

음향파를 이용한 금속 부식상태 판별에 관한 연구

문 건*

A Study on the Discrimination of Metal Corrosion State Using the Acoustic Wave

Gun Moon*

ABSTRACT

On this study, constructed the reflective acoustic detecting system using 15MHz acoustic transducer. The most difficult problem in metal substance is to discriminate the corrosion state using none destructive method. As the test samples, the six 100 won coins which are issued on the different years are used. The experimental results showed the distinct difference among the coin's acoustic signals accorded to its issued years. I caught the common regulation in acquisited acoustic signals and convinced this technique to be very useful in corrosion discrimination of the metal substances on none destructive testing.

Key words : Acoustic, metal, corrosion, discrimination, none destructive

1. 서 론

기계적 주사방법을 이용한 음향현미경 시스템은 1973년 미국의 Quate 와 Lemons에 의하여 처음으로 개발되었으며 근래에 와서 이를 이용한 생체실험, 비파괴검사, 재료의 특성분석 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 그러나 국내에서 이 분야의 연구가 매우 미약한 실정이며 그나마 초보적인 수준에 그치고 있다.

음향현미경에서 $V(z)$ 곡선은 음향변환기의 반사전압을 초점 평면과 샘플사이의 거리인 Z 의 함수로 나타낸 것으로 $V(z)$ 곡선은 재료마다 고유한 형태를 나

타내기 때문에 AMS(Acoustic Material Signature)라고도 불리며 이것은 재료의 물리적 성질 및 내부결함 등에 관한 정보를 포함하고 있으므로 재료의 특성조사에 이용할 수가 있다. 특히 금속의 산화로 인하여 변질이 되면은 탄성계수 및 음향저항이 변화하게 되며 이 변화량을 음향파로 검출하면은 금속의 부식정도를 판별할 수 있다.^{3,4)}

$V(z)$ 곡선에 대한 이론적인 해석은 1978년 Atalar가 Angular spectrum을 이용하여 해석하였으나, Angular spectrum으로 해석하는 경우 렌즈의 수차를 고려할 수 없고, Ray optics 이론으로 해석하는 경우 반사계수를 구하기가 어려웠다. 근래에 Liang은 위의 두 가지 이론을 상호 보완하여 $V(z)$ 곡선을 해석하므로서 수차 및 반사계수에 대한 오차를 최소화하였다.^{5,6)}

본 연구에서는 Liang의 이론을 이용하여 $V(z)$ 곡선

* 제주대학교 통신공학과, 산업기술연구소
Dept. of Telecommunication Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

을 해석하여 이에 대한 시뮬레이션과 실험을 통하여 V(z) 곡선과 재료의 탄성특성 사이에 관계를 고찰하였고, 이 고찰 결과를 이용하여 금속의 내부의 음향영상을 검출하여 변형여부를 판단하는 기준으로 이용하였다. 실험을 위하여 중심주파수가 15MHz 인 구면형 변환자를 사용하여 얻은 음향신호를 비교 분석하여 금속의 부식정도를 판별하는 데 이용하고자 한다.^{7,8)}

II. 이 론

V(z) 곡선의 이론적인 해석을 위하여 Fig.1 과 같은 기하학적 모형을 사용하였고 이 해석에 사용한 기호는 다음과 같다.

- r : 변환자 개구면 반경
- f₀ : 변환자의 초점거리
- z : 변환자와 샘플과의 거리
- Ψ : 음향장
- P : Pupil 함수
- θ : 입사각
- k : 전파정수
- R : 반사계수
- θ_R : Rayleigh 입사각
- λ_R : Rayleigh 파장

