

두개의 탐촉자를 사용한 등방성 균일 고체의 초음파 속도 및 두께 동시 측정법

Simultaneous Measurement of Ultrasonic Velocity and Thickness of Isotropic and Homogeneous Solids Using Two Transducers

이정기*, 권진오*, 김영환*

Jeong-Ki Lee*, Jino Kwon* and Young H. Kim*

초 록 시험체의 두께나 초음파 속도를 측정하기 위해서 초음파 펄스-에코법이 널리 사용되고 있다. 초음파 속도를 결정하기 위해서는 초음파 송수신 장치를 포함한 오실로스코프와 같은 초음파 측정 장치를 사용하여 시험편에서의 초음파 진행 시간을 측정하고, 초음파 진행 거리에 해당하는 시험편의 두께를 버니어 캘리퍼스 또는 마이크로미터와 같은 길이 측정 도구를 사용하여 측정한다. 그리고 초음파를 이용하여 시험편의 두께를 측정할 때에는 초음파 속도를 알고 있는 대비 시험편으로 기준을 설정하여야 한다. 본 연구에서는, 대비 시험편 없이 재료의 두께와 초음파 속도를 동시에 구하는 방법을 제시하였다. 재질과 두께를 달리한 여러 시험편에서 측정된 초음파 속도와 두께가 기존의 방법에 의해 측정된 값과 잘 일치하였다.

주요용어 : 초음파 속도 측정, 두께 측정, pitch-catch 법

Abstract Ultrasonic pulse-echo methods measuring the transit time through specimens have been widely used in determination of ultrasonic velocity and thickness of specimens. Usually, to determine the velocity of the ultrasonic, the transit time of the ultrasonic pulse through specimen is measured by using the ultrasonic measuring equipment such as the oscilloscope including ultrasonic pulser/receiver and the thickness of the specimen is measured by using the length measuring instrument such as micrometer or vernier calipers etc., i.e. each parameter is measured by using each measuring method. In the case of the measuring the thickness of a specimen by using the ultrasonics, the ultrasonic equipments, which measure the thickness, such as the ultrasonic thickness gauge must be calibrated by using the reference block of which the ultrasonic velocity is known beforehand. In the present work, we proposed a new method for simultaneous measurement of ultrasonic velocity and thickness without reference blocks. Experimental results for several specimens show that proposed method have good agreements with those by traditional ultrasonic method.

Keywords : ultrasonic velocity measurement, thickness measurement, pitch-catch method

1. 머리말

압력용기, 배관 및 저장탱크는 산업 시설물을 구성하는 핵심요소이므로 이러한 시설물의 건전성 평가는 건

체 시스템의 안전성 확보의 측면에서 매우 중요하다. 압력용기나 배관과 같이 압력을 받는 시설물들은 가동 압력을 고려하여 그에 맞는 두께로 설계 제작되나, 사용 시간이 증가함에 따라 부식, 침식 등에 의해 두께가

점차 줄어들어 구조물이 견딜 수 있는 압력이 점차 줄어든다. 따라서, 사용중인 압력용기 및 배관과 같은 시설물의 안전진단을 위해서 두께측정이 하나의 방법으로 사용된다.

국내의 화학 공장과 같은 여러 산업 설비들이 노후화됨에 따라서 안전성 확보와 지속적인 사용 여부를 결정하기 위해서 구조물의 두께 변화를 측정하는 것은 재질 평가와 아울러 매우 중요한 일로 자리잡아 가고 있다. 부식 및 침식에 의한 두께 감소를 측정하기 위해서는 방사선법[1, 2], 와전류법, 초음파법들이 사용된다. 방사선법은 단열재가 있는 상태에서 넓은 영역을 한번에 검사할 수 있다는 장점이 있지만 두께 변화에 대한 분해능이 낮은 단점이 있으며, 와전류법은 두께가 비교적 얇은 도체에 대해서만 적용이 가능하다. 반면에 초음파법은 두께의 제한이 없고 분해능도 높아서 초음파 두께 측정기와 같은 간단한 장치가 개발되었으며, 그 적용 범위도 점차 늘어나고 있다. 가장 널리 사용되는 초음파 두께 측정법은 초음파 펄스-에코법을 이용한 것으로 각 나라들이 공통적으로 규격화하고 있다[3-5].

