

저주파대 음향 현미경의 구성과 그 응용에 관한 연구

(A Study on the construction of Low-Frequency Acoustic Microscope and Its Application)

高 大 植*, 文 建*, 田 啓 石*, 黃 金 燦**

(Dae Sik Ko, Geon Moon, Kye Suk Jun and Keum Chan Whang)

要 約

본 논문에서는 재료 내부에 존재하는 결함을 검출하기 위한 저주파대 음향 현미경 시스템을 구성하고 그 성능을 평가하기 위하여 음향 현미경의 측방향 분해능을 연구 분석하였으며 본 시스템을 이용한 비파괴 검사 기술을 제시하였다.

음향 현미경 시스템을 focused mode 및 defocused mode에서 동작시켜 실험한 결과 표면에서 1mm 깊이에 크기가 0.2mm에서 1mm까지의 원형 결함을 갖는 fused-quartz 샘플에 대한 측방향 분해능은 3 MHz의 동작주파수에서 0.5mm로 나타났으며 100원 주화에 대한 음향 이미지는 콘트라스트가 분명한 영상을 보였다.

Abstract

In this paper, a low frequency acoustic microscope system has been built for the purpose of detecting subsurface defects in materials. The lateral resolution of acoustic microscope is studied and analyzed in order to evaluate that system performance. And a NDE technique is demonstrated by using this system.

In the focused and defocused mode of operation, the acoustic microscope system showed in experiment that its lateral resolution was about 0.5 mm at a frequency of operation of 3 MHz on a fused-quartz sample with seeded circular cracks ranged in size from 0.2 mm to 1.0 mm in diameter within 1 mm of the surface. It also showed the acoustic image of 100 won coin with fine contrast.

*正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)

**正會員, 延世大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1987年 8月 24日

(※ 본 연구는 한국과학재단의 지원으로 현재 연구 중인 연구결과의 일부임.)

I. 서 론

과학 및 기술이 고도화됨에 따라 현미경의 필요성과 그 이용 범위가 점차 확대되고 있다.

기존 광학 현미경은 샘플의 조사를 위하여 표면처리(staining) 과정을 거쳐야 하며 광학적으로 불투명한 물질에 대해서는 관찰이 어려웠다. 그러나 음향 현미경은 영상을 위한 파라미터가 물질의 기계적

성질(밀도, 점성율, 탄성계수)과 밀접한 관계가 있고 생체 분야에서 표면처리 과정이 불필요 하며, 광학적으로 불투명한 물질을 영상화할 수 있는 장점이 있다.^[44]

음향 이미지 처리 기술은 1930년대에 Sokolov에 의해 처음으로 제시되었으며 제 1 차 대전 중 sonar의 개발로 급격히 발전하였다.

특히 1975년 미국의 Quate와 Lemons는 종래 피스톤형 음향 변환기에 음향 렌즈를 부착하여 고분해능을 갖는 음향 현미경 시스템을 개발하였다.^[44]

초기의 음향현미경은 전달모드에서 동작 하므로써 생체의 조직이나 세포를 검사하는데 주로 사용되었으나 1978년 Atalar는 레이다에서 사용하는 펄스 에코 방법을 이용하여 반사모드에서 동작하는 음향 현미경을 개발하였으며 이것은 두께가 큰 샘플에 적용할 수 있으므로 비파괴 검사에 이용할 수 있다.^[47]

비파괴 검사에서 재료의 표면 부근에 존재하는 결함은 제품의 품질을 평가하는 중요한 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 금속 재료의 표면에서 깊이 1mm 내에 존재하는 결함검출을 위한 비파괴 검사장치를 음향 현미경 시스템을 이용하여 구성하였다. 이때 음향 변환기의 중심주파수는 금속 및 세라믹등에서 탄성표면파의 속도가 3000m/sec 정도이므로 3MHz가 된다. 본 시스템의 측방향 분해능은 음향 렌즈를 해석하여 실험결과와 비교 고찰하였으며 음향 현미경 시스템을 focused mode 및 defocused mode에서 동작시키는 실험을 통하여 고체샘플의 표면과 내부의 영상을 연구 분석하였다.

