

# 초음파의 에너지속도와 위상속도의 주행시간 동시성과 이방성 재료의 탄성계수 결정

정 현 조\*

Equivalence of the times of flight by ultrasonic energy and phase velocities and determination of the elastic constants of anisotropic materials

Hyun-Jo, Jeong\*

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to provide the experimenters who use the oblique incidence ultrasonic method for anisotropic elastic constants measurement with some useful relations. In particular, the equivalence of the times of flight by the energy and phase velocities, which is key to the oblique incidence method, is proved explicitly. This equivalence greatly simplifies the analysis of immersion measurement results. In order to correctly measure the transit time of an immersed sample using the oblique incidence, the receiving transducer should be shifted laterally, and an expression is given for this shift. A method for determining all nine elastic constants of an orthotropic material is briefly described and the measurement results are listed for SiC particulate reinforced Al matrix composites.

**Key Words :** Anisotropic materials(이방성 재료), elastic constants(탄성계수), energy velocity(에너지속도), phase velocity(위상속도), oblique incidence(경사면입사), equivalence of time-of-flight(주행시간 동시성), particulate reinforced MMC(입자보강 금속복합재료)

## 1. 서 론

초음파의 속도를 이용하여 이방성 재료의 탄성계수를 평가하는 비파괴 시험기법이 널리 사용되고 있다. 재료 내부의 주어진 전파방향에 대하여 평면파의 위상속도는 재료의 밀도와 하나 또는 그 이상의 강성 매트릭스 성분  $C_{ij}$ 와 관계되므로<sup>(1)</sup>, 필요한 방향으로 일련의 위상속도를 측정하면 이방성 재료의 탄성계수를 모두 구할 수

있다. 직교이방성 재료의 경우, 탄성파의 전달 이론에 의하여 대각선 성분  $C_{ii}$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ )는 대칭방향(symmetry direction)으로 전파하는 순수 종파 및 횡파속도로부터 구할 수 있고, 비대각선 성분  $C_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3, i \neq j$ )는 대칭방향으로부터 임의의 각도로 전파하는 준종파(quasi-longitudinal or QL Wave) 또는 준횡파(quasi-transverse or QT Wave)의 속도로부터 구할 수 있다.

\* 국방과학연구소

등방성 재료에서 평면파의 에너지속도 벡터와 파 벡터(wave vector)의 방향은 같다. 그러나 이방성 재료의 경우, 재료의 대칭방향 전파를 제외하고 이 두 벡터의 방향은 일반적으로 같지 않다. Markham<sup>(2)</sup>에 의한 경사면 입사/수직법은 비대칭 방향의 종파 및 횡파속도를 측정하는데 자주 이용되어 왔다. 평면파가 이방성 재료의 비대칭 방향을 전파할 때 에너지속도로서 파 벡터와 이탈각(deviation angle)을 이루며 전파하므로 강성매트릭스 성분을 계산하는데 필요한 위상속도를 측정하는데 어려움이 있다. 따라서, 실제 실험에서는 이탈각을 고려하지 않고 위상속도를 측정하거나<sup>(2, 3)</sup>, 에너지 속도를 직접 측정한 다음 위상속도로 변환시켰다<sup>(4)</sup>. 이러한 방법들은 재료의 이방성이 큰 경우 위상속도 값에 오차를 유발하거나, 속도변환으로부터 강성 성분을 구하는 과정이 복잡한 단점을 지니고 있다.

본 논문에서는 수직, 경사면 입사 시험에서 평면파가 직교이방성 재료의 대칭면내에서 전파하는 경우를 생각하였다. 위상속도와 에너지속도 사이의 관계식 및 스넬 법칙(Snell's law)을 사용하여 에너지속도에 의한 주행 시간과 위상속도에 의한 주행시간이 같다는 것을 증명하였다. 이 "주행시간 동시성"은 수직, 경사면 입사 시험의 해석과정을 아주 간단하고 쉽게 해준다. 또한 주행 시간 동시성으로부터 강성매트릭스 성분을 구하는데 필요한 위상속도를 에너지속도에 의한 주행시간으로부터 유도하였다. 그리고 직교이방성 재료의 9개의 독립 강성매트릭스 성분을 구하는 시험 절차를 간단하게 소개하고 실리콘 카바이드(SiC) 입자 보강 알루미늄(Al) 금속 복합재료의 탄성계수 측정 결과를 수록하였다.

