

초음파현미경의 원리와 응용



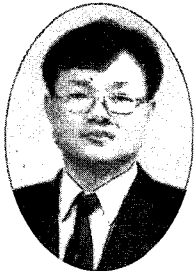
1. 서론

재료의 표면 및 내부에 존재하는 결함과 불연속부를 검출하기 위한 연구는 전자주사현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM), 광학현미경과 같은 이미지 기술로서 많은 연구가 진행되고 있다. 또한, 현재에는 광학적으로 불투명체를 통해 전파하고 탄성성질의 미소변화에 민감한 초음파 특성을 이용한 초음파현미경(SAM : scanning acoustic microscope)으로 물질 표면과 내부 이미지 및 특성을 검출할 수 있다.

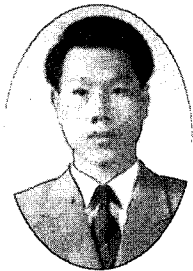
초음파현미경의 특징은 첫째, 초음파는 고체를 통과하므로 광학적으로 불투명한 시료의 내부구조를 현미경적인 해상력으로 자세히 관찰할 수 있다. 둘째, 고체를 투과하는 초음파는 시료의 탄성적 특성변화에 반응하기 때문에 광학적으로 균일한 재료의 탄성적 특성들이 다르다 해도 그 화상의 대조로서 탄성적 특성의 차이를 선명하게 표현할 수 있다. 셋째, 재료가 지닌 초음파적 특성들을 그 재료표면의 탄성과 속도로부터 분석하는 것이 가능하다. 넷째, 파장을 수백Å까지 자유로이 선택함으로써 시료를 다양하게 검사할 수 있다. 다섯째, 사용주파수를 높이면 해상도를 크게 향상시킬 수 있다는 점이다.

초음파현미경의 동작은 음향임피던스의 변화가 일어나는 경계면에서 초음파의 전파 및 반사의 원리로 동작한다. 이 기술은 시편의 다양한 성분에 의해 후면으로 반사된 초음파의 강도를 기초로 이미지(image)를 제공해 준다. 여기서 반사강도는 음향임피던스(음향속도×밀도)의 차이에 의해 나타나며, 다양한 주파수를 사용하면 다른 scale의 임피던스 변화의 사상(map)을 가능하게 하므로 샘플의 밀도, 탄성, 점성, 박막의 두께, 부착력, 결함등 기계적·물성적인 특성을 알 수 있다. 이들은 음향렌즈와 샘플사이의 거리에 따라서 변화하는 압전 변환기의 출력 기록 즉, $V(z)$ 곡선의 분석으로 가능해진다[1][2][3][4].

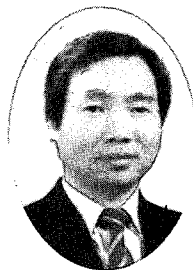
초음파현미경에 대한 개념이 처음 등장한 것은 1936년 S. J. Sokolov에 의해서였다. 그는 3GHz 음파의 파장이 광학이미지와 견줄만한 해상도와 정밀도를 가진다는 것을 발견하여 이를 이용한 초음파현미경을 구성할 수 있음을 제안하였다[5]. 그러나 단지 1MHz 정도의 음향파에서 동작하는 낮은 해상도의 Image system으로 그 개념을 입증하였다. 1940년에 Firestone은 초음파 투과법과 C-scan하는데 있어 중요한 역할을 하는 기계적 장치와 결합한 초음파 음향 펄스를 발생시키는 소자를 개발 발전시켰으며



정규원
성균관대학교 전기공학과 박사수료



이종덕
서남대학교 전자전기공학과 전임강사



송준태
성균관대학교 전기공학과 교수
당 학회 편수이사

[6], 1955년 Hastings이 최초로 gray scale C-Scan image를 개발하였다.

그 후 60년대부터 마이크로일렉

선의 해석, 그리고 그 응용에 대해 소개하고자 한다.