II. 저주파대 음향 현미경 시스템의 구조 및 동작원리

1. 구조 및 동작원리

저주파대 음향 현미경 시스템은 고체표면 및 표면 내부(subsurface)를 영상화하여 재료의 표면상태나 내부결합등을 탐상할 수 있는 장비이다.

기존의 음향 현미경 시스템은 광학현미경과 상호 보완적인 현미경으로서 개발되었으나 본 연구에서는 종래의 비파괴 검사장비로 관찰이 어려웠던 표면 부근에 존재하는 결함을 검출하기 위하여 저주파대에서 동작되는 음향 현미경 시스템을 구성하였다. 본 시스템은 효율이 좋은 focused transducer를 송수신 겸용으로 사용하고 2 차원 영상화를 위하여 기계적인 스캐닝 시스템을 사용하였으며 그 구조와 동작원리는 그림 1과 같다.

그림 1에서 샘플의 탐상을 위하여 변환기에 tone

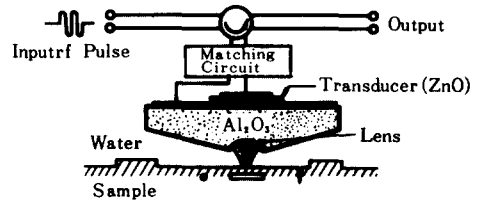


그림 1. 음향 현미경의 구조
Fig. 1. Structure of the acoustic microscope.

burst 파를 인가하면 변환기는 전기적 신호를 음향파로 변환시키며 변환된 음향파를 샘플위에 집약시킨다. 이때 음향파의 일부는 샘플의 내부로 전달되고 나머지는 샘플의 반사계수에 따라 샘플 표면으로부터 반사한다. 이 반사 신호의 진폭은 샘플의 음향 임피던스 값과 샘플과 렌즈 사이의 거리의 함수로 나타내지므로 디스플레이 모니터의 명도(brightness)를 변화시키는데 사용된다.^[8]

디스플레이 모니터의 한점(pixel)은 샘플에 대한 변환기의 한 위치에 대응하므로 샘플에 대한 영상을 얻기 위해서는 변환기를 2 차원적으로 스캐닝 하여야 한다. 변환기의 초점을 샘플표면에 일치시키고 변환기를 샘플에 주사하는 방법을 focused mode 동작이라고 하며 샘플의 표면상태를 영상화하는데 사용된다. 샘플 내부의 결함을 검출하고자 할 때는 변환기를 샘플에 접근시켜 초점이 샘플의 내부에 형성되도록 한다. 이러한 동작 모드를 defocused mode 동작이라고 부르며 defocused mode에서 음향파의 일부는 탄성 표면파(SAW : surface acoustic wave)를 발생시키는 Rayleigh angle로 샘플에 입사되어 샘플의 표면을 따라 전파하는 탄성 표면파를 발생시킨다.^[7]

탄성 표면파는 샘플 내부로 1 파장 깊이만큼 침투할 수 있으므로 그 파장내에 결함이 존재한다면 그 부분의 음향임피던스가 변화하여 반사신호의 세기가 변화할 것이다. 물론 defocus length는 결함의 위치와 일치하여야 명확한 영상을 얻을 수 있으며 이러한 동작 원리는 각종 비파괴 검사에 응용할 수 있다.

그림 1과 같이 변환기를 한개 사용한 음향 현미경 시스템에서 완전한 2 차원 영상을 얻기 위해서는 X-Y 평면에 대한 스캐닝(Scanning)이 필요하다. 기계적인 스캐닝 시스템에서 스테핑 모터를 이용하는 시스템은 컴퓨터에 의해 정확하게 제어할 수 있으므로 저주파대 음향 현미경 시스템에 사용하기에 적합하다.

음향 이미지는 샘플에서 반사된 신호를 data acquisition 방법에 의하여 얻어지며 이것은 다음 장에서 언급된다.

2. 디지털 음향 이미징 처리

그림 2는 샘플에 음향파를 인가하였을 때 발생하는 반사신호를 얻기위한 data acquisition 블록선도이다.

음향 변환기의 수신측으로부터 얻어진 1차 반사신호는 A/D 변환기에서 디지털량으로 변환되며 이때 데이터는 샘플의 한지점에서 한개만 유효하므로 샘플 속도와 스캐닝 속도는 정확히 동기되어야 한다.^[6]

이와같은 과정을 X, Y축에 대하여 256 스텝만큼 반복 동작시키면 256×256개의 데이터를 얻을 수 있다. 이러한 각각의 데이터는 영상 시스템에서 각각 하나의 화소가 된다.

