

음향신호 데이터를 이용한 재료 부식 상태 판별에 관한 연구

A Study on the Discrimination of Materials Corrosion States Using the Acoustic Signal Data

문 건*

Gun Moon*

요 약

본 논문에서는, 15MHz 음향 변환자를 사용한 반사 형 음향신호 검출 시스템을 구성하였다. 금속 재료의 특성 판별에서 가장 어려운 문제점들은 비파괴로 재료의 부식 상태와 내부에 보이지 않는 결함을 분별해내는 것이다. 이를 해결하기 위하여 먼저, 재료의 특성판별에 매우 중요한 음향 $V(z)$ 특성곡선에 대한 이론적인 전개를 하였다. $V(z)$ 이론을 부식상태 판별에 적용하기 위하여 각각 발행연도가 틀린 100원, 500원짜리 금속 동전을 실험샘플로 사용하였다. 실험결과는 발행연도에 따라 동전의 음향신호가 명확하게 다르게 됨을 보여 줬다. 이 결과로 검출된 음향신호로 공통된 규칙을 얻어냈고, 비파괴검사로 금속물질의 부식정도를 판별하는데 매우 유용한 기술임을 확신하였고, 또한 안전운항을 위하여 항공재료 검사에도 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

On this study ,I constructed the reflective acoustic signal detecting system using 15MHz acoustic transducer. The most difficult problems discriminating the characteristics of the metal substance are the discriminating the corrosion state and seeking hidden defects by using none destructive testing. For solving these problems, at first, theoretic analysis has been proceeded on the acoustic $V(z)$ characteristics which is very important on discriminating the material characteristics. For application the $V(z)$ theory to discriminating corrosion state, the 100 and 500 won metal coins which are issued on the different years are used as the test samples. The experimental results showed the distinct differences among the coin's acoustic signals accorded to its issued years. I caught the common regulation by analysing the acquisited acoustic signals and convinced this technique to be very useful on corrosion discrimination of the metal substances by none destructive testing and also can be used to inspect on the aeronautical materials for safety navigation.

Key words : Acoustic, Metal, discriminate, corrosion, Non destructive testing, safety navigation

I. 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 활발

* 제주대학교 통신컴퓨터공학부(Dept. of Communication Computer Eng., Cheju National University)

· 제1저자 (First Author) : 문건

· 접수일자 : 2005년 10월 21일

히 진행되고 있다. 그러나 국내에서 이 분야의 연구가 매우 미약한 실정이며 그나마 초보적인 수준에 그치고 있다[1],[2].

음향현미경에서 $V(z)$ 곡선은 음향변환기의 반사전압을 초점 평면과 샘플사이의 거리인 Z 의 함수로 나타낸 것으로 $V(z)$ 곡선은 재료마다 고유한 형태를 나타내기 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 되면 탄성계수 및 음향저항이 변화하게 되며 이 변화량을 음향파로 검출하면은 금속의 부식정도를 판별할 수 있다.

$V(z)$ 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.

본 연구에서는 Liang의 이론을 이용하여 $V(z)$ 곡선을 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[1],[2].

II. 변환자의 $V(z)$ 특성해석

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

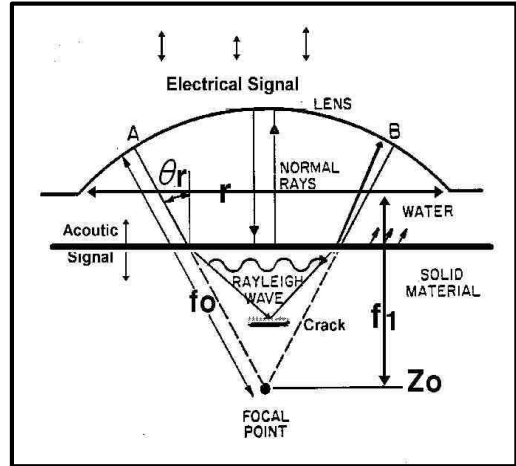


그림 1. 구면형 음향 변환자
Fig.1. Spherical acoustic transduce.

