

## 技術解説

## 초음파 비파괴시험

— Ultrasonic nondestructive testing —

김 영 환

(한국표준과학연구원 책임연구원)

## I. 서 론

재료 내부에 결함이 존재하게 되면 그 재료는 본래의 강도를 나타내지 못할 뿐만 아니라, 그 재료를 사용하여 제작된 제품은 사용되는 도중에 점차 약화되어 파손된다. 특히 자동차, 선박, 원전 등의 구조용 재료의 파손은 재산 피해는 물론이고 인명 피해도 불러일으키게 된다. 산업의 고도에 따라서, 복합재료, 요업재료 등 새로운 소재들이 계속해서 개발되고 있고, 이들 신소재들의 공통적인 특징은 고기능 소재로서, 고강도의 경량화로 특징지을 수 있다. 따라서, 생산되는 제품의 크기는 점차 소형화 되는 추세로서 이러한 경우에는 매우 작은 결함일지라도 제품의 기능에 치명적인 영향을 미치게 되고, 허용되는 결함의 크기는 점점 작아져서, 구조용 세라믹의 경우를 예로 든다면 최소한 수십  $\mu\text{m}$ 의 결함까지는 검출해야한다. 또한, 고기능 신소재에서는 극히 미세한 결함일지라도 그 소재의 기능을 크게 좌우하므로 생산되는 소재 및 제품의 전부에 대한 시험검사가 요구되어지고 있다.

비파괴시험은 시험 대상체에 향후 사용에 영향을 미치지 않고 시험체의 성능을 검사하는 방법으로, 전수 검사라는 측면에서 품질관리를 맡아왔으며, 신소재들의 개발으로 그 중요성은 점차 증대되고 있다. 지금까지 알려진 비파괴시험 방법은 수십가지 이상으로 대상재료의 특성, 시험체의 형상, 찾고자 하는 결함의 종류 및 크기에 따라서 적절한 방법을 선택하

여 사용하게 된다. 비파괴검사를 위해서는 재료의 물성이나 결함 등으로 인하여 교란(disturbance)이 발생될 수 있는 적당한 field를 대상체에 가하여야 한다. 이 field의 교란을 검출할 수 있는 적절한 센서가 요구되고 센서의 출력으로부터 field의 교란의 원인인 재료의 물성 또는 구조적 결함을 밝혀내는 기술이 마련되어야 한다. 이러한 field로서 대표적인 것으로 전자기장과 기계적 진동을 들 수 있는데, 본 해설논문에서 관심이 있는 기계적인 진동은 탄성파의 형태로 전파되어지고 그중에서도 초음파라 함은 가청음(20Hz-20kHz) 보다 높은 주파수의 탄성파를 의미한다. 초음파 시험은 X-선이나  $\gamma$ -선과 같은 방사선 투과 시험과 함께 품질관리의 측면에서 비파괴 시험의 중요한 역할을 담당해왔다.

파원에서 발생된 초음파는 입자의 진동을 유발하면서 매질내를 전파하고, 그 전파 특성은 매질의 특성에 따라서 달라진다. 초음파가 시험체 표면에 도달하면 표면이 진동하게 되고 이 진동신호는 표면에 부착된 탐촉자에 의해 검출된다. 검출된 신호는 탐촉자의 특성은 물론이고 파원과 매질의 특성을 포함하므로, 수신된 초음파 신호를 적절히 분석하면 매질에 관한 정보를 추출할 수 있다. 매질에 대한 정보는 탄성계수, 결정립의 크기, 결정구조의 이방성 등과 같은 재료의 물질적 성질과 균열, void, inclusion과 같은 구조적인 결함이 모두 포함이 되는데, 전자는 제질평가로 후자는 결함탐지로 구별된다. 이 두가지 분류는 절대적이지 않고 상호 보완적인 의미를 지니며,

시험장치는 거의 동일하고 신호 분석법에 약간의 차이가 있다.

초음파를 발생시키고 검출하기 위해서 일반적으로 압전현상을 이용한 초음파 탐촉자를 많이 사용하고 있으나, 경우에 따라서는 기계적인 충격이나 전자기적인 방법이 이용되기도 한다. 인위적인 초음파 파원의 이외에도, 시험체 내부에서 균열의 성장과 같이 응집된 에너지가 탄성파 에너지로 발생하는 신호를 이용하기도 하는데 이는 음향방출시험(acoustic emission)이라는 다른 큰 분류에 속하므로 본 해설논문에서는 생략한다. 사용되는 초음파는 대상재료의 특성이나 얻고자 하는 정보의 종류에 따라서 그 주파수, 시험방법, 신호분석법이 달라나, 대개의 경우 수십 kHz에서 수십 MHz의 초음파가 많이 사용되고 시험법에 따라서 협대역(narrow-band) 또는 광대역(wide-band)의 특성이 부여된다.

본 해설논문에서는 초음파의 발생과 수신 기법 및 기초적인 측정법을 요약하여 설명하기로 한다.