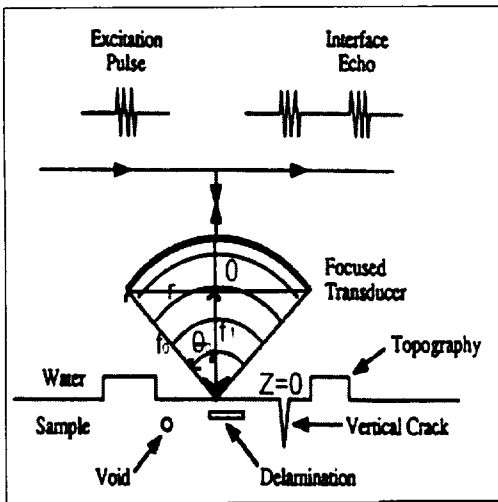


Fig. 1 Spherical acoustic transduce

Fig. 1에서 직경 2r₀ 인 음향변환기에 의하여 방사되는 음향장은 반경 r₀ 인 원형 개구면을 통과하는 구면파에 의한 음향장과 등가이므로 모든 음향 장이 시간에 대해 정현적으로 변화한다면 음향장은 다음과 같이 된다.^{3,4,5)}

$$\varphi(r) = P(r) \frac{\exp[jk\sqrt{r^2 + f_1^2}]}{\sqrt{r^2 + f_1^2}} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 f₁ = f₀ cos θ₀ 이고 P(r)는 렌즈의 Pupil 함수로서 렌즈의 수차와 렌즈의 비균일 상태를 고려하는 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 Hankel의 변환식을 이용하여 표현하면 구경 평면에서의 Angular spectrum A(k_r)는 다음과 같게 표시할 수 있다.

$$A(k_r) = \int P(r) \frac{\exp[jk\sqrt{r^2 + f_1^2}]}{\sqrt{r^2 + f_1^2}} J_0(k_r r) \cdot r \cdot dr \dots\dots(2)$$

여기서 k² = k_r² + k_z² 이고 변환기의 직경은 일반적으로 수파장 미만이므로 1종 0순차의 Bessel 함수 J₀(k_rr)은 다음과 같이 된다.

$$J_0(k_r r) = \frac{\exp[-j(k_r r - \pi/4)] + \exp[j(k_r r - \pi/4)]}{\sqrt{2\pi \cdot k_r r}} \dots\dots(3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 Angular spectrum식은 다음과 같이 된다.

여기서

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

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

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

Ψ₁(r)의 첫 번째 항의 위상을 고려할 때 A(k_r)의 적

분에 관계하는 것은 $\Psi_1(r)=0$ 되는 부근의 값이므로 이 영역을 벗어난 곳의 음향장은 무시할 수 있다. 이렇게 정리하면 다음과 같이 된다.

$$A(k_r) = \sqrt{\frac{2\pi}{|\Psi_1'(r)|}}$$

$$P(r) = \frac{\exp[j\Psi_1(r)]}{\sqrt{2\pi \cdot k_r \cdot (r^2 + f_1^2)}} \cdot \frac{k_r}{k_z} \cdot f_1 \dots (5)$$

여기서

$$\Psi_1'(r) = \frac{k}{\sqrt{r^2 + f_1^2}} - \frac{k_r^2}{(r^2 + f_1^2)^{3/2}} = \frac{k_r^2}{k^2 f_1}$$

이고 r 는 $\Psi_1(r)=0$ 이 되는 지점의 r 을 가리킨다. 초점에서 z 만큼 떨어진 평면에서의 Angular spectrum은 초점 평면에서의 값에 위상항만을 고려해 주면 되므로 식을 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

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

따라서 Kino 와 Auld의 가역정리를 이용하여 최종 출력 $V(z)$ 를 구하면 다음과 같이 된다. ³⁵⁾

$$V(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} Z^2(r/f_0) \cdot R(r/f_0) \cdot \frac{\exp[-j2k_z \sqrt{1-(r/f_0)^2}] \cdot r \cdot dr}{\sqrt{1-(r/f_0)^2}}}{\int_{-\infty}^{\infty} Z^2(r/f_0) \cdot \frac{r \cdot dr}{\sqrt{1-(r/f_0)^2}}} \dots (7)$$

