

## 초음파 반사신호의 복소 진폭을 이용한 교체 내부 결함의 영상 구조

김현\*/임호\*\*/김기열\*\*\*/구길모\*\*\*\*

### 요 약

초음파현미경은 대부분 단순히 시료로부터 반사된 신호의 진폭만을 이용하여 초음파영상을 구성하였다. 그러나 이 방법은 미세한 변화를 가지는 시료에 대해서는 반사신호의 진폭변화가 민감하지 않으므로 인하여 영상의 질을 저하 시켰다. 본 연구에서는 초음파 반사신호의 진폭과 위상을 동시에 측정할 수 있는 초음파현미경 시스템을 구성하고 샘플로서 500원 주화와 내부에 원형결함이 존재하는 알루미늄 시료에 대해 진폭영상과 위상영상을 획득하고 이들을 상호 비교분석하였다. 실험결과, 위상영상은 미세한 높이변화에 대해서는 진폭영상에 비하여 민감한 반응을 보였고 콘트라스트가 좋은 영상을 얻을 수 있었다. 이와같은 실험결과로 위상영상은 미세변화를 갖는 시료에 대한 비파괴검사시 진폭영상으로 얻어진 영상의 모호성을 개선하는 보조도구로서 활용이 기대된다.

## 1. 서론

현대 산업이 고도화됨에 따라 각 기업들은 생산성 향상과 상품 개발에 주력하고 있다. 특히 초정밀을 요구하는 반도체 산업이나 항공 산업 등에서 품질관리와 안정성 확보 및 생산 공정에서 원가 절감이라는 차원에서 볼 때 비파괴검사에 대한 관심이 고조되고 있다. 초음파현미경은 초음파를 사용하여 재료의 특성에 따르는 변화를 영상처리하여 가시화 시키는 장치로서 기존의 광학현미경으로는 불가능한 불투명한 금속이나 세라믹의 표층부나 내부를 탐상하는 비파괴검사장비이

다.<sup>[1,5,6]</sup>

이러한 초음파 현미경의 개념은 1930년대 처음 제시되었고<sup>[2]</sup> 1973년 Quate와 Lemon은 1 $\mu$ m의 분해능을 갖는 SAM(Scanning Acoustic Microscope)을 처음으로 개발하였으며<sup>[3]</sup> 이후에 Atalar가 펄스 에코우 방법을 이용하여 반사 모드에서 동작하는 SAM을 개발하였다<sup>[4]</sup>.

기존의 초음파현미경은 비파괴검사시 결합 검출을 위하여 시료에서 반사된 신호의 진폭 성분만을 신호처리하여 초음파 영상을 구성하였다. 그러나 박막과 같은 미세변화에 대해서 진폭의 변화가 민감하게 변화하지 않으므로 인하여 영상의 질이 저하되었다<sup>[11]</sup>. 반면에 위상은 진폭에 비하여 시료의 미세변화에 대해서 민감하게 반응한다. 예를 들면 3 MHz의 동작주파수를 갖는 반사형 초음파현

\* 부천대학교 컴퓨터제어학과 교수

\*\* 성남기능대학 전자과 교수

\*\*\* 부천대학교 컴퓨터제어학과 교수

\*\*\*\* 한국원자력 연구소 책임연구원

미경에서  $250\mu\text{m}$ 의 높이변화에 대해서  $360^\circ$  위상지연이 발생되므로 한파장보다도 작은 높이변화에 대해서도 좋은 분해능을 가지며 영상의 콘트라스트를 향상시킬 수 있다. 또한 정량적인 두께측정시 진폭과 더불어 위상을 사용하면 보다 정밀한 두께를 측정이 가능하다. Ken Liang<sup>[12]</sup> 등은 종파와 탄성표면파의 상대적인 위상차를 이용한 초음파현미경을 구성하였으나 신호의 간섭으로 인하여 각각의 신호를 분리가 어렵고 시스템 구성이 매우 복잡하며 탄성표면파를 이용함으로써 검출깊이가 한 파장범위로 한정된다는 단점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하면서 진폭과 위상을 동시에 측정할 수 있는 3MHz의 초음파현미경시스템을 구성하고 표면과 내부에 결합이 존재하는 시료를 각각 선택하여 영상처리한 후 진폭영상과 위상영상을 비교분석하고자 한다. 실험에서는 중심주파수가 3MHz이고 비대역폭인 45%인 초음파변환기를 사용하여 펄스에코방법으로 실험하고 시료로는 500원 주화와 원형결합이 존재하는 알루미늄 시료를 제작하여 실험하였다.

