

## 수침 초음파 시험법을 이용한 고체의 종파와 횡파 속도의 측정

### Measurement of Longitudinal and Transverse Wave Speed in Solid Materials Using Immersion Ultrasonic Testing

신요섭\*, 윤여호\*, 김영환\*<sup>†</sup>

Yosub Shin\*, Yeo Ho Yoon\* and Young H. Kim\*<sup>†</sup>

초 록 고체의 탄성 계수를 구하기 위한 방법으로 초음파의 종파와 횡파 속도를 측정하기 위하여 기존의 접촉식 초음파 시험법 대신 수침 초음파 시험법을 사용하였다. 통상적으로 수침법에서 종파 에코만 고려하는 것과 달리 모드 변환에 의한 횡파 에코를 찾아서 횡파 속도를 측정하였다. 물질의 두께를 알 수 없어 종파와 횡파 속도를 구할 수 없는 경우에도 두 속도의 비를 이용하여 포아송비를 구할 수 있었다. 다양한 재료를 대상으로 이 방법을 적용한 결과, 속도가 빠른 재료이거나, 포아송비가 작을수록 수침법에 의해 측정된 값이 정확하여 이러한 특징을 가진 세라믹이나 고강도 재료가 이 방법을 통한 종파와 횡파 속도 측정에 적합함을 알 수 있었다.

**주요어:** 수침 초음파 시험법, 초음파 속도, 탄성 계수, 포아송비

**Abstract** Immersion ultrasonic testing (UT) was used to determine elastic moduli of solid materials instead of the widely-used contact UT method. Conventionally, immersion UT is only used for determining the longitudinal wave speed. However, in this research, transverse wave speed was measured through finding transverse wave echoes caused by mode-conversion at material's boundary. Also, even in the cases when wave speeds could not be determined due to unknown thickness, Poisson's ratio was able to be calculated from the ratio of longitudinal and transverse wave speeds. This technique was verified for several materials, and it was found that higher accuracy was obtained by immersion UT method for materials either with relatively high wave speed or with relatively small Poisson's ratio. This technique thus will be suitable for ceramics or high strength materials.

**Keywords:** Immersion Ultrasonic Testing, Ultrasonic Wave Speeds, Elastic Moduli, Poisson's Ratio

#### 1. 서 론

고체의 탄성 계수는 물질에 가해지는 응력과 변형률에 관계되는 값들로서, 이 값들은 물성 평가를 위해서 널리 사용된다[1,2]. 이러한 탄성 계수를 구하기 위해서는 초음파를 사용하여 종파와 횡파의 속도를 측정하여야 하는데, 이를 위해서 기존에는 접촉식 초음파 시험법(이하 접촉법)을 이용하였는데, 이 때 종파 탐촉자와 횡파 탐촉자를 각각 따로

사용하여 종파와 횡파의 속도를 구하게 된다. 그리고 횡파 속도를 측정하기 위해서는 측정대상에 횡파를 전달하기 위하여 고체 접촉매질(couplant)이 사용되는데, 이 과정이 번거로울뿐더러, 위치에 따라 물성이 변하여 여러 곳에서 횡파의 속도를 측정하기 위해서는 고체 접촉매질을 이용해 여러 번 붙였다 떼었다 해야 하는 제약이 있다. 더욱이 표면이 상하기 쉽거나 약한 물질의 경우에는 접촉매질을 붙이기 위해 가해지는 열에 의해 측정해야 할

대상의 물성이 변하거나, 속도 측정 후에 탐촉자를 떼어낼 때와 물질에 붙어있는 접촉매질을 제거할 때 실험 물질이 떨어져 나갈 수도 있다.

포아송비(Poisson's ratio)는 재료가 외부로부터 힘을 받아 변형이 일어날 때에, 한 방향의 수직 변형률과 그에 수직인 방향으로 일어나는 수직변형률의 비로서, 탄성상수 중의 하나이다. 포아송비는 종파속도와 횡파속도의 비를 측정하면 정해 질 수 있는데, 포아송비의 변화폭이 그리 크지 않을 뿐만 아니라 두 초음파의 속도를 측정해야 하기 때문에 재료의 물성평가에서 그다지 큰 관심을 끌지 못하고 있다. 그러나, 일반적으로 포아송비가 크다면 연성재료일 것이라고 생각하고 있으며, 최근에 포아송비와 횡파 속도 사이의 관계에 대한 연구가 보고된 바 있다[3]. 또한, 동일한 재질 내에서 포아송비를 측정하여 재료의 균질성을 평가하는데 활용할 수 있다.