## II. 초음파의 발생 및 수신

초음파를 발생시키고 검출하기 위해서는 전기적 에너지와 기계적 에너지를 상호 변환시켜야 하는데, 가청 주파수 영역의 스피커와 마이크폰이 이에 해당하며 초음파 영역에서는 압전형 탐촉자가 널리 이용되고 있다. 압전형 탐촉자 이외에도 전자기적 방법, 정전 용량형, 광학적 방법, 기계적 충격 등이 고안되고 있는데 본 장에서는 이들 센서의 원리 및 특성을 기술하고자 한다.

### 1. 압전형 탐촉자<sup>1)</sup>

어떤 종류의 결정에 대해서는 역학적 strain에 의해 electrical polarization이 생기는데 이러한 현상을 압전효과라 하며 이는 가역적이어서 역학적 에너지와 전기적 에너지의 상호 변환에 널리 사용되고 그 중의 한 분야가 초음파의 발생 및 수신이다.

압전형 초음파 탐촉자는 그 특성상 공진 주파수가 일반적으로 100 kHz 이상이다. 또한 압전효과는 가역적이므로 송수신 겸용으로 사용될 수 있으나 시험 방법에 따라서는 분리형으로 사용되기도 한다. 이들은 couplant에 따라서 접촉식 및 수침형으로 구별되고, 초음파의 발생방향에 따라서 수직형 및 경사각 탐촉자로 구별된다. 수직형 접촉식 탐촉자의 일례를 Fig. 1에 나타내었다. 탐촉자의 주된 구성요소는 압전진동

자, wear plate, backing material로 구성되고 경우에 따라서는 wedge를 사용하여 발생하는 초음파의 진행방향을 바꾸기도 한다. 이들 구성요소들은 사용되는 탄성파의 모드, 주파수 및 펄스폭, 대상재료, 얻고자 하는 정보의 종류에 따라서 달라지는데, impedance matching을 통하여 최대의 SNR을 얻도록 설계된다.

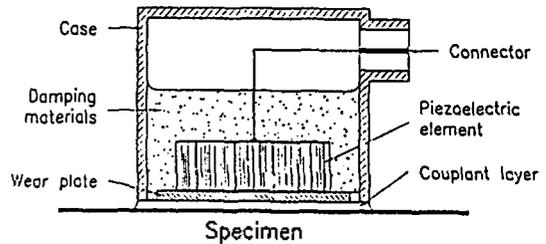


Fig. 1 Typical structure of piezoelectric transducer.

진동자로는 압전세라믹이 주로 사용되나 고온재료를 대상으로 하거나 높은 Q 값이 요구될 때에는 quartz나 LiNbO<sub>3</sub>와 같은 결정형 압전소자를 사용하게 된다. 대개의 경우 높은 주파수를 얻기 위하여 두께 방향의 공진모드를 이용한다. SH 모드의 횡파를 발생시키고자 할 경우에는 압전결정의 적당한 방향으로 자른 소자를 사용하는 것이 일반적이다.

Wear plate는 두가지 목적으로 사용된다. 첫째로는 압전소자를 보호하는 목적과 둘째로는 압전소자와 시험대상체 사이의 impedance matching의 목적이다. 무과되는 탄성파의 에너지를 최대로 하기 위해서는 waer plate의 acoustic impedance가 압전소자와 시험체의 acoustic impedance의 기하평균으로 주어져야 한다. 대개의 초음파시험의 대상체가 steel 계통이므로 이 wear plate는 수침용과 접촉용에 따라 두가지로 나누어진다. 수침용의 경우는 전달 매체가 물이므로 압전소자 보다 acoustic impedance가 낮은 재료가 사용되고, 접촉용으로는 압전소자보다 높은 impedance를 지니는 재료가 사용된다. 접촉용의 경우는 wear plate의 마모를 줄이기 위하여 알루미늄과 같은 내마모 세라믹 소재가 많이 사용되고, 수침용 탐촉자의 경우는 wear plate를 곡면으로 하게 되면, 특정한 위치에 초음파가 집중되는 집중형 탐촉자를 제작할 수 있다.

Backing 물질은 압전소자에 의해 발생되어 뒤로 진행되는 탄성파를 산란 및 흡수하여 발생하는 탄성파의 폭을 줄여주는 역할을 한다. 따라서, backing을 하지 않을 경우에는 pulse의 폭이 넓어지고 결과적으로는 좁은 폭의 주파수 성분을 지나는 공진형 탐촉자가 되고, backing을 할 경우에는 pulse 폭이 좁아져 broad band 탐촉자가 된다.

Wear plate 앞 부분에 wedge를 설치하면, 발생된 초음파는 wedge를 통하여 시험체로 진행되는데, wedge와 시험체의 표면 사이의 경계에서 반사와 굴절 현상이 일어나게 된다. 이때 wedge의 재질 및 각도를 바꾸면 시험체 내에서의 초음파의 진행방향 및 모드를 바꿀 수 있다.