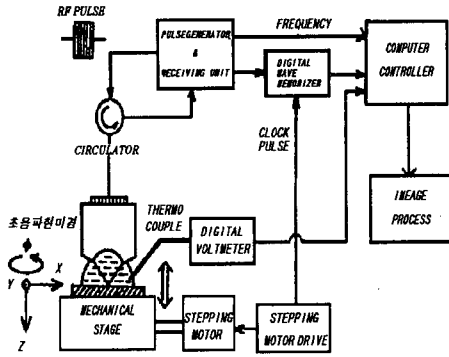


그림 1. 초음파현미경의 블록 다이어그램

트로닉스와 박막제조기술의 발전으로 고주파대역에서 동작하는 압전변환기 (Piezoelectric transducer)의 제작이 가능해지면서 고해상도를 가지는 음향현미경에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 1973년 C. F. Quate에 의해 초음파현미경이 개발되었다[7]. 이후, 4.4GHz의 중심주파수와 2000Å의 해상도를 가지는 SAM 시스템이 개발되어 비파괴검사등에 응용되고 있다. 현재, SAM 시스템에 대한 연구는 Olympus, Leitz, Hitachi, Sonix Corp. 등에서 반도체 패키지의 내부검사와 제품의 신뢰성을 확보하기 위해 고주파 pulse /receiver, 고주파변환기와 8 GHz A/D 변환기술을 이용하여 20 nm 정도의 해상도를 가지는 제품을 선보이고 있으며, 또한, 비파괴검사법의 혁신적인 개발과 이들 성분들의 upgrade 그리고 응용분야를 넓혀 나가는 데 주력하고 있다.

본 글에서는 반사모드 즉, Pulse echo 모드로 동작하는 초음파현미경의 동작원리와 V(z)곡

2. 초음파 현미경의 동작원리

주요한 원리는 초음파로 물질의 표면이나 내부의 형상을 연구하는 것이다. 미세구조의 이미지는 샘플내에서 임피던스의 변화에 의해 반사되어진 초음파로서 나타내어진다. 샘플에 초음파를 입사하면 부분적으로 샘플에 투과되고 나머지는 반사된다. 샘플로부터 반사된 신호는 물질의 탄성정수에 의해 결정되며 변환기에 의해 수신된다. 이 수신된 신호 즉, 변환기의 출력은 거리의 함수인 V(z)곡선으로 불리며, 이를 분석함으로써 시편표면과 내부형상을 이미지화 할 수 있고, 결과적인 이미지는 C-scan으로 불린다. 또한, 주파수 변환을 통하여 얻은 결과를 토대로 물질의 성질(밀도, 음향속도, 음향감쇄계수)을 알 수 있다.

초음파현미경의 구조는 그림 1과 같이 음향렌즈, 전기신호의 수신, 발신을 위한 pulse generator & receiver unit, image processing unit의 3가지로 크게

나누어진다.

2.1. 음향렌즈

그림 2는 음향렌즈의 형상으로 음향렌즈는 음향파를 발생하고 기록하는 변환기와 wave guide의 역할을 하는 crystal rod, 초음파를 전달시키는 매개체인 coupling liquid로 구성된다. 압전효과를 이용한 ZnO 변환기는 crystal rod의 한쪽 끝에 sputter 법에 의해 증착하고 이는 고주파 음향파를 발생하여 시편을 향해 crystal rod를 통해 전파된다. Crystal rod는 ZnO 변환기에서 발생된 초음파를 전달하는 역할을 하며 sapphire와 같이 음향전달 특성이 양호하고 음향속도가 빠른 단결정체가 선택된다[8][9].