## 2. 위상속도와 에너지속도의 주행시간 동시성

Fig. 1과 같은 수직, 경사면 입사시험을 생각해 보자. 직육면체의 시편이 물속에 잠겨 있으며, 투과시험을 위하여 송신 탐촉자(T)와 수신 탐촉자(R)가 시편의 양편에 위치하고 있다. 시편은 비감쇠라고 가정하며, 따라서 분산의 영향을 무시할 수 있다. 또한 시편은 직교이방성으로 가정하며, 3개의 대칭축은  $x_1$ ,  $x_2$  및  $x_3$ 로 표시한다.  $x_1$ 축에 대하여 종파가 입사각  $\theta_i$ 로 입사할 경우 물/시편의 경계면에서 모드변환(mode conversion)이 일어나게 된다. 이 경우 굴절파는 대칭면내에서만 전파하므로 하나의 QL파와 하나의 QT파가 발생하

게 된다. 이중 빠른 것이 QL파이고 느린 것은 QT파이다. 이 두파는 입자의 변위 방향이 모두 전파면 ( $x_1$ - $x_2$ )내에 있게 된다. 이 두파의 위상속도는 다음의 스넬 법칙을 만족하며

$$\frac{V_w}{\sin \theta_i} = \frac{V}{\sin \theta_r} \quad (1)$$

$\theta_r$ 은 굴절각이다.  $V$ 와  $\theta_r$ 은 QL 또는 QT파의 위상속도와 굴절각이다. 굴절파는 실제로 에너지 속도로서 에너지 플럭스(energy flux) 벡터방향으로 전파하게 된다. 에너지속도 벡터를 에너지 플럭스 벡터 변화율에 대한 총 에너지 밀도로 정의하면, 에너지속도 벡터  $V_e$ 와 위상속도 벡터(또는 파 벡터)  $n$  사이에 다음의 관계식이 존재한다<sup>(5)</sup>.

$$V_e \cdot n = V \quad (2)$$

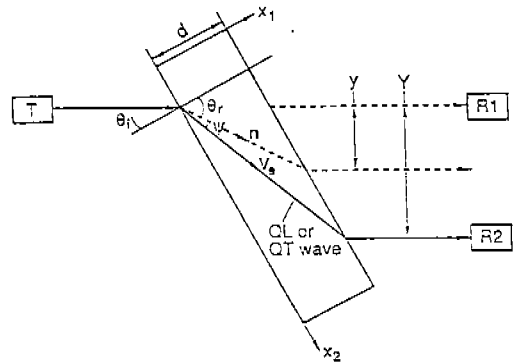


Fig. 1 Schematic illustration of the deviation of the energy velocity vector of refracted QL or QT wave from the wave vector. (For reason of clarity, only one refracted wave is shown.) The receiver position R1 is the position for measuring the time of flight without the sample and for measuring the transit time with the sample at the normal incidence. The receiver should be shifted to the position R2 in order to measure the time of flight with the sample at oblique incidence. Y is the amount of lateral shift required for an anisotropic solid.

또는

$$V_e \cos \psi = V \tag{3}$$

여기서  $\psi$ 는  $V_e$ 와  $n$  사이의 각이다. 따라서 에너지속도의 위상속도 방향성분은 평면파의 위상속도가 된다. 시편/물의 경계면에서 다시 반사와 굴절이 발생하며, 파의 정확한 위치는 에너지 벡터방향에 의해 결정된다. 이 위치에서 굴절되는 종파는 입사파와 평행하게 수신탐촉자로 전달된다.