2. Electromagnetic Acoustic Transducer

앞에서 기술한 압전형 초음파 탐촉자는 반드시 wear plate는 물론이고 접촉매질이 있어야 하므로 고온의 시험체에 대한 검사에 사용할 수 없을 뿐만 아니라, 재질 평가를 위한 정밀한 속도를 측정하려면 couplant 영향의 보상등의 어려운 문제가 따른다<sup>2)</sup>. 이러한 문제를 극복하기 위해서 개발된 것이 EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer)이다.

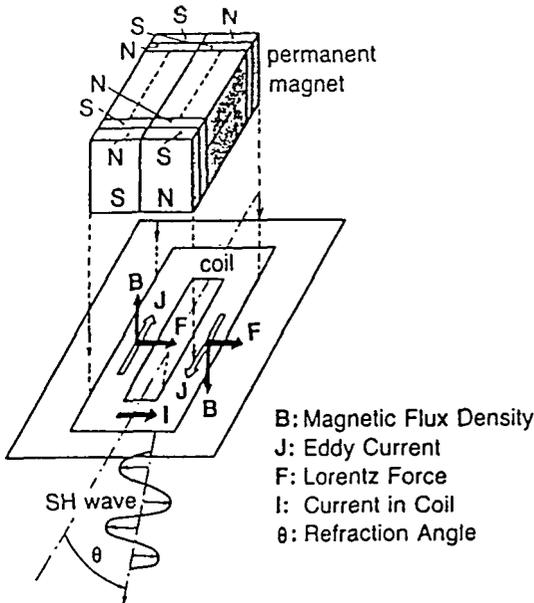


Fig. 2 Typical electromagnetic-acoustic transducer for SH wave.

대표적으로 SH 파를 발생시키기 위한 EMAT의 구조는 Fig.2와 같다. EMAT의 코일에 교류 신호를 가하면 이 교류 신호는 시험체 표면에 와전류를 형성하게 되고 이 와전류는 EMAT의 영구자석에 의한 자기장에 의해 Lorentz 힘에 의하여 기계적인 진동을 발생시킨다. 코일의 형태와 영구자석의 배치에 따라서 표면에 작용하는 힘의 배열에 따라서 진행되는 탄성파의 모드가 결정된다. 수신시의 동작원리는 발생시의 역과정으로 설명된다.

EMAT를 사용하면 탄성파가 탐촉자에서 발생되지 않고 시험체에서 직접 발생되기 때문에 접촉매질이 필요하지 않고, 코일의 형태, 영구자석의 배열에 따라서 쉽게 종파, 횡파(SH, SV), 표면파, Lamb파 등을 자유로이 발생시킬 수 있다<sup>3)</sup>. 전기에너지를 탄성파로 바꾸어주는 효율이 뛰지고, 시험체가 도체이어야 하며, 코일을 사용함으로써 동작주파수를 높이기 어려운 점이 있으나, 이는 재료의 잔류응력측정<sup>4)</sup>, texture 분석<sup>5)</sup> 등에 널리 사용되고 있다.

3. 광학적인 방법

광학적인 방법은 주로 레이저를 사용하는 방법으로서 laser-ultrasonics라는 새로운 분야를 구축하고 있다(Fig.3). 탄성파 발생을 위해서는 Q-switched Nd-YAG 레이저와 같은 고출력 펄스 레이저를 사용하며, 시험체 표면에서 국부적인 열팽창이나 입자의 ablation에 의한 반발력이 탄성파원이 된다<sup>6)</sup>. 이 과정은 매우 국부적으로 짧은 시간에 일어나므로 광대역의 구면파를 발생시키는 것이 일반적이다. 따라서, 가해주는 레이저 빔의 위치적 시간적 변화를 주어서 좁은 폭의 지향성 탄성파를 발생시키는 연구도 진행되고 있다<sup>7)</sup>. 이 방법은 완전한 비접촉식으로 고온재료의 물성이나 결함 탐지에 응용될 뿐만 아니라, 10 ns 이하의 좁은 레이저 펄스를 사용하여 100 MHz 이상의 고주파 탄성파 시험의 가능성을 내포하고 있다.

검출기는 간섭계의 원리를 이용하는 것으로서, 간섭계의 형태는 Michelson 형과 Fabri-Ferot 형 등이 이용된다. 어느 경우어나 검출하고자 하는 변위는 수 nm 이내로서 사용하는 레이저 파장에 비하여 매우 작은 값이다. 레이저 간섭계는 광검출기의 잡음, 외부 잡음신호의 유입 등으로 인하여 최소 검출 변위가 압전형 탐촉자에 비하여 비교적 크고, 구성장치가 복잡하여 이동성이 뛰어나 수십 nm 영역에서의 절대 변위를 측정할 수 있다는 장점으로 실험실에서 물성 측정 등에 계속적으로 연구되고 활용되어진다.