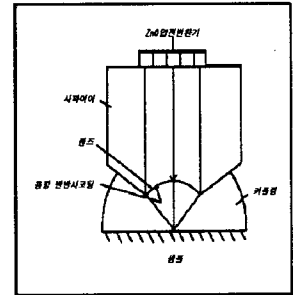


그림 2. 음향렌즈의 모형

Sapphire rod 후면에 구형으로 연마된 오목한 면은 입사되는 초음파를 coupling liquid를 통한 곳으로 집중시키는 역할을 한다. 또한, 시편과 렌즈 사이에는 음향경로를 형성시키기 위해 사용한 coupling liquid와 사파이어의 큰 음향속도차이로 초점에서 회절 제한된 초음파 beam을 얻을 수 있어 광학렌즈에서 발생하는 구면수차를 최소화 할 수 있다. 렌즈의 표면은 음향손실을 최소화하기 위해 정밀하게 연마하며 사파이어와 coupling liquid

와의 임피던스 정합을 위해 유리 층을 입힌다[10]. 또한, Coupling liquid는 초음파를 흡수하며 흡수 손실은 주파수의 제곱에 따라 증가한다. 따라서 SAM에서, 초점은 렌즈로부터 떨어져 있어 흡수 손실이 발생하므로 이 손실을 최소화하기 위해 초점거리를 짧게 해야 한다. 예를 들어 1GHz에서는 약 $50 \mu\text{m}$ 이하이다. 그리고 물은 흡수 손실을 감소시키기 위하여 heating한다.

2.2. pulse generator & receiver unit

pulse generator와 receiver unit은 변환기를 여기시키기 위해 short pulse를 발생하는 고주파 펄스 발생기와 변환기에 의해 저장된 반사신호를 증폭하고 기록하기 위한 receiver로 구성된다. 서클레이터 장치는 송신된 신호와 수신된 신호사이를 분리한다.

pulse generator로 부터의 RF pulse는 ZnO변환기를 여기 하여 초음파가 샘플로 전파된다. 샘플로부터의 반사파는 서클레이터를 통해 pulse mode system으로 저장된다. RF pulse signal의 검출에 의한 video 출력은 peak holding 회로를 이용한 video 출력으로 변환된다.

2.3. image processing unit

이는 영상처리 기능을 지닌 컴퓨터 시스템으로서 X, Y, Z 방향으로 stage 제어가 가능하고, 변환기로부터의 전기적인 신호를 3차원의 이미지로 변환할 수 있다. 음향현미경에서 검사 모드는 세 가지 즉, A-scan, B-scan, C-scan이 이용된다.

① X-t scan 또는 A-scan :

pulse를 시편에 가하면 시편 내부에서부터 결합까지의 거리 및 크기가 오실로스코프상에 시간지연으로 나타내어지는 방법이다. 반사파의 amplitude를 분석하면 샘플내에 존재하는 결함 및 그 크기를 분석할 수 있다. 이러한 scan을 amplitude scan 또는 A-scan 이라고 하며, 변환기에서 수신된 최초의 정보이다. 즉 고정된 렌즈의 위치에서 시간에 따라 수신된 신호 크기의 변화를 보여준다.

② X-Z scan 또는 B-scan :

한 줄의 amplitude정보를 동시에 얻어진 것을 표현한 것을 B-scan 이라고 하며 수평축은 시간지연을 수직축은 샘플표면을 따라가는 기계적인 위치를 의미한다. 2차원적인 B-scan은 선을 따라서 몇몇의 A-scan을 기록함으로써 만들어진다. 즉 특정 영역에서 "cross section"의 2차원 이미지를 제공한다.

③ X-Y scan 또는 C-scan :

초음파의 전파방향에 수직으로 image면을 형성한 방법으로 A-scan상에서 시간을 고정하고, X-Y방향으로 렌즈를 움직여서 정보를 수집한다. 즉 선택된 내부평면의 2차원 이미지를 제공한다.

3. V(z)곡선의 분석

변환기의 출력신호에는 종파와 표면파의 성분으로 이루어져 있으며, 일반적으로 단단한 물질의 음향이미지에서는 종파와 횡파(shear wave) 보다 느리게 전파하는 표면파에 (rayleigh wave) 의해 크게 좌우된다. 그리고 표면으로부터의 깊이는 입력주파수

의 한 파장 이내로 제한된다 [3][11].

