 직접반사 파와 종파 또는 횡파가 시료의 저면에 집속되었을 때 나타나는 수신 펄스열을 나타낸다. 그리고 그림 15, 그림 16 및 그림 17은 초점면으 로부터 defocus에 따른 각 파의 진폭변화를 휘도 변환하여 나타낸 것이다. 그림 15, 그림 16 및 그림 17로부터 집속지점의 defocus 량 을 알 수 있으며, 종파 및 횡파의 속도 측정이 가능한데 표 4는 본 연구에서 사용한 시료에 대한 두께, 각 파의 저면집속시의 defocus 량 및 산출된 음속을 나타낸다.



그림 13. 황동에 대한 벌크파의 수신



그림 14. SiO2에 대한 벌크파의 수신



그림 15. 황동에 있어서 defocus에 따른 반사파의 진폭변화



그림 16. SiO2에 있어서 defocus에 따른 반사파의 진폭변화



그림 17. Pyrex Glass에 있어서 defocus에 따른 반사파의 진폭변화

표 4. 벌크파 속도 측정결과

	.1 • 1	mea. velocities		ref. ve	locities	Error	
Specimen	thickness	[m/s]		[m	/s]	[%]	
	[<i></i> m]	vl	vs	vl	vs	vl	vs
SiO2	1035	5,982	3,832	5,973	3,766	0.15	1.83
Al	980	6,286	3,102	6,148	3,406	2.25	8.93
Cu	770	4,705	2,378	4,650	2,288	1.18	3.93
Brass	1010	3,854	2,120	3,830	2,050	0.63	3.42
Pyrex <i>G</i> lass	1050	5,589	3,174	5,609	3,283	0.36	3.32

4. 2. 1 측정방법

실험은 그림11과 동일한 장치로 수행되는데, 단지 트랜스듀서만 대 개구각으로 구동시킨 후, z방향으로 변화시키면서 분리되는 펄스파형 을 관찰한다. defocusing은 초점으로부터 스테핑모터를 이용하여 0.2mm간격으로 2.4mm까지 변화시키면서 측정하였고, 분리된 펄스파 형은 HPIB Card를 이용해 디지털오실로스코프에서 컴퓨터로 저장하 였다.

광대역 트랜스듀서의 대개구각 구동에 있어서 시료면을 트랜스듀 서 쪽으로 defocus시키면 그림 18에서 나타낸 경로1(LSAW성분)과 경로2(직접반사성분)만이 시간적으로 분리된 출력파형으로 나타나게 된다. LSAW 성분은 직접반사파와 반대되는 위상으로 직접반사파 보 다 늦게 수신되며, 그 시간 간격 △左 defocus량 ∠에 비례하게 된 다. 이 때, LSAW 음속 _{ν_{kaw}는 스넬의 법칙(sinθ_c = <u>ν_w</u>)으로부터 다음 식에 의해 구해진다.}

$$v_{lsaw} = \frac{v_{w}}{\sqrt{1 - (1 - \frac{\Delta t v_{w}}{2z})^{2}}}$$
(8)

식 (8)로부터 [∡]_{Δt}, 즉 _{z-Δt} 그래프에서의 기울기를 구할 수 있으면 쉽게 표면파속도를 산출할 수 있음을 알 수 있다.



그림 18. 대개구각 구동시의 음선경로

4. 2. 2 측정결과

그림 19는 LSAW 측정 예로서, 수정, 알루미늄, 용융석영 및 Pyrex Glass에 있어서 LSAW가 defocus에 따라 직접반사파와 분리 되는 모습을 나타내었으며, 그림 20은 실험에 사용한 모든 시료에 대 해서 ∡/∆≠ 을 구하기 위해 직선 근사한 결과이다. 이 결과로부터 LSAW의 속도를 구할 수 있는데, 각 시료에 대한 측정결과와 이론적 으로 계산된 LSAW의 속도는 표 5에 정리하였다. 각 시료의 측정치 와 계산치는 오차 약 1% 이내로 잘 일치하였다.



그림 19. Defocus에 따른 LSAW의 직접반사파로부터의 분리



그림 20. 각 시료에 있어서 z/At 그래프

표 5. 탄성표면파 측정치와 이론치의 비교

specimen	$\frac{z}{\Delta_{t}}$ [m/s]	Measured [m/s]	Calculated [*] [m/s]	error [%]
SiO_2	7.5758×10^{3}	3428	3430	0.06
Al	5.4734×10^{3}	2883	2863	0.70
Cu	2.6142×10^{3}	2120	2139	0.90
Brass	2.0577×10^{3}	1611	_	_
Pyrex Glass	5.8604×10^{3}	3064	3031	1.08

* By using elastic stiffness constants or *bulk* waves velocities and densities given in ref.[9, 10].