한편 비접촉 방식인 수침 초음파 시험법(이하 수침법이라 칭함)을 사용하면 접촉식 시험법에서 발생하는 제약을 상당 부분 해소할 수 있다. 일반적으로 수침법에서는 종파에 대해서만 고려되지만 수침법에서도 모드변환(mode-conversion)된 횡파가 존재함이 보고되었다[4]. 수침법을 이용한 종파와 횡파 속도의 측정은 펄스 에코(pulse-echo) 신호에서 종파의 에코뿐만 아니라 시험편 경계에서 일어나는 모드변환에 의해 생겨나는 횡파 에코들을 찾아내어 도달시간으로부터 계산함으로써 이루어진다. 수침법을 사용하면 종파와 횡파의 속도를 동시에 측정할 수 있고, 특정 위치에서 측정할 때마다 접촉매질을 사용해 붙이는 것과 같은 일이 불필요하기 때문에 빠른 측정이 가능하고, 위치마다 물성이 달라 여러 번 측정이 필요한 경우에도 스캔 방식으로 넓은 면적에 대해 종파 및 횡파의 속도 측정이 가능하다. 또한 시험편에 직접적으로 접촉하지 않아도 되므로 시험편 자체의 상태에 거의 영향을 미치지 않는다.

또한, 만약 시험편의 두께를 알 수 없어 초음파의 속도를 측정할 수 없는 상황에서도 두 속도의 비는 펄스 에코 신호를 통해 구할 수 있기 때문에 물질의 고유한 특성인 포아송비를 구할 수 있다. 더욱이 이 방법을 이용한다면 하나의 탐촉자로 포아송비를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 수침법을 이용하여 탄성계수를 측정하는 방법의 가능성과 한계를 확인하기 위하여

다양한 시험편을 대상으로 종파와 횡파의 속도를 측정하고, 기존의 접촉식 시험법으로 측정된 값과의 비교를 하였다. 또한 본 방법을 활용하여 재료의 포아송비를 측정하고 이에 대한 분포를 구하는 가능성을 제시하였다.

## 2. 실험

7개의 다른 종류의 시험편들에 대해 실험을 진행하였으며, 그 중 6개의 시험편은 가로, 세로, 높이가 25 mm인 정방형인 것을 사용하였고, 나머지 하나의 시험편은 22 mm 두께의 Silicon Nitride를 사용하였다. 고체 내부의 종파와 횡파의 속도를 측정하기 위하여 본 연구에서 제안하는 수침법과 기존에 사용되고 있는 종파, 횡파 탐촉자를 이용한 접촉식 시험법을 사용하였다. 기본적으로는 5.0 MHz의 중심 주파수를 가진 탐촉자를 사용해 실험하였고, 감쇠가 심해 에코를 찾기 힘든 납과 아연 합금에 대해서는 감쇠가 덜한 1.0 MHz와 2.25 MHz의 탐촉자를 각각 수침법과 접촉식 시험법에 대하여 사용하였다. 수침법의 경우 탐촉자와 시험편 사이의 거리가 너무 가까우면 시험편 내부에서 반사되어 발생하는 에코들과 탐촉자와 시험편 사이를 왔다갔다하면서 발생하는 에코들이 겹쳐서 데이터를 분석하기 힘들기 때문에 충분한 거리(약 8 cm)의 거리를 두고 실험하였다. 접촉식 시험법에서 횡파 속도를 측정하기 위해서 횡파탐촉자 (중심주파수: 2.0 MHz)와 고체 접촉매질인 Salol을 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1. 종파와 횡파 속도 측정

파동이 어떤 매질 속을 진행하다가 매질의 경계 부분에 도달하게 되면 다시 원래의 매질 쪽으로 반사하거나 다른 매질 속으로 투과하게 되는데, 이때 모드변환이 발생할 수 있다. 원래 수직 입사된 평면파에서는 모드변환이 일어나지 않지만, 탐촉자에서 발생한 초음파는 평면파가 아니므로 수직 입사 하더라도 모드변환이 발생한다. 이러한 모드변환에 의해 초음파 탐촉자에서 출발한 종파 형태의 파동의 일부가 횡파로 반사되어 되돌아오게 되는데 이 때 걸리는 시간을 측정하면 횡파의 속도를 측정할 수 있다[4].