- r : 변환자 개구면 반경
- f_0 : 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

그림 1에서 직경 $2r_0$ 인 음향변환기에 의하여 방사되는 음향장은 반경 r_0 인 원형 개구면을 통과하는 구면파에 의한 음향장과 등가이므로 모든 음향장이 시간에 대해 정현적으로 변화한다면 음향장은 다음과 같이 된다[5],[6].

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

여기서 $f_1 = f_0 \cos \theta_0$ 이고 $P(r)$ 는 렌즈의 Pupil 함수로서 렌즈의 수차와 렌즈의 비 균일 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 변환 식을 이용하여 표현하면 구경평면에서의 Angular spectrum A(k_r)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$A(k_r) = \int_0^\infty J_0 \left(\frac{\exp jk\sqrt{r^2 + f_1^2}}{\sqrt{r^2 + f_1^2}} \right) (k_r r) \cdot r \cdot dr \quad (2)$$

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

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

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

여기서

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

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

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

ψ₁(r)의 첫 번째 항의 위상을 고려할 때 A(k_r)의 적분에 관계하는 것은 ψ₁'(r)=0 되는 부근의 값이므로 이 영역을 벗어난 곳의 음향장은 무시할 수 있다. 이렇게 정리하면 다음과 같이 된다.

$$A(k_r) = \sqrt{\frac{2\pi}{|\psi_1''(r')|}}$$

$$P(r') = \frac{\exp[j\psi_1(r')]}{\sqrt{2\pi \cdot k_r r' (r'^2 + f_1^2)}} \cdot \frac{k_r}{k_z} \cdot f_1 \dots (5)$$

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 ψ₁'(r)=0 이 되는 지점의 r을 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.[3][4]

$$V(z) = \frac{\int P^2(r/f_0) \cdot R(r/f_0) \cdot \frac{\exp[-j2k\sqrt{1-(r/f_0)^2}]}{\sqrt{1-(r/f_0)^2}} \cdot r \cdot dr}{\int P^2(r/f_0) \cdot \frac{r \cdot dr}{\sqrt{1-(r/f_0)^2}}} \quad (7)$$

식 (7)에서 R(r/f₀)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 평면 반사에 대한 focal depth Δz는 다음과 같다.

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

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 Δz는

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

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 V₀은 결합용액의 음향속도(물: 1500m/s)이고, f는 동작주파수이다.

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

그림 3은 여러 가지 재료에 대한 실험으로 얻은 V(z) 특성곡선으로서 재료에 따라서 극대점과 극소점이 다르게 나타나며, 주기도 확연하게 틀림을 확인할 수가 있다[7],[8].

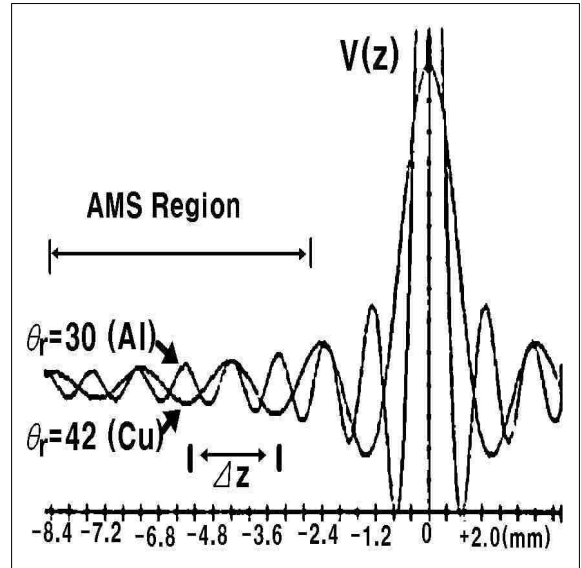


그림 2. 알루미늄과 구리의 시뮬레이션 V(z) 곡선
Fig. 2. Simulation of V(z) Al & Cu.