## II. 초음파 반사신호의 진폭과 위상해석

대부분의 초음파현미경에서는 초음파변환기에 전기적인 신호로서 톤버스트파를 여기시킨다. 해석을 위하여 톤버스트파를  $f(t)$ 로 나타내면 실수부와 허수부의 형태나 진폭과 위상항의 형태로서 식(2-1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = f_R(t) + jf_I(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (2-1)$$

$F(\omega)$ 가  $f(t)$ 의 푸리에변환 값이라면 시료에서 반사되는 파형은 시간지연으로 식(2-2)과 같이 표현될 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$\mathcal{F}\{f(t-\Delta t)\} = F(\omega)e^{-j\omega\Delta t} \quad (2-2)$$

$F(\omega)$ 는  $f(t)$ 의 푸리에변환 값이며 시간 지연은 근사적으로  $\Delta t = 2D/c$ 이다. 여기서  $D$ 는 초음파 변환기에서 시료까지의 거리이고  $c$ 는 결합매질에서의 초음파 속도이다. 파수  $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ 인 관계에서 위상  $\phi$ 는 시료에서 초음파 변환기까지 거리에 비례하며 식 (2-3)와 같다.

$$\phi = \omega\Delta t = 2kD \quad (2-3)$$

만일 시료의 높이가 변화하면 시료와 변환기의 사이의 거리가 이에 대응하여 변화하므로 식(2-3)에서 보는바와 같이 위상이 변화하게 된다. 위상변화량  $\Delta\phi$ 는 높이의 변화  $\Delta D$ 에 비례하며 식(2-4)과 같다.

$$\Delta\phi = 2k\Delta D \quad (2-4)$$

반사신호의 진폭과 위상은 복소진폭으로 표현될 수 있고 반사파의 푸리에성분을  $A\cos(\phi + \omega t)$ 라고 하고 기준신호를  $\cos(\theta + \omega t)$ 라고 하자. 이때 두 신호에 대한 곱은 주파수 영역에서 두식의 합과 차주파수의 항으로 나타나면 식(2-5)와 같다.

$$A \cos(\theta + \omega t) \cos(\phi + \omega t) = \frac{A}{2} \cos(\theta - \phi) + \frac{A}{2} \cos(\theta + \phi + 2\omega t) \quad (2-5) \quad (2-9)$$

이때 A는 반사신호의 최대값이고  $\theta$ 는 기준신호의 초기 위상각이고  $\omega$ 는 각주파수이고  $\phi$ 는 위상변화값이다. 식(2-5)를 시간에 대해 적분하면  $\phi$ 의 함수로써 식(2-6)와 같다.

$$Q(\phi) \propto \int_{-\infty}^{\infty} A \cos(\theta + \omega t) \cos(\phi + \omega t) dt \quad (2-6)$$

식 (2-6)의 결과는 식 (2-5)에서 2번째 항을 제거하면 식 (2-7)과 같은 관계를 갖는다.

$$Q(\phi) \propto A \cos(\theta - \phi) \quad (2-7)$$

식(2-7)에서 기준신호의 초기위상이  $\theta = 0^\circ$  인 경우  $A \cos(\phi)$ 가 되며,  $\theta = 90^\circ$  인 경우에는  $A \sin(\phi)$ 가 되며 이는 반사 신호의 복소진폭에 대한 실수부와 허수부이다<sup>[10]</sup>. 위의 과정은 믹서, 저역통과필터 그리고 적분기를 사용하여 구현될 수 있으며<sup>[8]</sup> 반사신호에 대한 진폭과 위상정보를 제공해 준다.  $A \cos(\phi)$ 를  $V_1$ 라 하고  $A \sin(\phi)$ 를  $V_2$ 라 하면 진폭과 위상은 식(2-8)과 식(2-9)과 같다.

$$|f(t-\Delta t)| = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (2-8)$$

$$\angle f(t-\Delta t) = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) & (V_1 > 0, V_2 > 0 \text{일때}) \\ \tan^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + 180^\circ & (V_1 > 0, V_2 < 0 \text{일때}) \\ \tan^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - 180^\circ & (V_1 < 0, V_2 < 0 \text{일때}) \\ \tan^{-1}\left(-\frac{V_1}{V_2}\right) & (V_1 < 0, V_2 > 0 \text{일때}) \end{cases}$$

$|f(t-\Delta t)|$ 는 반사신호의 진폭이고  $\angle f(t-\Delta t)$ 는 반사신호의 위상이며 이때 위상값은  $\tan^{-1}$ 이  $-90^\circ \sim +90^\circ$  값만 가지므로  $V_1$ 과  $V_2$ 의 극성에 따라서 결정 되어진다.