식(7)에서 $R(r/f_0)$ 은 재료의 반사계수로서 재료의 물리적 성질과 밀접한 관계를 갖고 있으며 초점 평면으로부터의 거리 z 와 함께 $V(z)$ 곡선의 중요한 요소로 작용함을 알 수 있다. 식(7)은 Alalar의 해석에 비하여 렌즈의 수차를 고려하고 있으며 이상적인 평면반사에 대한 focal depth Δz 는 다음과 같다. ^{6,8)}

$$\Delta z = \frac{0.45 \lambda_R}{1 - \cos \theta_R}$$

로서 Angular의

$$\Delta z = \frac{0.5 \lambda_R}{1 - \cos \theta_R}$$

에 비교하여

$$\Delta z = \frac{0.05 \lambda_R}{1 - \cos \theta_R}$$

의 차이를 보이고 있다.

또 $V(z)$ 곡선의 극대치 사이의 간격 Δz 는

$$\Delta z = \frac{\lambda_R}{\sin \theta_R} \cdot \frac{1 + \cos \theta_R}{2}$$

가 되며, 재료의 Rayleigh 음향속도는 다음과 같이 된다.

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

식(8)에서 V_0 은 결합용액의 음향속도(물: 1500m/s) 이고, f 는 동작주파수이다.

Fig. 2는 재료의 특성에 의한 $V(z)$ 특성곡선의 변화를 고찰하기 위하여 재료의 Rayleigh wave 변환각을 변화시켜서 시뮬레이션한 결과이다. 이때 각각의 조건은 실험결과와 비교하기 위하여 음향현미경의 동작주파수는 15MHz, 초점은 24mm인 변환자로 하였고 탄성계수와 속도는 알루미늄과 구리를 선택하여 구한 것이다.

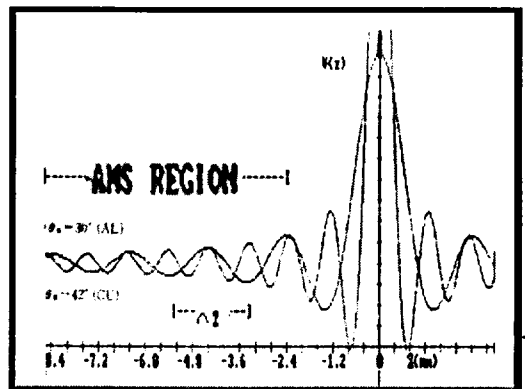


Fig. 2 Simulation of $V(z)$ Al & Cu

Fig. 3은 동일한 재료인 백동의 값을 사용하여 다만 반사계수의 변화에 따른 $V(z)$ 특성곡선의 시뮬레이션한 것으로 극소, 극대점의 위치는 같으나 세력이 틀리게 나타남을 알 수 있다.

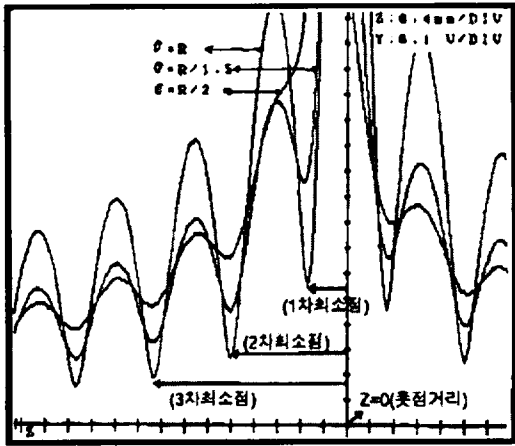


Fig. 3 Variation of $V(z)$ Curve by R

III. 시스템 구성

Fig. 4는 본 실험을 위하여 구성한 시스템 구성도이다. 샘플에 임펄스를 가해서 반사신호를 게이트 신호로 추출하여 신호 처리하여 음향영상을 얻을 수 있도록 구성하였다.⁹⁾ 먼저 사용한 음향변환자는 재료가 ZnO 이고 중심주파수가 15MHz 이며 초점이 24mm 이고 F number 는 2 가 되도록 설계하였다. 게이트 임펄스 신호의 폭은 65ns 이고 진폭은 10Volt를 사용하여 하였다.^{10,11)}

Fig. 5는 사용한 음향변환자의 임펄스 응답특성 파형을 보여주고 있으며, Fig. 6은 음향변환자의 주파수 스펙트럼을 나타내고 있으며 여기서 대역폭의 30% 정도로 광대역 특성을 갖음을 알 수 있다.