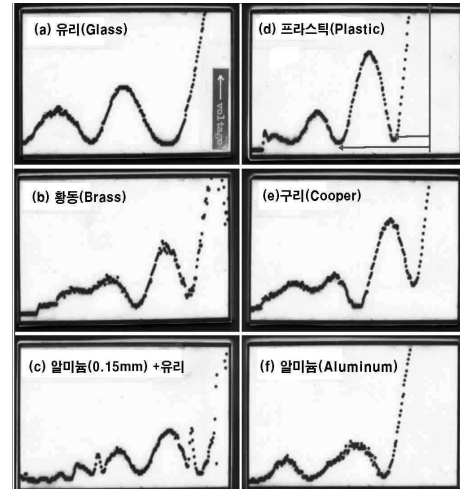


그림 3. 재료에 따른 실험치의 V(z) 곡선
Fig. 3. The Experimental V(z) Curve of Materials.

III. 시스템 구성

3-1 구성도

그림 4는 본 실험을 위하여 구성된 시스템 구성도이다. 샘플에 임펄스를 가해서 반사 신호를 게이트 신호로 추출하여 신호 처리하여 음향영상을 얻을 수 있도록 구성하였다. 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 10Volt 를 사용하여 하였다.

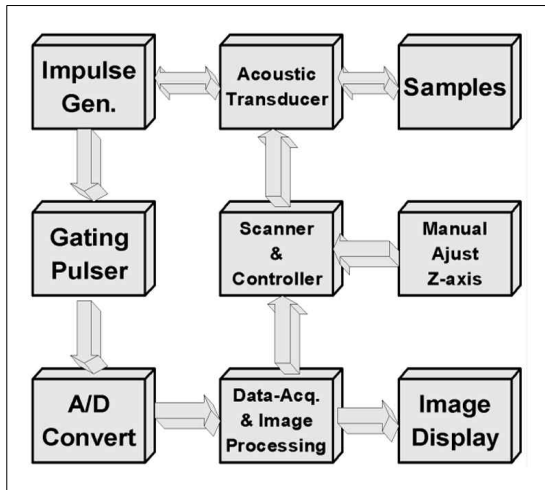


그림 4. 시스템 구성도
Fig. 4 System block diagram.
3-2 실험장치

실험 장치는 설계하여 다음 제품을 조립하여 구성하였으며 그림 5는 실험 장치 사진을 보여주고 있다.

- (1) 15Mhz 음향변환자(Transducer) : Technisonic
- (2) Impulse generator : Xtactex corp.
- (3) Signal generator(Gating Pulse) Feedback
- (4) Scanner & Controller : MkC Korea
- (5) Oscilloscope : Tecktronix
- (6) A/D converter : Signal Pro.
- (7) Data Acquisition & image processing : PCI Card
- (8) PC (Image display)



그림 5. 실험장치 사진
Fig. 5. The experimental devices.

3-3 변화자의 특성

그림 6은 사용한 음향변환자의 임펄스 응답특성 파형을 보여주고 있으며 시플레이션 이론 치와 실험 치가 오차가 적음을 확인할 수가 있다.

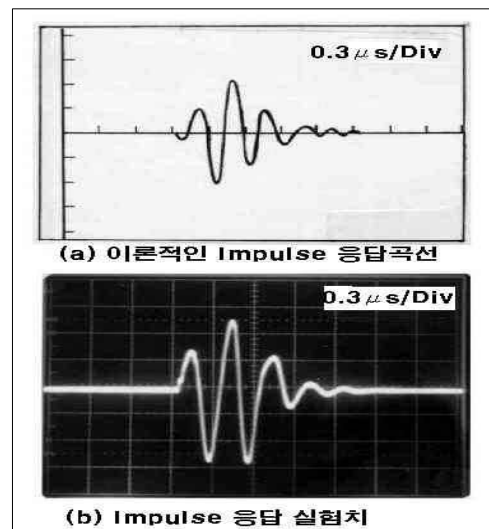


그림 6.음향변환자의 이론(a) & 실험치(b)의 임펄스 응답
Fig. 6. Theoretical(a) & experimental(b) impulse response of the transducer.