그림 1은 해석된 반사신호의 진폭과 위상을 측정하기 위한 초음파 현미경의 블록선도이다. 반사 신호의 위상을 얻기 위해서는 기준 신호와 비교하여 반사신호의 실수부와 허수부를 측정하여야 한다. 따라서 각각의 기준 신호들은 튜너스트파에 대해서  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  만큼씩 위상천이(phase shift)된 신호로서 컴퓨터에 의해서 제어된다. 입력되는 전기적인 신호와 4개의 기준신호는 동기가 되어져 있으며 초음파영상의 한 화소를 얻기 위해서는 4개의 데이터가 필요하다. 그림 2는 이러한 초음파 반사신호의 실수부와 허수부를 얻기 위한 신호들의 시간에 따르는 흐름도이다. 획득된 데이터는 식(2-8)과 (2-9)에 의해서 진폭과 위상이 계산되어진다.

### III. 실험결과 및 고찰

실험은 그림 1에서 보여준 블록선도에 의해서 초음파현미경시스템을 구성하고 실험하였다. 그림 1에서 디지털 클럭신호를 위하여 신호발생기는 WAVETEK사의 3006모델을 사용하였으며 120MHz의 사인파를 클럭신호로 사용하였다. 실험시 신호의 상태를 측정하기 위하여 LEADER 사의 8103(100MHz) 오실로스코프와 HP사의 54502A(400MHz) 디지털오실로스코프를 사용하였다. 한편 데이