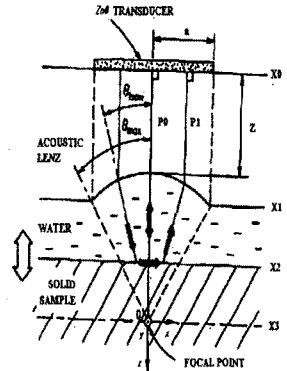


그림 3. V(z)곡선 매카니즘

그림3은 V(z)곡선의 매카니즘을 설명하는 그림으로 직각좌표계 (x,y,z)는 coupling liquid내의 초점면을 나타낸다. 시편은 최대각 θ_{max} 에 의해 제한되는 초점화된 음향장에 의해서 표현된다. 또한, 가장 간단한 경우의 leaky SAW를 고려하면, θ_{LSAW} 가 θ_{max} 보다 작을 때 여기 된다.

여기서, 정상적으로 반사된 종파는 p0 경로로 진행한다. p1 경로를 따라 진행되는 종파는 샘플 표면에 θ_{LSAW} (rayleigh angle)로 입사한다.

여기서, $\sin \theta_{LSAW} = V_w / V_{LSAW}$ (V_w : 액체에서의 초음파 속도, V_{LSAW} : 샘플 내에서의 rayleigh wave의 속도)이다. 이 파는 표면에서 rayleigh wave를 여기하고 연속적으로 leak energy가 결합액체로 되돌아간다. 이 leaked wave는 p1 경로를 따라서 종파와 같이 변환기로 되돌아 진행한다. 정상적으로 반사된 종파(p0)와 종파-rayleigh-종파(p1)로부터의 정보는 변환기에 의해 수신되고 진폭과 위상이

합해진다. 표면 이미지는 음향빔이 샘플의 표면에 초점화 되었을 때 얻어진다. 샘플내부의 이미지를 얻기 위해서는 음향 빔의 초점을 샘플의 내부로 해야하므로 렌즈를 향해 샘플을 움직여서 얻는다. 그러한 이미지를 소위 SAM에서 "defocused" 이미지라고 하고 이는 초점이 없거나 흐트러졌다는 의미가 아니고 표면과 표면내부의 정보를 포함하고 있다는 것을 의미한다. 음향이미지에 있어서 contrast의 주요한 원인은 두 경로를 진행하는 두 파 사이의 위상차이로 인한 간섭효과이다. 렌즈와 샘플사이의 거리(z)가 변함에 따라 종파와 rayleigh wave의 위상은 다른 비율로 변한다. 그러므로 거리(z)의 감소와 더불어 두 경로사이의 보강간섭과 상쇄간섭으로 인하여 변환기에 의해 수신된 신호는 진동(oscillations)의 열(series)로서 나타나게 된다. 신호진폭의 이러한 변화를 $V(z)$ 곡선이라고 부른다. 즉 $V(z)$ 는 렌즈와 샘플사이의 거리(z)의 함수로서 수신된 신호(Volt)의 크기를 나타내며, 교번 하는 보강 또는 상쇄간섭 때문에 진동의 형태를 가진다. 이런 $V(z)$ 곡선의 변화는 변환기에 감지된 음파의 두 성분의 간섭에 의해 발생하므로 이 곡선의 분석을 통해 물질의 음향특성을 분석할 수 있다.

따라서, 변환기의 출력 $V(z)$ 곡선은 이 둘 두 성분의 합으로 수식화할 수 있으며, 그림 4에 $V(z)$ 곡선의 형태를 나타내었다.

$$V(z) = V_L(z) + V_I(z) \quad (1)$$

여기서 $V_L(z)$ 의 성분은 샘플의 표면에서 z축으로 직접적으로 반사된 종파의 렌즈응답이다. 또한,

$V_L(z)$ 는 렌즈의 치수와 동작주파수 즉 음향장 분포에 의해 영향을 받으며, 진폭의 크기는 초점(z=0)에서 최대가 된다. 이는 샘플로부터 반사되는 모든 공간주파수 성분을 수신할 수 있기 때문이다.

초점을 샘플 내로 입사시키면 변환기에서 수신된 신호는 크게 감소하고 거의 일정하게 된다. 따라서 $V_I(z)$ 는 $V_L(z)$ 가 기준신호로 이용될 때 두 경로의 간섭의 성분으로 나타내어진다. 이 간섭에 의한 진동의 파장 Δz 는 다음과 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta z = \frac{v_w}{2f(1 - \cos \theta_{LSAW})} \quad (2)$$

여기서 v_w 는 결합액체에서의 음향속도이고, θ_{LSAW} 은 rayleigh angle이다.

