

## 음향현미경의 $V(z)$ 곡선을 이용한 재료의 특성에 관한 연구

### A study on the characteristic of material using $V(z)$ curve of acoustic microscope

\*문     건 (Moon, G.)  
\*\*고   대   식 (Ko, D. S.)  
\*\*전   계   석 (Jun, K. S.)

#### 요     약

본 논문에서는 음향현미경의  $V(z)$  곡선을 해석하고 실험결과와 비교 고찰하였으며  $V(z)$  곡선과 재료의 탄성 특성사이의 관계를 연구분석하였다.  $V(z)$  곡선의 이론적인 해석은 angular spectrum과 ray optics 이론을 사용하였고 실험은 동작주파수가 3 MHz 인 음향현미경을 구성하여 행하였다. 실험결과  $V(z)$  곡선은 재료마다 고유의 형태를 나타내며  $V(z)$  곡선에서 극대치 사이의 간격은 재료에서 Rayleigh 파의 음향속도를 산출하는 데 이용될 수 있음을 보였다.

#### ABSTRACT

In this paper,  $V(z)$  curve has been analyzed theoretically and compared with the experimental result, and the relation between the  $V(z)$  curve and the material characteristic has been studied. Angular spectrum and ray optics theory have been used for theoretical analysis and the acoustic microscope operating at a center frequency of 3 MHz has been used for experiment.

In experiment, it has been shown that each material has a  $V(z)$  curve of a unique form and the interval of dips appearing in the  $V(z)$  curves have been used to determine the Rayleigh wave velocity.

\* 제주대학교 통신과  
\*\* 경희대학교 전자공학과

## I. 서 론

기계적 주사방법을 이용한 음향현미경 시스템은 1973년 미국의 Quate와 Lemons에 의하여 처음으로 개발되었으며 근래에 와서 이를 이용한 생체실험, 비파괴 검사, 재료특성분석 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(1, 2, 5)</sup>.

음향현미경에서  $V(z)$  곡선은 음향변환기의 반사전압을 초점평면과 샘플사이의 거리인  $z$ 의 함수로 나타낸 것으로서  $V(z)$  곡선은 재료마다 고유한 형태를 나타내기 때문에 AMS (Acoustic Material Signature) 라고도 불리우며 이것은 재료의 물리적 성질 및 내부결함 등에 관한 정보를 포함하고 있으므로 재료의 특성조사에 이용될 수 있다<sup>(3, 4)</sup>.

$V(z)$  곡선에 대한 이론적인 해석은 1978년 Atalar가 angular spectrum을 이용하여 해석하였고 1984년 Bertoni는 ray optics 이론을 이용하여 해석하였으나 angular spectrum으로 해석하는 경우 렌즈의 수차를 고려할 수 없고 ray optics 이론으로 해석하는 경우 반사계수를 구하기가 어려웠다. 최근 Liang은 위의 두가지 이론을 상호보완하여  $V(z)$  곡선을 해석함으로써 수차 및 반사계수에 대한 오차를 최소화 하였다<sup>(1, 6, 8)</sup>.

본 연구에서는 Liang의 이론을 이용하여  $V(z)$  곡선을 해석하고 이에대한 시뮬레이션과 실험을 통하여  $V(z)$  곡선과 재료의 탄성 특성사이의 관계를 고찰하였다. 실험을 위하여 동작주파수가 3MHz인 음향현미경을 구성하였고  $z$  축에 대한 이동은 마이크로미터를 수동으로 조작하였으며 샘플로는 내부결함이 없는 알루미늄과 유리, 그리고 스테인레스 등을 선택하였다. 내부결함이 있는 경우  $V(z)$  곡선의 변화를 조사하기 위하여 100원 주화의 한쪽 면을 grind하여 요철을 제거한 것을 샘플로서 선택하였

고  $V(z)$  곡선을 구한 후 이를 이용하여 보다 향상된 고체내부의 음향 이미지를 얻을 수 있음을 보였다.

## II. $V(z)$ 곡선

### II-1. $V(z)$ 곡선의 이론적인 해석<sup>(4)</sup>

$V(z)$  곡선의 이론적인 해석을 위하여 그림 1 과 같은 기하학적 모형을 사용할 수 있다.