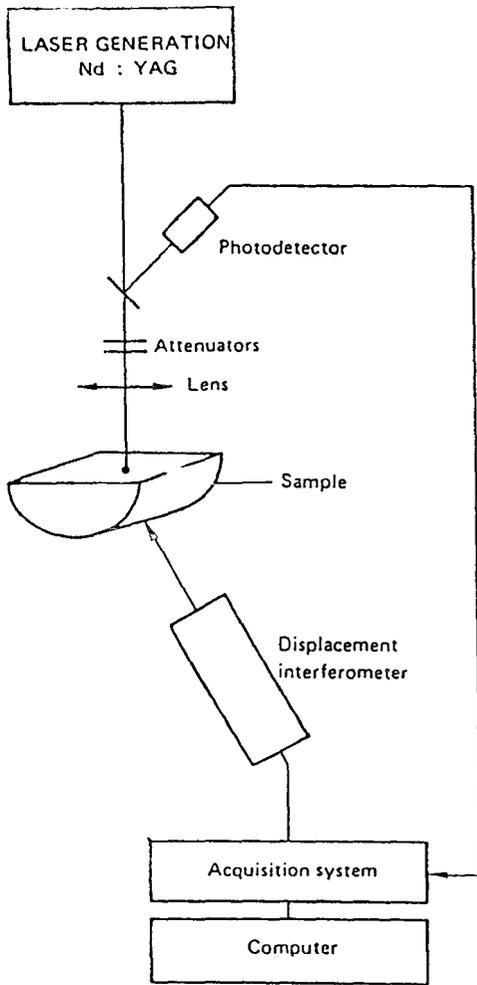


Fig. 3 Typical laser-ultrasonic setup.

4. 특수 탐촉자

초음파 시험에 사용되는 특수 탐촉자는 주로 강력한 초음파를 발생시키거나, 수신감도가 높거나 광대역인 탐촉자를 말한다. 특히 광대역 탐촉자는 초음파 전파기구인 정량적 해석에의 응용되므로 본 해설은 문에서는 주로 광대역 탐촉자에 관하여 언급한다. 압전소자를 사용한 접촉식 광대역 탐촉자로는 변위센서인 원추형 탐촉자와 속도 센서인 PVDF 센서에 대하여 논의하고, 비접촉식으로 capacitive transducer에 대하여 논의한다.

가. 원추형 압전탐촉자

압전소자를 사용한 탐촉자는 일반적으로 두께나 직경에 의한 공진 모드를 형성하는데, 원판형 압전소

자를 사용할 경우에는 공진자파수에서 높은 Q값을 지낸다. 반면에 Fig.4에 나타낸 바와 같이 원추형 압전소자를 사용할 경우에는 직경모드의 공진주파수가 하나로 결정되지 않고 인접한 여러 공진모드들의 중첩으로 인하여 광대역 특성을 나타낸다<sup>8)</sup>. 이 원추형 탐촉자는 초음파 펄스를 발생시키는데도 활용되고 있으나, 이 경우에는 접촉면이 1 mm 정도로서 지향성이 없는 구면파가 된다. 따라서, 원추형 탐촉자는 point-receiver로서의 광대역 탄성과 검출용 센서로 사용된다.

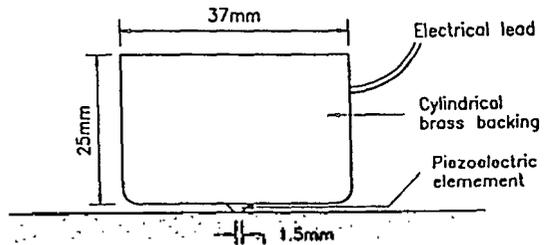


Fig. 4 Conical piezoelectric transducer.

나. PVDF 속도 센서

또다른 광대역 압전센서로서 PVDF 속도센서를 들 수가 있다. 이는 일반적인 압전형 초음파 탐촉자와 구조적으로는 유사하나, 압전소자로서 압전 포라머의 일종인 PVDF를 사용한 것으로 그 전기적 특성이 capacitance와 유사하여 특정한 공진 peak를 나타내지 않아 광대역 특성을 나타낸다. PVDF의 acoustic impedance가 PZT에 비하여 매우 낮은 이유로 hydrophone으로 많이 활용되고 있다<sup>9)</sup>. 이 탐촉자는 낮은 탄성계수로 인하여 탄성과 발생효율이 낮으므로 주로 탄성과 수신용 센서로 사용된다.

다. Capacitive transducer

압전소자를 사용한 광대역 센서들은 높은 감도를 나타내지만, 시험체 표면에 부착하여야 하므로 탄성과 전파기구를 왜곡시킨다. 반면에 capacitive 탐촉자는 비접촉식으로 탄성과 전파를 왜곡시키지 않고 시험체 표면의 변위를 검출할 수 있어서 표준 센서로 활용된다<sup>10)</sup>.