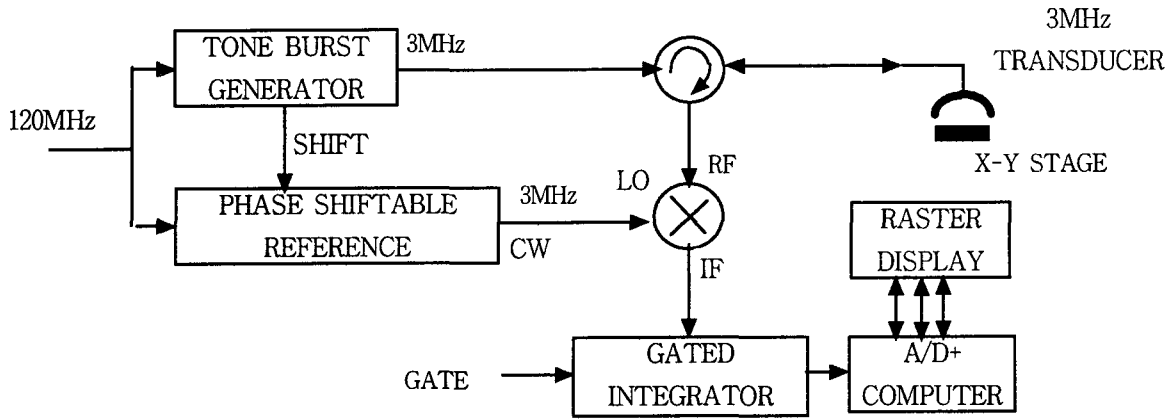


그림 1. 초음파현미경 시스템의 블록선도

fig 1. The block diagram of Acoustic microscope system

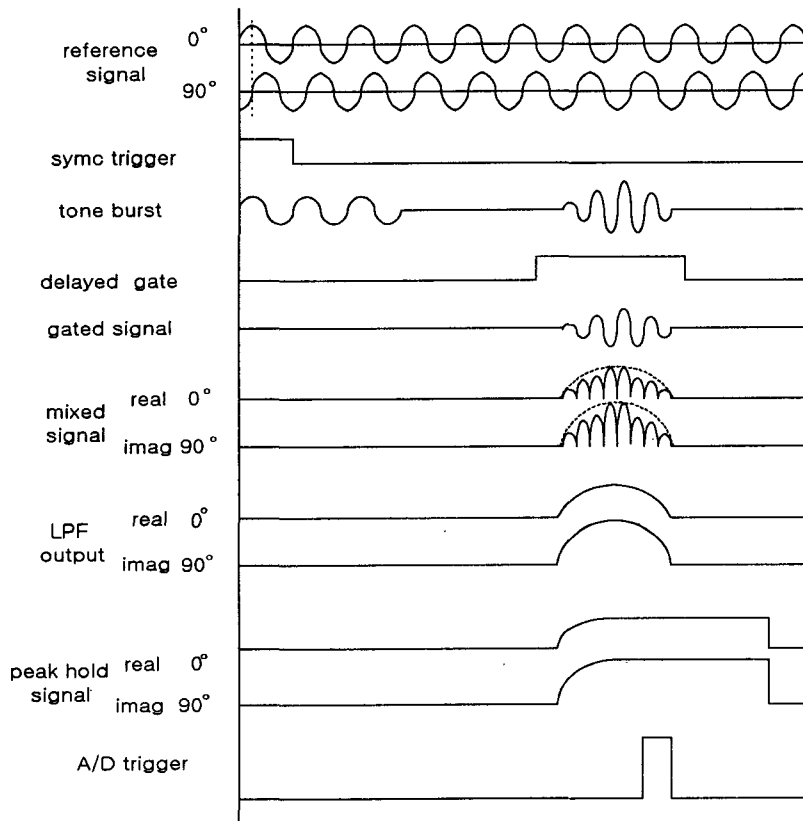
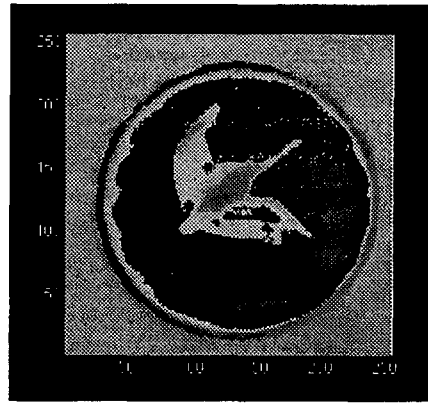


그림 2. 데이터 획득을 위한 신호들의 흐름도

fig 2. The flowchart of signals for data acquisition

터획득을 위하여 IoTeck사의 A/D변환기를 사용하였으며 2차원의 공간이동을 위한 스캔 제어시스템으로는 UNIDEX III A시스템을 사용하였다. 스캔제어 시스템, 데이터획득장치, 기준신호 제어 그리고 영상처리는 컴퓨터에 의해서 제어된다. 본 연구에서 사용된 컴퓨터는 CPU가 486이고 기본메모리가 16M, 보조기억장치가 540M이며 두 개의 병렬포트와 한 개의 직렬포트를 갖고 있다. 데이터 획득은 병렬포트중 하나를 사용하였고 다른 병렬포트를 사용하여 기준신호중 하나를 선택하도록 하였으며 직렬포트를 사용하여 스캔제어시스템을 제어하였다. 실험에 사용된 초음파변환기는 중심주파수가 3MHz이고 비대역폭이 45 %인 집속형변환기를 사용하였으며 믹서는 동작주파수범위가 0.05Mhz에서 150MHz인 HP사의 1053A믹서를 사용하였고 저역통과 필터는 차단주파수가 800KHz가 되도록 설계하였다.

그림 3의 영상은 초음파변환기의 초점을 주화표면에 일치시켜 스캔하여 얻어진 256×256 영상이며 화소와 화소사이의 거리는 120 μm이다. 진폭영상과 위상영상을 비교하여 보

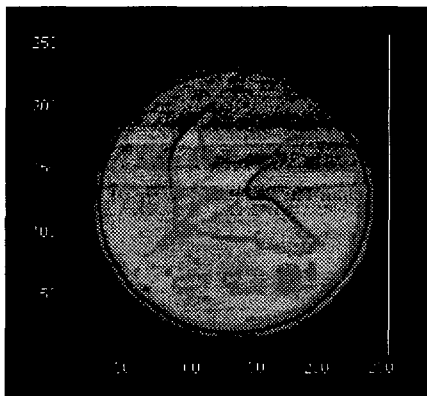


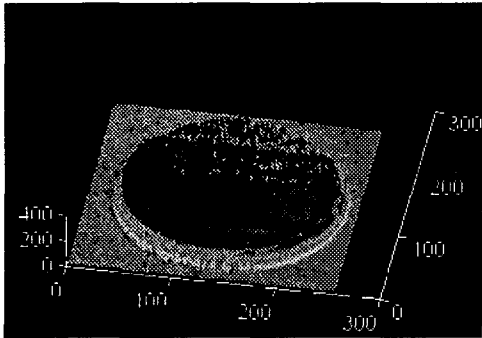
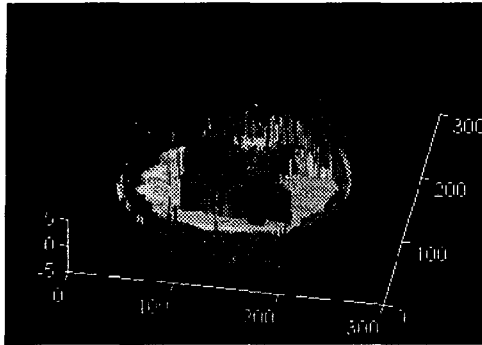
(a) 진 폭 (amplitude) (b) 위 상 (phase)

