

초음파 탐촉자의 종류와 응용



김병국

한국표준과학연구원 방재기술 연구센터 비파괴평가그룹

초음파 탐촉자(ultrasonic transducer)는 주파수가 가청주파수 범위를 벗어나는 약 20 kHz 이상의 초음파를 발생하고 수신하는 초음파 변환장치 또는 부품을 말한다[1]. 초음파는 물체의 내부를 탄성에너지로 전파하는 특성을 지니고 있어서 초음파 탐촉자를 사용하여 금속, 비금속 재료나 구조물 또는 인체 등의 내부 진단에 이용된다. 실생활과 밀접하게 관계되는 예로는 산모의 태아진단, 인체의 건강진단 등에 사용되는 초음파 탐촉자이다.

산업기술 응용에서는 초음파의 속도와 감쇠를 측정하여 재료의 물리적 성질의 하나인 탄성계수를 측정하거나 입도 조직 등 재질평가와 결함검출을 통한 품질관리를 위한 비파괴시험 등에 널리 사용되고 있다. 고주파수 초음파를 이용한 초음파 현미경이 반도체 칩, 세라믹 등의 내부의 미세한 결함 검출에 이용되고 있다. 이 외에 초음파를 이용한 기

술로는 도난 경보기, 거리 측정기, 리모콘 등에도 응용되고 있다.

여기에서는 다양한 응용을 지닌 초음파 탐촉자 중에서 재료, 구조물의 물성과 품질평가에 활용되는 비파괴 시험용 초음파 탐촉자를 중심으로 살펴보고자 한다. 초음파 탐촉자의 종류, 높은 에너지의 초음파를 발생하는 압전형 초음파 탐촉자 및 비접촉식 초음파 탐촉자의 구조, 초음파 발생원리, 용도와 기술 동향에 대하여 기술하였다.

비파괴시험에 사용되는 초음파 탐촉자는 초음파 탐촉자와 시험대상체 사이에 초음파의 전달매질의 유무에 따라서 접촉식과 비접촉식 탐촉자로 구분할 수 있다. 표1에 나타낸 바와 같이 접촉식 초음파탐촉자는 초음파를 대상체면에 수직하게 입사하는 수직형과 쉐기를 사용하여 특정 각도로 입사케하는 경사각용 탐촉자로 분류할 수 있다. 수직형은 직접접촉식, 국부수침식과 수침식 초음파 탐촉자로 구분된다 [2].

직접 접촉식 탐촉자는 대상의

1. 초음파 탐촉자의 종류

표 1. 초음파 탐촉자의 종류

수직형	직접 접촉식	종파용		1 탐형 · 분리형	고주파수 · 저주파수	협대역 · 광대역	고온용 · 저온용	집속형 · 평면형	지연재 유무
		국부	회파용						
접촉식	직접접촉식	고정각형	종파용	분리형	저주파수	광대역	저온용	평면형	유무
		가변각형	회파용 표면파용						
기타	수신용	공진형			초음파 탐촉자	광대역형	저온용	평면형	유무
		Paint brush 수침용 초음파 탐촉자							
		Mosaic 초음파 탐촉자							
비접촉식	Capacitive transducer								
	EMAT(electromagnetic acoustic transducer)								
	레이저를 이용한 초음파 발생 및 수신계								

한쪽 면에서 초음파의 송·수신을 하는 1탐형, 송·수신탐촉자가 분리되어 있는 2탐형으로 구분된다. 2탐형 탐촉자는 초음파의 송신부와 수신부가 완전히 분리되어 사용되는 분리형과 한 몸체로 되어있는 분할형으로 나눌 수 있다. 국부 수침식 초음파 탐촉자는 주로 광판 등의 자동화 검사 시스템에서 이용 되는데 초음파 탐촉자와 대상체가 접촉 매질로 물에 일부만 잠긴 상태에서 사용

범위에 따라서 고온용, 저온용, 상온용으로 분류할 수 있다. 또 초음파를 집속하는 집속형과 집속하지 않는 평면형으로 구분된다. 또 초음파의 지연재가 있는 것과 없는 것, 수분이나 기름 등의 접촉매질을 사용하지 않는 건식형도 있다. 사용되는 초음파의 종류에 따라서 종파형, 횡파형, 표면파형으로 분류할 수도 있다.

