

반사형 음향 현미경을 이용한
비파괴 검사 기술에 관한 연구
A Study on NDE technique using
Acoustic Reflection Microscope

*문 건(Moon, G.)
**고 대 식(Ko, D. S.)
**김 장 권(Kim, J. K.)
**전 계 석(Jun, K. S.)

요 약

본 논문에서는 반사형 음향 현미경의 반사응답 특성인 $V(z)$ 현상을 고찰하고 이 현미경을 이용한 새로운 형태의 비파괴 검사 기술을 제시한다. 10원 주화, 알루미늄, 집적회로 소자, 그리고 kevlar-epoxy 등을 샘플로서 선택하고 중심주파수 3MHz의 음향 현미경을 focused mode 및 defocused mode에서 동작시켜 실험하였다. 이 과정에서 음향 현미경의 분해능은 $500\mu\text{m}$ 로 나타났고 샘플의 표면 및 그 내부에 존재하는 결함은 검출되어 이를 영상화하였으며 샘플에 대한 영상의 콘트라스트 변화는 $V(z)$ 현상과 잘 일치함을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, the characteristic response of reflected signals of acoustic reflection microscope, $V(z)$ phenomenon, has been studied and a new type of NDE technique has been presented. 10 Won coin, aluminium, IC component, and kevlar-epoxy samples have been used for the experiment of NDE and the acoustic microscope operating at a center frequency of 3MHz has been used in the focused or defocused

*정희원, 제주대학교 통신과

**정희원, 경희대학교 전자공학과

mode of operation. In experiment, it has been shown that the acoustic microscope has the resolution of 500 μm and the defects present on the surface and near surface of samples have been detected by acoustic transducer and imaged on a monitor, and the variation of the contrast of image for samples has been in good agreement with $V(z)$ phenomenon.

I. 서 론

재료의 표면 및 내부에는 피할 수 없는 여러 결함이 있고 이들 결함은 재료의 강도와 밀접한 관계가 있다. 비파괴 검사는 전자파, 열, 방사선, 초음파등을 이용하여 재료를 손상 혹은 파괴하는 일없이 결함과 그 상태를 파악하고 재료의 품질을 평가하는 것을 말한다. 그중에서 초음파를 이용한 비파괴 검사는 탐촉자로서 피스톤형 변환자를 사용하고 있으나 이것은 음향파가 확산되어 전파되고 음향감쇄가 심하므로 높은 입력전력을 필요로 한다. 그러나 음향렌즈를 부착한 변환자는 음향파가 초점으로 집중되기 때문에 피스톤형에 비하여 음향강도를 약 10배 정도 증대시킬 수 있는 잇점이 있다.⁽¹⁾ 1973년 미국의 Quate와 Lemons는 강력한 음향빔을 형성시켜주는 음향렌즈를 이용하여 1 μm 의 분해능을 나타내는 음향 현미경 시스템을 개발하였다.⁽²⁾ 이 시스템은 영상을 위한 파라미터가 재료의 기계적 성질이므로 광학적으로 불투명한 재료의 내부에 존재하는 결함을 검출할 수 있고 재료의 특성을 조사하는 데도 이용할 수 있다.^{(2),(3),(4)}

음향 현미경에는 전자 현미경과 마찬가지로 투과형과 반사형의 두 종류가 있고 이 중에서 반사형 음향 현미경은 1978년 Atalar에 의하여 처음으로 연구되었으며 그는 구면형 변환자의 반사응답 특성($V(z)$ 곡선)을 해석하여 음향이미지의 콘트라스트가 샘플의 음향 임피던스와 변환자와 샘플사이의 거리(z)에 따라 현저한 차이를 나타냄을 보여 주었다.^{(2),(5),(6),(10)}

본 연구에서는 반사형 음향 현미경을 이용한 비파괴 검사 기술을 제시하기 위하여 샘플로서 10원 주화와 알루미늄, 그리고 집적회로 소자등을 사용하고 음향 현미경 시스템을 focused mode 및 defocused mode에서 동작시키므로써 광학적으로 불투명한 고체의 표면과 내부에 대한 음향 이미지를 구하였으며 보다 향상된 영상을 얻기 위하여 동일한 데이터를 비선형 드레슬딩 기법으로 처리하였다. 그리고 내부에 결함이 있는 kevlar-epoxy 샘플에 대한 영상은 음향렌즈의 defocus length를 변환시켜 가면서 구했으며 $V(z)$ 현상과 그 영상의 콘트라스트를 비교 분석하였다.