IV. 실험 및 분석

먼저 금속의 부식상태를 비교 분석하기 위한 샘플로서는 1979, 1983, 1988, 1993, 1997, 1999년도에 발행된

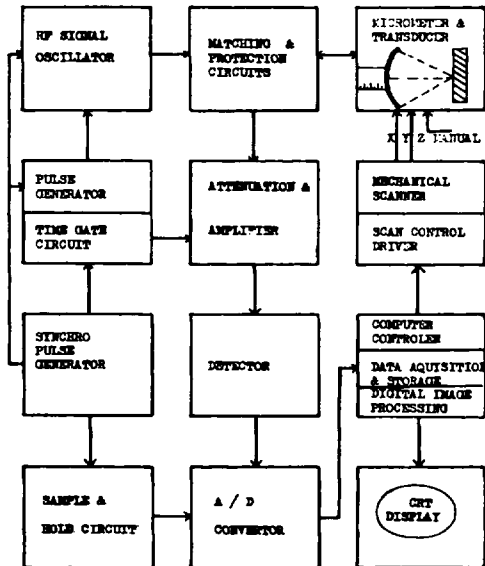


Fig. 4 System block diagram

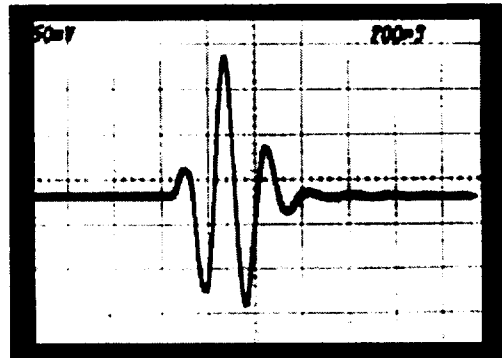


Fig. 5 Impulse Response of Transducer

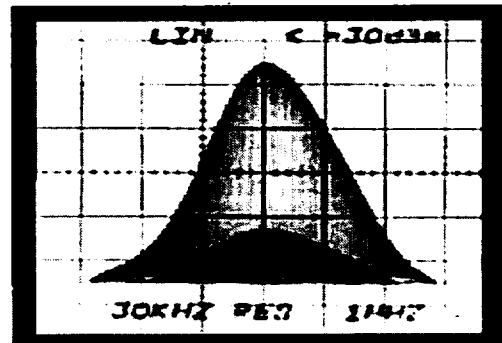


Fig. 6 Frequency spectrum of Transducer

100원짜리 동전 6개를 사용하였다. 동전의 재료는 백동으로서 산화가 잘되지 않고 부식이 잘되지 않으므로 육안으로는 부식정도를 판별하기가 어렵고 또한 다른 기술적인 방법도 없는 실정이다. 먼저 부식이 되면은 탄성계수와 음향임피던스의 변화를 갖어오게되므로 이것이 바로 음향반사신호의 차이로 나타나게되며 이를 검출하여 비교하기 위해서는 음향반사신호를 표면과 내부의 신호를 각각 검출하여 비교 분석하였다.

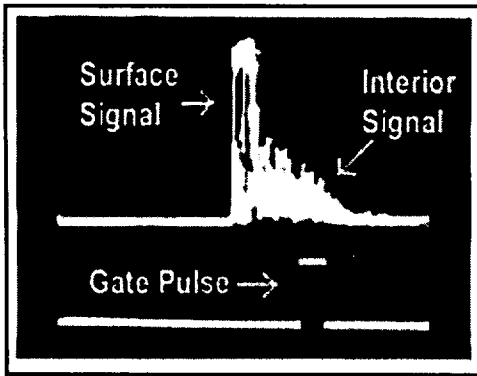


Fig. 7 Reflected signal & gate pulse

Fig. 7은 동전에서 반사되어온 음향파와 이를 게이트하여 신호를 추출하는 펄스를 보여주는 것으로 게이트 펄스신호의 위치에 따라서 표면과 내부 신호를 구분하여 추출할 수가 있는 것이다.