Fig.5에 capacitive 탐촉자의 동작원리를 나타내었다. Capacitive 탐촉자의 핵심요소는 탐촉자의 적극과 시험체 표면의 전극 사이의 capacitance이다. 시

협체가 도체일 경우는 시험체 자체가 전극이 되고 도체가 아닐 경우에는 전도성 물질을 coating하여 사용한다. Charge amplifier의 출력 전압  $V$ 는

$$V = \eta Q = \eta V_s C = \eta V_s \epsilon S / x \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서  $\eta$ 는 charge amplifier의 charge에 대한 출력 전압비를 나타내는 상수,  $Q$ 는 전극에 유도된 전하이고  $V_s$ 는 전극에 가해진 바이어스 전압,  $C$ 는 전기용량,  $\epsilon$ 은 시험체와 전극사이 물체의 유전상수,  $x$ 는 전극의 간격,  $S$ 는 전극의 면적이다.

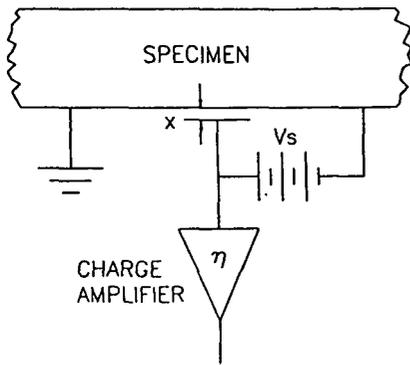


Fig. 5 Schematic diagram of capacitive transducer and its associated electronics.

시험체 표면이  $\Delta x$  만큼 변할 경우에 출력 전압의 변화  $\Delta V'$ 는  $\Delta x \ll x$ 일 경우에 근사적으로

$$\Delta V' = - \frac{\eta V_s \epsilon S}{x^2} \Delta x \quad (2)$$

과 같이 주어진다. 따라서 출력전압은 표면의 변위에 비례하는 신호를 나타내며, 이는 또한 바이어스 전압

에 비례하고 초기의 전극 사이의 간격의 제곱에 반비례한다. 최대 감도를 얻기 위해서는 전극 사이의 간극을 최대한 줄이고 방전이 일어나지 않을 정도로 높은 바이어스 전압을 기할 필요가 있다. 전극의 면적이 늘어남에 따라서 출력 전압도 증가하나 전극의 면적을 늘릴 경우에는 전극 면적에 대한 평균으로 인하여 주파수 대역이 좁아진다(aperture effect)<sup>11)</sup>.

### III. 초음파 시험 방법 및 장치

초음파를 사용한 비파괴 시험에서 측정되는 변수는 송신용 탐촉자에서 발생된 초음파가 수신용 탐촉자에 수신된 신호의 진폭, 도달시간 및 위상이다. 이들의 변수를 처리하는 방법에 따라서 시험검사하는 방법과 장치가 달라진다. Table 1에 이들 변수와 측정법을 요약하였다<sup>12)</sup>.

#### 1. Intensity Method

Intensity 방법은 초음파가 시험편을 통과한 후에 측정되는 intensity를 측정하는 방법으로 초음파 비파괴 시험의 가장 오래된 방법이다. 이 방법의 원리는 Fig.6과 같다. 발생된 초음파가 시험체 내부를 진행할 때에 결함이 존재하면 결함 근처에서 탄성파가 반사 산란되어 수신되는 탐촉자에 도달하는 탄성파의 에너지가 줄어든다. 따라서 수신되는 초음파의 진폭으로부터 시험체 내부의 결함 존재 유무를 파악할 수 있다. 또한, Fig.7에 intensity에 의한 image projection 방법을 나타내었다. Image projection의 가장 간단한 방법은 초음파 intensity를 빛으로 바꾸어 주는 image converter를 사용하여 결함의 그림자를 얻는 방법이다<sup>13)</sup>. 이 image converter는 초음파의 intensity를 전기적으로 주사하여 그 결과를 CRT 스크린에 나타내는 방법이다. 이 방법은 초음파 주파수를 100 MHz 정도로 높이고 초음파의 intensity를 레

Table 1. Measured variables and testing Methods.

Measured Variables :	Intensity	Intensity and phase	Intensity and transit time	Transit time or resonance frequency
Method :	Intensity method	Ultrasonic holography	Pulse transit-time or pulse-echo method	Resonance method
Principal application :	Image projection of flaw in plates	3-dimensional image projection of flaw	General flaw location and size	Wall-thickness measurement and flaw detection in plate

이저로 주사하여 나타내는 SLAM(Scanning Laser Acoustic Microscopy)<sup>14)</sup> 기술로 발전하게 된다.

은 수면으로 하고 기준파는 다른 초음파 탐촉자를 사용하거나 또는 전기적 신호로 처리될 수도 있다<sup>15)</sup>.

2. Pulse-Echo Method

Pulse-echo 방법은 초음파 시험법 중에서 가장 널리 사용되는 방법으로서, 발사된 탄성파가 물체에 부딪혀 되돌아오는 탄성파의 도달시간과 그 크기를 이용하는 방법으로서 1차 세계대전 당시 수중 물체 포착에 처음 이용되었다. 병산 발견을 위하여 제시된 이 방법은 선박, 특히 잠수함의 포착을 위하여 사용되었고, 종전 후에는 바다의 깊이를 추정하는데 사용되었다. 이 방법은 이차 세계대전 중에 비파괴 시험에 사용되기 시작하였다. Firestone은 1940년에 결함의 위치 판정의 비파괴검사에 이 pulse-echo 방법의 중요성을 인지하였다<sup>16)</sup>.