제 5 장 탄성정수 및 밀도 산출에의 응용

5.1 이론적 배경

고체재료와 물이 경계를 이루고 있을 때 탄성표면파의 이론적인 계산은 고체 및 물에서의 응력과 입자변위를 각각 유도하여 경계에 서 연속이 되게끔 조건을 만족시킴으로써 구할 수가 있다. 여기서는 먼저 등방성고체가 진공과 경계를 이루고 있을 때에 대한 일반적인 탄성표면파인 Rayleigh파에 대한 이론을 전개한 후, 그 고체가 물과 경계를 이루고 있을 때 전파하는 누설탄성표면파(Leaky Rayleigh Wave 또는 Leaky Surface Acoustic Wave)에 대한 전파속도 및 감 쇄를 구하는 이론식을 전개한다.

5. 1. 1 Rayleigh파의 전파이론

가) 응력과 입자변위

일반적으로 탄성고체에 있어서 변위벡터 $U = (U_{1,}U_{2,}U_{3})$, 응력 $T_{ij}(i,j=1,2,3)$, 변형 $S_{ij}(i,j=1,2,3)$ 사이에는 다음 (9), (10)식의 관계가 성립한다.

$$\begin{pmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} = S_{32} \\ S_{13} = S_{31} \\ S_{12} = S_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} \\ \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \\ \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \\ \frac{\partial U_3}{\partial x_3} + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \end{pmatrix}$$
(9)
$$\begin{pmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{ij} \\ (i, j = 1 \sim 6) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{31} \\ S_{12} \end{pmatrix}$$
(10)

여기서, $C_{ij}(i, j = 1 \sim 6)$ 는 탄성 스티프네스(stiffness) 정수로서 등 방성 고체에서는 다음의 식(11)과 같은 텐서로 나타낼 수 있다.



그림 21. Rayleigh 파 전파해석을 위한 좌표계

그림 21과 같이 x_1 방향으로 진행하고, x_3 방향으로는 감쇄하는 표면 파의 경우, 모든 물리량이 x_2 방향으로는 일정하고 변위가 없으므로 식(10)은 다음과 같이 식(12)로 주어진다.

$$\begin{pmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + C_{12} \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \\ C_{12} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right) \\ C_{12} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + C_{11} \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \\ 0 \\ C_{44} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \right) \\ 0 \end{pmatrix}$$
(12)

한편, 운동방정식으로부터 다음의 식(13)이 얻어진다.

$$\rho_s \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} = \left(C_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + C_{44} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) U_1 + \left(C_{12} + C_{44} \right) \frac{\partial^2 U_3}{\partial x_1 \partial x_3}$$

$$\rho_s \frac{\partial^2 U_3}{\partial t^2} = \left(C_{44} + C_{12}\right) \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_1 \partial x_3} + \left(C_{44} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + C_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}\right) U_3 \tag{13}$$

단, ρ_s는 고체의 밀도이다. 그런데, 표면파는 경계부근에서만 존재하 고 깊이방향으로는 진폭이 감쇄하는 파이므로 x_1 과 x_3 방향으로의 변 위는 다음과 같이 주어진다.

$$U_{1} = U_{1p}e^{-\alpha x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$

$$U_{3} = U_{3p}e^{-\alpha x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$
(14)

식(14)을 식(13)에 대입하면

$$-\rho_s \omega U_{1p} = \left(-C_{11}k^2 + C_{44}\alpha^2\right) U_{1p} - ik\alpha \left(C_{12} + C_{44}\right) U_{3p} -\rho_s \omega U_{3p} = -ik\alpha \left(C_{12} + C_{44}\right) U_{1p} + \left(-C_{44}k^2 + C_{11}\alpha^2\right) U_{3p}$$
(15)

가 되고, U_{1p} 와 U_{3p} 를 소거하면 다음의 4차방정식이 얻어진다.

$$A\alpha^{4} + B\alpha^{2} + C = 0$$
(16)

$$\Psi, \ A = C_{11}C_{44}$$

$$B = \rho_{s}\omega^{2}(C_{11} + C_{44}) - 2C_{11}C_{44}k^{2}$$

$$C = \rho_{s}\omega^{2}(\rho_{s}\omega^{2} - C_{11}k^{2} - C_{44}k^{2}) + C_{11}C_{44}k^{4}$$
(17)