시험편의 아래 표면에서 반사된 펄스가 첫 번째로 초음파 탐촉자에 도달한 뒤 다음으로 도달하는 종파 신호들을 순서대로 Fig. 1 과 같이 2P, 4P, 6P 등과 같이 표현한다. 그리고 시험편의 경계에서 모드변환에 의해 종파에서 횡파로 바뀌어서 반사되는 경우 1P1S, 3P1S 등과 같이 표현한다. Fig. 1에서 Front 와 2P 신호 사이의 간격을  $t_{2P}$  라고 하고, Front에서 4P까지를  $t_{4P}$ , Front 와 1P1S 사이의 시간을  $t_{1P1S}$  라고 하면

$$t_{4P} - t_{2P} = \frac{2d}{c_p}, \quad t_{1P1S} = \frac{d}{c_p} + \frac{d}{c_s} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서  $d$ 는 시험편의 두께이다. 위의 식으로부터 종파속도  $c_p$ 와 횡파속도  $c_s$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$c_p = \frac{2d}{t_{4P} - t_{2P}}, \quad c_s = \frac{d}{t_{1P1S} - (d/c_p)} \quad (2)$$

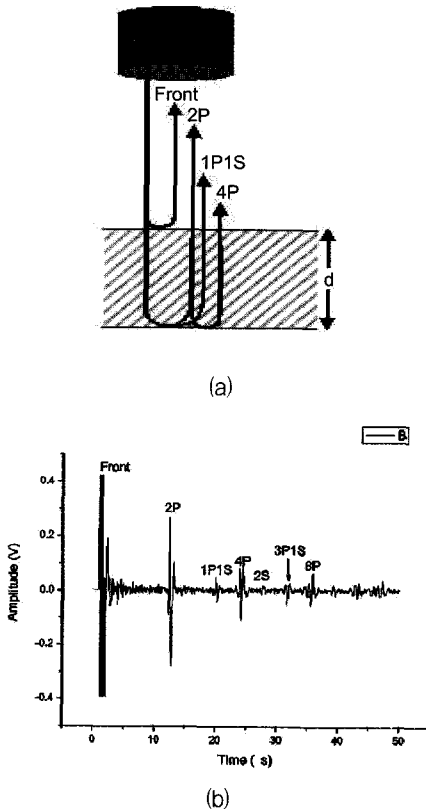


Fig. 1 (a) Schematic diagram of ultrasonic signals due to reflection, refraction and mode conversion (b) pulse-echo signals from brass using immersion method

Fig. 2는 수침법으로 알루미늄과 납에 대해 실험한 신호이다. 알루미늄의 펄스 에코 신호를 보면 에코가 시간이 갈수록 작아지기는 하지만 앞부분에서 충분히 모드변환에 의한 1P1S 신호의 위치를 파악할 수 있다. 따라서 이 신호로부터 종파와 횡파의 속도를 정확히 구할 수 있다. 그런데, Fig. 2 오른쪽의 납 시험편에 대한 펄스 에코 신호의 경우는 1.0 MHz 탐촉자를 사용했음에도 불구하고, 2P와 4P의 윤곽을 겨우 알아볼 수 있을 정도이다. 이렇게 다른 시험편에 대해 실험 결과가 크게 다른 것은 납에서 파의 감쇠가 알루미늄에서보다 훨씬 크기 때문이다. 이러한 이유 때문에 수침법을 이용한 실험에서는 납과 아연 합금 시험편에 대하여 횡파 속도를 구할 수 없었다. 파의 감쇠로 인하여 측정에 필요한 피크를 찾을 수 없는 문제를 해결하기 위하여 5.0 MHz 중심주파수의 탐촉자에서 감쇠가 적은 1.0 MHz 탐촉자로 교체하여 실험해보았으나, 피크의 분산이 커지는데다 이마저도 피크를 잡아내지 못하였다.