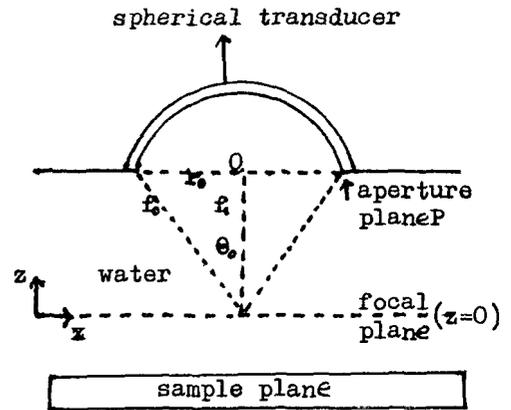


그림 1 구면형 음향렌즈  
Spherical acoustic lens.

그림 1에서 직경  $2r_0$ 인 음향변환기에 의하여 방사되는 음향장은 반경  $r_0$ 인 원형개구면을 통과하는 구면파에 의한 음향장과 동가이므로 모든 음향장이 시간에 대해 정현적으로 변화한다면

$$\psi(r) = P(r) \frac{\exp[ik\sqrt{r^2 + f_0^2}]}{\sqrt{r^2 + f_0^2}} \quad (1)$$

여기서  $f_0 = f_0 \cos \theta_0$  이고  $P(r)$  은 렌즈의 Pupil 함수로서 렌즈의 수차와 렌즈의 비균일 상태를 고려하

는 함수이며 이상적인 렌즈인 경우는 단순한 값을 갖는다.

$$P(r) = \begin{cases} 1 & 0 < r < r_0 \\ 0 & r > r_0 \end{cases}$$

식(1)을 Hankel 의 변환식을 이용하여 표현하면 구경평면에서의 angular spectrum A(k<sub>r</sub>)은

$$A(k_r) = \int_0^\infty P(r) \frac{\exp[jk\sqrt{r^2+f_1^2}]}{\sqrt{r^2+f_1^2}} J_0(k_r r) r dr \quad (2)$$

여기서 k<sup>2</sup> = k<sub>z</sub><sup>2</sup> + k<sub>r</sub><sup>2</sup>이고 변환기의 직경은 일반적으로 수파장 미만이므로 1st kind, 0 order의 Bessel 함수 J<sub>0</sub>(k<sub>r</sub>r)은 다음과 같다.

$$J_0(k_r r) \approx \frac{\cos[-j(k_r r - \pi/4)] + \exp[j(k_r r - \pi/4)]}{\sqrt{2\pi k_r r}} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면

$$A(k_r) = \int_0^\infty P(r) \cdot \frac{\exp[j\psi_1(r)] + \exp[j\psi_2(r)]}{\sqrt{2\pi k_r r (r^2 + f_1^2)}} r dr \quad (4)$$

여기서

$$\psi_1(r) = (k\sqrt{r^2+f_1^2} - k_r r + \pi/4)$$

$$\psi_2(r) = (k\sqrt{r^2+f_1^2} + k_r r + \pi/4)$$

$\psi_1(r)$ 의 첫번째 항의 위상을 고려할 때 A(k<sub>r</sub>)의 적분에 관계하는 것은  $\psi_1'(r) = 0$  되는 부근의 값이므로 이 영역을 벗어난 곳의 음향장은 무시할 수 있다. 그러므로

$$A(k_r) = \left( \frac{2\pi}{|\psi_1''(r')|} \right)^{1/2} P(r') \frac{\exp[jk\psi_1(r')]}{\sqrt{2\pi k_r r' (r'^2 + f_1^2)}} \frac{k_r}{k_z} f_1 \quad (5)$$

여기서

$$\psi_1''(r') = \frac{k}{\sqrt{r'^2+f_1^2}} - \frac{k r'^2}{(r'^2+f_1^2)^{3/2}} = \frac{k_z^2}{k^2 f_1}$$

이고 r'는  $\psi_1'(r) = 0$  되는 지점의 r을 가리킨다.