이며, 근의 공식에 의해 그 해는

$$\alpha_{1} = + \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
$$\alpha_{2} = - \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{3} = + \left\{ \frac{-B - \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
(18)
$$\alpha_{4} = - \left\{ \frac{-B - \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

로 주어진다. 이 4개의 근 중에서 실수부(real part)가 +인 2개의 근 이 x_3 방향으로 감쇄하는 실제의 표면파의 해가 된다. 그 2개의 해를 각각 α_1^* 과 α_2^* 라고 하면, 일반적인 표면파는 그 2개의 파의 1차 결 합으로 표현되어져 (19)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{1} = \begin{bmatrix} U_{1p}^{'}e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + U_{1p}^{''}e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}}\end{bmatrix}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$
$$U_{3} = \begin{bmatrix} U_{3p}^{'}e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + U_{3p}^{''}e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)} \tag{19}$$

또한, $U_{1p}^{'}$ 과 $U_{3p}^{'}$, $U_{1p}^{''}$ 과 $U_{3p}^{''}$ 사이에는 (15)식에 의해 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{U_{3p}^{'}}{U_{1p}^{'}} = \frac{C_{11}k^{2} - C_{44}(\alpha_{1}^{*})^{2} - \rho_{s}\omega^{2}}{-i(C_{12} + C_{44})k\alpha_{1}^{*}} \equiv P_{1}$$

$$\frac{U_{3p}^{''}}{U_{1p}^{''}} = \frac{C_{11}k^{2} - C_{44}(\alpha_{2}^{*})^{2} - \rho_{s}\omega^{2}}{-i(C_{12} + C_{44})k\alpha_{2}^{*}} \equiv P_{2}$$
(20)

따라서, (19)식은

$$U_{1} = \begin{bmatrix} U_{1p}^{'} e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + U_{1p}^{''} e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}} \end{bmatrix} e^{i(kx_{1} - \omega t)}$$
$$U_{3} = \begin{bmatrix} P_{1}U_{1p}^{'} e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + P_{2}U_{1p}^{''} \end{bmatrix} e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}} e^{i(kx_{1} - \omega t)}$$
(21)

로 고쳐 쓸 수 있다.

나) 경계조건

$$T_{13}|_{x_2=0} = 0 \tag{22a}$$

$$T_{33}|_{x_2=0} = 0 \tag{22b}$$

의 조건이 만족되어야 한다. (21)식을 (12)식에 대입하면, (22a)식으로 부터

$$-\alpha_{1}^{*}U_{1p}^{'} - \alpha_{2}^{*}U_{1p}^{''} + ik\left(P_{i}U_{1p}^{'} + P_{2}U_{1p}^{''}\right) = 0$$
⁽²³⁾

(22b)식으로부터

$$C_{12}ik(U_{1p} + U_{1p}) + C_{11}(-\alpha_1^*P_1U_{1p} - \alpha_2^*P_2U_{1p}) = 0$$
(24)

가 얻어지며, 행렬로 표시하면 다음의 (25)식과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} ikP_1 - \alpha_1^* & ikP_2 - \alpha_2^* \\ C_{12}ik - C_{11}\alpha_1^*P_1 & C_{12}ik - C_{11}\alpha_2^*P_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1p}' \\ U_{1p}'' \end{pmatrix} = 0$$
(25)

이 식이 자명해 $U_{1p}^{'}$ = $U_{1p}^{''}$ =0 이외의 해를 가지기 위해서는

$$\begin{vmatrix} ikP_1 - \alpha_1^* & ikP_2 - \alpha_2^* \\ C_{12}ik - C_{11}\alpha_1^*P_1 & C_{12}ik - C_{11}\alpha_2^*P_2 \end{vmatrix} = 0$$
(26)

가 되어야한다. 표면파의 해를 구하기 위해서는 (16)식과 (26)식을 연 립시켜 동시에 만족하도록 하면 된다. 그러나 일반적으로 이 두 식으 로부터 k만 또는 α^{*}_i만의 식을 도출하는 것은 매우 어렵다. 따라서 실제로는 우선 k의 값을 주고 (16)식으로부터 α^{*}_i를 구해, 그것을 (26)식에 대입하여 행렬식을 만족하는 값들을 찾아내는 근사해석법을 사용한다. 5. 1. 2 누설탄성표면과(LSAW)의 전파이론



가) LSAW의 응력과 입자변위

그림 22. 누설탄성표면파 전파해석을 위한 좌표계

그림 22와 같은 좌표계를 생각하고, 모든 물리량이 x_2 방향으로 불변 이라고 하면 고체에 있어서의 이론은 Rayleigh 파와 동일하므로,

$$T_{13} = C_{44} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \right)$$
$$T_{33} = C_{12} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + C_{11} \frac{\partial U_3}{\partial x_3}$$
(27)

또한, 물의 경우 횡파가 전파하지 않으므로 스티프네스(stiffness) 정 수는 식(28)과 같이 나타낼 수 있다.