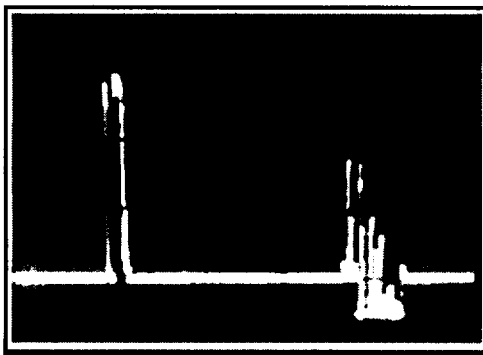


Fig. 8 Gated acoustic signal

Fig. 8은 실제로 동전 내부의 음향신호를 게이트한 경우로서 게이트 펄스에 의해 취해진 신호만이 영상 처리되게 되어서 이 경우는 표면신호 세력을 최소화

할 수 있음을 보여 주고 있다.

Fig. 9는 1979, 1983, 1988년도 발행된 동전의 표면 음향영상과 직경으로 스캔된 라인 데이터를 나타내는 것으로 오래된 동전일수록 돌출영상 음향신호의 변화가 둔화되고 있음을 보여주고 있다.

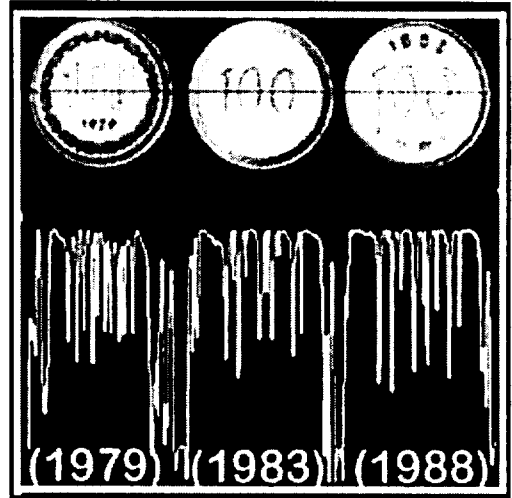


Fig. 9 Surface acoustic images & line data (1979, 1983, 1988)

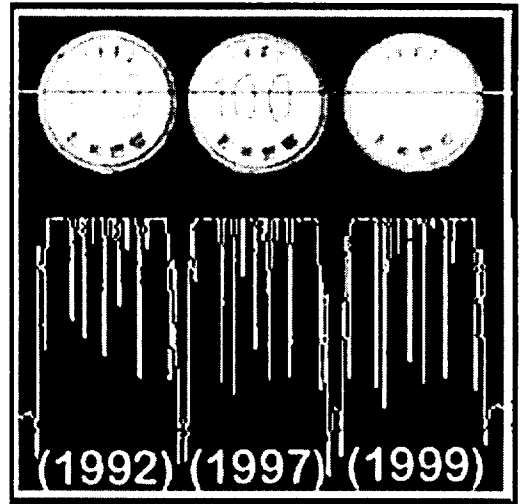


Fig. 10 Surface acoustic images & line data (1992, 1997, 1999)

Fig. 10은 1992, 1997, 1999년도 발행된 동전의 표면

음향영상과 직경으로 스캔된 라인 데이터를 나타내고 있는 것으로 Fig. 9와 같이 최근에 발행된 동전일수록 들출 부분에 의한 음향영상 변화가 급격함을 알 수 있다.