여기서 반사신호는 샘플의 음향임피던스의 변화에 따라 음향강도가 다른 반사를 일으키며 이 반사 신호의 진폭크기를 모니터의 그레이레벨로 대응시켜 나타내면 콘트라스트가 분명한 영상을 얻을 수 있다. 그러므로 모니터의 그레이 레벨은 A/D 변환기의 분해능과 일치하는 것이 좋다.

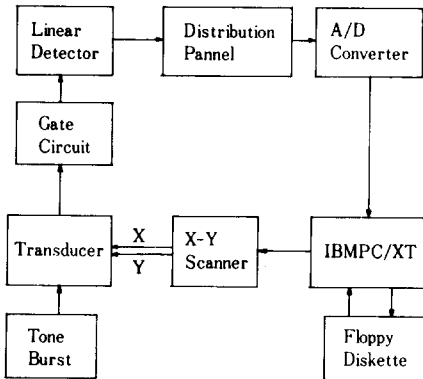


그림 2. data acquisition 블록 선도
Fig. 2. Block diagram for data acquisition.

III. 음향 현미경 시스템의 축방향 분해능

음향 현미경 시스템의 성능을 표시하는 중요한 파라미터로 분해능이 있다. 축방향 분해능(lateral resolution)은 변환기면과 평행한 방향으로의 구별능력을 말하며 음향 렌즈의 초점에서의 빔 폭에 의하여 결정된다.

음향 렌즈의 초점에서의 빔폭을 결정하는 요인으로는 수차 및 변환기와 샘플 사이의 결합용액 내에서의 파장 그리고 렌즈의 F/number를 들 수 있다.^[6] 이 중에서 수차는 광학에서와 같이 분해능을 저해시키는 요인이 되며 굴절률(C₂/C₁)과 aperture angle에 비례한다. 그러나 Lemons가 밝힌것처럼 광

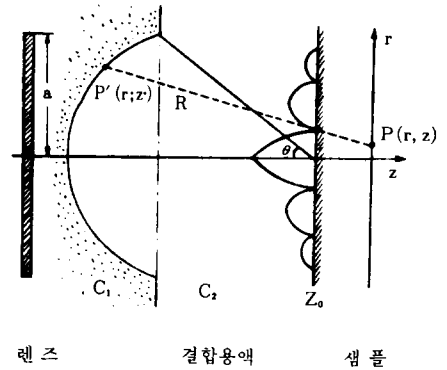


그림 3. 음향 렌즈로부터의 음향 방사
Fig. 3. Acoustic radiation from the acoustic lens.

학 렌즈에서는 굴절률이 0.667인데 비하여 음향 렌즈의 굴절률은 매우 작으므로(0.1~0.3) 음향 렌즈의 수차가 음향 현미경의 분해능에 미치는 영향은 무시할 수 있다.^[8,10]

축방향 분해능을 고찰하기 위하여 그림 3과 같은 음향 변환기에서 변위 U₀에 의하여 여진된 구면파가 초점 평면에 나타내는 음향장을 구하면 변환기상의 P'점으로부터 R만큼 떨어진 P점에서의 음향장이므로 식(1)과 같다.^[6]

$$\phi(r, z, 0) = -\frac{U_0}{2\pi} \int \frac{e^{-jKR}}{R} r' dr' d\psi' \quad (1)$$

그림 3에서 $R = \sqrt{r'^2 + r^2 - 2rr' \cos \psi' + (z - z')^2}$ 이고 $z' = \frac{r'^2}{2z_0}$ 이므로

$$R \approx z + \frac{r'^2 + r^2 - 2rr' \cos \psi'}{2z} - \frac{r'^2}{2z_0}$$

R을 식(1)에 대입하여 정리하면

$$\phi(r, z) = -e^{-jK(z+r'/2z)} \cdot \frac{U_0}{2\pi z} \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-jKr'^2(\frac{1}{2} - \frac{1}{z_0})} \cdot e^{\frac{jKrr' \cos \psi'}{z}} r' d\psi' dr' \quad (2)$$

식(2)를 ψ' 에 대하여 적분하면

$$\phi(r, z) = -e^{-jK(z+r'/2z)} \frac{U_0}{z} \int_0^a J_0(krr'/z) \cdot e^{-\frac{jKr'^2}{2}(\frac{1}{2} - \frac{1}{z_0})} r' dr' \quad (3)$$

여기서 $\int_0^{2\pi} e^{jz \cos \psi} d\psi$ 이고, $\int z J_0(z) dz = z J_1(z)$ 이며, $J_1(z)$ 는 Bessel 함수이다.