따라서, 물에 대한 응력은

$$T_{33}^{*} = C_{11}^{*} \left(\frac{\partial U_{1}^{*}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial U_{3}^{*}}{\partial x_{3}} \right)$$
(29)

가 된다. 운동방정식에 대해서도 고체 중에서는 전술한 바와 같이,

$$\rho_{s} \frac{\partial^{2} U_{1}}{\partial t^{2}} = \left(C_{11} \frac{\partial^{2}}{\partial x_{1}^{2}} + C_{44} \frac{\partial^{2}}{\partial x_{3}^{2}} \right) U_{1} + \left(C_{12} + C_{44} \right) \frac{\partial^{2} U_{3}}{\partial x_{1} \partial x_{3}}$$

$$\rho_{s} \frac{\partial^{2} U_{3}}{\partial t^{2}} = \left(C_{44} + C_{12} \right) \frac{\partial^{2} U_{1}}{\partial x_{1} \partial x_{3}} + \left(C_{44} \frac{\partial^{2}}{\partial x_{1}^{2}} + C_{11} \frac{\partial^{2}}{\partial x_{3}^{2}} \right) U_{3}$$
(13)

가 되며, 액체 중에서는

$$\rho_L \frac{\partial^2 U_1^*}{\partial t^2} = C_{11}^* \left(\frac{\partial^2 U_1^*}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_3^*}{\partial x_1 \partial x_3} \right)$$
$$\rho_L \frac{\partial^2 U_3^*}{\partial t^2} = C_{11}^* \left(\frac{\partial^2 U_1^*}{\partial x_1 \partial x_3} + \frac{\partial^2 U_3^*}{\partial x_3^2} \right)$$
(30)

단, ρ_L은 물의 밀도이다. 여기서 고체 및 액체 중의 변위를 각각 다 음과 같이 가정한다.

<고체 중>

$$U_{1} = U_{1p}e^{-\alpha x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$

$$U_{3} = U_{3p}e^{-\alpha x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$

$$(14)$$

$$< \mathfrak{A} = U_{1p} * e^{-\beta x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$

$$U_{1}^{*} = U_{1p} * e^{-\beta x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$

$$U_{3}^{*} = U_{3p} * e^{-\beta x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$

$$(31)$$

이것을 식(13)에 대입하면, 고체 중에서는

$$-\rho_{L}\omega^{2}U_{1p}^{*} = -C_{11}^{'}k^{2}U_{1p}^{*} - ik\beta C_{11}^{'}U_{3p}^{*} -\rho_{L}\omega^{2}U_{3p}^{*} = -ik\beta C_{11}^{'}U_{1p}^{*} - C_{11}^{'}\beta^{2}U_{3p}^{*}$$
(32)

가 된다. 식(15)에서 U_{1p} 와 U_{3p} , 식(32)에서 U_{1p} *과 U_{3p} *을 소거하는 것에 의해서 다음과 같이 α 에 관한 전술한 4차 방정식을 얻을 수 있다.

$$A\alpha^4 + B\alpha^2 + C = 0 \tag{16}$$

단,
$$A = C_{11}C_{44}$$

 $B = \rho_s \omega^2 (C_{11} + C_{44}) - 2C_{11}C_{44}k^2$
(17)

$$C = \rho_s \omega^2 \left(\rho_s \omega^2 - C_{11} k^2 - C_{44} k^2 \right) + C_{11} C_{44} k^4$$

이며, 근의 공식에 의해 그 해는

$$\alpha_1 = + \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{2} = -\left\{\frac{-B + \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{3} = +\left\{\frac{-B - \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{4} = -\left\{\frac{-B - \sqrt{B^{2} - 4AC}}{2A}\right\}^{\frac{1}{2}}$$
(18)

이다. β 에 관해서도 다음의 식이 얻어진다.

$$\beta^{2} = \omega^{2} \left\{ (k/\omega)^{2} - (\rho_{L}/C_{11}^{*}) \right\}$$
(33)

따라서

$$\beta = \pm \sqrt{k^2 - \frac{\rho_L \omega^2}{C_{11}^*}}$$
(34)

이다.