그림 7은 변환자에 15MHz의 정현파를 3μSec

게이팅 한 펄스 신호를 입력시켜서 샘플의 표면에서 반사되어 돌아오는 음향신호를 보여주고 있다. 1차 반사파의 세력이 뚜렷하게 나고 있음을 확인 할 수 있고, 2차 반사파는 세력이 적으나 불필요한 신호이므로 이를 제거하고 1차 반사파만을 얻기 위하여 게이팅 펄스를 사용하였다. 반사파의 차수가 높을수록 주파수 대역이 넓어짐을 그림 6에서 확인 할 수가 있다.

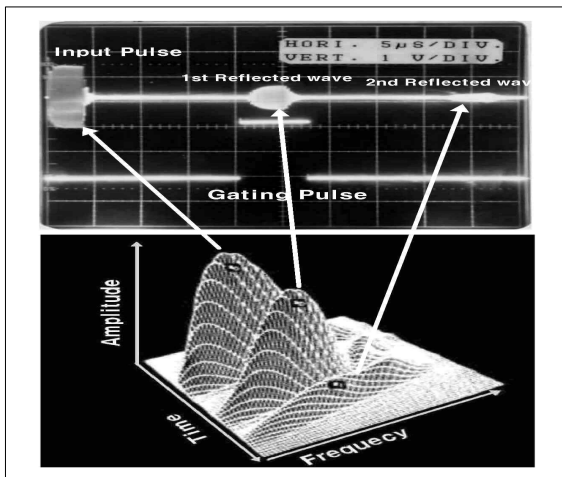


그림 7. 음향변환자의 반사파
Fig. 7. The reflected wave of the transducer.

IV. 실험 및 분석

4-1 금속 내부의 음향신호 검출 방식

먼저 금속의 부식상태를 비교 분석하기 위해 15MHz 음향신호를 발생하여 샘플의 내부에 초점을 맞추어서 입사시켰고, 샘플로서는 1979, 1983, 2002 년도에 발행된 100원짜리 동전 3개를 사용하였다. 동전의 재료는 백동으로서 산화가 잘되지 않고 부식이 잘되지 않으므로 육안으로는 부식정도를 판별하기가 어렵고 또한 다른 기술적인 방법도 없는 실정이다. 먼저 부식이 되면 탄성계수와 음향임피던스의 변화를 가져오게 되므로 이것이 바로 음향 반사 신호의 차이로 나타나게 되며 이를 검출하여 비교하기 위해서는 음향 반사 신호를 표면과 내부의 신호를 각각 검출하여 비교 분석하였다.

그림 8은 동전에서 반사되어온 음향파와 이를 게

이트 하여 신호를 추출하는 펄스를 보여주는 것으로 게이트 펄스신호의 위치에 따라서 표면과 내부 신호를 구분하여 추출할 수가 있는 것이다.

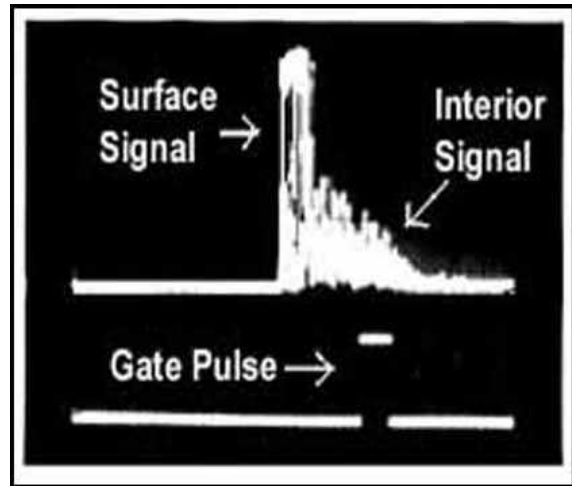


그림 8. 반사 신호와 게이팅 펄스
Fig. 8. Reflected signal & gate pulse.