입력주파수를 f 라 하면, 스넬의 법칙($\sin \theta_{LSAW} = v_w / V_{LSAW}$)으로 부터 다음과 같은 수식으로 나타내어진다.

$$v_{LSAW} = \frac{v_w}{(1 - (1 - \frac{v_w}{2f\Delta z})^2)^{1/2}} \quad (3)$$

위 식으로부터 v_{LSAW} 는 $V(z)$ 곡선에서 진동의 주기와 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서, $V(z)$ 곡선으로부터 $V_I(z)$ 함수를 실험 data로부터 추출하면 위 식으로부터 leaky SAW의 두 물리적인 량 즉, v_{LSAW} 는 간섭의 파장 Δz 로부터 결정되고, 감쇄상수는 간섭경도의 기울기로부터 계산할 수 있다.

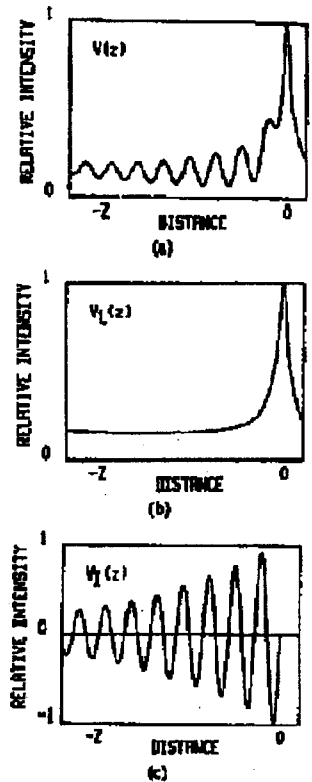


그림 4. $V(z)$ 곡선의 형태

그러므로 실험적인 진행은 다음과 같다.

1. $V(z)$ 곡선 기록
2. $V(z) - V_L(z)$ 으로 $V_I(z)$ 추출
3. $V_I(z)$ 으로부터 v_{LSAW} 를 결정
4. $V_I(z)$ 으로부터 감쇄상수 측정

즉, 얻어진 $V(z)$ 곡선으로부터 음향특성을 결정하기 위해서는 $V_I(z)$ 곡선을 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼 분석을 행하여 간섭형태의 파장(Δz)를 구함으로서 v_{LSAW} 를 구할 수 있다. 또한, 스펙트럼분석을 통하여 종파음향속도, 감쇄상수등 물질의 성질을 파악할 수 있다.

표 1. 각종 매질에서의 음향파장의 변화

| 주파수 매질 | 100MHz | 200MHz | 400MHz | 1GHz |
|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 물 | 15.0 μm | 7.5 μm | 3.7 μm | 1.5 μm |
| 에탄올 | 10.9 μm | 5.4 μm | 2.7 μm | 1.1 μm |
| 액체헬륨 | 1.8 μm | 0.9 μm | 0.5 μm | 0.18 μm |
| 액체질소 | 9.6 μm | 4.8 μm | 2.4 μm | 0.9 μm |
| 수은 | 14.5 μm | 7.3 μm | 3.6 μm | 1.5 μm |

4. 해상도

SAM의 해상도는 음향렌즈와 샘플 사이를 채운 liquid coupling에서의 초음파주파수에 의한 음향파장에 의해 좌우된다. 표 1은 liquid coupling과 음향파장의 관계로 음향파장에 0.7배 해준 것이 해상도이다. 초음파 주파수가 증가하면 음향파장이 감소하여 해상도가 증가한다. 또한, 액체질소, 액체헬륨등의 액화가스를 사용하면 해상도가 훨씬 증가한다는 것을 알 수 있다.