이 외에 초음파의 발생 및 송신은 하지 않으며 음향방출

전장이 가해졌을 때에는 결정의 변화 즉 팽창 또는 압축이 일어나는 역압전효과를 통틀어서 압전효과라 한다. 결정성 고체는 원자의 격자배열이 3차원상에서 32가지의 가능한 다른 형태로 존재할 수 있으며 이중 20종이 대칭 중심의 결여에 의한 압전현상을 나타낸다[3,4]. 이런 압전효과를 이용하여 초음파를 발생하고 수신하게 되는데 압전소자는 크게 결정성 물질과 결정성 세라믹

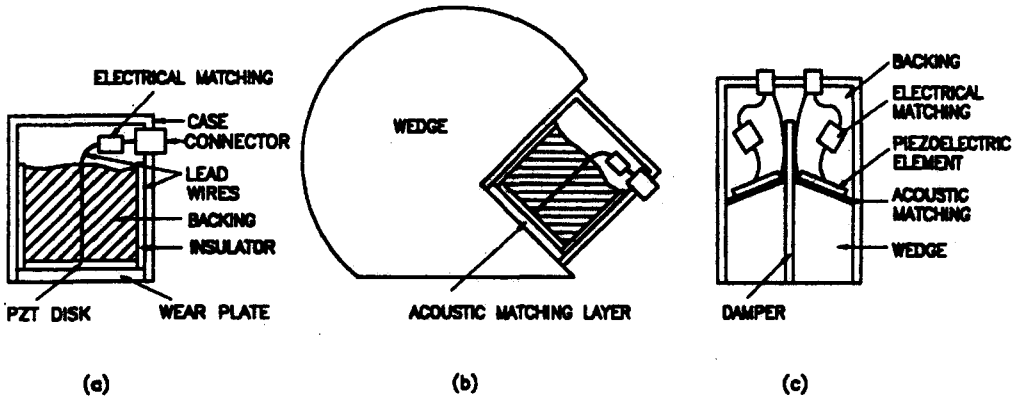


그림 1. 압전형 초음파 탐촉자의 전형적인 구조: (a) 수직형, (b) 경사각형, (c)분할형

된다. 수침용 초음파 탐촉자는 물을 초음파의 전달매질로 하여 초음파 탐촉자와 시험 대상체가 완전히 잠긴 상태로 사용되는데 초음파를 집속하는 집속형 초음파탐촉자가 많이 이용된다. 경사각형 초음파 탐촉자는 썰기가 고정되어 있는 고정각형과 썰기를 교체할 수 있게 하거나 유동성이 있게 한 가변각형으로 구분할 수 있다.

이들 접촉용 초음파 탐촉자는 사용되는 주파수 영역에 따라서 고주파수, 저주파수 초음파 탐촉자로 주파수 대역폭에 따라서는 좁은 주파수 대역폭을 지닌 협대역형과 넓은 범위의 주파수 대역폭을 지닌 광대역형 초음파 탐촉자로 구분된다. 사용되는 온도

(acoustic emission)이나 외부 충격에 의하여 발생된 초음파신호를 수신만하는 수신용(sensing type)이 있다.

비접촉식 초음파 탐촉자에는 정전기 에너지를 이용한 capacitive transducer, 전자기 에너지를 이용한 EMAT (electromagnetic acoustic transducer), 광학 에너지를 이용하는 레이저에 의한 초음파의 발생 및 탐지 장치 등이 있다.

2. 압전형 초음파 탐촉자

2.1 압전소자

역학적 응력에 의해 전하 또는 전장이 형성되는 현상을 압전현상이라 하며, 역으로 압전물질에

물질로 분류된다. 결정성 물질에는 수정, 황옥(topoz), 로셀염(rochellesalt), LiNbO₃ 등이 있고, 결정성 세라믹 물질에는 비파괴시험용 탐촉자에 널리 사용되고 있는 유전율이 보통 결정보다 100배 정도 높은 강유전체 계열의 PZT(Pb(Zr,Ti)O₃)계열과 BaTiO₃, PbNb₂O₆ 등이 있다. 또한 최근에는 음향임피던스(acoustic impedance)가 인체와 물과 유사한 PVDF (polyvinylidene fluoride) 계열의 압전 polymer가 고주파의 초음파 발생, 수중 시험이나 인체 시험을 위하여 사용되고 있다. 압전세라믹과 에폭시 수지를 일정한비율로 혼합한 복합재료가 광대역 초음파 발생, 공기중 초음파의 전파,