II. 음향 현미경 시스템의 해석

음향 현미경에는 투과형(transmission type)과 반

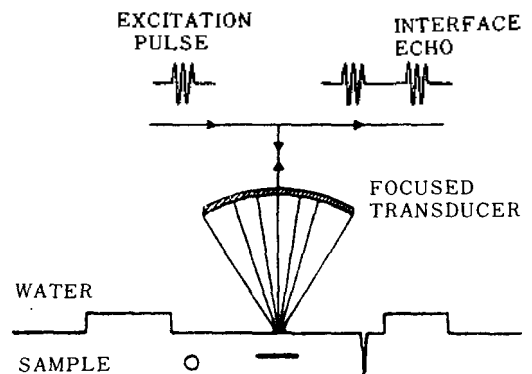


그림 1 음향 현미경의 동작원리
The principle of operation of acoustic microscope.

사형 (reflection type)의 두 종류가 있으며 이 중에서 반사형 음향 현미경은 두께가 큰 샘플에 적용할 수 있고 간섭문제를 일으키지 않으므로 고질 (high quality)의 이미지를 준다.

음향 현미경의 구조는 기본적으로 낮은 F/number를 갖는 음향렌즈위에 변환자를 구성시킨 것이며 그림 1은 음향 현미경의 동작원리를 보여준다.

그림 1에서 변환자는 rf tone burst로 여진되며 음향렌즈의 초점에 놓여진 샘플 위를 주사한다. 물과 샘플의 경계면에서 반사된 신호는 진폭 검출되어 디스플레이 모니터의 명도를 변화시키는데 사용되며 모니터의 한 점은 샘플에 대한 변환자의 위치에 대응한다. 변환자는 기계적인 방법에 의존하여 샘플을 연속적으로 주사하면서 음향 이미지를 만든다. 반사신호의 진폭은 샘플의 음향 임피던스의 함수이며 샘플과 렌즈사이의 거리의 함수이다. 만일 어떤 결함이 샘플의 표면에 존재한다면 결함이 있는 곳에서 샘플의 음향 임피던스는 결함이 없을때와 다른 값을 나타내고 그 결과로써 반사신호의 진폭은 변화를 일으킨다. 이와 같은 반사신호의 진폭을 A/D 변환하여 모니터의 그래픽레벨로 대응시켜 나타내면 샘플에 대한 2차원 음향 이미지를 얻을 수 있다. 음향렌즈의 초점을 샘플의 표면에 일치시키는 이러한 동작모드를 focused mode 동작이라고 하며 우리는 이것을 바탕으로 샘플의 표면에 존재하는 결함을 검출할 수 있다.^{(2), (8)} 한편 어떤 결함이 샘플의 내부에 존재한다면 변환자의 초점거리를 샘플에 좀더 접근시켜 초점이 샘플의 내부에 형성되도록 한다. 이것을 음향 현미경의 defocused mode 동작이라고 하며 defocused mode에서 동작할 때 변환자에 의하여 여진된 구면파의 일부는 rayleigh angle로 입사되며 탄성 표면파를 발생시킨다. 탄성 표면파는 샘플 표면을 따라서 전파하며 샘플과 상호 작용한 후에 변환자를 향하여 재방사 한다. 이때 탄성 표면파의 윌크파는 상호간섭을 일으켜 샘플과 변환자사이의 거리(z)에 따른 반사응답 특성을 준다. 이 현상은 V(z)