그림 3. 500원 주화의 표면 영상

fig 3. The surface image of 500 won coin

면 동전의 바닥과 동전 경계면에서는 진폭정보에 의한 경우가 콘트라스트가 더 좋은 반면 미세한 변화에 대해서는 위상정보에 의한 영상의 콘트라스트가 좋음을 볼 수 있다. 즉 동전내 존재하는 학의 모습을 관찰하여 보면 위상정보에 의한 영상이 학모양이 더욱 또렷이 보이고 있으며 특히 날개와 배에서의 미세변화는 진폭영상에서는 거의 차이를 보이지 않으나 위상영상에서는 크게 나타남을 볼 수 있었다. 또한 오백원이라는 글자체가 진폭영상보다 또렷이 나타남을 볼 수 있다. 그림 4는 높이 변화에 따라 두 영상이 변화를 비교하기 위하여 그림 3의 영상을 3차원 mesh방법으로 표현한 그림이다. 바닥면과 동전면의 경계에서 급격한 변화에 대해서는 진폭정보에 의한 영상의 콘트라스트가 좋아보이나 위상영상에서는 동전면에서의 변화에 대해서는 위상정보에 의한 영상이 민감하게 나타남을 볼 수 있다.

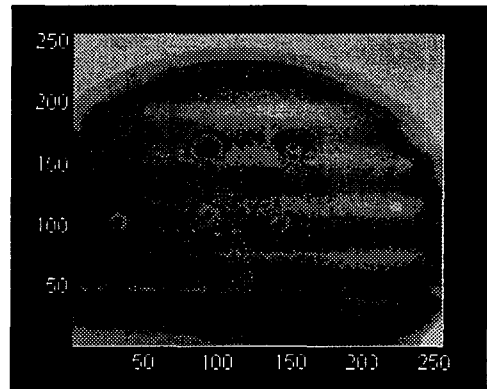
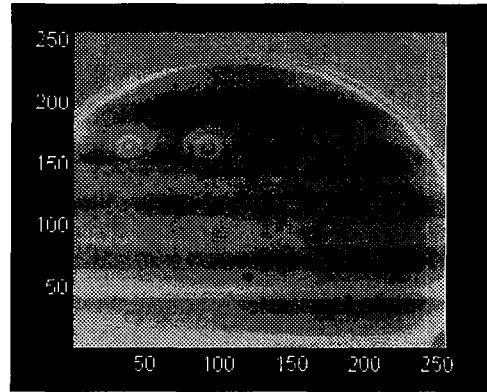




(a) 진 폭 (amplitude) (b) 위 상 (phase)  
 그림 4. 500원 주화에 대한 표면 mesh영상  
 fig 4. The surface mesh image of 500 won coin

그림 5는 알루미늄 내부에 원형결함을 제작하고 내부의 영상을 스캔하여 얻은 영상이다. 이때 영상의 필드는 256×256인 영상이며 화소간의 간격은 100 $\mu$ m이고 표면으로부터 -3mm 디포커싱하여 얻은 영상이다. 원형결함의 깊이를 달리하였기 때문에 영상의 윗부분에 존재하는 3개의 구멍에 대해서는 잘 나타나고 있는 반면 그 이상에 존재하는 부분에서 희미하게 나타나 보이고 있다. 고체내부의 영상에 대해서도 전반적으로 위상영상이 원형결함에 대한 콘트라스트가 진폭영상

보다 좋게 나타남을 볼 수 있다.