그림 9는 실제로 동전 내부의 음향신호를 게이트 한 경우로서 게이트 펄스에 의해 취해진 신호만이 영상처리하게 되어서 이 경우는 표면신호 세력을 최소화할 수 있음을 보여 주고 있다.

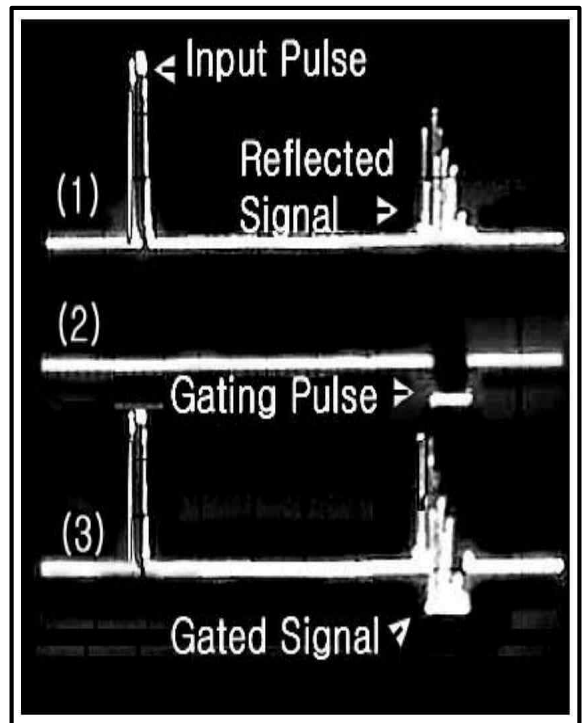


그림 9. 게이트 된 음향 신호

Fig. 9. Gated acoustic signal.

4-2 15MHz 주파수를 사용한 부식 판별 실험결과

그림 10은 1979년도에 발행된 동전의 표면 음향영상과 직경으로 스캔된 라인 데이터를 나타내는 것으로 스캔한 표면 상태는 시각적으로는 부식을 확인할 수 없으나 금속 내부의 음향 데이터를 분석하면 확연하게 내부에서의 탄성계수가 불규칙하게 나타남을 분명하게 확인할 수가 있음을 잘 보여주고 있다. 불규칙적인 변화량은 부식상태에 비례하므로 이를 이용하면 부식정도를 판단할 수 있다.

그림 11은1983년도 발행된 동전의 표면 음향영상과 직경으로 스캔된 라인 데이터를 나타내고 있는 것으로 그림 10의 1979년도 발행된 동전과 비교하면 부식은 진행되고 있으나, 그 정도가 덜 함을 음향 데이터로 확인할 수가 있다.

그림 12는 발행 된지 몇 년이 안 된 2002년 동전의 내부의 음향데이터 신호를 보여주고 있다. 이 동전은 아직 내부에 부식이 진행되지 않고 있으며 양호한 상태를 잘 보여주고 있다.

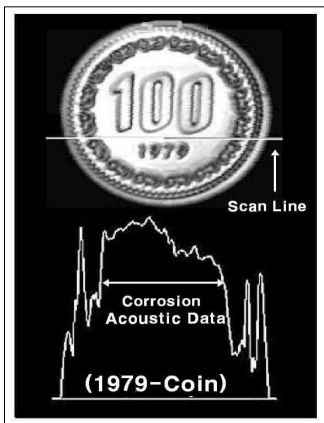


그림 10. 1979년에 발행된 동전의 부식 음향데이터
Fig. 10. Corrosion Acoustic Data issued on 1979.

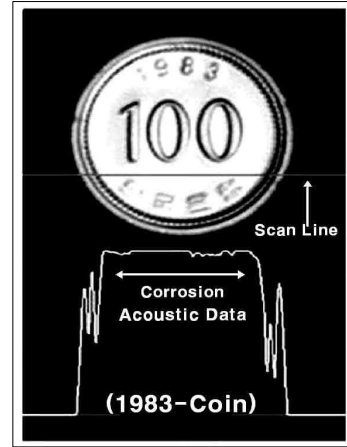


그림 11. 1983년에 발행된 동전의 부식 음향데이터
Fig. 11. Corrosion Acoustic Data issued on 1983.