현상으로 불리우며 샘플내부에 존재하는 결함에 대한 음향이미지의 콘트라스트와 밀접한 관계가 나타나고 재료의 특성을 연구하는 분야에 이용된다.^{(6), (7)}

2. 구면형 변환자의 반사응답 특성 : V(z)곡선

V(z)곡선은 구면형 변환자의 반사응답 전압을 변환자의 초점으로부터의 거리인 z의 함수로서 나타낸 식을 말하며 재료의 특성을 산출하는데 이용할 수 있다. V(z)곡선에서 나타나는 영점사이의 간격(null space)은 재료의 기계적 성질과 밀접한 관계가 있다.⁽⁴⁾ V(z)응답은 또한 재료의 음향 반사계수에 기인하므로 구면형 변환자의 초점을 재료내부에 존재하는 결함에 일치시키는 방법을 통하여 음향 이미지의 콘트라스트를 향상시키는데 사용될 수 있다.

V(z)곡선에 대한 이론적인 계산은 구면형 음향변환자에 의하여 여진된 음향파가 샘플을 향하여 전파할 때 샘플과 상호작용한 후에 재방사하여 나타내는 반사출력을 산출하여 얻을 수 있으며 그림 3과 같은 ray teacing모형을 이용하여 해석한다.

그림 3에서 샘플의 법선방향으로 입사된 ray 1과 rayleigh angle로 입사된 ray 2인 음향파는 상호 간섭을 일으킨 후 재방사하며 변환자를 샘플에 더욱

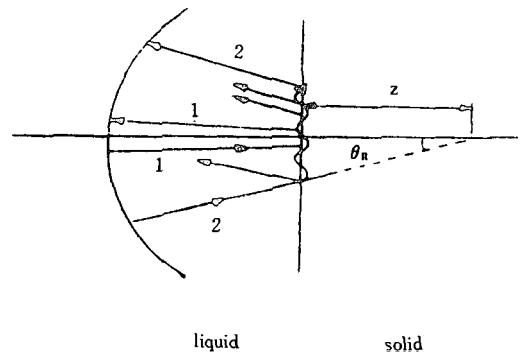


그림 3 V(z) 응답의 해석을 위한 ray diagram. Ray diagram for interpretation of the V(z) response.

접근시켜가면서 반사출력의 변화를 검출하면 V(z) 곡선을 얻을 수 있다. V(z)식의 산출은 구면형 변환자에 의하여 여진된 음향파가 전파되어 초점에 나타내는 음향강도를 구하는 식과 두매질(변환자와 결합용액, 결합용액과 샘플)사이를 전파하는 음향파의 투과계수 및 반사계수를 구하는 식을 이용하여 구할 수 있으며 변환자의 구표면 전체에 대한 적분으로 나타낼 수 있다.^{(3),(4)}

$$V(z) = \int_0^\infty |P(\lambda_0 R)|^2 |U(\lambda_0 R)|^2 IR(\rho) \cdot \exp(j 2kz \sqrt{1-\rho^2 \lambda^2}) 2\pi \rho d\rho \quad (1)$$

여기서 IR(ρ)는 공간주파수 ρ를 갖는 음향 반사 계수, P는 lens pupil function, R은 반지름, $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ 로 전파상수, U는 초점에서의 음향강도를 표시한다. 식(1)에서 P와 U는 일정하므로 측정하고자 하는 재료의 음향 임피던스는 식(1)에서 V(0)인 조건을 이용하여 산출할 수 있는 것이다. 또한 V(z) 출력은 음향 임피던스와 z의 함수이므로 만약 재료의 내부에 결함이 존재한다면 그 지점의 음향 임피던스는 결함이 없을 때와 차이가 있으므로 V(z) 출력에도 변화를 일으키며 초점이 그 결함의 위치와 일치하였을 때 가장 커다란 V(z) 출력을 나타낸다. 결과적으로 커다란 V(z) 출력의 차이를 모니터의 명도에 대응시켜 영상처리하였을 때 얻어진 영상은 콘트라스트가 현저하게 좋은 영상이 되는 것이다. 이와같이 V(z) 곡선에 대한 해석을 통하여 고체내부에 존재하는 결함의 위치를 결정할 수 있으며 보다 향상된 콘트라스트를 갖는 음향 이미지를 얻을 수 있다.