초음파 펄스-에코법에 의한 두께 측정 방법은 시험체 표면에 부착된 탐촉자로부터 초음파가 시험체의 저면에서 반사되어 되돌아오는 시간, T 를 측정하여 두께, d 를

$$d = \frac{vT}{2} \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 결정한다. 따라서, 이 방법으로 두께를 측정하기 위해서는 재료의 초음파 속도 v 를 알아야 한다. 그러나, 배관이나 압력용기의 경우와 같이 재료의 두께를 직접 측정할 수 없기 때문에 현재는 비슷한 재질로 제작된 대비 시험편에서 측정된 초음파 속도를 적용하여 두께를 결정하고 있다.

이와 같은 경우에 실제의 구조물의 재질이 대비 시험편과 동일해야 하나, 합금의 경우에 조성 성분이 조금씩 달라질 수 있으며, 동일한 철강 재료에서도 미세 조직이 다를 수가 있다. 합금에 있어서의 조성 성분이나 미세 조직이 다른 경우에는 초음파의 속도도 달라져 약 10% 이상 차이가 나는 경우도 있다. 일례로 주조강의 경우에는 3,500m/s부터 5,800m/s까지 차이가 난다 [6]. 또한, 시험체의 온도도 초음파의 속도를 변화시키는 요인중의 하나이다[7]. 따라서, 정확한 초음파 속도를 구하기 위해서는 검사 시설물에서 직접 채취한 재료로 대비 시험편을 사용해야 하나, 이것은 시설물 일부를 파손시키는 결과를 가져오기 때문에 현실적으로

불가능하다. 특히 고온 고압하에서 운전 사용되는 설비 구조물들은 creep과 피로로 인하여 재질이 열화되어 초음파의 속도가 낮아진다[8]. 따라서 열화된 시설물에서 두께측정을 하는 경우에 속도를 보정하지 않으면 열화된 재료에서의 경과시간 T 가 커지게 되어 식 (1)에 의해 두께를 평가하면 두꺼운 것으로 평가된다. 따라서, 실제로 두께가 얇아지더라도 두께가 감소하지 않았거나 심지어는 두께가 증가하는 것으로 평가되는 경우도 발생한다.

재료내에서의 초음파 속도를 측정하는 방법은 이미 오래 전부터 이루어져왔으며[9], 초음파 속도 측정으로부터 재질을 평가하려는 노력도 계속되고 있다[10]. 이 중에서 펄스-에코법은 여러 나라에서 규격화되어 있다 [11-13]. 그러나 펄스-에코법은 시험편의 두께를 알고 경과시간을 측정하여 속도를 결정하기 때문에 압력용기나 배관의 경우에 펄스-에코법으로 경과시간을 쉽게 측정할 수 있지만 직접적으로 두께를 측정하는 방법이 없다. 수침 투과법을 이용하여 두께 및 속도 동시 측정법이 제시되었지만[14] 한정된 크기의 시료에만 적용할 수는 방법으로 현장에서 직접 사용하기는 곤란하다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 대비 시험편없이 재료의 두께와 초음파 속도를 동시에 구하는 방법을 제시하였다. 본 방법에 의해서 두께를 달린 탄소강, 알루미늄, 황동, 아크릴 시험편에서 측정된 초음파 속도와 두께가 기존의 방법에 의해 측정된 값과 2%의 오차 범위내에서 잘 일치하였다.

2. 두께 및 속도 동시측정법의 원리

초음파를 이용하여 재료의 두께를 측정하기 위해서는 대상체의 초음파 속도를 정확히 알 필요가 있다. 초음파 속도를 모르는 재료의 초음파 속도와 두께를 동시에 측정하려면 둘 이상의 관계식이 필요하다. Fig 1과 같이 두께가 일정한 등방성 균일 재료에서 초음파 pitch-catch 시험을 고려하자. 송수신 탐촉자의 거리를 L_1 과 L_2 로 변하는 두 경우를 가정한다. 각각의 경우에 대하여 초음파 빔이 시험체의 저면에서 반사하여 되돌아오는 빔 경로를 각각 S_1 과 S_2 라고 하면

$$S_i = \sqrt{L_i^2 + 4d^2} \quad (i = 1, 2) \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 주어진다. 여기서 d 는 시험체의 두께이다. 각각의 빔 경로에 대하여 초음파의 전파시간을 T_1 과 T_2 라