누설탄성표면파의 해를 생각하면 α에 대해서는 실수부가 +인 것 (+ x_3 방향으로 감쇠하는 것)을 선택하고 β에 대해서는 허수부가 + 인 것(- x_3 방향으로 전파하는 것)을 선택한다.

이상과 같이 하여 $\alpha_1^*, \alpha_2^*, \beta^*$ 가 구해졌다고 하면 일반적으로 고 체에서는 전술한 바와 같이

$$U_{1} = \begin{bmatrix} U_{1p}^{'}e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + U_{1p}^{''}e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}}\end{bmatrix}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$
$$U_{3} = \begin{bmatrix} U_{3p}^{'}e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + U_{3p}^{''}e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}}e^{i(kx_{1}-\omega t)}$$
(19)

이고, 액체에서는

$$U_1^* = U_{1p}^* e^{-\beta^* x_3} e^{i(kx_1 - \omega t)}$$

$$U_3^* = U_{3p}^* e^{-\beta^* x_3} e^{i(kx_1 - \omega t)}$$
(35)

가 된다. 한편 식(15)와 식(32)으로부터 고체에서는

$$\frac{U_{3p}^{'}}{U_{1p}^{'}} = \frac{C_{11}k^{2} - C_{44}(\alpha_{1}^{*})^{2} - \rho_{s}\omega^{2}}{-i(C_{12} + C_{44})k\alpha_{1}^{*}} \equiv P_{1}$$

$$\frac{U_{3p}^{''}}{U_{1p}^{''}} = \frac{C_{11}k^{2} - C_{44}(\alpha_{2}^{*})^{2} - \rho_{s}\omega^{2}}{-i(C_{12} + C_{44})k\alpha_{2}^{*}} \equiv P_{2}$$
(20)

이고, 액체에서는

$$\frac{U_{3p}^{*}}{U_{1p}^{*}} = \frac{C_{11}^{*} k^{2} - \rho_{L} \omega^{2}}{-C_{11}^{*} k \beta^{*}} \equiv q$$
(36)

이다. 이러한 P_1 , P_2 , q를 이용하여 식(19)와 식(35)를 고쳐 쓰면

$$< \mathfrak{L} \,\mathfrak{A} | \stackrel{\neq}{\mathfrak{S}} >$$

$$U_{1} = \begin{bmatrix} U_{1p}^{'} e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + U_{1p}^{''} e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}} \end{bmatrix} e^{i(kx_{1} - \omega t)}$$

$$U_{3} = \begin{bmatrix} P_{1} U_{1p}^{'} e^{-\alpha_{1}^{*}x_{3}} + P_{2} U_{1p}^{''} \end{bmatrix} e^{-\alpha_{2}^{*}x_{3}} e^{i(kx_{1} - \omega t)}$$

$$< \mathfrak{Q} | \mathfrak{A} | \stackrel{\neq}{\mathfrak{S}} >$$

$$U_{1}^{*} = U_{1p}^{*} e^{-\beta^{*}x_{3}} e^{i(kx_{1} - \omega t)}$$

$$U_{3}^{*} = q U_{1p}^{*} e^{-\beta^{*}x_{3}} e^{i(kx_{1} - \omega t)}$$

$$(37)$$

가 된다.

나) 경계조건 물과 고체의 경계면에서의 응력과 입자변위를 고려하면 $T_{13}|_{x_2=0}=0$

$$T_{33}|_{x_2=0} = T_{33}^*|_{x_2} = 0$$

$$U_{x_3} = U_{x_3}^*$$
(38)