축점에서 z 만큼 떨어진 평면에서의 angular spectrum은 축점평면에서의 값에 위상항만을 고려해 주면 되므로

$$A(k_r) = P(k_r) k \exp[jk_z f_1] / k_z \quad (6)$$

따라서 Kino와 Auld의 가역정리<sup>(4)</sup>를 이용하여, 최종출력 V(z)을 구하면.

$$V(z) = \frac{\int P^2(r/f_0) R(r/f_0) \frac{\exp[-j2kz\sqrt{1-(r/f_0)^2}]}{\sqrt{1-(r/f_0)^2}} r dr}{\int P^2(r/f_0) \frac{r dr}{\sqrt{1-(r/f_0)^2}}} \quad (7)$$

식(7)에서 R(r/f<sub>0</sub>)는 재료의 반사계수로서 재료의 물리적 성질과 밀접한 관계를 갖고 있으며 축점평면으로부터의 거리z와 함께 V(z) 곡선의 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있다. 식(7)은 Atalar의 해석에 비하여<sup>(6)</sup> 렌즈의 수차를 고려하여 있으며 이상적인 평면반사기에 대한 focal depth Δz는

$$\Delta z = \frac{0.45 \lambda_n}{1 - \cos \theta_n} \text{로서 Atalar의 } \Delta z = \frac{0.5 \lambda_n}{1 - \cos \theta_n} \text{에 비하여 } \frac{0.05 \lambda_n}{1 - \cos \theta_n} \text{의 차이를 보이고 있다.}$$

또 V(z) 곡선의 극대치 사이의 간격 Δz는

$$\Delta z = \frac{\lambda_R}{\sin \theta_R} \cdot \frac{1 + \cos \theta_R}{2} \quad (\text{여기서 } \lambda_R : \text{재료의}$$

Rayleigh 파의 파장,  $\theta_R$  : Rayleigh 파의 임계각)이므로 재료의 Rayleigh 음향속도는

$$V_R = V_0 / [1 - (1 - V_0/2 \cdot f \cdot \Delta z)^2]^{1/2} \quad (8)$$

식(8)에서  $V_0$ 는 결합용액의 음향속도(1500m/sec),  $V_R$ 은 재료의 Rayleigh 파 음향속도이고  $f$ 는 동작주파수이다.

II - 2.  $V(z)$  곡선의 시뮬레이션

그림 2는 재료의 특성에 의한  $V(z)$  곡선의 변화를 고찰하기 위하여 재료의 Rayleigh wave 변환각을 변화시켜 가면서 시뮬레이션 한 결과이다. 이때 각각의 조건은 실험결과와 비교하기 위하여 음향현미경의 동작주파수 3 MHz, 초점거리 16mm, F/number

1.0으로 하였고 샘플로는 알루미늄과 구리를 선택하였으며 이때 알루미늄과 구리의 Rayleigh 파 속도는 각각 2906m/sec, 2250m/sec 이고 Rayleigh 파 변환각은 각각 30°, 42° 이다.

그림 2에서 주기성을 가진 좌측영역은 재료에 대한 각종 정보를 포함하게 되므로 이영역을 AMS 영역이라 부르며 시뮬레이션결과 재료의 Rayleigh 파 변환각 즉 재료의 Rayleigh 파 속도의 변화에 따라  $V(z)$  곡선의 형태와 극대치 사이의 간격  $\Delta z$ 가 변화하는 것을 볼 수 있고 특히 Rayleigh 파 속도가 몰수록  $\Delta z$ 는 증가하는 것을 알 수 있다.

III. 실험 및 고찰

$V(z)$  곡선의 실험을 위하여 구성한 실험장치의 불럭선도는 그림 3과 같다.