V(z) 곡선의 영점사이의 간격(null space)인 Δz는 그림 3의 ray 1과 ray 2의 위상차가 π의 기수배일 때 얻어지며 Δz는 식(2)와 같다.

$$\Delta z = \frac{\lambda_R}{\sin \theta_R} \left(\frac{1 + \cos \theta_R}{2} \right) \quad (2)$$

여기서 λ_R은 rayleigh 파장이며 θ_R은 rayleigh angle이다. 식(2)에서 Δz는 재료에 따라 다른 측정치를 주므로 Δz와 λ_R을 이용하면 재료의 음향속도를 구할 수 있고 음향 임피던스와 음향속도를 이용하면 재료의 밀도를 산출할 수 있다.⁽⁹⁾

III. 실험 및 결과 고찰

본 연구에서 설계한 음향 변환자의 제반특성과 실험조건은 표 1과 같다.

표 1 변환자의 특성 및 조건

구 분	특성 및 조건
center frequency	3 MHz
aperture diameter	16 mm
aperture angle	30°
focal spot size	0.51 mm
F/number	1.0
sample	10원 주화, 알루미늄, I.C. kevlar-epoxy
coupling liquid	fresh water

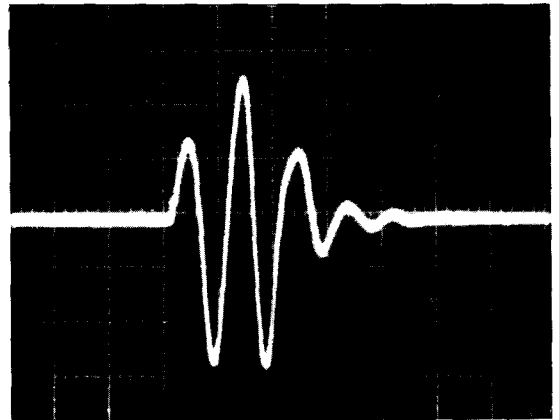
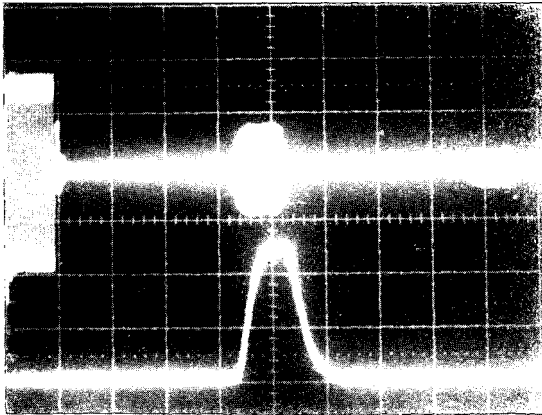


그림 4 구면형 변환자의 임펄스 응답
Impulse response of spherical transducer.



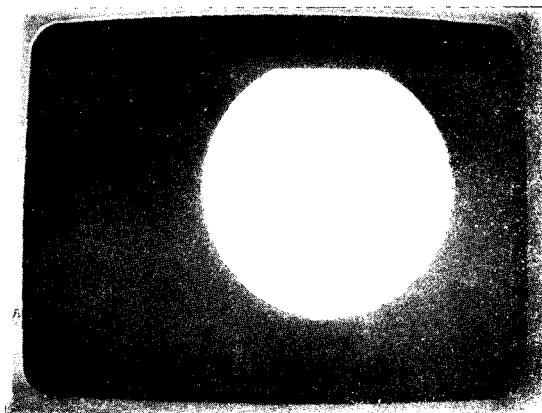
상축 : vertical 0.5 V/div.
 horizontal 5 μ sec/div.
 하축 : vertical 2 V/div
 horizontal 5 μ sec/div.