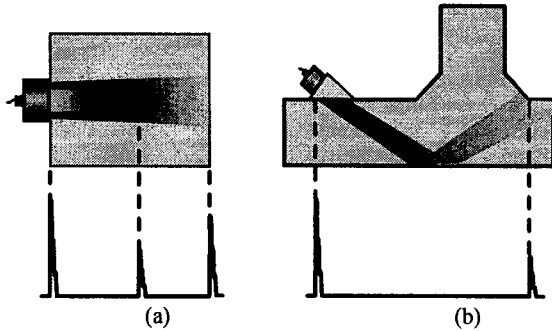


그림 2. (a) 수직 pulse-echo 탐상, (b) 경사각 pulse-echo 탐상

인체진단의 성능향상을 위한 초음파 탐촉자의 발전 소자로 연구 개발되고 있으며 일부 사용되고 있다.

2.2 압전형 초음파 탐촉자의 구조

비파괴시험에 사용되는 압전소자를 이용한 초음파 탐촉자는 종파, 횡파, 표면파 등의 파의 종류, 크기, 범위, 각도, 진동수 등 여러 변수에 따라 다양하지만 몇 가지 기본적인 성분으로 구성되어 있다[5]. 그림 1에 보이는 바와같이 압전소자, wear plate 또는 썸기(wedge), backing, 전기적 기계적 matching 부분, damper 또는 연결 부품, housing이 있다. 압전소자의 앞에 붙어 있는 wear material은 깨지기 쉬운 압전소자를 보호하면서 시험체에 초음파의 전달이 용이하도록 음향임피던스 등을 고려하여 사용되며, 보통 수직형인 경우 재질을 Aluminium oxide로 한 평판을 사용하고 경사각형인 경우 플라스틱을 각도에 맞게 성형한 썸기 모양의 것을 사용한다. Backing은 압전소자로부터 뒷쪽 방향으로 전달되는 초음파를 흡수, 산란시키는 역할을 하며, 주로 여러 종류의 분말에 epoxy를 혼합하여 굳혀 사용하거나 고무계통의 물질이 사용된다. Housing은 전자파 차

단을 위하여 금속 재료가 사용되고 압전 소자와의 사이에 절연 및 방음 재료가 사용되기도 한다. 일반적으로 그림 1a의 수직형 탐촉자는 종파나 횡파용으로 그림 1b의 경사각형 탐촉자는 주로 횡파나 표면파용으로 사용되며 그림 1c는 분할형 탐촉자로 표면 근처의 시험에 용이한 구조를 지니고 있으며 썸기의 각도와 중간에 damper의 역할이 중요하다.

2.3 직접 접촉식 초음파탐촉자

직접접촉식 초음파 탐촉자는 대체로 시험체의 표면이 매끄러운 경우에 사용된다. 탐촉자의 성능과 특성을 결정하는 기본적인 요소에는 작은 결함 또는 불연속 상태를 탐지할 수 있는 능력을 나타내는 감도가 있다. 또한 서로 근접한 시간 또는 깊이 에 있는 두 불연속부를 구별해 낼 수 있는 능력을 나타내는 분해능과 역학적 에너지를 전기적 에너지를 전환하거나 또는 그역으로 할 수 있는 능력을 나타내는 효율 등이 있다. 이외에도 초음파의 지향성, 대칭성, 거리감도 특성 등 여러 분석요소가 있다. 일반적으로 직접접촉식 초음파 탐촉자는 에너지 변환 효율이나 신호대 잡음(S/N) 비에 있어 초음파를 이용하는 다른 수침법이나 비접촉식 방법에 비해 우수하다.