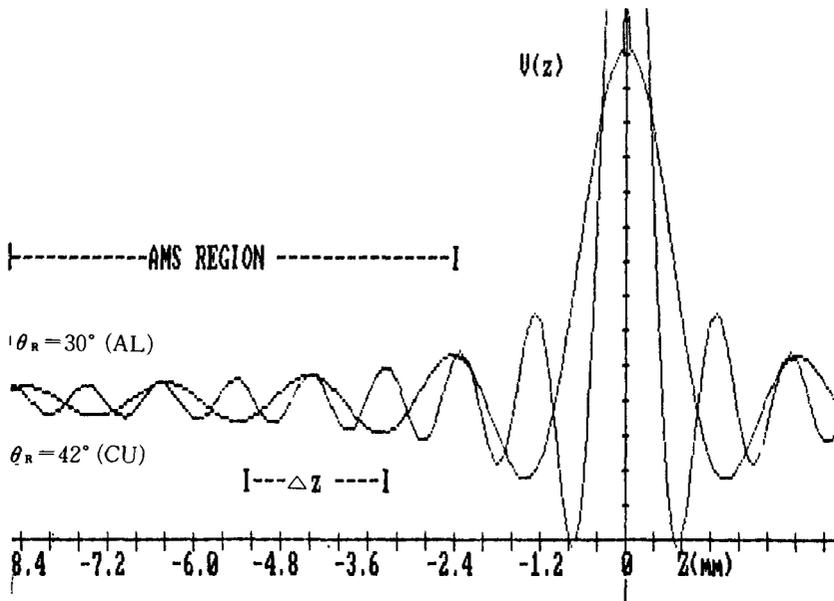


그림 2  $V(z)$  곡선의 시뮬레이션과 AMS 영역  
Simulation of  $V(z)$  curve and AMS region.

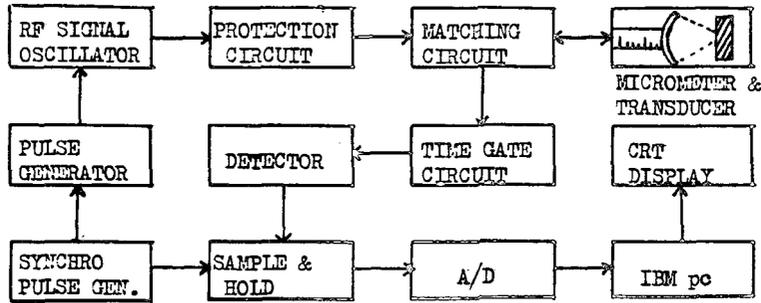


그림 3 실험장치 구성도  
Block diagram of experimental equipment.

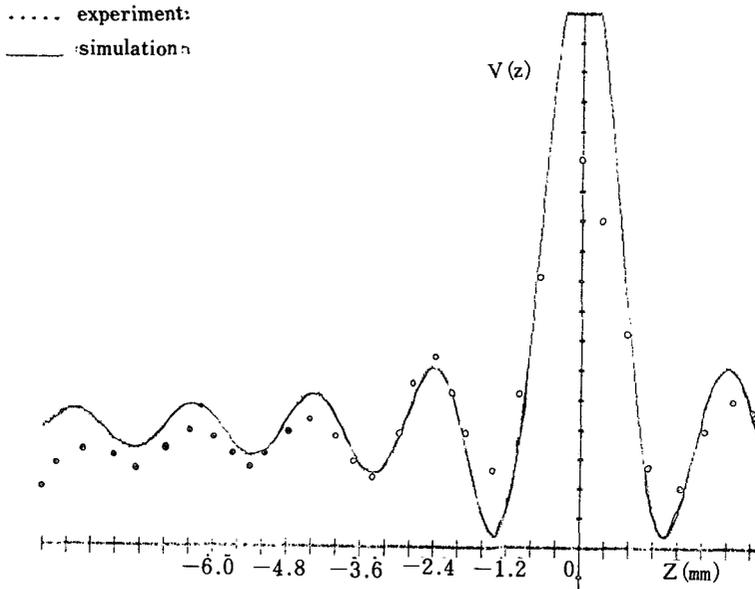


그림 4 알루미늄에 대한  $V(z)$  곡선 ( $v_n = 2906\text{m/sec}$ )  
 $V(z)$  curve of aluminum sample.

그림 3에서 동작주파수는 음향변환기의 중심주파수인 3 MHz로 하였고 음향변환기의 초점거리는 16 mm이고 F/number는 1.0이다. 음향변환기에 인가하는 tone burst파는 다중반사의 중첩을 피하기 위하여  $2\mu\text{sec}$  펄스폭을 사용하였고 1차 반사 신호만을 time gate 하여 선형검파하였으며 음향변환기는

$z$  축방향으로 defocus 시켜가면서 각 지점에서 반사되어온 반사전압을 모니터에 나타내게 하였다.

그림 4는 내부결함이 없고 두께가 1cm인 원판형 알루미늄의 표면을 polishing 하여 샘플로 선택하고 그림 3의 실험과정을 통하여 얻어진  $V(z)$  곡선이다.