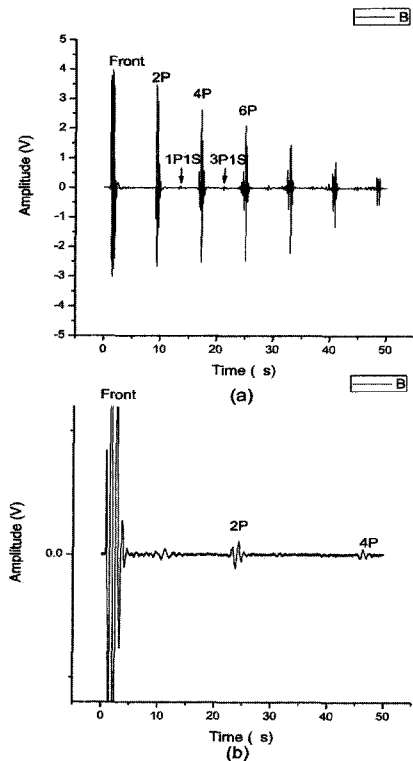


Fig. 2 Pulse-echo signals by immersion method (a) from aluminum using 5.0 MHz transducer and (b) from lead using 1.0 MHz transducer

Fig. 3은 알루미늄 시험편에 대해 수행한 접촉식 초음파 시험의 결과이다. 물이 탐촉자와 시험편 사이에 놓여있던 수침법과는 다르게 시험편과 탐촉자가 직접 접촉시킬 수 있어서 고체 접촉매질을 사용하면 횡파를 직접적으로 전달할 수 있는데, 따라서 접촉법에서는 종파 탐촉자와 횡파 탐촉자를 따로 사용하여 각각 종파와 횡파의 속도를 측정하였다. Fig. 3에서 종파(a)와 횡파(b)에 대한 신호 모두 뚜렷이 구분되는 에코들이 시간의 진행에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 두 그래프에서 각각 구해진 종파와 횡파의 속도는 수침법으로 측정한 알루미늄의 종파와 횡파의 속도와 같다. 그런데 Fig. 4의 납에 대한 펄스 에코 신호들을 보면, 종파(a)와 횡파(b) 신호 모두 첫 번째 에코를 간신히 구분할 수 있는 정도이며, 모드변환된 에코는 물론 시험편 내부를 두 번 왕복한 에코도 찾을 수 없다. 이러한 현상은 납에서의 초음파의 감쇠가 다른 금속에서보다 훨씬 심하기 때문인데, 납 말고도 아연 합금의 경우에도 비슷한 이유로 접촉법으로는 횡파 속도를 찾을 수 없었다. 감쇠를 줄이기 위해 기존의 5.0 MHz보다 낮은 2.25 MHz의 중심주파수를 가진 종파 탐촉자를 사용하였으나, 역시 첫 번째 에코 외에 다른 에코를 찾을 수 없었다. 그러나 다른 금

속의 펄스 에코 신호를 참조하여 front 와 첫 번째 에코 간의 시간 간격을 이용해 횡파와 종파의 속도를 근사적으로 계산할 수 있었다. 이 방법을 통해 구한 납의 횡파, 종파 속도는 문헌에 표시된 값과 일치했으나, 이전에 수침법으로 횡파의 속도를 구할 수 없었던 아연 합금의 경우는 접촉법으로도 에코를 찾을 수 없어 횡파의 속도를 구할 수 없었다.

이상의 결과를 요약하면 Table 1과 같다. 수침법으로 측정한 값과 접촉법으로 측정한 속도 값들을 비교해보면 파의 속도가 빠를 때는 접촉법과 수침법으로 측정한 종파와 횡파의 속도의 값들이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그런데, 초음파의 속도가 느려지면 접촉법과 수침법으로 측정한 종파의 속도의 값은 거의 비슷하지만, 횡파의 속도는 그 값이 작아질수록 두 방식으로 측정한 값들의 차이가 벌어진다. 이러한 경향성으로 수침법을 이용한 종파와 횡파 속도의 측정에는 Silicon Nitride와 같은 고강도 재료나 세라믹 물질과 같은 초음파의 속도가 빠른 매질이 효과적이라는 사실을 알 수 있다. 하지만 아연 합금의 경우에는 납처럼 파의 속도가 느려서 측정이 잘 안되었던 것인지 어떤 원인에 의해 수침법이나 접촉법에 의해 횡파 측정이 불가능했는지 알 수 없다.