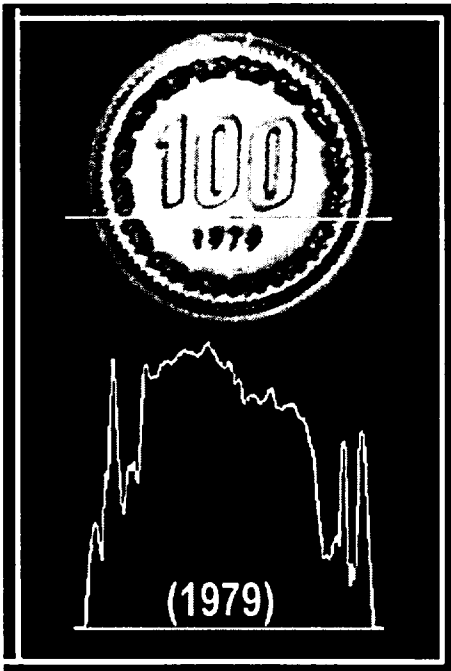


Fig. 11 Interior acoustic images & line data (1979)

Fig. 11은 1979년도 동전의 내부에 초점을 맞추어 얻은 음향영상과 라인 데이터를 보여주고 있다. 여기서 라인 데이터를 동전의 평면에 맞추어도 얻어진 음향 데이터가 균일치 못함을 잘 보여주고 있다. 이것은 내부가 부식되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 1983년도 동전의 내부 음향영상과 평면 부근에서의 라인 데이터를 나타낸 것으로 Fig. 11의 1979년도의 동전의 데이터와는 많은 차이가 있고 데이터의 변화가 적은 것은 부식이 적다는 것을 말해 주고 있는 것이다.

Fig. 13은 1997년도 발행된 동전으로서 최근의 동전으로 라인 데이터는 직선으로 나타나고 있어서 부식이 전혀 진행되지 않았음을 잘 보여주고 있는 것이다.

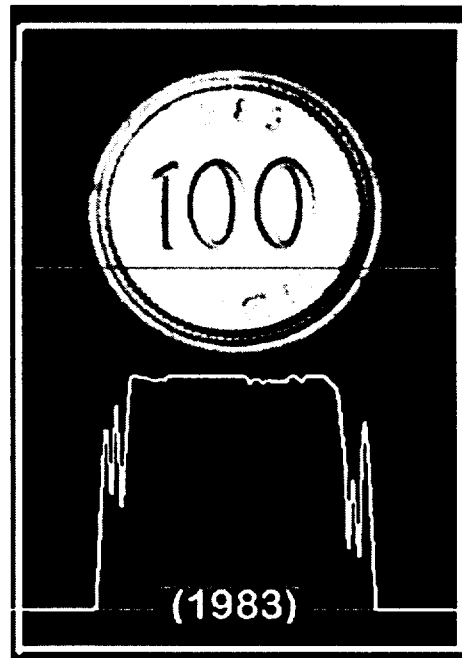


Fig. 12 Interior acoustic images & line data (1983)

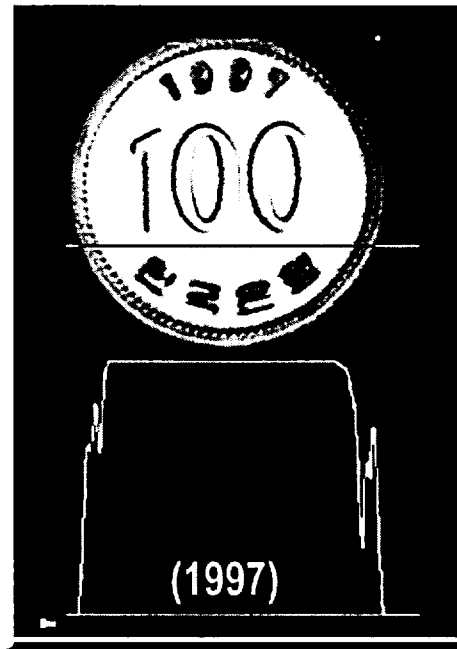


Fig. 13 Interior acoustic images & line data (1997)