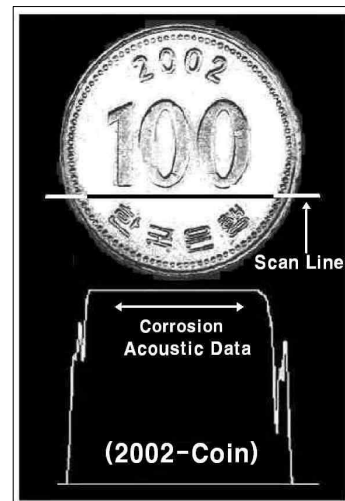


그림 12. 2002년에 발행된 동전의 부식 음향데이터
Fig. 12. Corrosion Acoustic Data issued on 2002.

4-3 3MHz 와15MHz 주파수를 사용한 실험 결과 비교

그림 13은 1996년도 발행된 500원짜리 동전으로서 3MHz의 낮은 주파수의 음향변환자를 이용하여 동전 내부의 음향데이터를 검출한 것으로 스캔한 라인의 데이터는 일직선으로 나타나서 동전의 내부에는 마치 아무런 부식상태가 없는 것과 같은 실험 결과는 보여주고 있다.

반면에 그림 14는 동일한 500원 동전을 사용하여 15MHz 높은 주파수의 음향 변환자를 이용하여 꼭 같은 위치에서의 스캔한 라인 음향데이터를 보여

주고 있다. 3MHz에서는 나타나지 않았던 부식상태가 15MHz 의 데이터에는 부식 상태를 확연하게 나타남을 확인 할 수가 있었다. 이는 낮은 주파수에서는 음향과장이 길어짐으로서 미세한 결함은 나타나지 않아서 해상도가 떨어짐을 실험으로 잘 보여주고 있다. 반면에 높은 주파수의 음향과장은 매우 짧아서 미세한 탄성계수의 변화에도 잘 반응하게 되어서 해상도가 좋게 됨을 알 수가 있다. 그러나 낮은 주파수의 음향 파는 금속 내부에 침투 깊이가 높은 주파수에 비교하여 깊으므로 금속 내부의 깊은 곳에 재료의 특성 판별은 낮은 주파수가 유리하는 장단점을 갖게 된다.

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 2002년 사이에 발행된 100원과 500원 짜리 동전의 표면과 내부의 음향영상을 검출하였고 또한 이를 물질의 재료 특성을 판별하는 일환으로 라인 데이터를 분석하여 금속의 부식상태를 비교 분석하였다. 실험결과 오래된 동전일수록 내부의 음향신호의 데이터는 부식 정도에 비례하는 굴곡이 나타나는 비 균일성 일그러짐을 확인하였고 또한 발행해서 얼마 되지 않는 동전의 내부 음향신호의 데이터는 균일하게 나타남을 확인할 수가 있어 부식 상태가 아직 진전되지 않았음을 판별할 수가 있었으며 동전의 발행 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 100원과 500원 짜리 동전의 재료는 백동으로 부식이 잘되지 않는 것으로 육안으로는 전혀 부식정도를 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 연구하면 매우 응용분야가 넓은 유용한 기술이 될 것이다. 특히 골동품의 진위를 판별을 정확히 판별하는 데에도 그리고 안전운항을 위해 항공기의 중요 부품에 대한 육안 및 타 비파괴 검사로 검출이 불가능한 내부의 결함 검출에도 유용하게 쓸 수가 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 제주대학교 발전(청봉)기금 지원으로 이루어진 것으로 지원에 대해 감사합니다.