의 조건이 만족되어야 한다. 식(21), 식(37)을 식(27), 식(29)에 각각 대입하고 위의 경계조건을 고려하면 첫 번째 조건에서부터

$$-\alpha_{1}^{*}U_{1p}^{'} - \alpha_{2}^{*}U_{1p}^{'} + ik(P_{i}U_{1p}^{'} + P_{2}U_{1p}^{'}) = 0$$
(23)
$$= 0$$

$$C_{12}ik(U_{1p}' + U_{1p}'') + C_{11}(-\alpha_1^* U_{1p}' P_1 - \alpha_2^* U_{1p}'' P_2)$$

$${}_{11}^*(ikU_{1p}^* - \beta^* q U_{1p}^*)$$
(39)

$$U_{1p}'P_1 + U_{1p}''P_2 = U_{1p}^*q (40)$$

행렬 형태로 위 식을 고쳐 쓰면

$$\begin{pmatrix} ikP_{1} - \alpha_{1}^{*} & ikP_{2} - \alpha_{2}^{*} & 0\\ iC_{12}k - C_{11}\alpha_{1}^{*}P_{1} & IC_{12}k - C_{11}\alpha_{2}^{*}P_{2} & -C_{11}^{*}(ik - \beta^{*}q)\\ P_{1} & P_{2} & -q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1p}'\\ U_{1p}''\\ U_{1p}''\\ U_{1p}^{**} \end{pmatrix} = 0$$

$$(41)$$

가 되고 자명해가 아닌 조건에서

$$\begin{vmatrix} ikP_1 - \alpha_1^* & ikP_2 - \alpha_2^* & 0\\ iC_{12}k - C_{11}\alpha_1^*P_1 & IC_{12}k - C_{11}\alpha_2^*P_2 & -C_{11}^*(ik - \beta^*q)\\ P_1 & P_2 & -q \end{vmatrix} = 0 \quad (42)$$

이다.

LSAW의 해는 식(16), 식(34), 식(42)을 연립하여 구할 수 있다. 그 러나 이러한 식으로부터 하나의 변수만의 식을 얻는 것은 대단히 곤 란하다. 따라서 실제로는 우선 k값을 주고 식(16)과 식(34)으로부터 α₁*, α₂*, β*를 구한 후 그 값을 식(42)에 대입하여 행렬식이 0이 되는 조건을 찾는다.

5. 2 계산 결과

실험에 의해 도출한 각 시료[용융석영, 알루미늄, 구리 및 Pyrex Glass]의 벌크파와 LSAW의 전파속도로부터 탄성텐서와 밀도를 이 론적으로 구하는데 있어서는 앞 절에서 기술한 이론을 역으로 적용 하는 방식을 택하였다. 즉, 탄성정수와 밀도로부터 표면파의 음속을 구하는 이론을 역으로 적용하여 종파, 횡파 및 표면파의 음속을 대입 하여 재료의 탄성텐서 및 밀도를 산출하였다. 각 재료의 문헌에 나와 있는 탄성정수 및 밀도와 실험에 의해서 구해진 탄성정수 및 밀도는 다음과 같고, 이를 정리하여 표 5에 정리하였다.

<SiO₂의 탄성 텐서>

문헌치

((7.85	1.61	1.61	0	0	0	
	1.61	7.85	1.61	0	0	0	
	1.61	1.61	7.85	0	0	0	× 10 ¹⁰ [<i>17</i> m ²]
	0	0	0	3.12	0	0	×10 [<i>1</i> // <i>m</i>]
	0	0	0	0	3.12	0	
	0	0	0	0	0	3.12	

(7.90	1.62	1.62	0	0	0					
1.62	7.90	1.62	0	0	0					
1.62	1.62	7.90	0	0	0	× 10 ¹⁰	[<u> </u>			
0	0	0	3.14	0	0	^10				
0	0	0	0	3.14	0					
0	0	0	0	0	3.14					
SiO ₂ 의 밀도 : ρ = 2200 [<i>kg</i> / m ³]										
실험값에 의한 계산치 : ρ = 2214 [<i>kg</i> / m ³]										

<구리의 탄성 텐서>

문헌치

(19.24	9.92	9.92	0	0	0	
	9.92	19.24	9.92	0	0	0	
	9.92	9.92	19.24	0	0	0	х 10 ¹⁰ Г <i>МЛ ат</i> ²]
	0	0	0	4.66	0	0	×10 [<i>1v</i> / <i>m</i>]
	0	0	0	0	4.66	0	
	0	0	0	0	0	4.66	

	(18.0	8.8	8.8	0	0	0			
	8.8	18.0	8.8	0	0	0			
	8.8	8.8	18.0	0	0	0	× 10 ¹⁰ [<i>1/1 m</i> ²]		
	0	0	0	4.59	0	0	^10 [<i>1v</i> / <i>m</i>]		
	0	0	0	0	4.59	0			
	0	0	0	0	0	4.59			
7	구리의	밀도	: p	= 8900) [<i>kg</i> /	m^3]			
신	실험값에 의한 계산치: ρ = 8905 [<i>kg m</i> ³]								