V. 결 론

본 연구에서는 집속 음향렌즈를 사용하여 금속물체에서 반사하여 돌아오는 음향신호의 세력 $V(z)$ 를 해석하여 물질의 재료 특성을 판별하는 이론을 고찰하였다. 실험으로는 1979년부터 1999년 사이에 발행된 100원 짜리 동전 6개의 표면과 내부의 음향영상을 검출하였고 또한 라인 데이터를 분석하여 금속의 부식 상태를 비교하였다. 실험결과 오래된 동전일수록 내부의 음향신호의 데이터는 비균일하여 일그러짐을 확인하였고 또한 발행해서 얼마 되지 않는 동전의 내부의 음향신호의 데이터는 균일하게 나타남을 확인할 수가 있었으며 동전의 년 수에 따라 감소 증감을 뚜렷하게 판별할 수 있었다. 이는 금속의 내부가 어느 정도 부식이 진행되고 있는가를 판단할 수 있는 기준으로 이용할 수 있는 성과를 본 연구에서 얻었다. 본 실험에서 사용한 100원 짜리 동전의 재료는 백동으로 부식이 잘되지 않는 것으로 육안으로는 전혀 부식 정도를 감지 할 수 없었어도 본 실험 기술로는 확연하게 판별이 가능하였다. 앞으로 이를 보다 체계적으로 정량화 하여서 데이터의 분석으로 몇 년 정도의 유통되어 사용된 것인지를 비파괴 검사로 판별될 수 있도록 발전 연구하면은 매우 응용분야가 넓은 유용한 기술이 될 것이다. 특히 골동품의 진위를 판별을 정확히 판별하는 데에도 유용하게 쓸 수가 있을 것이다.

참고문헌

- 1) D. Rugar, 1984, Resolution Beyond the Diffraction Limitation the Acoustic Microscope, J. Appl. phys. 56, pp.1338-342.
- 2) M. Waugh, 1976, Acoustic imaging techniques for

- none destructive testing, IEEE Trans, Sonics and Ultrasonics, Vol.32, No.5, pp.312-316.
- 3) B. T. Khuri-Yakub, 1984, Surface Defect Detection Using Acoustic Microscope, Proc. IEEE Ultrasonics Symp. Vol.2, pp.580-587.
- 4) M. A. Breazeale, 1977, Interaction of Ultrasonic Waves Incident the Rayleigh Angle onto a Liquid-solid Interface, J. Appl. Phys. 48, pp.530-537.
- 5) A. Atalar, 1985, Penetration depth of the Scanning Acoustic Microscope, IEEE, Trans. Sonics and Ultrasonics, Vol.su-32, No.2, pp.164-167.
- 6) S. Gordon, 1983, Acoustic devices and analog signal processing, Stanford Univ. pp.1-20.
- 7) G. S. Liang, 1985, Material characterization by inversion of $V(z)$.IEEE Trans Sonics and Ultrasonics Vol.Su-32, No.2, pp.213-223.
- 8) 문건, 고대식, 전계석, 1988, 음향현미경의 $V(z)$ 특성곡선을 이용한 재료의 특성에 관한 연구, 한국음향학회지 논문집, 제7권 2호, pp.26-73.
- 6) 문건, 1988, 음향현미경 특성해석과 고체표면 및 내부 영상검출, 경희대학교 박사학위 논문집, pp. 1-134.
- 9) 문건, 1997, 음향파를 이용한 고체내부의 수직 축상에 존재하는 상이한 결합분리 검출에 관한 연구, 한국음향학회 논문집 제16권, 8호, pp.98-102.
- 10) 문건, 1998, 지연시간 변별에 의한 음향영상 분리 개선에 관한 연구, 제주대학교 산업기술연구 논문집, 제16권, 2호, pp.25-30.
- 11) 문건, 1999, 디포커스를 이용한 고체내부의 음향영상의 해상도 개선에 관한 연구, 제주대학교 산업기술연구 논문집, 제10권, 1호, pp.49-55.