고 하면

$$S_i = \nu T_i \quad (i = 1, 2) \dots\dots\dots (3)$$

와 같이 주어진다. 여기서, ν 는 재료에서의 초음파 속도이다. 식 (2)와 (3)을 연립하여 풀면 재료의 두께, d 와 초음파 속도 ν 는

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_2^2 T_1^2 - L_1^2 T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_2^2 - L_1^2}{T_2^2 - T_1^2}} \dots\dots\dots (5)$$

로 주어진다. 따라서, 미지의 시험체에서 초음파의 속도와 두께를 대비 시험편 없이 동시에 측정이 가능하다.

3. 시험장치

식 (4)와 (5)로부터 초음파의 속도와 두께를 동시에

측정할 수 있는데, 이와 같은 원리를 검증하기 위해서 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 이 장치는 크게 초음파 시험부분, 탐촉자 이송장치부분 및 결과 분석용 PC로 구분할 수 있다. 초음파 시험부분은 실험실에서 널리 사용되는 초음파 pulser/receiver와 디지털 오실로스코프로 구성되어 있다. 탐촉자 이송부분의 사진을 Fig. 3에 나타내었는데, 이는 수동으로 탐촉자의 위치를 변화하도록 하면서 encoder를 이용하여 탐촉자 사이의 거리를 측정하도록 하였다. 중심주파수 5MHz인 선접촉 초음파 탐촉자 두 개를 자체 제작하여 pitch-catch법으로 초음파를 송수신할 수 있도록 배열하고 encoder가 부착된 탐촉자 이송장치를 이용하여 탐촉자 사이의 간격을 바꾸면서 초음파 시험을 수행한다. 이때 encoder 출력을 이용한 위치 지시계로부터 두 초음파 탐촉자 사이의 거리 L_i 를 읽고 디지털 오실로스코프의 초음파 RF 파형으로부터 경과시간 T_i 를 읽어서 이 데이터를 PC에 입력하여 두께와 속도를 동시에 계산한다. 이론적으로는 두 지점에서의 탐촉자 사