5. 초음파현미경의 응용

초음파현미경에 의한 샘플의 내부관찰은 크게 표면의 해상력을 선명하게 나타내도록 하는 burst mode와 심부를 관찰하기 위한 펄스모드(pulse mode)로 나뉘며, burst mode에서는 100 MHz~1GHz의 높은 주파수를 이용하여 샘플내부로 초음파를 주사하여 반사된 신호는 표면에서부터 초점거리까지의 물질내부 정보를 가지고 있어 표면근처의 공극, 결함등을 높은 해상력으로 검출할 수 있으며 펄스모드는 수십MHz~100MHz의 단일 펄스를 시료에 주사하고 시간적으로 분

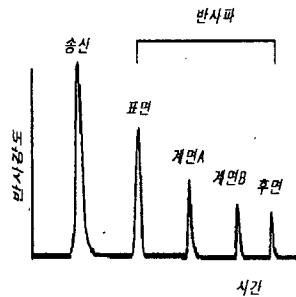
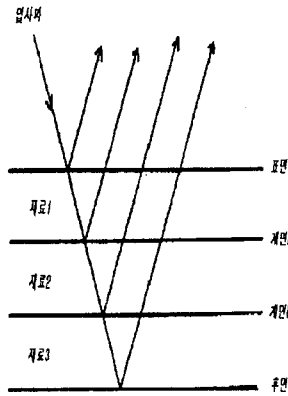
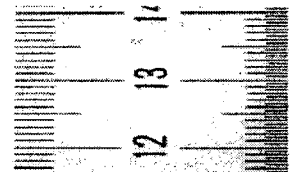


그림 5. 펄스모드에서의 반사파형

리된 내부반사파만을 수신한다. 그림 5에서와 같이 3개의 다른 물질의 접합체를 가진 샘플에 초음파 펄스를 가하면 표면반사파,

내부계면 A, B에서의 반사파, 후면반사파를 관찰 할 수 있는데 이중 하나의 반사파에 게이트를 가해서 특정계면의 형태를 분석할 수 있다.

초음파현미경이 디바이스에 적용될 경우 주파수가 높아지면 샘플 속에서의 음파흡수가 증가하여 깊은 지점의 검사에 어려움이 많다 즉, 시료의 깊은 지점을 검사할 때 해상력이 감소되더라도 주파수를 낮추어야 한다. 또한, 음향렌즈의 개구각이 넓으면 시료표면에 rayleigh wave가 여기되어 그 재방사가 내부정보 추출에 방해가 되므로 내부관찰에는 개구각이 좁은렌즈가 바람직하다. 그러므로 샘플의 내부관찰을 위해서는 시료재질, 재료표면상태, 내부산란, 검색깊이를 고려하여 적절한 사용주파수를 가지는 음향렌즈를 선정하여야 한다.



(a) 샘플 표면

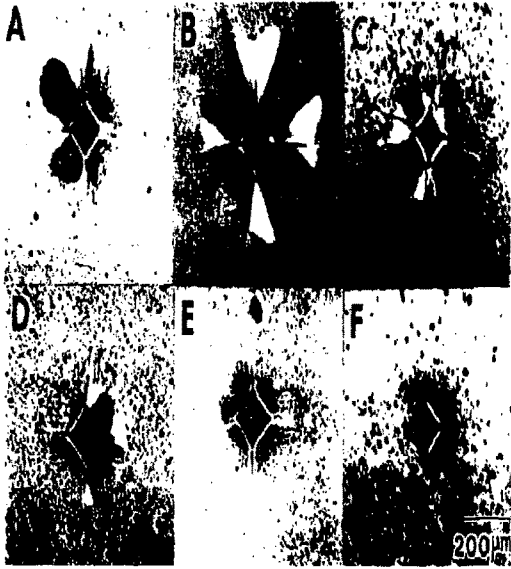
| TAP DRILL | | | |
|-----------|------|-----|------|
| M | W | H | W.W. |
| M 1.2 | 0.75 | W H | 5.1 |
| M 1.2 | 0.95 | W H | 6.6 |
| M 1.4 | 1.10 | W H | 8.0 |
| M 1.7 | 1.35 | W H | 9.4 |
| M 2 | 1.60 | W H | 10.7 |
| M 2.3 | 1.80 | W H | 12.3 |
| M 2.6 | 2.15 | W H | 13.7 |