초점거리에서 $r=r_0, z=z_0$ 이고 $u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$ 이다. 식(3)

으로부터

$$u_z = - \frac{\pi a^2 e^{-jkz_0} \cdot e^{-jk r_0^2 / 2 z_0}}{\lambda z_0} \frac{2 J_1(k r_0 a / z_0)}{k r_0 a / z_0} \cdot u_0 \quad (4)$$

식(4)에서 음향 강도는 $I = |u|^2$ 이므로

$$I(r_0, z_0) = \left(\frac{\pi a^2}{\lambda z_0} \right)^2 [J_1(x)]^2 \cdot I_0 \quad (5)$$

식(5)에서 $x = k r_0 a / z_0$ 이고 $J_1(x) = J_1(2\pi x / \pi x)$ 이다.

측방향 분해능은 초점에서의 음향 강도가 최초로 1/2로 감소하는 점 (-3dB point)에서의 빔의 직경으로 정의되며 J_1 함수표에서 -3dB 값에 해당하는 $x=1.6$ 을 대입하여 빔의 직경 $2r_0$ 을 구하면

$$2r_0 = \frac{0.51 \lambda z_0}{a} = \frac{0.51 \lambda}{\sin \theta} = 1.02 \lambda F \quad (6)$$

여기서 $F = \frac{z_0}{2a}$ 이며 F/number라 부른다.

식(6)으로부터 측방향 분해능은 동작주파수를 높게 할수록 향상되는 것을 알 수 있으며 F/number가 1일때 측방향 분해능은 결합 용액내에서의 한파장 정도인 것을 알 수 있다. 본 연구의 경우 F/number가 1인 구면형 변환기와 결합용액으로 물을 사용하였을 때 동작주파수 3MHz에서 측방향 분해능은 0.51mm이다.

IV. 실험 및 검토

본 연구에서 설계한 음향변환기는 중심주파수 3 MHz인 focused 변환기로 F/number 1.0, 비대역폭 45%, 초점거리 16mm이며 그림 4는 음향 현미경 시스템의 블럭 선도이다.

그림 4와 같이 구성된 음향 현미경 시스템을 focused mode에서 동작시키고 샘플표면에 대한 음향 이미지를 얻기 위하여 100원 주화를 샘플로하여 변환기에 tone burst파를 인가하였을 때 얻어진 반사 신호는 그림 5와 같으며 오른쪽으로 가면서 1, 2, 3 차 반사 신호로서 매우 커다란 반사신호가 얻어짐을 알 수 있다.

그림 6의 (b)는 (a)와 같은 샘플에 대하여 화살표 방향으로 스캐닝하면서 256개의 1차반사 신호를 샘플링하여 A/D 변환시킨 데이터를 나타낸 것으로 샘플표면의 미소한 변화가 탐지되는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 100원 주화 샘플에 대하여 스캐닝 범위를 3cm×3cm로 하고 얻어진 데이터를 256×256 화소에 대응시켜 영상처리한 결과이다.

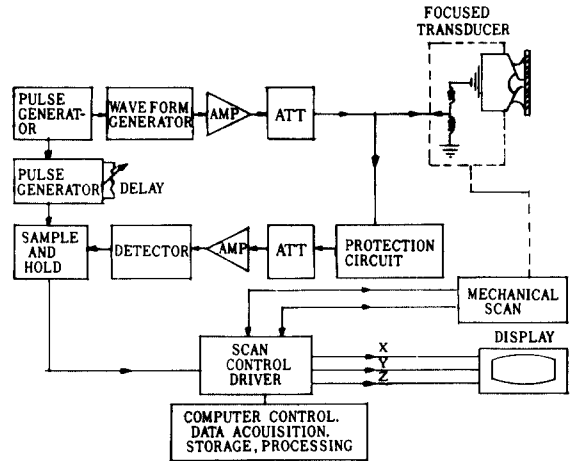
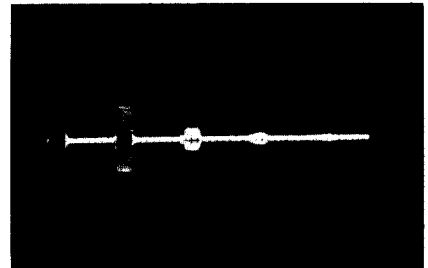