Pulse-echo 방법은 하나의 탐촉자로도 초음파의 송수신이 가능하다. Fig.9에 나타낸 바와 같이 결함에서 반사되는 신호(결함신호)는 시험편의 뒤편에서 반사되는 신호(저면신호)와는 그 intensity와 transit time(송신 탐촉자에서 발생한 초음파가 반사되어 수신 탐촉자까지의 경과 시간)에 의해 구별된다. 결함 또는 저면까지의 거리는 반사파가 되돌아 오는 시간으로부터  $d = ct/2$ 와 같이 계산된다.

Fig. 6 Intensity method with ultrasonic wave transmission.

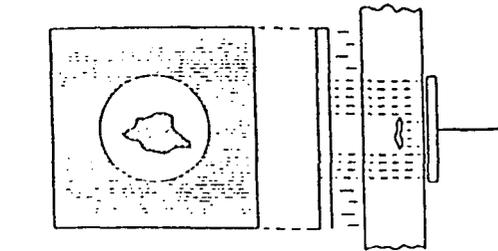


Fig. 7 Intensity method with image projection.

초음파 intensity에 위상정보를 더하면 acoustic hologram을 만들 수 있다. 이는 광학적 hologram과 유사하며 Fig.8에 나타낸 바와 같이 hologram 평면

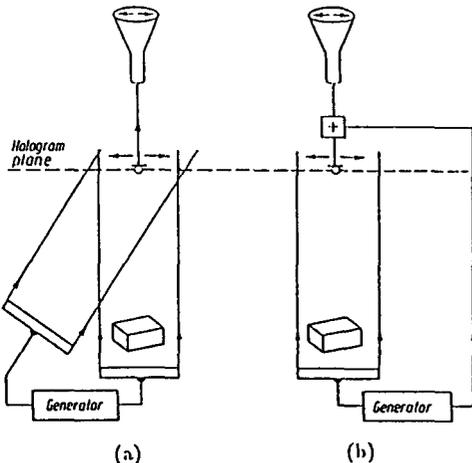


Fig. 8 Scanning of an acoustic hologram and its conversion into an image. (a) By means of an acoustic reference wave : (b) by means of an electronically added reference wave.

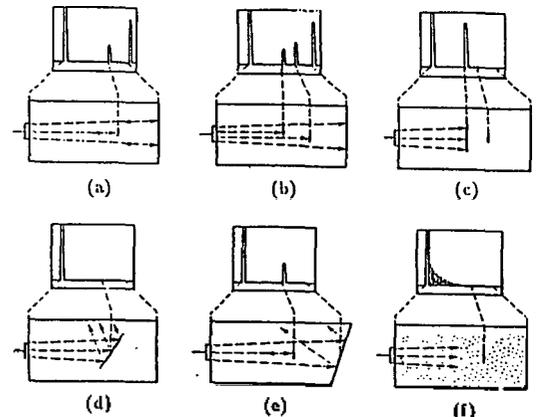


Fig. 9 Schematic screen pictures obtained by the pulse-echo method. (a) small flaw. (b) two small flaws. (c) Large flaw, smaller second flaw and backwall masked. (d) Large, obliquely oriented flaw, backwall masked. (e) Small-flaw but no backwall echo. (f) Strong attenuation of sound beam due to scattering, no echo from flaw and backwall.

Fig.9(a)와 같이 초음파 빔에 비하여 작은 결함이 초음파 경로상에 있게 되면 초음파 에너지의 일부가 결함에서 반사되고 나머지는 저면에서 반사된다. Fig.9(b)와 같이 초음파 경로상에 작은 두 결함이 존재하면 각각에서의 결함 신호와 저면신호가 같이 나타나고, 결함신호의 위치 및 크기는 각각 결함의 위치와 크기에 의해 결정된다. Fig.9(c)와 같이 초음파 빔보다 큰 결함이 초음파 경로상에 있게 되면 모든 초음파 에너지가 결함에서 반사되고 뒤쪽으로 투과하는 초음파는 없게 되어, 큰 결함 뒤의 작은 결함신호나 저면신호는 나타나지 않는다. Fig.9(d)와 같이 큰 결함이 초음파 경로상에 비스듬하게 놓여 있을 경우에는 초음파 에너지 모두가 반사되는 탐촉자를 향하지 않기 때문에 결함신호가 나타나지 않는다. Fig.9(e)와 같이 작은 결함과 경사진 저면의 경우에는 결함신호는 나타나지만 저면신호는 경사진 저면으로 인하여 나타나지 않는다. Fig.9(f)와 같이 산란이 심한 재료에서는 매질내의 입자에서 불규칙하게 산란된 신호가 탐촉자에 검출되고, 초음파가 진행해 감에 따라서 intensity가 줄어들므로 결함신호나 저면신호는 나타나지 않는다.