그림 2a는 접촉 접촉식 초음파 탐촉자인 수직형 초음파 탐촉자를 사용하여 pulse-echo 방식으로 시편내의 불연속부를 탐지하는 방식을 도시하고 있다. 초음파의 경로와 불연속부로부터의 초음파의 반사 및 시편 저면에서의 반사신호를 검출하여 전기적인 신호로 변환하여 시간축상에서 도시하는 예를 보여주고 있다. 그림 2b는 경사각형 초음파 탐촉자를 사용하여 용접부위를 검사하는 예를 보여주고 있다.

경사각 탐촉자의 플라스틱 썸기에 전달된 종파는 시험체와 경계면에서 종파나 횡파 또는 편면파로 굴절되거나 모드 변환을 하는데 각각의 음파의 속도와 관계하여 초음파의 입사각과 굴절각의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{c_i}{c_r}$$

여기서 θ_i 와 c_i 는 각각 입사파의 입사각과 속도이며 θ_r 과 c_r 는 각각 시험체 내에 굴절되는 초음파의 굴절각과 속도이다. 보통 분석의 복잡성을 피하기 위해 시험체 내에 횡파만이 전파하도록 입사각(썸기의 각도)을 조절하도록 제작되면 표면파의 경우는 굴절각이 90°가 되는 경우이다.

2.3.1 접촉형 초음파 탐촉자

초음파는 광학렌즈를 통한 빛의 집속(focusing)과 같이 음향렌즈를 통하여 초음파의 구절 현상을 이용하여 집속될 수 있다 [6,7]. 초음파가 집속되면 감도와 공간분해능, S/N비가 향상되는 장점이 있다. 시험체의 표면이 곡면을 이루는 파이프나 구형 구조물의 검사를 위해서도 사용된다. 초음파를 선집속하는 원기둥

모양으로 오목하게 파인 cylindrical lens를 이용한 것과 점접속을 위한 구모양 spherical lens를 이용한 것이 있으며 시험재의 표면이 오목한 경우 볼록한 형의 렌즈의 분산형도 이용된다.

또한 최근에 발표된 기술로 표면파를 집속하는 기술이 있다. 이 기술은 특별히 고안된 음향렌즈를 사용하여 모드 변환에 의하여 표면파를 발생시키고 회전 중심에 발생한 초음파를 집속하는 원리를 이용한다. 그림3은 이 탐촉자의 내부구조를 보여주고 있다 [8-10].

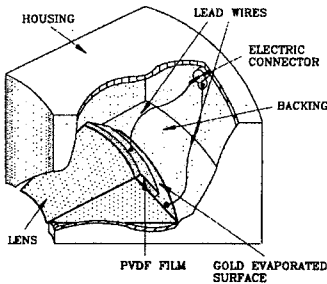


그림 3. 표면파 집속용 초음파 탐촉자의 구조

그림 4는 이 초음파 탐촉자를 사용하여 집속된 표면파의 빔 특성을 보여주고 있다. 초음파의 중심주파수가 4.3 MHz의 초음파 탐촉자 전면에서의 가로 6 mm 세로 16 mm의 범위에 대한 빔특성으로 초점거리 8 mm에서 -6dB 빔 폭이 약 0.6 mm입과 -6dB 영역이 축방향으로 5.5 mm(5.3에서 10.8 mm 범위)와 0.6 폭으로 주어지는 좁은 타원의 형태로 표면파가 아주 좁은 범위에 효과적으로 집속되고 있음을 나타낸다.