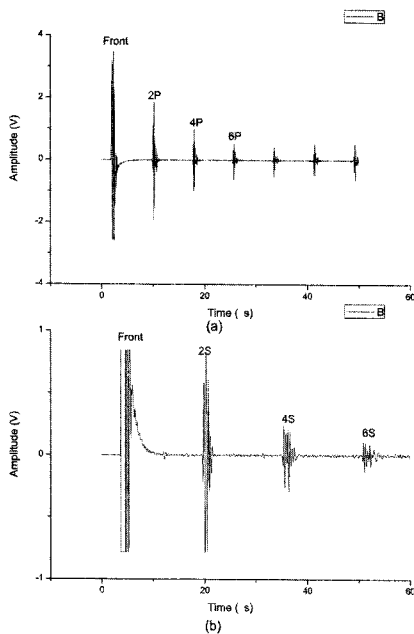


Fig. 3 Pulse-echo signals by contact method (a) from aluminum (a) using 5.0 MHz longitudinal wave transducer and (b) using 2.0 MHz transverse wave transducer

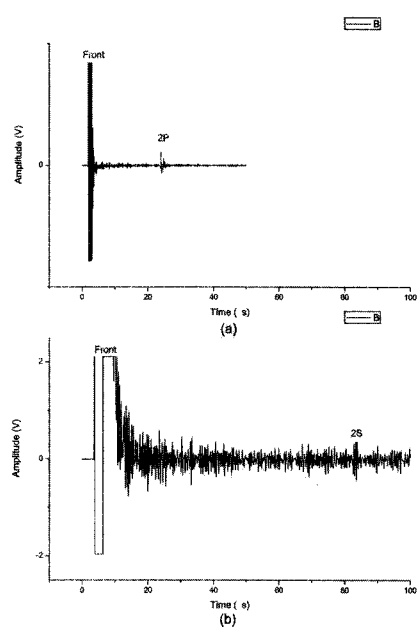


Fig. 4 Pulse-echo signals by contact method (a) from aluminum (a) using 2.25 MHz longitudinal wave transducer and (b) using 2.0 MHz transverse wave transducer

Table 1 Measured speeds of longitudinal and transverse waves for various specimens

Material	Reference [5]		Contact method		Immersion method	
	$c_p$ (m/s)	$c_s$ (m/s)	$c_p$ (m/s)	$c_s$ (m/s)	$c_p$ (m/s)	$c_s$ (m/s)
Silicon Nitride	11200	7000	13400	8560	13400	8520
Aluminum	6374	3111	6410	3210	6360	3150
Steel	5874	3179	6010	3270	6010	3210
Copper	4759	2260	4680	2280	4790	1990
Brass	4372	2100	4400	2100	4390	1940
Lead	2160	700	2290*	634	2260*	X
Zinc Alloy	X	X	4420*	X	5240*	X

\* 납과 아연합금에 대해서 접촉식과 수침법에서 2.25 MHz, 1.0 MHz 탐촉자를 각각 사용하였다.

Table 2 Calculated Poisson's ratio for various specimens

$\mu$	Reference [5]	Contact method	Immersion method
Silicon Nitride	0.18	0.16	0.16
Steel	0.29	0.30	0.30
Aluminum	0.33	0.33	0.34
Brass	0.35	0.35	0.38
Copper	0.34	0.34	0.39
Lead	0.44	0.46	X
Zinc Alloy	X	X	X

### 3.2. 고체 물질의 포아송비 측정

고체에서 종파와 횡파의 속도는 각각 영(Young) 계수, 전단탄성계수와 각 물질의 밀도의 비를 통해 표현된다. 이러한 탄성률은 고유의 값으로써 변환식을 통해 다른 종류의 탄성률을 구할 수 있다. 그리고 고체의 두께를 측정할 수 없는 경우에는 종파와 횡파의 속도의 절대적인 값을 측정할 수 없다. 이 때에는 에코들의 도착시간을 이용해 종파와 횡파의 속도의 비를 구할 수 있는데, 이 비를 이용하면 물질의 중요한 특성 중 하나인 포아송비를 구할 수 있다[6].

$$\mu = \frac{1-2\alpha^2}{2-2\alpha^2} \quad (3)$$

여기서  $\alpha = c_s / c_p$  는 횡파와 종파 속도비이다.