그림 4의 AMS 영역에서 6mm 정도에 걸쳐 4개

의 극대치를 보여주고 있고  $\Delta z$ 는 1.75mm이며 식(8)에 의하여 알루미늄의 속도를 산출하면 2913m/sec로서 문헌에서<sup>19)</sup> 주어진 알루미늄에서의 Rayleigh 파의 음향 속도(2906m/sec)와 거의 일치함을 알수 있다.

그림 5-a는 유리 샘플, 그림 5-b는 스테인레스 샘플을 선택하고 같은 과정을 통하여 얻어진  $V(z)$  곡선으로서 유리(2897m/sec)와 스테인레스(2891m/sec)의 음향속도는 커다란 차이가 없기 때문에  $\Delta z$ 는 미소한 변화만을 나타내었으나 그 진폭에서 다소 커다란 변화가 있음을 볼 수 있다. 이와 같이  $V(z)$  곡선은 샘플에 대한 탄성특성을 보다 신속하게 측정하는데 이용될 수 있는 것이다.

그림 6은 100원 주화의 환면을 grind하여 요철을 제거한 후 샘플고정대에 부착시키고 실험하였을 때 얻어진  $V(z)$  곡선으로서 샘플의 두께는 1mm 정도이었다. 그림 6은 두께가 크고 내부결함이 없는 샘플에서 얻어진  $V(z)$  곡선의 형태에 비하여 커다란 차

이를 보여주고 있으며  $z = -2\text{mm}$  정도에서 커다란 반사전압을 나타내었다. 이것은 결합용액과 샘플의 경계면에서 snell의 법칙에 의하여 굴절된 음향파와 내부촉점이 음향임피던스 차이가 발생하는 샘플이면과 일치한 결과이며 이를 고려하여 음향변환기를 2mm defocus시킨 다음 영상처리하였을 때 얻어진 음향이메이지는 그림 7과 같다. 그림 7에서 샘플전체에 대한 명확한 영상이 나타나지 않은 것은 grind하는 과정에서 샘플의 두께를 고르게 하지 못한 것과 모니터의 그레이레벨이 16정도로 한정되었기 때문이지만 defocus length를 0mm, 1mm, 2mm, 3mm로 변화시켜 가면서 행한 실험을 통하여 얻어진 음향이메이지 중에서는 가장 우수한 영상이다. 이와 같이 층상구조물(layered structure)에서 그층의 두께를 알 수 없다면 층의 내부에 대한 명확한 영상을 얻을 수 없고 명확한 영상을 얻기 위하여는 음향현미경의 defocused length를 여러번 변화시켜가면서 영상처리해야 하는 번거로움이 있을 것이다.

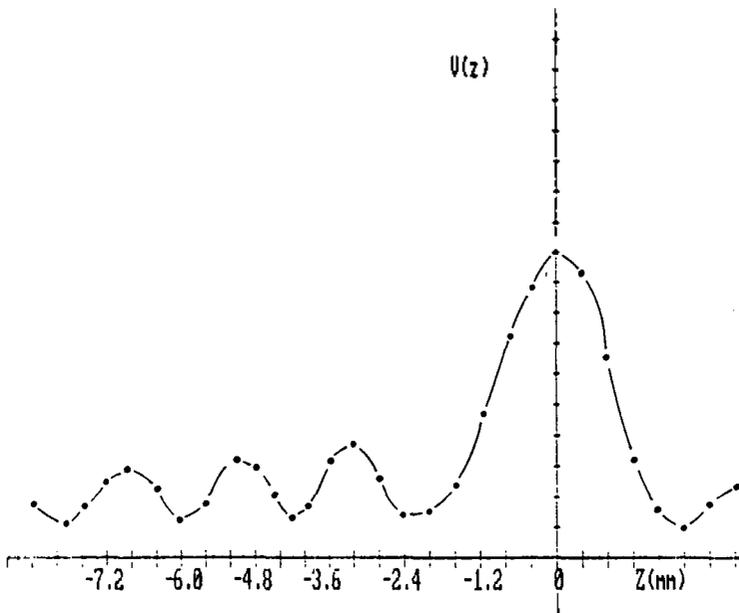


그림 5-(a) 유리에 대한  $V(z)$  곡선 ( $V_s = 2897\text{m/sec}$ )  
 $V(z)$  curve of glass.