그림 5 pulse-echo 방법에 의한 다중반사신호
 Multiple reflected signal by pulse-echo method.

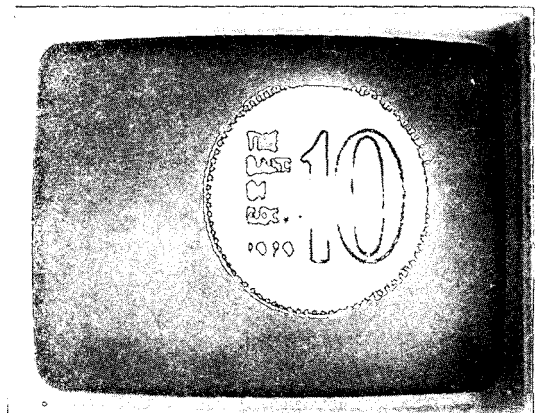
그림 4는 표 1의 특성을 갖는 변환자에 100nsec의 임펄스를 인가하였을 때 pulse-echo 방법에 의하여 얻어진 임펄스 응답으로서 약 1.5 μ sec에 걸쳐 수개의 pulse-lobe가 발생되는 것으로 보아 임펄스 응답에 대한 주파수 특성은 광대역성임을 예측할 수 있다. 그림 5에서 상축은 중심주파수 3MHz, 펄스폭 5

μ sec인 tone burst파를 변환자에 인가하였을 때 얻어진 다중반사 신호이고 하축은 1차 반사신호만을 선택한 후 선형 검파시킨 파형이다. 그림 5에서 매우 높은 1차 반사신호가 얻어짐을 알 수 있으며 이것은 렌즈에 의한 음향파동의 집중효과가 기인한 것이다. 이와같은 과정을 통하여 얻어진 1차 신호를 A/D변환하여 그 진폭크기의 변화를 모니터의 명도의 변화로 대응시켜 영상처리하면 샘플에 대한 음향 이미지를 얻을 수 있다.

그림 6-a는 10원 주화를 샘플로 사용하고 구면형 변환자의 초점을 샘플표면에 일치시킨 후 변환자를 스캐닝하여 샘플표면을 영상처리한 것으로 본 연구에서 사용한 모니터의 제한된 그레이레벨로 인하여 영상의 질이 매우 저하되었음을 볼 수 있다. 그림 6-b는 그림 6-a에서 사용한 동일한 데이터를 비선형 드레슬딩(thresholding)기법 즉 전체 데이터에 대한 히스토그램에 의하여 데이터의 분포를 해석하고 영상의 콘트라스트에 중요한 영향을 미치는 데이터 구간에서는 데이터를 작은 간격으로 드레슬딩하고 그 이외의 구간에서는 데이터를 거의 같은 레벨로 취급하는 기법으로 처리한 것으로 고해상력의 모니터를 사용하면 고질의 음향 이미지를 얻는 것이 가



(a)



(b)

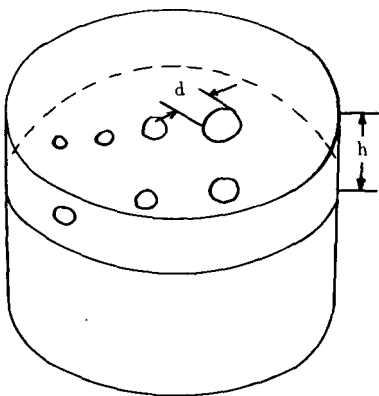
그림 6 고체 샘플표면에 대한 음향 이미지 (a) 선형 드레슬딩 (b) 비선형 드레슬딩
 Acoustic image for the surface of the solid sample. (a) Linear threshold (b) Nonlinear threshold.

능하다.

이와같이 변환자의 초점을 샘플표면에 일치시키는 것을 음향 현미경의 *focused mode* 동작이라고 부르며 이것은 정밀성을 요하는 공업재료등의 표면상태를 관찰하는데 이용될 수 있고 광학 현미경에 비하여 표면처리(*staining*)과정이 불필요한 잇점을 준다.