2.4 초음파 현미경용 초음파 탐촉자

초음파 현미경에 사용되는 초

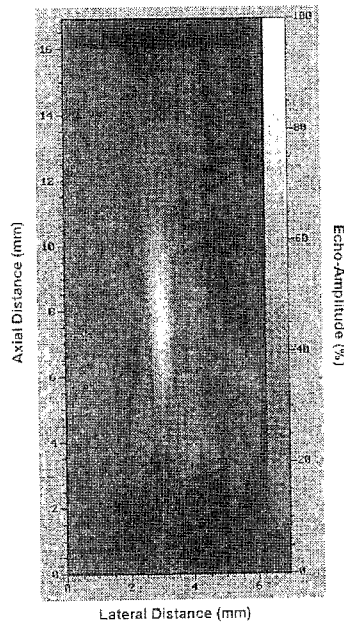


그림 4. 표면파를 집속하는 초음파 탐촉자의 빔특성의 2차원 이미지

음파 탐촉자는 주로 100 MHz 이상에서 수 GHz 범위의 초음파를 압전 박막을 이용하여 발생하고 Sapphire와 같이 음파의 감쇠가 적은 재료로 된 음향렌즈를 이용하여 한 점이나 선으로 집속하여 초음파 탐촉자를 주사하거나 시편을 주사하여 시편의 표면 근처의 내부의 미세 결함 검출이나 재질 평가에 이용된다. 초음파 현미경용 초음파 탐촉자는 음향렌즈의 일부에 물방울을 물여서 시험함으로써 국부수침용이라

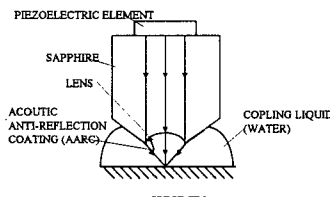


그림 5. 초음파 현미경용 초음파 탐촉자의 내부 구조

할 수 있는데 그림5는 그 구조를 보여주고 있다[11].

최근에는 pulse-echo 형 뿐 아니라 박층의 시험을 위한 Through-transmission용 초음파 현미경도 이용되고 있다. 그림6는 반도체 칩을 초음파 현미경을 이용하여 검사한 결과를 보여주고 있는데 광학 현미경과는 달리 박리와 같은 내부의 결함의 이미지가 잘 나타난다.

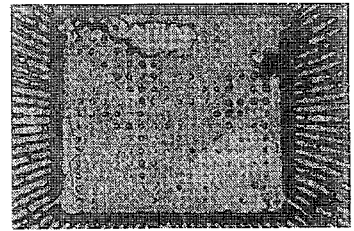


그림 6. 반도체 칩의 내부 결함을 보여주는 초음파 현미경 이미지

2.5 수침용 및 국부 수침용 초음파 탐촉자

수침용 탐촉자는 탐촉자와 시험재 사이에 초음파를 전달하는 매질로 물이나 기름 속에서 수행되는 시험에 사용되는 초음파 탐촉자이다. 물과 접촉하기 때문에 wear plate 대신에 접촉식과는 낮은 음향 임피던스의 재료가 사용된다. 수침용 초음파 탐촉자로는 고주파의 탐촉자, 집속형 초음파 탐촉자가 널리 이용되고 있다. 그림7은 고주파수 PVDF 초음파 탐촉자를 사용하여 4mm 두께의 세라믹 내부의 평균 크기가 50 μ m인 공극을 검출한 예를 보여주고 있다[12-14].

집속형 탐촉자를 사용하여, 시험재와의 거리를 조절하면서 원하는 위치에 집속을 하여 정밀 탐상이 가능하며, 여러가지 형태

의 구조물에 대한 시험을 가능케 한다. 경사각 탐촉자를 사용하지 않고도 탐촉자 자체를 기울여 빔의 각도를 조절할 수 있으며, 표면이 상대적으로 거친 시험체 탐상에도 사용될 수 있다.

초음파 현미경도 국부 수침용 탐촉자의 일종이지만 겹 수침탐

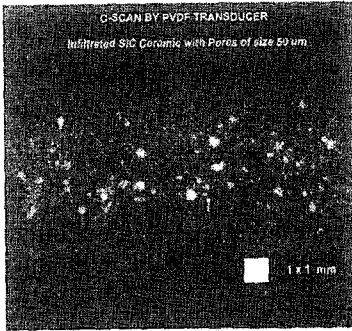


그림 7. 80 MHz 고주파수 집속형 수침용 PVDF 초음파 탐촉자를 사용하여 50 μ m 크기의 공극(pore)을 검출한 예.

촉자(gap immersion transducer)와 같은 국부 수침 탐촉자는 주로 대형판재나 구조물을 시험재료로부터 일정 간격을 유지하면서 물이나 기름을 분사하면서 탐촉자의 일부만 유체에 잠기는 방식의 주사시험에 주로 이용된다. 강판 탐상용 초음파 자동화 시스템이나 항공기 날개와 같은 대형 부품의 검사 등에 이용되고 있다.