(b) 샘플 후면



(c) 샘플 표면과 후면의 검사

그림 6. 100MHz에서 샘플 표면과 내부 검색



- (A) alumina
- (B) alumina titanium carbide
- (C) silicon carbide
- (D),(E) silicon nitride
- (F) zirconia

그림 7. 세라믹내부의 크랙 검색

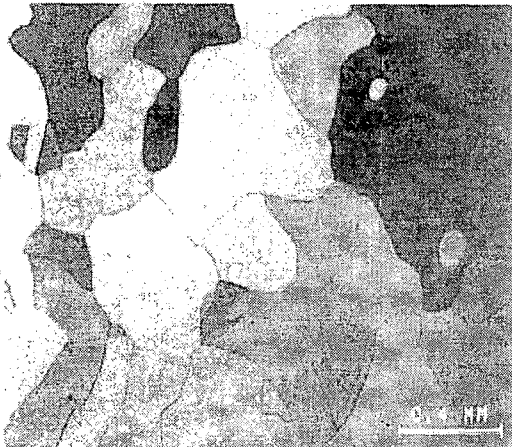
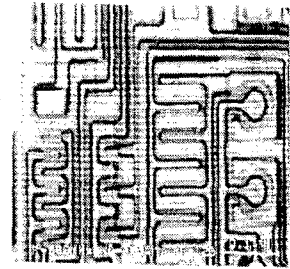
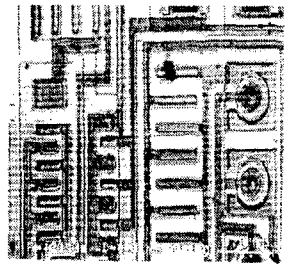


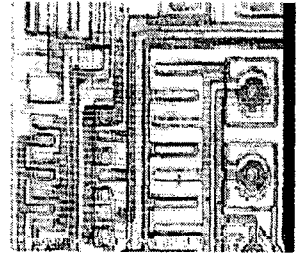
그림 8. 철(steel)의 grain 구조 검색



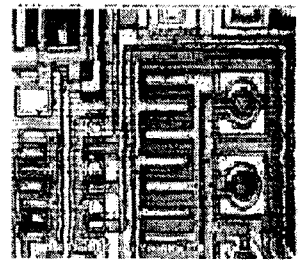
(a) 200 MHz



(b) 400 MHz



(c) 600 MHz



(d) 1GHz

그림 9. 사용주파수에 따른 IC패턴 비교 검색

표 2. 사용주파수에 따른 초음파현미경의 응용분야

| 사용주파수 | 응용 분야 | 비고 |
|--------|--|------------|
| 30MHz | 금속접합부분의 용접부관찰, 플라스틱의 접합면 검사, 하이브리드 IC검사 | pulse mode |
| 50MHz | 압연강 재료의 함유물 검출, 세라믹속의 흠검사, 금속부품 결함검사 | pulse mode |
| 100MHz | IC커플링검사, 다층배선기판의 관찰, 칩콘덴서 관찰, 세라믹 접착부검사 | pulse mode |
| 100MHz | IC칩의 결함검사, 반도체 불량품검출, 표면 도장막검사, 용접부분검사 | burst mode |
| 200MHz | 세포관찰, 표면탄성과 측정, 페인트 코팅상태의 검사, 다층 PCB의 내부검사 | burst mode |
| 400MHz | 생물표본 검사, 증착피막검사, 표면탄성과 속도의 측정, IC의 품질관리 | burst mode |
| 600MHz | 치아의 에나멜상태관찰, 세균조직관찰, 결정결함검사, 모발상태검사 | burst mode |
| 800MHz | 세포 조직관찰, 금속조직관찰, 박막의 파단면 관찰, 기판의 표면상태 관찰 | burst mode |
| 1GHz | 적층IC의 결함검사, 증착막의 밀착상태 검사, 미세한 표면구조 관찰 | burst mode |