그림 4. 음향 현미경 시스템의 블럭선도

Fig. 4. Block diagram of the acoustic microscope system.



(Horizontal : 10μsec/div., Vertical : 0.2V/div)

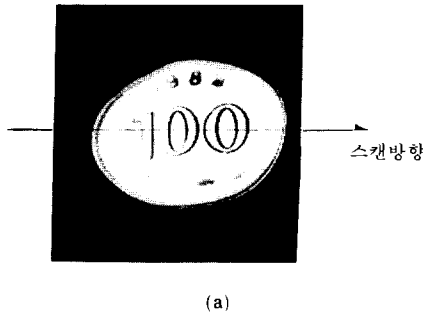
그림 5. 1, 2, 3 차 반사 신호파형

Fig. 5. The waveform of 1st, 2nd and 3rd reflection signal.

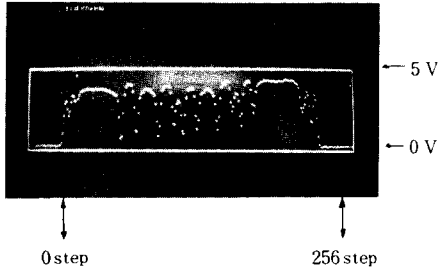
그림 6에서 본 실험에서 사용한 A/D 변환기의 분해능은 4096이었으나 모니터의 그레이 레벨이 16으로 제한되어 영상의 질이 다소 저하되었음을 알 수 있다.

음향 현미경 시스템의 defocused mode 동작과 측방향 분해능을 실험하기 위하여 그림 8과 같은 샘플을 fused quartz (Rayleigh wave 속도=3000m/sec)로 제작하고 표면에서 1mm 깊이에 0.2mm 부터 1mm까지의 원형결함을 만들어 음향 현미경 시스템을 defocused mode에서 동작시켰을 때 그림 9와 같은 영상을 얻을 수 있었다.

그림 9에서 0.4mm 이상의 내부 결함들이 검출되었으며 식(6)에서 이론적으로 산출한 측방향 분해능은 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 결함주변에서 원형 후린지 (fringe)를 볼 수 있는데 이것은



(a)



(b)

그림 6. (a) 샘플에 대한 변환기의 스캔 방향
(b) A/D 변환된 1차 반사신호

Fig. 6. (a) Scan direction of transducer for 100 won coin sample.
(b) First reflected signal transformed analog to digital.

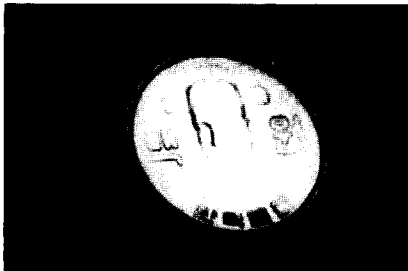


그림 7. 고체표면에 대한 음향 이미지
Fig. 7. Acoustic image for the surface of solid.

샘플표면에서의 bulk wave 반사와 결함에서 반사하는 Rayleigh wave 사이의 간섭 결과이다.

이때 후린지 사이의 거리는 Rayleigh 파장의 값이 되므로 Rayleigh wave 속도를 계산하는데 사용될 수 있다. 이와같이 음향 현미경의 defocused mode 동작 원리는 각종 산업분야의 비파괴 검사 특히 표면근처의 미소 결함을 검출하는데 이용될 수 있다.

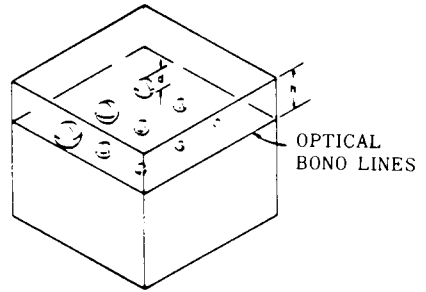


그림 8. Fused-quartz 샘플의 설계도형
Fig. 8. Schematic diagram of fused-quartz sample.