Pulse-echo 시험법은 결함 탐지 뿐만 아니라 두께 또는 길이 측정 및 탄성계수 측정에 활용된다. Transit time을 측정하면 음속을 알 경우에 거리는  $d=ct/2$ 로 주어지고, 반대로 두께를 알고 있는 경우에는 음속은  $c=2d/t$ 로 주어지고 음속으로부터 재료의 탄성계수들을 측정할 수 있다. 측정된 길이나 탄성계수의 정밀도를 향상시키기 위해서는 transit time을 정확히 측정해야 하고 이를 위해서는 pulse-echo overlap method, sing-around method, ultrasonic pulse interferometer 등이 사용된다<sup>17)</sup>.

사용하는 주파수를 1 GHz 정도로 높이고, 집속형 탐촉자를 사용하여 위치에 따른 pulse-echo 시험 data로부터 영상화된 상을 얻을 수 있는데, 이를 SAM (Scanning Acoustic Microscope)라 한다. SAM은 광학 현미경, SEM 또는 STM과는 달리 표면 내부에 대한 영상을 얻을 수 있는 장점 때문에 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히, SAM으로 얻어진 영상은 기하학적인 구조 뿐만 아니라 탄성계수에 의해서도 영향을 받는 관계로 박막의 잔류응력 측정 등에 활용되기도 한다.

### 3. Resonance Method

항아리의 공명소리로부터 균열을 찾는 방법과 같

은 가청 주파수 영역에서의 음향공진은 아마도 비파괴검사의 가장 오래된 방법일 것이다. 이는 초음파가 특정한 파장을 가지고 시험체의 앞뒷면 사이의 왕복 또는 원주방향으로의 회전으로 증첩될 때에 그 위상이 정확히 일치하면 공진이 일어나고 그렇지 못한 경우에는 서로 상쇄되는 현상을 이용하는 것이다. 공진 특성은 시험체의 재질, 형상, 크기에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라 가진(加振) 특성 및 위치, 불가피한 시험편의 고정 등에 영향을 받는다. 모든 시험조건을 동일하게 할 경우에는, 상대적인 비교를 통하여 시험체 특성의 변화를 검출할 수 있다. 크기가 시험체의 크기에 비하여 너무 작지 않을 경우에만 결함 검출이 가능하고 결함의 크기나 위치에는 민감하지 못하기 때문에, 이 방법은 결함검출 보다는 두께 측정이나 이와 유사한 시험에 유용하다. 또다른 응용분야로는 재료의 탄성계수 측정에 활용된다.

공진 두께측정의 원리는 정상파로 설명될 수 있다. 얇은 판의 양면이 자유롭게 움직일 수 있으면 두께 방향의 공진이 일어날 수 있는데 이 경우의 정상파는 판의 두께가 반파장의 정수배와 일치하는 주파수에서 나타난다. 즉  $n$ 차 공진주파수  $f_n$ 는

$$f_n = n f_0 \quad (3)$$

와 같이 주어지고 이때  $f_0$ 는 두께가 반파장일 때에 일어나므로 두께  $d$ 는

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2} \frac{c}{f_0} \quad (4)$$

와 같이 결정된다.

일반적으로 어떠한 공진주파수  $f$ 를 얻었다 하더라도 정수부  $n$ 을 모를 경우에는 이 식은 의미가 없다. 그러나, 이러한 경우에는 한 공진주파수  $f_n$ 에서 가동 주파수를 늘려서 다음 공진 주파수  $f_{n+1}$ 를 얻게 되면 그 주파수의 차이  $\Delta f$ 는

$$\Delta f = f_{n+1} - f_n = f_0 \quad (5)$$

와 같이  $f_0$ 와 같게 되어 식(4)를 사용할 수 있다. 이러한 방법은 펄스 폭이 pulse-echo 방법에서의 transit time 보다 길어서 송신 펄스와 반사파를 분리시키기 곤란한 경우에 활용도가 높다. 이러한 경우는 coating막과 같은 얇은 두께의 측정, 콘크리트와 같이 감쇠가 큰 재료의 두께측정등에 활용된다.

이 방법은 가진시키는 방법에 따라서 두가지로 나눌 수 있는데, 그 하나는 연속적인 정현파를 주파수를 바꾸어 가면서 공진 주파수를 측정하는 방법과 또 다른 하나는 짧은 충격에 의해 넓은 주파수 성분의 초음파를 발생시키고 시험체의 진동신호를 주파수 분석을 통하여 공진주파수를 측정하는 방법이다. 전자는 공진 주파수를 높은 정밀도로 측정할 수 있어서 탄성계수 측정등에 활용되나 측정시간이 긴 단점이 있다. 후자는 기계적 충격에 의해 큰 진폭의 탄성파를 발생시킬 수 있으나, FFT를 통하여 얻어지는 주파수 분해능이 그리 높지 않아서 콘크리트와 같이 구멍입자가 많은 재료의 비파괴 검사 등에 활용된다<sup>18)</sup>.