그림 6 ~ 그림 9는 다양한 샘플을 초음파 스캔한 그림으로 그림 6은 100MHz에서 두께 1.05 mm의 steel 줄자의 표면과 후면을 동시에 스캔한 것이며, 그림 7은 200MHz에서 세라믹 샘플들 내부에 존재하는 크랙을 검출한 것이고, 그림 8은 600MHz에서 철(steel)의 grain 구조를 스캔한 것이다. 또한, 그림 9는 사용주파수에 따른 IC패턴의 스캔 결과를 비교한 것으로 주파수가 높아짐에 따라 해상도가 증가함을 알 수 있다. 표 2에 사용주파수에 따른 응용분야를 나타내었다.

6. 맺음말

본 글에서는 반사모드로 동작하는 초음파현미경의 구조 및 동작원리와 $V(z)$ 곡선의 해석, 그리고 그 응용에 대해 살펴보았다. 초음파현미경에 의한 물질 특성 분석은 liquid coupling과 샘플사이의 계면에서의 leaky wave에 의한 $V(z)$ 곡선을 측정하여 종파 음향속도, 감쇄상수등 물질의 성

질을 파악할 수 있다. 또한 정밀한샘플의 내부관찰을 위해서는 시료재질, 재료표면상태, 내부산란, 검색깊이를 고려하여 적절한 사용주파수를 가지는 음향렌즈를 선정하여야 한다.

초음파현미경으로 composite, polymer, metal의 화학반응특성, 물질특성, 계면상호간의 미세한 결합, 박막표면 및 내부의 잔류 응력의 변화등을 비파괴검사할 수 있어 물리전자분야, 비파괴검사분야, 재료공학분야등 많은 분야의 연구에 영향을 미쳤다.

stanford 대학, north-western 대학등에서는 초음파현미경의 특성을 이용하여 그 응용분야를 넓혀 나가는 연구에 주력하고 있으며, Sonix Corp. olympus 등에서는 높은 해상도를 가지는 제품이 개발되었다.

초음파현미경은 박막증착 기술의 발전으로 인한 우수한 음향변환 특성을 가지는 변환기 제작으로 높은 해상도를 가질 수 있으며, 정확하고 신속한 이미지분석을 할 수 있는 컴퓨터 주변장치

의 발전으로 그 응용분야는 더욱 더 광범위해질 것이다.

참고 문헌

- [1] Lawrence W. Kessler, Donald E. Yuhas "Acoustic Microscope-1979", IEEE, vol. 67, No.4, pp.526-536, 1979.4.
- [2] Junichi Kushibiki, Noriyoshi Chubachi, "Material Characterization by line focus beam Acoustic Microscope", IEEE Trans on sonic & ultrasonics, vol. su-32, No. 2, pp189-212, 1985.3.
- [3] A. Atalar, "An angular spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscope," J. Appl. Phys, vol. 50, pp5130-5139, 1979.10.
- [4] H.K. Wickramashinghe, "Contrast and imaging performance in the scanning acoustic microscope," J. Appl. Phys., vol. 50, pp664- 672, 1979.2.

- [5] Sokolov S "USSR patent 49", 1936.
- [6] McMaster R C "Non destructive Testing Handbook vol II", New York :Ronald, 1959.
- [7] Lemons R A and Quate C F "Acoustic Microscopy by Mechanical scanning", Appl. phys. Lett. 24 pp165-7, 1973.
- [8] 이종덕, 정규원, 송준태, "RF magnetron sputtering으로 제작한 ZnO/Sapphire 압전변환기의 전기적인 특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp22-25, 1995.5
- [9] 정규원, 이종덕, 송준태, "ZnO압전변환기의 주파수특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회논문집, pp189-192, 1996.5
- [10] 이종덕, 송준태, "100MHz 초음파필스용 Acoustic 사파이어렌즈의 설계", 성대과학기술연구소 논문 45(1), pp53-63, 1994.11.
- [11] A. Atalar," A Physical model for acoustic signatures" J. Appl. Phys., vol. 50, pp8237-8239, 1979 .12.

< 송준태 이사 >