광학적으로 불투명한 고체샘플의 내부에 있는 결함을 영상화하기 위하여서는 구면형 변환자의 초점이 샘플내부에 형성되도록 음향 현미경 시스템을 *defocused mode*에서 동작시켜야 한다. 이것은 II-2절에서 다룬 $V(z)$ 식에서 초점거리로부터의 거리 z 에 따라서 반사신호 출력이 변화하는 데 기인한다. 음향 현미경 시스템을 *defocused mode*에서 동작시켰을 때 샘플을 향하여 *rayleigh angle*로 입사된 음향파는 샘플표면을 따라 전파하는 탄성 표면파를 발생시키며 탄성 표면파는 한 파장 깊이까지 음향장을 형성시킨다. 종래의 초음파 탐상기술로서는 표면근처(*subsurface*)의 결함을 검출하기가 어려웠고 미소 결함에 대한 명확한 영상을 얻을 수 없었으나 음향 현미경시스템을 이용하면 가능하다.

그림 7은 샘플로서 알루미늄(*rayleigh wave acoustic velocity*=3000m/s)을 선택하고 샘플의 표면으로



($h=1.0, 1.5\text{mm}$, $d=0.3, 0.5, 0.8, 1.0\text{mm}$)

그림 7 알루미늄 샘플의 설계도형
schematic diagram of aluminum sample.

부터 1mm 깊이에 0.3, 0.5, 1.0mm등의 결함을 임의로 제작한 샘플의 설계도형이다.

그림 8은 그림 7과 같은 샘플을 사용하여 음향 현미경 시스템을 *defocused mode*에서 동작시켜 얻어진 음향 이미저로서 0.5mm이상의 원형 결함이 검출되었음을 볼 수 있다.

그림 9는 샘플로서 직접회로 소자를 선택하고 음향 현미경을 *defocused mode*에서 동작시켜 직접회로 소자의 내부의 영상을 나타낸 것으로서 본 시스템의 제한된 분해능(0.5mm)과 실험장치의 제한으로

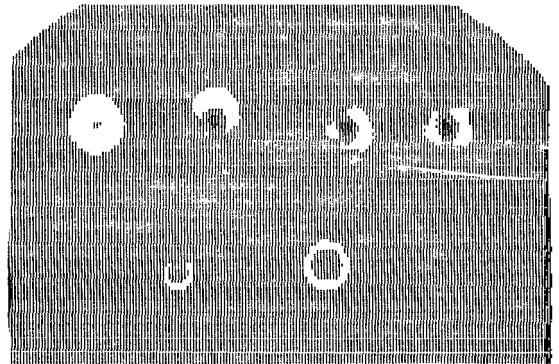


그림 8 알루미늄 샘플내부에 대한 음향 이미저.
Acoustic image for interior of aluminum sample.

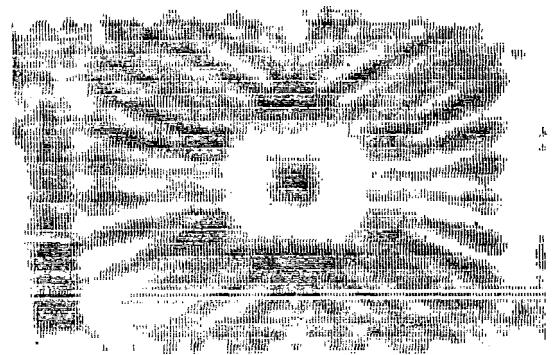
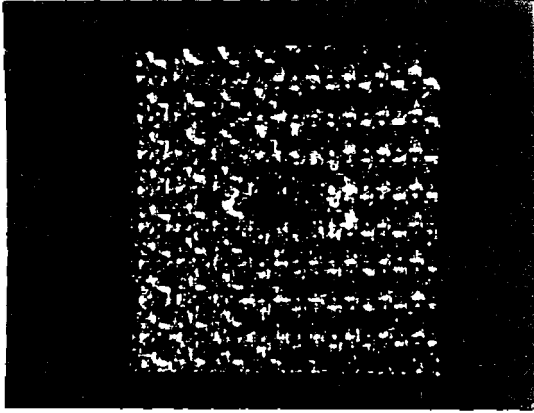
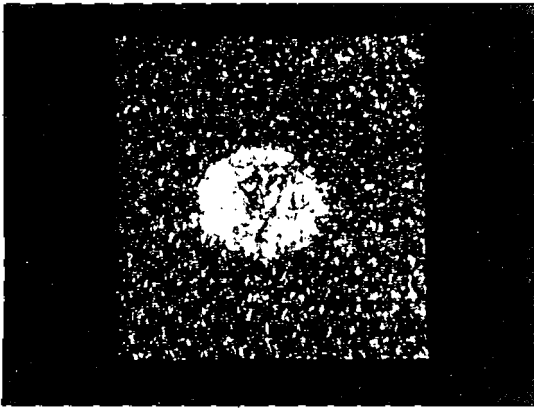