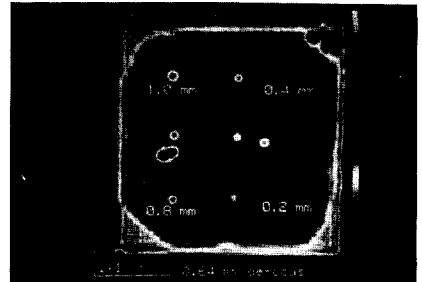


그림 9. 고체내부에 대한 음향이미지 (defocus length=0.64mm)
Fig. 9. Acoustic image for the interior of solid.

IV. 결 론

본 연구에서는 저주파대 음향현미경 시스템을 구성하고 그 주요한 부분인 음향 렌즈를 해석하여 음향 현미경의 측방향 분해능을 연구 분석하였으며 광학적으로 불투명한 고체 샘플 내부의 미소 결함을 검출하는 비파괴 검사 기술을 실험을 통하여 제시하였다.

이를 위하여 fused-quartz를 샘플로 사용하여 샘플 표면으로부터 깊이 1mm 지점에 원형결함을 만들었으며 음향 현미경 시스템을 defocused mode에서 동작시켜 실험한 결과 그림 9에서 나타난 것처럼 0.5mm 이상의 내부결함을 검출할 수 있었으며 음향 현미경의 측방향 분해능은 3MHz에서 0.5mm(결합용액내에서의 한파장)로서 식(6)의 이론치와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

샘플로써 100원 주화를 사용하고 음향 현미경 시스템을 focused mode에서 동작시켰을 때 샘플 표면 상태의 미소한 변화에 따른 반사신호 크기의 커다란

변화를 검출할 수 있었고 이를 음향이미지 처리한 결과 음향 현미경 시스템은 우수한 음향이미지 디바이스임을 알 수 있었다.

본 연구의 결과 저주파대 음향 현미경 시스템은 재료의 특성 조사나 산업분야의 각종 비파괴 검사에 응용할 수 있으며 고주파대(수백 MHz~수 GHz) 음향 현미경 시스템을 구성하면 생물학 및 의학 그리고 반도체 산업에서 광학 현미경과 양립하는 강력한 과학적 도구로서 활용이 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] C.F. Quate, et. al., "Acoustic microscopy with mechanical scanning - a review," *Proc. IEEE*, vol. 67, p. 1092, 1979.
- [2] C.F. Schueler, "Fundamentals of digital ultrasonic imaging," *IEEE Trans. Sonic & Ultra.* vol. SU-31, no. 4, pp. 195-202, July 1984.
- [3] R.A. Lemons "Acoustic microscopy by mechanical scanning," M.L. Report, no. 2456, Stanford Univ., pp. 19-24, May 1975.
- [4] H.K. Wickramasinghe, "Scanning acoustic microscopy," *J. of microscopy*, vol. 129, pp. 63-73, Janu. 1982.
- [5] L.W. Kessler, "Acoustic microscopy-1979," *Proc. IEEE* vol. 67, no. 4, April 1979.
- [6] A. Atalar, "Acoustic reflection microscope," Ph. D. Dissertation, Stanford Univ. 1978.
- [7] B.T. Khuri-Yakub, "Acoustic imaging of subsurface defects in composite & samples with rough surfaces," *Ultrasonic Symposium*, vol. 2, pp. 746-749, Oct. 1985.
- [8] M.E. Schafer, "The influence of front-end H/W on digital ultrasonic imaging," *IEEE. Trans. Sonic & Ultra.*, vol. SU-31, no. 4, pp. 295-305, July 1984.
- [9] 이상수, "파동광학" 교학 연구사, 서울, pp. 144-158, 1985.
- [10] R.A. Lemons, "A scanning acoustic microscope," *Ultrasonic Symposium*, pp. 18-29, 1976.
- [11] R.A. Lemons & C.F. Quate, "Acoustic microscope-scanning version," *Appl. Phys. Lett.* vol. 25, pp. 163, 1974.