Table 2는 각 재료들에 대해 포아송비를 구한 결과이다. 이 표를 보면 Table 1에서와 같이 경향성이 있는 것을 알 수 있는데, 접촉법과 수침법으로 측정된 포아송비가 그 값이 작을 때에는 두 값이 거의 일치하지만, 포아송비가 커질수록 접촉법으로 측정된 값과 수침법으로 측정된 포아송비의 값의 차이가 커지게 된다. 그리고 그 차이는 수침법으로

구한 값이 접촉법으로 구한 값보다 점점 커지면서 발생한다. 이러한 경향은 포아송비가 작을 때 대체적으로 물질의 초음파 속도가 빠르다는 점에서 Table 1에서의 결과와 같은 맥락을 보인다[2]. 그리고 이미 수침법이 효과적이라고 언급했던 세라믹과 같은 제조 과정상 균질하지 않은 물질은 포아송비가 위치에 따라 달라지기 때문에 포아송비의 스캔이 유용하게 쓰일 수 있다.

### 4. 결론

고체 물질의 여러 가지 탄성률과 포아송비를 구하기 위해 기존의 접촉법을 사용하는 대신, 수침법의 방법을 사용해 횡파와 종파의 속도를 구하였다. 이 방법을 통해 고체 접촉매질을 사용하는 번거로움이 없이 고체의 종파 속도와 횡파 속도를 구할 수 있었다. 이 방법은 비 접촉 방식으로 빠르게 종파와 횡파 속도 모두를 측정할 수 있기 때문에, 스캐닝을 통해 넓은 면적의 시험편에서 위치에 따른 속도 분포와 포아송비를 측정할 수 있다. 그렇지만 납이나 아연합금과 같이 감쇠가 큰 일부 시험편에서는 모드변환이 일어난 횡파의 성분이 너무 작아서 이 방법으로 횡파의 속도를 구할 수 없는 경우도 있었다.

실제 상황에서 스캔을 통해 종파와 횡파의 속도를 측정하려고 할 때 각 부분마다 시험편의 두께가 다르면 속도의 절대적인 값을 계산할 수 없는데, 이 경우 유일하게 알 수 있는 종파와 횡파 속도의 비를 이용하면 물질의 특성 중 하나인 포아송비를 구할 수 있다. 그리고 실험 결과에 따르면 음속이 빠르거나 포아송비가 작은 물질에 있어 이 방법이 보다 유용하다는 점을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] 김정표, 석창성, 송성진, 김영환, "선형 및 비선형 초음파를 이용한 1Cr-1Mo-0.25V의 열화평가에 관한 연구", 비파괴검사학회지, 제 21권 제 5호, pp. 549-555, (2001)
- [2] Don J. Roth, James D. Kiser, Suzanne M. Swickard, Steven A. Szatmary and David P. Kerwin. "Quantitative mapping of pore fraction variations in silicon nitride using an ultrasonic contact scan technique," NASA TP-3377, NASA, Cleveland, Ohio, U.S.A. (1993)
- [3] A. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj and K. K. Ray, "Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials," Acta Materialia, Vol. 51, pp. 2417-2426, (2003)
- [4] Y. H. Kim, J. K. Lee and H. C. Kim, "Transverse-wave modes in the pulse-echo signal of a normal-beam longitudinal-wave mode transducer," J. Korean Phys. Soc., Vol. 42, pp. 111-117, (2003)
- [5] G. W. C. Kaye and T. H. Laby, "Tables of physical and chemical constants," Online version, [http://www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_4/2\\_4\\_1.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_4/2_4_1.html)
- [6] H. F. Pollard, "Sound waves in solids," p. 15 and pp. 25-26, Pion Limited, London, (1977)