#### IV. 결 론

초음파를 이용한 비파괴 시험법에 대하여 간략히 검토하였다. 초음파 비파괴 시험의 활용도는 매우 넓으나, 국내에서는 학문적인 연구와 산업 현장에서의 요구 사이의 기술이 전에 대한 괴리가 큰 탓으로 크게 활용되지는 못하고 있는 실정이다. 특히 초음파 시험은 대상재료, 형상 및 시험검사 인자에 따라서 시험장치와 방법이 달라져야 하는 관계로 시험 장비의 국산화에 관한 사업이 활발히 전개되어야 할 것으로 판단된다. 초음파 비파괴 시험이라는 주제가 워낙 광범위한 관계로 이들의 세세한 내용을 검토하지 못한 아쉬움이 남는다.

#### 참 고 문 헌

1. H. Kwun, "Ultrasonic transducers, performance variability, design, and manufacturing procedures," Nondestr. Test. Inform. Anal. Center, NTIAC-84-1 (1984)
2. A. Vincent, "Influence of wearplate and coupling layer thickness on ultrasonic velocity measurement," Ultrasonics, 25(4), 237-243 (1987)
3. V. M. Ristic, "Principles of acoustic devices," John Wiley & Sons, New York (1984), Chapter 3 and 4
4. A. V. Clark and J. C. Moulder, "Residual stress determination in aluminium using electromagnetic acoustic transducer," Ultrasonics, 23(6), 260-268 (1985)
5. D. R. Allen, R. Langman and C. M. Sayers, "Ultrasonic SH wave velocity in textured aluminium plates," Ultrasonics, 23(5), 215-222 (1985)
6. J. D. Aussel, A. Le Brun and J. C. Baboux, "Gener-

ating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of the emission source," Ultrasonics, 26(5), 245-255 (1988)

7. P. Cielo, F. Nadeau and M. Lamoutague, "Laser generation of convergent acoustic waves for materials inspection," Ultrasonics, 23(2), 55-62 (1985)
8. A. D. W. McKie, J. W. Wagner, J. B. Spicer and C. M. Penny, "Laser generation of narrow and directed ultrasound," Ultrasonics, 27(6), 323-330 (1989)
9. T. M. Proctor, Jr., "An improved piezoelectric acoustic emission transducer," J. Acoust. Soc. Am., 71, 1163-1168 (1982)
10. M. Greenspan, "The NBS conical transducer: analysis," J. Acoust. Soc. Am., 81(1), 173-183 (1987)
11. A. S. DeReggi, S. C. Roth, J. M. Kenney and S. Edelman, "Piezoelectric polymer probe for ultrasonic applications," J. Acoust. Soc. Am., 69(3), 853-859 (1981)
12. M. Platte, "A polyvinylidene fluoride needle hydrophone for ultrasonic applications," Ultrasonics, 23(3), 103-112 (1985)
13. F. R. Breckenridge and M. Greenspan, "Surface-wave displacement: absolute measurements using a capacitive transducer," J. Acoust. Soc. Am., 69(4), 1177-1185 (1981)
14. K. Y. Kim, L. Niu, B. Castagnede and W. Sachse, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals," Rev. Sci. Instrum., 60(8), 2785-2788 (1989)
15. F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg and M. Greenspan, "Acoustic emission: some applications of Lamb's problem," J. Acoust. Soc. Am., 57(3), 626-631 (1975)
16. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, "Ultrasonic testing of materials," Springer-Verlag, Berlin (1977), p.173
17. S. Y. Sokolov, "Means for indicating flaws in materials," US Pat. 2,164,125 (1937)
18. A. W. Korpel, L. W. Kessler and P. R. Palermo, "Acoustic microscope operating at 100 MHz," Nature, 232(5306), 110 (1971)
19. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, "Ultrasonic testing of materials," Springer-Verlag, Berlin (1977), p.188
20. F. A. Firestone, "Flaw detecting device and measuring instrument," US pat. 2,280,226 (1940)
21. E. P. Papadakis, "Ultrasonic velocity and attenuation: measurement methods with scientific and

industrial applications," in Physical Acoustics, Vol. 12, eds. Mason, W.P. and Thurston, R.N., Academic Press, New York (1976)

22. Y. H. Kim, S. Lee and H. C. Kim, "Quantitative vibration mode analysis of mortar and concrete blocks containing flaws," NDT Int'l, 23(2), 67-74 (1990)

▲金榮煥(Young H. Kim) 1956년 6월 27일생



1975년 3월~1979년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학사)

1979년 3월~1981년 2월: 한국과학기술원(이학석사)

1982년 9월~1990년 2월: 한국과학기술원(이학박사)

1981년 3월 6일~현재: 한국표준과학연구원 책임연구원

1983년 6월 26일~1983년 10월 25일: 미연방표준국 방문연구원

1992년 8월 1일~1993년 9월 30일: Ames Lab., U.S. A. 객원연구원

1991년 9월 20일: 한국표준연구소 모범직원포상

1991년 11월 25일~현재: 공업진흥청 국내전문위원  
ISO/IEC/TC87