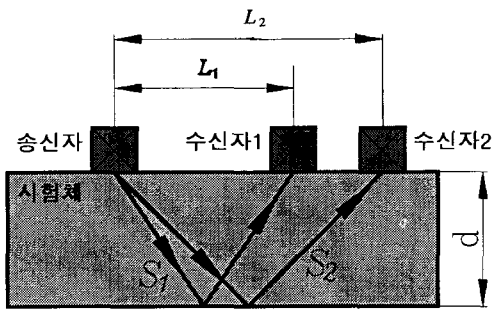


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic pitch-catch test

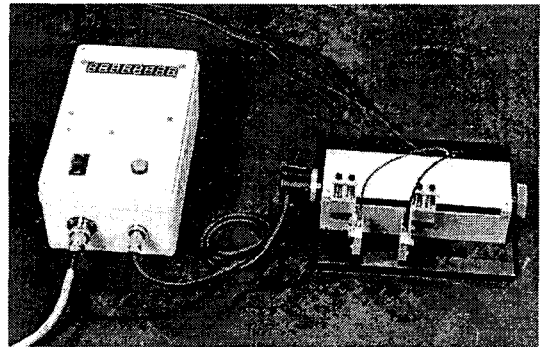


Fig. 3 Photograph of translator for ultrasonic transducers

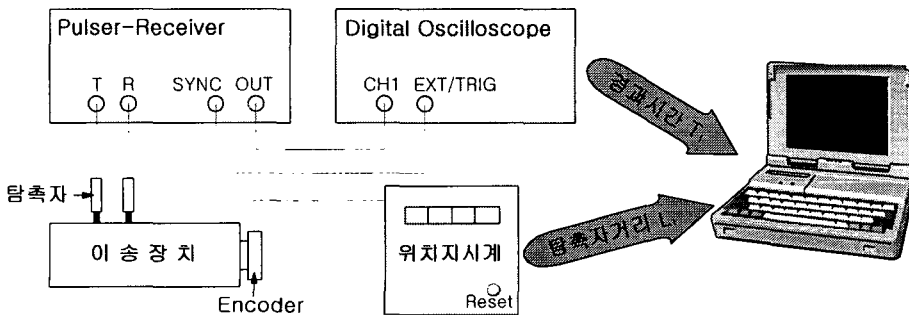


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

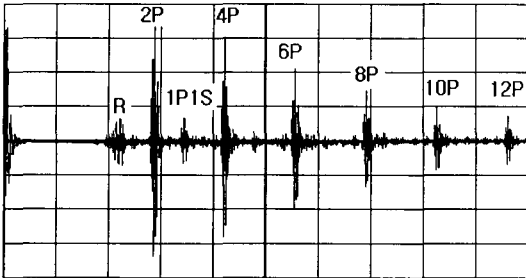


Fig. 4 Ultrasonic RF waveform obtained at $L_i=10\text{mm}$. Horizontal: $5\mu\text{s}/\text{div}$.

이의 거리와 경과시간을 측정하면 속도와 두께를 결정할 수 있으나, 여러 점에서 측정하여 최소 제곱법을 이용하면 그 오차를 줄일 수 있다.

4. 결과 및 토의

Fig. 4는 두께가 20mm인 강판에서 두 탐촉자 사이의 거리가 10mm일 경우에 수신된 초음파 RF 파형을 나타낸 것이다. 수평축은 시간축으로 한 눈금당 $5\mu\text{s}$ 이

고, 수직축은 신호의 진폭을 나타낸다. 재료의 초음파 속도 및 두께를 측정하는데 있어서 어떤 신호의 도달 시간만이 의미가 있으므로 시간축에 대한 정보만을 기록하였다.

$11\mu\text{s}$ 근처의 신호 R은 두 탐촉자가 접촉하고 있는 표면을 따라 진행한 표면파이고, 그 다음에 도달한 $14\mu\text{s}$ 근처의 2P 신호는 송신 탐촉자에서 발생한 종파가 저면에서 반사되어 모드 변환없이 종파로 수신탐촉자에 도달된 신호이다. 그 외에 1P1S 신호는 송신 탐촉자에서 발생한 종파(또는 횡파)가 저면에서 반사되면서 모드 변환에 의해 횡파로 바뀌어 수신 탐촉자에 도달한 신호이고, 4P, 6P 등은 종파의 다중 반사에 의해 형성되어 수신된 신호들이다.

송신 및 수신 탐촉자 사이의 거리 L_i 를 10, 15, 21, 28mm로 바꾸었을 때, 수신된 신호를 Fig. 5에 나타내었다. L_i 가 증가함에 따라서 표면파 R의 전파 시간은 종파 모드의 반사 신호인 2P의 전파 시간에 비하여 빠르게 증가하여 $L_i = 21\text{mm}$ 일 때 표면파 R과 종파의 저면 반사파 2P가 겹쳐진다. 탐촉자 사이의 거리가 재료의 두께보다 큰 경우인 $L_i = 28\text{mm}$ 일 때 2P 신호는