2.6 수신형

초음파의 발생은 하지 않고 음향방출과 같은 외부인자에 의해 발생된 초음파를 수신만 하는 수신용 초음파 탐촉자로서 광대역 센서와 공진형 센서로 구분할 수 있다[14-15]. 공진형 센서는 주파수 범위가 대개 500 kHz 이하의 것이다. 그림8은 원추(conical)형

압전소자를 사용하여 제작된 광대역 변위센서를 사용하여 유리 모세관 파괴에 의하여 발생된 계단형태의 힘에 의하여 전달된 탄성파를 검출한 출력신호와 이론적으로 계산된 변위신호를 비교하여 나타낸 것이다. 센서의 출력이 표면의 변위에 대하여 비례하는 광대역 특성이 잘 나타나고 있다[16].

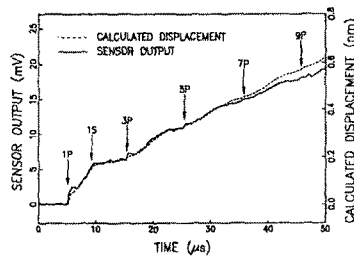


그림 8. 광대역 변위센서의 출력 신호(실선), 이론 신호(점선)

그림9는 최근에 발표된 PVDF 압전 polymer를 이용하여 개발된 광대역 속도센서의 출력신호와 이론적인 표면의 운동속도를 비교하여 나타낸 것이다. 이차적인 변화없는 센서의 출력이 표면의 속도에 비례함을 보여주고 있다. 이러한 광대역 센서는 음향방출 시험용 센서의 교정을 위한 표준

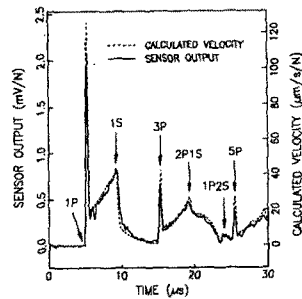


그림 9. 광대역 속도센서의 출력 신호(실선), 이론 신호(점선)

센서로, 파원해석, 재료의 물성측정, 콘크리트와 같은 탄성파의 고감쇠재료의 결함검출에 이용되고 있다[17-19].

2.7 기타 접촉식 초음파 탐촉자

이러한 여러 가지의 접촉식 초음파 탐촉자 외에도 paint brush 수침 탐촉자와 mosaic 탐촉자 등이 있다. paint brush 수침 탐촉자는 넓은 면적을 동시에 검사하기 위하여 사용되는데 보통 여러 개의 압전소자를 이용하여 좁고 긴 사각형 모양의 형태를 지니고 있으며 집속렌즈를 부착하기도 한다. Mosaic 초음파 탐촉자는 같이 여러 개의 작은 압전소자들이 고무와 같이 유연성이 좋은 재질로 연결되어 있어서 곡면의 표면을 가진 재료의 시험에 이용된다.

3. 비접촉식 초음파 탐촉자

앞에 언급한 바와 같이 비접촉식 초음파탐촉자는 시험재와의 사이에 접촉 매질이 없이 초음파를 송수신 할 수 있는 것이다. Capacitive transducer, EMAT (electro-magnetic acoustic transducer), 레이저를 이용한 초음파 발생 및 탐지장치 등이 있다.

3.1 Capacitive Transducer

Capacitive transducer는 정전기적 에너지를 이용하며, 표면의 변위에 비례하는 출력을 나타내는 초음파의 수신용 탐촉자로서 ESAT (electrostatic acoustic transducer)라고도 부른다. 그림 10에 변위를 측정하는 원리를 모식적으로 나타내었다[20].