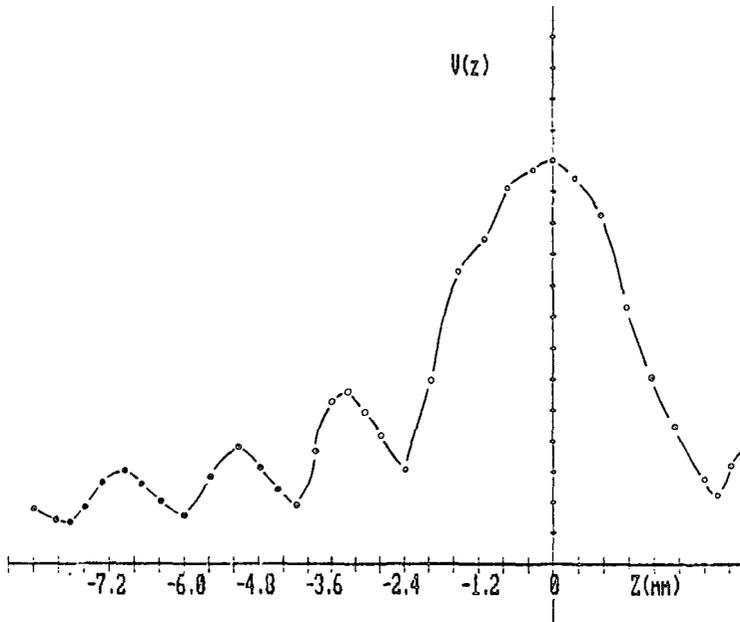


그림 5-(b) 스테인레스에 대한  $V(z)$  곡선 ( $V_R=2891\text{m/sec}$ )  
 $V(z)$  curve of stainless steel.

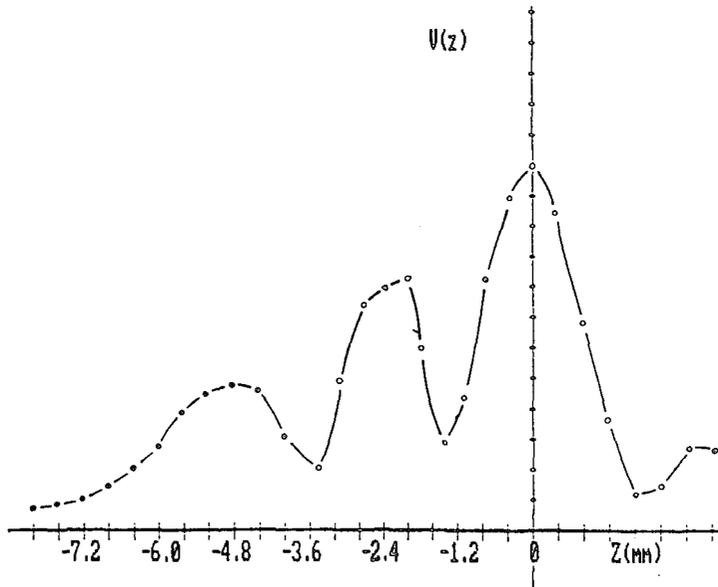


그림 6 100 원 주화에 대한  $V(z)$  곡선  
 $V(z)$  curve of 100 Won coin.

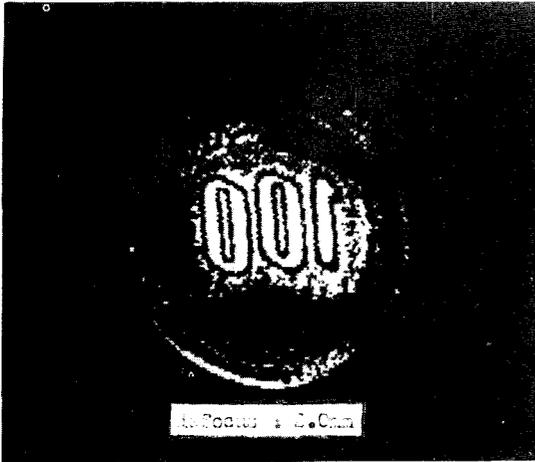


그림 7 100원 주화 이면에 대한 음향 이미징  
Acoustic image for the back surface of 100  
Won coin.