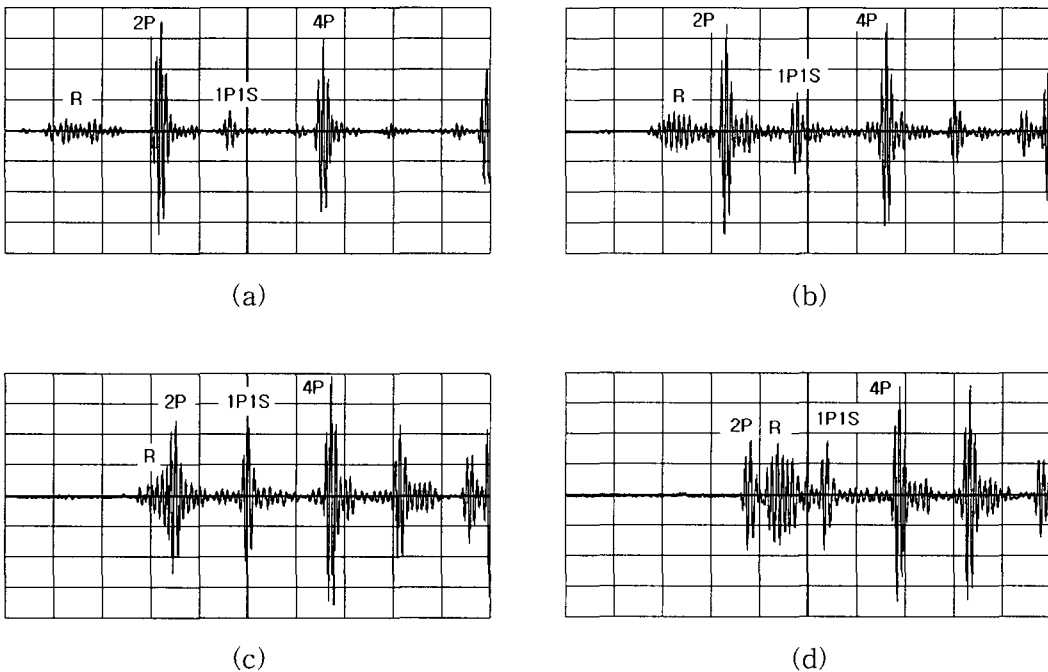


Fig. 5 Ultrasonic RF waveform obtained at various L_i . horizontal: $2\mu\text{s}/\text{div}$. with $8\mu\text{s}$ delay. $L_i=$ (a) 10mm, (b) 15mm, (c) 21mm, and (d) 28 mm.

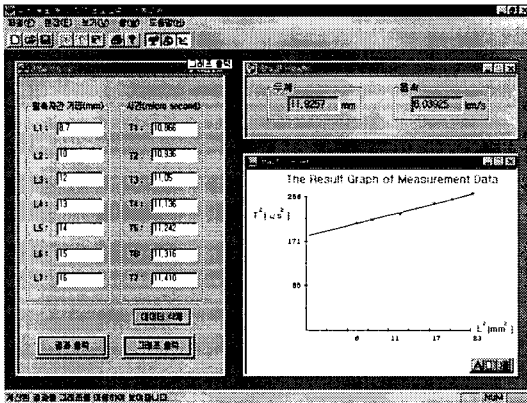


Fig. 6 Screen output for the program to calculate thickness and ultrasonic velocity using measured L_i and T_i

표면과 보다 먼저 도착한다. 그리고, Fig 5에 나타낸 바와 같이 L_i 가 비교적 크게 변화되어도 수신되는 2P 신호의 도달 시간 변화는 표면과 R의 도달 시간 변화에 비해 심하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 금속 재료의 경우 종파의 속도가 표면파의 속도의 약 2배 정도 빠르기 때문이다.

두 점 이상의 여러 점에서 측정된 값을 최소제곱법에 적용하여 d 와 v 를 결정하는 것이 오차를 줄일 수 있으므로, 본 연구에서는 7 지점에서 L_i 와 T_i 를 측정하여 최소 제곱법으로 시험체의 초음파 속도와 두께를 결정하였다(Fig. 6). 이 방법을 검증하기 위해서 두께와 초음파 속도가 다른 재료들을 준비하여 그들에 대하여 본 방법을 이용하여 결정한 재료의 두께 및 초음파 속도와, 버어니어캘리퍼스로 측정 한 재료의 두께와 5 MHz의 중심주파수를 갖는 초음파 탐촉자를 사용하여 펄스-에코법으로 측정 한 재료의 초음파 속도를 Table 1에 나타내었다. 그 결과로 기존의 방법과 본 연구에서

제시된 방법 사이의 오차가 2% 정도였으며, 특히 감쇠나 분산이 큰 재료로 알려진 아크릴 판에 대해서도 2% 정도의 오차 범위에서 측정이 가능하였다.