도체인 시험재 표면과 거리 x에 위치하며 축전지 역할을 하는 작은 면적의 도체판과 시험재의

양단에 직류전압 V_s 가 가해진다. 표면이 전동함에 따라서 즉 거리 x 가 바뀔에 의해 충전되는 전하의 양이 바뀌는데, 이를 charge

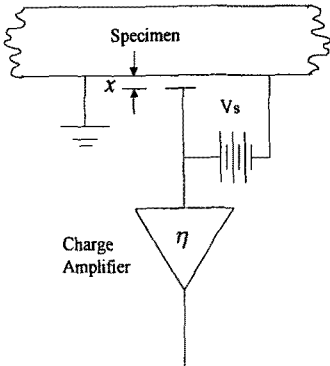


그림 10. Capacitive 탐촉자의 구성도

amplifier를 사용하여 전압으로 변조 증폭시킨다. 이때의 전압은 다음 식으로 주어진다.

$$V = \eta Q = \eta V_s C = \eta V_s \epsilon S / x$$

여기서 η 는 전하의 전압변환율이고 Q 는 전하량, C 는 축전용량, V_s 는 직류전압, ϵ 은 시험재와 전극 사이 물질의 유전율, S 는 전극의 유효면적이다. 어떤 시간 t 에 표면의 변위가 $\Delta x(t)$ 만큼 바뀌었고 이로 인해 charge amplifier의 출력 전압이 $\Delta V(t)$ 만큼 바뀌었다면, 관계식은

$$\Delta V(t) = -(\eta V_s \epsilon S / x^2) \Delta x(t)$$

로 주어진다. 즉 $\Delta X(t)$ 와 $\Delta V(t)$ 는 비례관계에 있다. ESAT는 변위에 비례하는 특성에서 우수하고 비접촉식인 장점이 있지만 접촉식에 비하여 감도가 낮다.

3.2 EMAT

EMAT는 도체 표면 근처에 와전류를 유도하는 유도 코일과

자기장을 형성하는 영구자석 또는 전자석으로 구성된다. 그림11은 도체 표면 근처에 있는 EMAT의 구조의 도시하고 있다. 와전류가 형성되었을 때 전자와 이온의 운동방향은 반대이나 전하가 서로 다르므로 자기장 내에서의 전자와 이온이 받는 Lorentz힘은 같은 방향이 된다. 이 힘에 의해 생긴 운동량이 주위의 이온들에 전파하는 것이 초음파 발생원리이다[21].

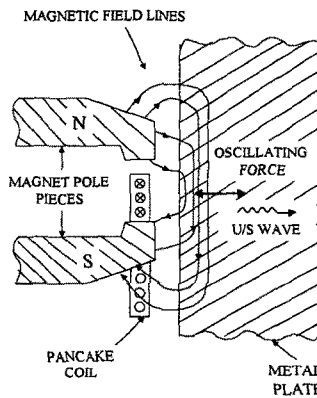


그림 11. EMAT 탐촉자의 구조 및 초음파발생원리

그리고 자기장 내의 도체 표면에 초음파가 전달되면 와전류가 형성되고 이 와전류에 의한 자속의 변화는 유도코일에 기전력을 일으키게 되는데 이것이 초음파의 수신원리이다. EMAT는 이상의 간단한 원리를 이용하여 와전류의 방향 및 자기장의 방향을 조절함에 의해 종파나 횡파 등 여러가지 모드의 초음파를 쉽게 발생시킬 수 있는 장점이 있다. EMAT로는 도체의 심부탐상의 예도 특히 표면파를 이용한 도체 표면의 결함탐지, 판파(plate wave)를 이용한 얇은 도체판이나 tube의 시험도 가능하며 비접

촉식이므로 고온상태의 재료에 대한 시험에도 장점이 있다.

3.3 레이저를 이용한 초음파 송수신 장치

레이저를 이용한 초음파 시험은 펄스 레이저를 사용한 시험재 표면에서의 초음파발생과 레이저 간섭계에 의한 초음파변위의 탐지로 구분된다. 시험재 표면에 손상을 주지 않는 저출력 펄스 레이저를 사용하여 열팽창 응력의 의하여 주로 표면에 나란한 방향의 초음파를 발생시키거나 고출력 펄스 레이저를 사용하여 금속 표면의 온도상승에 의한 ablation에 의해서 강력한 에너지의 초음파를 일으킴으로써 반발운동량이 시험재 내부로 전달되는 방식이 있다. 금속표면의 손상을 없애고 초음파 발생효율을 높이기 위해 금속표면에 얇은 액체나 고체 층을 입혀 사용하기도 한다. 레이저를 이용한 표면의 변위 탐지는 레이저의 반사가 잘되도록 polishing된 표면 위에서의 반사광과 거울에서의 반사파와의 위상차이에 의한 간섭신호를 광전지로 받아 신호를 분석함으로써 수행된다. 레이저를 이용한 초음파 시험은 비접촉식이어서 고온 재료의 시험, 원거리 시험, 자동화 시험 등에 활용될 수 있다. 또한 레이저를 이용한 초음파 응용기술로서 세라믹 내부의 미세 결함 검출 등에 응용되고 있는 레이저 주사 초음파 현미경(SLAM: scanning laser acoustic microscope)이 있다[22].