참 고 문 헌

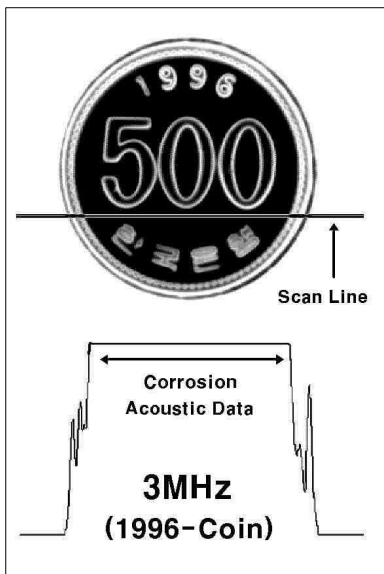


그림 13. 3MHz 부식 음향 데이터
Fig. 13. Corrosion acoustic data 3MHz.

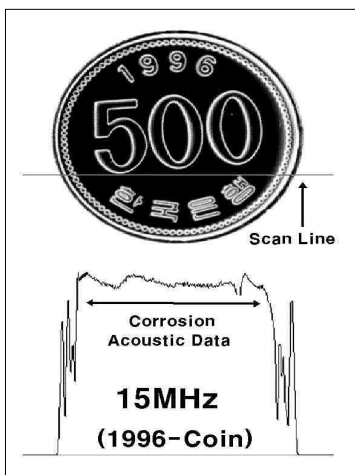


그림 14 15MHz 부식 음향 데이터
Fig. 14. Corrosion acoustic data 15MHz.

[1] S. P. Marsh, "Power splitting and combining techniques on MMICS," *The GEC Journal of Tech.*, vol. 15, no. 1, 1998.

[2] A. A. M. Saleh, "Planar electrically symmetric n-way hybrid power dividers/combiners," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 28, no. 6, pp. 555-563, June 1980.

[3] D. Rugar, "Resolution Beyond the Diffraction Limitation the Acoustic Microscope," *J. Appl. phys.* 56, pp. 1338-342, 1984.

[4] M. Waugh, "Acoustic imaging techniques for none destructive testing," *IEEE Trans, Sonics and Ultrasonics*, vol. 32, no. 5 pp. 312-316, 1976.

[3] B. T. Khuri-Yakub, "Surface Defect Detection Using Acoustic Microscope," *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.* vol. 2, pp. 580-587, 1984.

[4] M. A. Breazeale, "Interaction of Ultrasonic Waves Incident the Rayleigh Angle onto a Liquid-solid Interface," *J. Appl. Phys.* 48, pp. 530-537, 1977.

[5] A. Atalar, "Penetration depth of the Scanning Acoustic Microscope," *IEEE, Trans. Sonics and Ultrasonics*, vol .su-32, no. 2, pp. 164-167, 1985.

[6] S. Gordon, "Acoustic devices and analog signal processing," *Stanford Univ.* pp.1-20, 1983.

[7] 문건, "음향현미경 특성해석과 고체표면 및 내부 영상검출," *경희대학교 박사학위 논문집*, pp. 1-134, 1988.

[8] 문건, "음향파를 이용한 고체내부의 수직 축상에 존재하는 상이한 결함분리 검출에 관한 연구," *한국음향학회 논문집* 제16권, 8호, pp. 98-102, 1997.

[9] 문건, "디포커스를 이용한 고체내부의 음향영상의 해상도 개선에 관한 연구," *제주대학교 산업기술연구 논문집*, 제10권1호, pp. 49-55, 1999.

[10] 문건, "Study on the improvement method of image detection in solid-interior using acoustic wave," *The 6th joint symposium of CNU & Nagasaki Univ.* pp. 27-34, 2000.

문 건 (文建)



1969년 : 한국항공대학 통신공학과 졸업(공학사)
 1981년~1988년 : 경희대학교 전자공학과(공학석사, 박사)
 1983년 : 정보통신기술사
 1987년~현재 : 제주대학교 통신컴퓨터 공학부 교수

관심분야 : 디지털컨텐츠, 초음파 영상처리