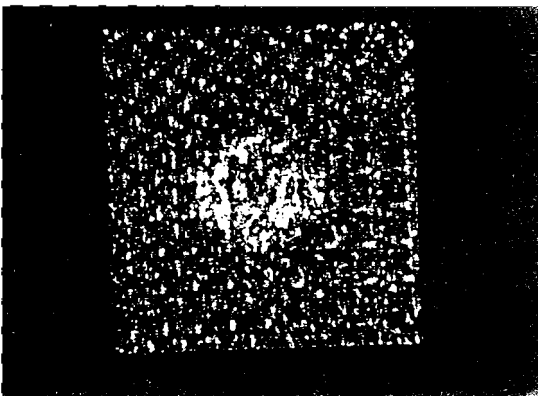
그림 9 직접회로 소자 샘플 내부의 음향 이미저
Acoustic image for the interior of integrated circuit sample



(a) defocus length = 1.0 mm



(b) defocus length = 2 mm



(c) defocus length = 3 mm

그림10 내부결합이 있는 kevlar-epoxy 샘플에 대한 음향 이미징
Acoustic image for the kevlar-epoxy sample with subsurface defect

인하여 다소 불명확하게 나타났지만 분해능을 향상시키고 시스템을 개선한다면 음향 현미경 시스템은 반도체 산업분야의 비파괴 검사 장비로 크게 기여할 수 있을 것이다.

그림10은 내부에 결함을 갖고있는 kevlar-epoxy composite (음향 임피던스 $= 3-5 \times 10^6 \text{ kg}$, 음향속도 $= 3000 \text{ m/sec}$)를 샘플로 사용하여 내부 결함을 조사한 것이다. 그림10에서 변환기의 초점이 II-2 절에서 다룬 $V(z)$ 곡선에 대한 이론과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림10에서 내부결합의 영상에 대한 콘트라스트는 defocused length가 2 mm 일 때 가장 좋으며 내부 결함은 표면으로부터 2 mm 깊이에 존재하는 것을 예측할 수 있다.

끝으로 본 실험에서 사용한 실험장치는 그림11과 같다.

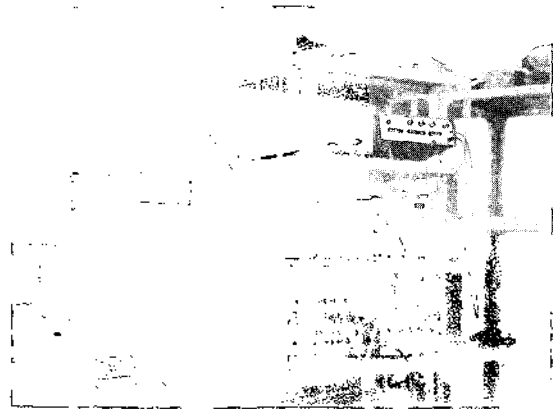


그림11 실험 장치도
Configuration of experimental equipment

IV. 결 론

본 연구에서는 반사형 음향 현미경 시스템을 구성하고 이 시스템을 이용한 새로운 형태의 비파괴 검사 기술을 실험을 통하여 보였다. 이를 위하여 음향 현미경을 focused mode 및 defocused mode에서 동