4. 맺는 말

초음파 탐촉자는 다양한 응용성으로 국내외에서 연구용 뿐 아니라 산업계, 의학계 등에서 널

리 활용되고 있다. 지금도 좀더 강한 초음파 에너지의 발생, 공기 중에서의 응용 및 콘크리트와 같이 감쇠가 심한 재료의 효과적인 시험 등을 위하여 압전재료 등의 새로운 구성 재료의 개발과 신기술에 대한 연구가 지속되고 있다. 국내에서도 관련 기술의 비약적 발전을 기대해 본다.

참 고 문 헌

- [1] J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials* (New York: Springer-Verlag, 1977)
- [2] 이승석, 김병국 등 저, 비파괴시험, KRISS-95-124-ET (공업진흥청 보고서: 정밀측정 교재 95-013, 1995)
- [3] 김병국, "압전재료의 기술 동향," 물리학과 첨단기술, 23-29 (1994)
- [4] 김병국, 김달현, 박용기, 새물리, 30(1), 45-52(1990).
- [5] 김병국, 박용기, 한국비파괴검사학회지, 9(1), 69-76 (1989).
- [6] R. V. Murphy, *Mat. Eval.* 53-58 (1980).
- [7] J. Fraser, B. T. Khuri-Yakub, and G.S. Kino, *Appl. Phys. Lett.*, 32(11) 698-700 (1978).
- [8] Byoung G. Kim, Se K. Lee, and Jae O. Lee, U. S. Pat. no. 5094108 (1992).
- [9] B. G. Kim, J. O. Lee, and S. Lee, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 40(2), 162-166 (1993).
- [10] Byoung-Geuk Kim, Se-kyung Lee, Manabu ENOKI, and Teruo KISHI, *Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 2733-2740 (1998).
- [11] Lemons P. and C. Quate, "Acoustic Microscope," *Physical Acoustics: Principles and Methods*, Vol. XIV, W. Mason, ed. Vol. XIX, New York, NY: Academic Press (1979): p 1-92.
- [12] 김병국, 이승석, 한국비파괴검사학회지, Vol.17, No.1, pp. 23-30 (1997)
- [13] 김병국, 이승석, 한국비파괴검사학회지, Vol.17, No.2, pp. 100-107 (1997)
- [14] S. Pangraz and W. Arnold, *Ferroelectrics*, 93, 251-257 (1989).
- [15] R. A. Kline, R. E. Green and C. H. Palmer, *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1633 (1978).
- [16] T. M. Proctor, *J. Acoustic Society of America*, 71(5), 1163-1168 (1982).
- [17] 김병국, 김영환, 한국비파괴검사학회지, 12(4), 9-17 (1992)
- [18] 김병국, 김영환, 새물리, 32(5), 744-748 (1992)
- [19] Byoung-Geuk Kim, Manabu ENOKI, and Teruo KISHI, *Review of Scientific Instruments*, 9(2), 457-459 (1998).
- [20] K. Y. Kim and W. Sachse, *Rev. Sci. Instrum.*, 57, 264 (1986).
- [21] R.B. Tomson, "Physical Principles of Measurements with EMAT transducers," *Physical Acoustics*. R.N. Thurston, A.D. Pierce, eds. Vol. XIX, New York, NY: Academic Press (1990): p 157-200.
- [22] Yuhas. D.E., T.E. McGraw and L.W. Kessler, "Scanning Laser Acoustic Microscope Visualization of Solid Inclusions in Silican Nitride," *Proceeding of the ARPA/AFML Review of Progressive Quantitative NDE*. AFLM-78-55(1978): p 241-244.

< 송준태 이사 >