<알루미늄의 탄성 텐서>

문헌치

11.1	6.1	6.1	0	0	0)	
6.1	11.1	6.1	0	0	0	
6.1	6.1	11.1	0	0	0	× 10 ¹⁰ [<i>1</i> 7 m ²]
0	0	0	2.5	0	0	×10 [<i>1V</i> / <i>M</i>]
0	0	0	0	2.5	0	
0	0	0	0	0	$2.5^{/}$	

	(11.17	5.73	5.73	0	0	0		
	5.73	11.17	5.73	0	0	0		
	5.73	5.73	11.17	0	0	0	× 10 ¹⁰ [<i>11 m</i> ²	<i>λΠ ma²</i>]
	0	0	0	2.72	0	0	~10 [<i>1V</i> / <i>M</i>	T
	0	0	0	0	2.72	0		
	0	0	0	0	0	$2.72^{)}$		
Ó ĩ	말루미늄	의 밀도	: 1	p = 26	695 [<i>k</i>	g/m^3]	
くそ	실험값에	의한 계	산치 :	p = 28	364 [A	kg/m^3]	

<Pyrex *G*lass의 탄성 텐서> 문헌치

7.02	2.20	2.20	0	0	0	
2.20	7.02	2.20	0	0	0	
2.20	2.20	7.02	0	0	0	× 10 ¹⁰ [<i>M</i> m ²]
0	0	0	2.40	0	0	×10 [<i>1V</i> / <i>M</i>]
0	0	0	0	2.40	0	
0	0	0	0	0	2.40°	

		0	0	0	2.23	2.23	(7.10)	
		0	0	0	2.23	7.10	2.23	
[<i>17</i> ²]	× 10 ¹⁰	0	0	0	7.10	2.23	2.23	
	×10	0	0	2.43	0	0	0	
		0	2.43	0	0	0	0	
)	2.43	0	0	0	0	0	
	m^3]	[<i>kg</i> /	= 2230	: p] 밀도	Glass≏	Pyrex (F
	m^3]	[kg/.	= 2260	: p	계산치	의한	실험값에	<u>کر</u>

표 5. 탄성정수와 밀도의 이론적 계산 결과

구	분	문헌치	측정속도에의한 계산치	오차(%)
	$C_{11}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	7.85	7.82	0.38
요이저여	$C_{12}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	1.61	1.62	0.62
8848	$C_{44}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	3.12	3.21	2.88
	ρ [kg/m ³]	2,200	2,249	2.22
	$C_{11}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	11.10	11.17	3.60
아르피노	$C_{12}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	6.1	5.73	6.07
월구미뀸	$C_{44}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	2.50	2.72	4.00
	ρ [kg/m ³]	2,695	2,755	2.23
	$C_{11}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	19.24	18.0	6.44
그 리	$C_{12}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	9.92	8.8	11.29
ТЧ	$C_{44}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	4.66	4.59	1.50
	ρ [kg/m³]	8900	8905	0.06
	$C_{11}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	7.30	7.94	8.77
Dramour Class	$C_{12}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	2.2	2.23	1.36
Fyrex Glass	$C_{44}[*10^{10} \text{ N/m}^2]$	2.50	2.82	12.8
	ρ [kg/m³]	2,320	2,342	0.95

제 6 장 결론

본 연구는 종파, 횡파 및 누설 탄성표면파 속도를 하나의 트랜스듀 서에 의해 측정할 수 있는 광대역 전극분할형 PVDF 직선집속 초음 파 트랜스듀서를 제안하고 설계·제작하여, 용융석영 등 몇몇 시료에 대한 벌크파와 탄성표면파를 측정하였다. 측정된 값을 이론식에 적용 하여 시료의 재료 물성치(탄성계수, 밀도)를 이론적으로 계산하고 평 가하였다.

PVDF 트랜스듀서는 소개구각 구동을 통해 얻어지는 수신파열에서 근접한 종파와 횡파의 구분과 대개구각 구동에 의한 LSAW의 정확 한 측정을 위해 배면체를 압전성이 없는 벌크 PVDF로 제작함으로써 주파수 14.2[MHz], 대역폭 152%의 광대역 트랜스듀서를 구현할 수 있었다. 이는 KLM 등가회로에 의한 시뮬레이션 결과와 일치한다. 제 작된 프로브는 Rayleigh-Sommerfeld 회절 이론에 의해 음장해석을 수행한 결과, 소개구각 트랜스듀서의 초점심도 약 6.5mm이었고, 그 범위에서 벌크파를 측정하였다. 또한 대개구각 구동에 의한 Defocus 에 따른 LSAW를 측정, 이를 직접반사파로부터 분리하여 *z*-Δ*t* 곡선 을 구함으로써 그 속도를 쉽게 계산할 수 있었다. 벌크파와 LSAW의 속도는 표준치와 수 %내외의 오차로 정확하게 측정되었다.