(a) 진 폭 (amplitude) (b) 위 상 (phase)  
 그림 5. 원형결함이 존재하는 알루미늄시료의 내부영상(-3mm)

fig 5. The internal image of aluminum sample with internal round defect(-3mm)

#### IV. 결론

본 연구에서는 위상이 진폭보다 미세변화에 대해서 민감하게 변화하므로 진폭과 위상

을 동시에 측정할 수 있는 초음파현미경을 설계·구성하고 동전주화 와 고체내부에 원형 결함이 존재하는 알루미늄 시료를 제작하여 실험하였다. 우선 500원주화의 표면영상에서 영상의 필드가  $256 \times 256$ 이며 화소간의 거리가  $120\mu\text{m}$ 인 진폭과 위상영상을 구성하였다. 두 영상을 비교하여 보면 학모양의 미세부분이나 동전내 글자부분에서 위상영상의 콘트라스트가 진폭 영상 좋게 나타남을 볼 수 있었으며 3차원으로 나타난 영상을 비교하여 보면 진폭영상은 높이변화가 큰 부분에서는 영상의 콘트라스트가 좋으나 위상영상은 미세한 부분에서 민감하게 변화함을 볼 수 있었다. 알루미늄 내부에 원형결함이 존재하는 시료에 대해 표면에서  $-3\text{mm}$  디포커싱하여 얻은  $256 \times 256$  영상에서도 위상정보에 의한 영상의 콘트라스트가 더 좋게 나타남을 알 수 있었다.

이와 같은 결과를 미루어보면 본 연구에서 구성된 초음파현미경 시스템은 기존의 초음파현미경에서는 얻기가 어려운 미세변화를 관찰하기 용이한 현미경시스템임을 알 수 있으며 이를 반도체 및 항공 우주산업등의 첨단 산업현장에서 활용할 시 비파괴 검사장비로서 활용이 기대되어진다.

## 참고문헌

1. Kessler, L. W., and D. E. Yuhas, "Acoustic Microscopy-1979," Proc. IEEE 67, 526 April 1979.
2. Sokolov, S. Y., Dokl. Akad. Nauk. SSSR 64. 333. 1949.
3. Lemons, R. A., and C. F. Quate, "Acoustic Microscope Scanning," Appl. Phys. Lett. Phys. Lett. 24, 163, February 1974.
4. A. Atala, "An angular Spectrum Approach to contrast in Reflection Acoustic Microscopy," J. Appl. Phys., Vol. 49, pp. 5130-9, 1978.
5. Hadimiouglu, B, and J. S. Foster, "Advances in Superfluid Helium Acoustic Microscopy," J. Appl. Phys. 56, 1976, October 1984.
6. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 6A, D. O. Thompson and D.E. Chimenti, Eds., NY: Plenum Press, 1987.
7. Jipson, V., and C. F. Quate, "Acoustic Microscopy at Optical Wavelengths," Appl. Phys. Lett. 32, 789 June 1978.
8. RF/IF Signal Processing Handbook, Vol. 1, Min-Circuits, 1985.
9. Bracewell, R. N., The Fourier Transform and Its Applications, 2nd ed. NY: McGraw-Hill, 1978.
10. Wickramasinghe, H. K., and M. Hall, "Phase Imaging with the Scanning Acoustic Microscope," Electron. Lett. 12, 637, November 1976.
11. Rugar, D., "Resolution Beyond the Diffraction Limit in the Acoustic Microscope: A Nonlinear Effect," J. Appl. Phys. 56, 1338, September 1984.
12. K. Liang, "Precision phase measurement in acoustic microscopy", deg. of Ph. stanford univ. 1985.

---

## The image construction of the surface and subsurface defects using complex amplitude of the reflected ultrasonic signals from the solid

Hyun, Kim\*/Ho, Lim\*\*/Ki-Yeoul, Kim\*\*\*/Kil-Mo, Koo\*\*\*\*

### Abstract

Most of the acoustic microscopes have been constructed acoustic image by simply measuring the amplitude of the reflected signal from the specimen. This method fails to produce images of good quality because the change in amplitude is not sensitive enough to specimen with fine variation. In this paper, we have been constructed the acoustic microscope system which has been able to measure simultaneously the amplitude and phase of the reflected ultrasonic signal. And also we have been constructed the amplitude and phase images for the 500 won coin as a sample and the aluminum specimen with internal round defect, and compared and analyzed these images. In experimental result, the phase image have shown better sensitive than the amplitude image and given better contrast for the micro height variation of specimen. It will be expected that the phase image can be used as an additional bit of information to improve ambiguities in amplitude image on nondestructive testing for specimen with fine variation.

---

\* Dept. of Computer Control, Bucheon College

\*\* Dept. of Electronic, Sunnam Polytechnic College

\*\*\* Dept. of Computer Control, Bucheon College

\*\*\*\* Heat-water Power Research Division, KAERI