이와같이  $V(z)$  곡선은 재료에 대한 AMS 뿐만 아니라 층상구조물의 비파괴 검사분야에도 응용할 수

#### IV. 결 론

본 연구에서는 음향현미경의  $V(z)$  곡선을 해석하고 재료의 탄성적 특성 및 재료내에 존재하는 결함과  $V(z)$  곡선사이의 관계를 고찰하였다.

$V(z)$  곡선의 이론적인 해석을 통하여  $V(z)$  곡선은 재료의 반사계수와 초점평면으로부터 샘플까지의 거리  $z$ 의 함수로서 재료마다 고유의 형태를 나타내며 특히 극대치 사이의 간격은 재료의 음향속도와 밀접한 관계를 갖고 있음을 알수 있었다.

동작주파수 3 MHz인 음향현미경을 이용하여 행한 실험결과, 알루미늄 및 유리, 그리고 스테인레스의  $V(z)$  곡선은 각각 그림 4, 그림 5와 같이 나타났으며 알루미늄의  $V(z)$  곡선에서 극대치사이의 간격은 1.75mm이며 이를 이용한 알루미늄의 Rayleigh 파의 속도는 2913m/sec로써 문헌에서 주어진 결과

와 0.22%의 오차만을 보였고 본실험의 경우 각 샘플에 대한 평균적 오차는 1.5% 정도이었으며 이것은  $z$  축을 수동으로 조작하면서 측정한 때문으로 분석된다.

끝으로 본 연구에서는 내부에 결함이 있을 경우  $V(z)$  곡선의 변화를 고찰하기 위하여 100원 주화를 샘플로 선택하고 실험을 행한 결과 그림 6과 같이 나타났으며 이를 이용하여 고체 내부의 영상을 보다 쉽게 얻을 수 있음을 보였다. 이와같이  $V(z)$  곡선은 재료의 AMS 등의 탄성 특성조사뿐만 아니라 각종 층상구조물의 비파괴 검사에도 이용할 수 있으며 앞으로  $V(z)$  곡선을 이용한 layer의 두께 측정과 crack size 측정등에 관한 연구가 계속되어야겠다.

#### 참 고 문 헌

1. 문건, 고대식, 전계식, "반사형 음향 현미경을 이용한 비파괴검사 기술에 관한 연구" 한국음향 학회지. 6권, 3호, pp. 24-30. 1987.
2. Gordon S.K. "Acoustic devices and analog signal processing" Edward L. Gizton Laboratory Stanford Univ., pp.1-20, 1983.
3. J. Kushibiki, "Theoretical analysis of  $V(Z)$  curves measured by acoustic line focus beam" IEEE Ultrasonics symposium. No.5607, pp.623-628, 1982.
4. G. S. Liang, "Material characterization by inversion of  $V(Z)$ " IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, vol.su-32, No.2, pp.213-223, 1985.
5. A. Atalar, "Acoustic reflection microscope" Ph.D. dissertation, Stanford Univ. pp.1-117, 1978.
6. A. Atalar, "An angular spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy" J. Appl. Phys., vol.49, pp.5130-5139, 1978.
7. D. Bennett, "Precise phase measurements with the acoustic microscope" IEEE Trans. Sonic and Ultrasonics, vol.su-32, No.2. 1985.
8. H. Bertoni. "Ray optical evaluation of  $V(z)$

in the reflection acoustic microscope" IEEE Trans. Sonic and Ultrasonics, vol.su-32, No.2, pp.105-116, 1984.

9. L. Adler, "Backscattering of ultrasonic leaky waves from liquid-solid interfaces" Review of progress in quantitative NDE, 1984.

10. H.K.Wickramasinge "Scanning acoustic microscopy" A review, Jour. of microscopy, vol.1, No.129, pp.63-73, 1983.

11. G.S. Kino, "The application of reciprocity theory to scattering of acoustic waves by flaws" Appl. Phys., Lett, Vol.45, No., pp.848-850, 1984.

- ▲문 전 6 권 3 호 참조
- ▲고 매 식 6 권 3 호 참조
- ▲전 계 석 1 권 1 호 참조