최종적으로 각 시료에서 측정된 벌크파와 LSAW의 속도를 누설탄 성표면파 전파 이론에 따른 해석방식을 역으로 적용하여, 고체의 탄 성계수와 밀도를 계산하였다. 표에 나타난 바와 같이 Pyrex glass를 제외하면 측정치와 문헌치가 수% 이내로 일치하는 것을 볼 수 있다. 이상으로부터 단일의 전극분할형 직선집속 PVDF 트랜스듀서를 이 용하여 실용적인 범위에서 종파, 횡파, 그리고 LSAW 속도의 측정이 가능함을 확인할 수 있었으며, 이를 이용한 탄성정수 및 밀도를 이론 적으로 산출할 수 있음을 확인하였다.

향후 측정오차에 대한 정밀한 분석과 더불어 이방성 재료의 측정 등이 지속적으로 이루진다면 관련연구기관과 기업체의 재료 물성 측 정에 도움이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] Mason, W. P. and Thurston R. N., "Physical Acoustics -Principles and Methods-", Vol. 12. Academic Press, New York, (1976).

[2] Quate C. F., Atalar A., and Wickramasinghe, "Acoustic Microscope with Mechanical Scanning -a Review-", Proc. *IEEE*, Vol.67, pp.1092-1114, (1979).

[3] Weglein R. D. and Wilson R. G., "Characteristic Material Signatures by Acoustic Microscopy," *Elecron. Lett.*, Vol. 14, NO. 352, (1978).

[4] Kushibiki J. Chubachi, N., "Material Characterization by Line-Focus-Beam Acoustic Microscope," *IEEE* Trans. Sonics and Ultrason., Vol. SU-32, No.2, pp.189–212, (1985).

[5] Xiang, D., Hsu, N. N., and Blessing, *G.* V., "Thedesign, construction and application of a large aperture len-less line-focus PVDF transducer," Ultrasonics, Vol.34, pp.641-647, (1996).

[6] 윤혁준, 하강렬, 김무준, 윤종락, "PVDF 직선집속 초음파 트랜스 듀서에 의한 누설탄성표면파 속도 측정", 한국음향학회지 제 20권 1 호, pp.62-67. (2001). [7] Goodman J. W., "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill Co., pp. 42-54, (1968).

[8] Campbell and Jones, "A Method for Estimating Optimal Crystal Cuts and Propagation Directions for Excitation of Piezoelectric surface Waves," *IEEE* Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-15, NO. 4, pp. 209–217, (1968).

[9] Auld B. A., "Acoustic Fields and Waves in Solids," 2nd Ed.,Krieger Publishing Company, Malabar, (1990).

[10] 實吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, "超音波技術便覽", 7th *E*d., 日刊 工業新聞社, 東京, (1989).

감사의 글

'97년 대학원 입학이후 개인적인 사정으로 인한 3번의 휴학을 포함 해 너무 오랜 기간을 방황하고 졸업 포기까지 생각한 저에게 힘들 때마다 충고와 격려로 저의 앞날을 이끌어주시고, 부족하나마 이 논 문을 완성할 수 있도록 도와주신 하강렬 교수님께 먼저 너무나 감사 한 마음을 전합니다. 또한 멀리 있다는 핑계를 대신하여 학사 행정부 터 실험까지 여러모로 수고해준 김상윤 군과 김정순 박사 그리고 김 동현 군에게 감사의 마음을 전하며, 회사의 배려로 10일 가량을 학교 에서 논문을 정리하는 동안 같이 고민하고 조언을 아끼지 않았던 양정원 군에게도 감사한 마음을 전합니다.

그리고 바쁜 회사 일정에도 불구하고 이 논문을 완성할 수 있도록 배려해주신 아이에스텍(주) 유갑상 사장님 이하 임직원 여러분과 바 쁜 업무에도 불구하고 수정 작업을 도와준 최규훈 과장, 채민구 대리 에게도 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 힘든 여건 속에서도 묵묵히 위안이 되어준 아내와 두 딸 수빈, 수진 그리고 부모님과 가족들에게 이 작은 결실을 바칩니 다.