작시켜 고체 샘플에 대한 표면 및 표면 내부의 결함을 영상화 하였으며 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 샘플로서 10원 주화를 사용하고 음향 현미경 시스템을 focused mode에서 동작시킨 결과 광학 현미경에서 필요한 staining 없이 샘플표면에 대한 영상을 얻을 수 있었으며 이 데이터를 비선형 드래슬딩기법으로 영상 처리하여 보다 향상된 영상을 재현할 수 있었다.

2. 샘플로서 표면으로부터 1mm와 1.5mm 깊이에 0.3, 0.5, 0.8, 1.0mm의 원형결함을 갖는 알루미늄과 임의의 집적회로 소자를 선택하고 음향 현미경 시스템을 defocused mode에서 동작시킨 결과 알루미늄 내부에 존재하는 0.5mm 이상의 결함을 검출할 수 있었고 집적회로 소자에 대해서도 그 내부의 배선상태를 영상화할 수 있었다. 이 실험에서 음향현미경의 분해능은 500 μ m임을 알 수 있다.

3. 샘플로서 표면으로부터 2mm 깊이에 결함이 있는 kevlar-epoxy 샘플을 사용하고 $V(z)$ 이론에 따라서 defocused length를 변화시킨 결과 샘플에 대한 음향 이미지는 음향렌즈의 초점이 결함의 위치와 일치하였을 때 콘트라스트가 분명한 영상을 나타냈으며 II-2절에서 논한 $V(z)$ 이론과 잘 일치함을 확인하였다. 이와같이 $V(z)$ 현상은 콘트라스트의 변화를 통하여 내부결함의 위치를 결정해주며 근 외에도 재료의 음향속도나 음향 임피던스등을 조사하는데 사용할 수 있다.

본 연구의 결과를 살펴볼 때 반사형 음향 현미경 시스템은 반도체 산업에서처럼 고품질을 요하는 재료에 대한 비파괴 검사도구로서 그 성능이 우수함을 알 수 있으며 그 외에 재료의 특성을 조사하거나 생체 및 의공학 분야에도 강력한 과학적 도구로서 그 활용을 기대할 수 있다.

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 현재 연구중인 연구결과의 일부임

REFERENCE

1. 고대석, 문건, 전개석, "음향렌즈의 성능에 관한 연구", 전기전자공학학술대회논문집(II), pp 1591-1594, July, 1987.
2. R.A. Lemons, "Acoustic microscope by mechanical scanning" M.L. Report. No.2456, Stanford Univ., pp.1-200, 1975.
3. H.K. Wickramasinghe, "Scanning microscopy: a review", Jour. of microscopy, Vol.129, pp. 63-73, Jan., 1983.
4. A. Atalar, "Phase imaging in reflection with the acoustic microscope", Appl. Physics letter, 31 (12), pp.791-796, Dec., 1977.
5. B.K. Yakub, "Low frequency acoustic microscope", G.L. Report No.3765 Stanford Univ. pp. 1-8, 1984.
6. G.S. Kino, "Material characterization by the inversion of $V(z)$ " IEEE Trans. sonic & ultra., Vol.SU-32 No.2, pp.213-223, 1985.
7. K.L. Lawrence, "Techniques of acoustic microscope", Ph.D. Dissertation Stanford Univ. pp. 1-156, 1983.
8. A. Atalar, "Penetration depth of the scanning acoustic microscope" IEEE. Trans. sonic & ultra. Vol.SU-32 No.2, pp.164-167, 1985.
9. C.F. Quate, "Acoustic microscopy with mechanical scanning", Proc. of the IEEE, pp.1092-1113, 1979.
10. A. Atalar, "Acoustic reflection microscope", Ph.D. dissertation, Stanford Univ., pp.1-117, May 1978.