앞으로 탐촉자 이송장치 및 데이터 획득부를 자동화 하면 측정 속도를 빠르게 할 수 있으며, 아울러 측정 지점의 수를 더 증가시켜서 측정 오차를 줄일 수 있다. 이 방법을 실제의 구조물 전체에 적용한다면 현재의 초음파 두께측정기를 사용할 때보다 검사 시간이 길어질 것이다. 그러나 노후화된 구조물들은 여러 가지 요인에 의해 초음파 속도가 대비시험편과 달라질 수 있으므로, 표본 영역을 설정하여 그 영역에 이 방법을 적용하여 초음파 속도를 결정하고, 이 결과를 초음파 두께 측정기에 입력하여 사용하면 전 영역의 현재의 검사 시간으로 검사를 할 수가 있다. 즉, 이 방법은 시험 대상체에서 속도를 결정하기 때문에 같은 재질의 대비시험편이 없거나 또는 열화에 의해 초음파 속도가 변화되어도 적용할 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 대비 시험편 없이 두 개의 선 접촉 탐촉자를 사용하여 등방성 고체 재료의 초음파 속도와 두께를 동시에 측정하는 방법을 제안하였다. 두 탐촉자의 거리를 변화시키면서 종파모드의 저면 반사파인 2P 신호의 전파시간을 측정함으로써, 미지의 재료에 대하여 대비시험편 없이도 초음파 속도와 두께를 동시에 측정할 수 있었다. 따라서, 본 방법을 이용하여 재료의 초음파 속도와 두께를 동시에 측정함으로써 재질 열화 및 부식여부를 동시에 평가하는 것이 가능하다.

참고문헌

(1) 이성식, 김영환, "Tangential radiography를

Table 1 Measured thicknesses and ultrasonic velocities by traditional and proposed methods

재 질	기존의 방법		본 시험법		에러율(%)	
	두께(mm)	음속(m/s)	두께(mm)	음속(m/s)	두께	음속
탄 소 강	20.0	5,910	20.01	5,982	0.10	1.22
탄 소 강	12.0	5,955	11.93	6,039	0.58	1.41
알루미늄	20.0	6,376	20.21	6,526	1.05	2.35
황 동	20.0	4,440	20.39	4,562	1.95	2.75
아 크 릿	14.2	2,696	14.53	2,752	2.32	2.08

- 이용한 배관의 두께 평가법," 비파괴검사학회지, 제18권 3호, pp. 205-210, (1998)
- [2] 이성식, 이정기, 김영환, "Radiography를 이용한 두께 측정에 관한 연구," 1998 한국비파괴검사학회 추계학술발표회, 서울, (1998)
- [3] ASTM E797-90, "Standard practice for measuring thickness by manual ultrasonic pulse-echo contact method," (1990)
- [4] JIS Z 2355, "Methods for measurement of thickness by ultrasonic pulse echo technique", (1994)
- [5] KS B 0536: 1995, "초음파 펄스 반사법에 의한 두께 측정법", (1995)
- [6] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, "Ultrasonic testing of materials," 4th ed., pp.561, Springer-Verlag, Berlin, (1990)
- [7] 이성식, 김영환, "고온에서의 초음파 펄스-에코법에 의한 두께 측정시 오차 발생요인과 보정방법," 대한검사, 1988년 6-8월호 (통권 41호), pp. 14-19, (1998)
- [8] T. Gomez Alvarez-Arenas, E. Riera-Franco de Sarabia and J. A. Gallego-Ju rez, "Ultrasonic evaluation of creep damage in steel," Ultrasonics, Vol. 31, No.3, pp. 155-159, (1993)
- [9] E. P. Papadakis, "Ultrasonic velocity and attenuation: measurement methods with scientific and industrial applications," in Physical Acoustics Vol. 12, eds W. P. Mason and R. N. Thurston, Academic Press, London, (1976)
- [10] M. G. Silk, "Relationships between metallurgical texture and ultrasonic propagation," Metal Science, Vo. 15, pp. 559-565, (1981)
- [11] ASTM E494-89, "Standard practice of measuring ultrasonic velocity in materials", (1989)
- [12] JIS Z 2353, "Methods for measurement on ultrasonic velocity of solid by pulse technique using reference test pieces", (1991)
- [13] KS B 0533: 1995, "초음파 펄스법에 의한 고체 음속의 측정방법 (대비시험편을 사용하는 방법)", (1995)
- [14] D. K. Hsu and M. S. Hughes, "Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 92, No.2, pp. 669-675, (1992)