이제  $V_e$ 방향 및 이에 수반되는 물에서의 실제 주행시간은  $n$ 방향 및 이에 수반되는 물에서의 가상의 주행시간과 동일하다는 것을 증명하고자 한다. 시편내에서의 에너지 속도에 의한 실제 주행거리는 위상속도에 의한 가상의 주행거리보다 길거나 짧을 수 있는데 이는 입사각과 시편의 이방성 정도에 달려 있다. Fig. 2에서와 같이 에너지속도의 주행거리가 더 긴 경우만을 여기서는 고려한다. 해석을 간단하게 하기 위하여 QL과 QT과 중 하나의 파에 의한 거리만을 생각한다. 주행시간은 주행거리를 해당 속도로 나누면 되므로, AC를 따라 주행하는 에너지속도의 시간은 다음과 같이 표시할 수 있으며

$$t_{AC}^e = \frac{AC}{V_e} \tag{4}$$

$$= \frac{AC \cos \psi}{V} \tag{5}$$

$$= \frac{AB}{V} + \frac{BE}{V} \tag{6}$$

여기서 식 (3)의 관계식이 사용되었다. AB와 BD를 따라 주행하는 위상속도에 의한 시간은 다음과 같다.

$$t_{ABD}^p = \frac{AB}{V} + \frac{BD}{V_w} \tag{7}$$

식 (6)과 식 (7)을 비교해 보면,  $BD/V_w$ 와  $BE/V$ 가 같다는 것을 증명할 필요가 있다. 스넬법칙과 시험편의 형상으로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\frac{BD}{V_w} = \frac{BD \sin \theta_r}{V \sin \theta_i} \tag{8}$$

$$= \frac{BC \sin \theta_r}{V} \tag{9}$$

$$= \frac{BE}{V} \tag{10}$$

따라서 에너지속도 벡터 방향의 주행시간은 위상속도 벡터 방향의 주행시간과 동일하다. 에너지속도의 주행거리가 더 짧은 경우에도 같은 방법으로 주행시간 동시성을 증명할 수 있다. 더우기, 송신 탐촉자로부터 수신 탐촉자까지의 총 주행시간도 동일한데, 이는 나머지 물에서의 거리와 속도가 같기 때문이다. 직교이방성 재료의 다른 두 대칭면에서도 마찬가지로 방법으로 주행시간 동시성을 증명할 수 있다. 본 논문에서는 재료의 대칭면내에서 전파하는 파에 대해서만 고려하였으나, 일반적인 비대칭면내에서의 전파에 대하여 마찬가지로 주행시간 동시성을 증명할 수 있다<sup>(6)</sup>.

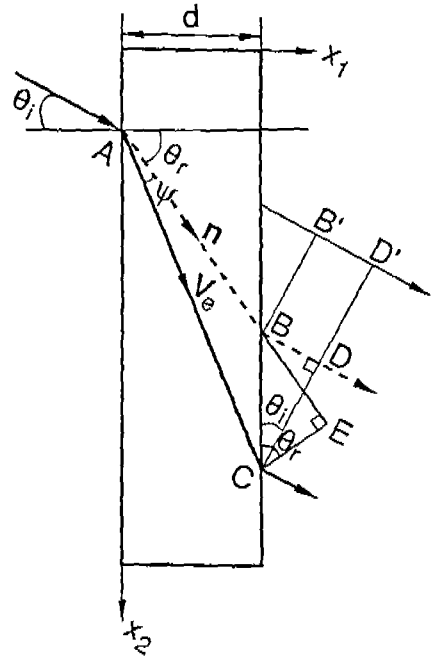


Fig. 2 Schematic diagram showing the time of flight along the energy vector path and its accompanying water path is equivalent to the time of flight along the phase velocity path and its accompanying water path.

### 3. 위상속도의 계산

Fig. 2로부터, 시편이 없는 경우와 있는 경우의 주행 시간 차이,  $\Delta t$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있으며

$$\Delta t = \frac{AD'}{V_w} - \frac{AC}{V_s} \quad (11)$$

$$= \frac{AB'}{V_w} - \frac{AB}{V} \quad (12)$$

$$= \frac{d}{\cos\theta_r} \left[ \frac{\cos(\theta_r - \theta_i)}{V_w} - \frac{1}{V} \right] \quad (13)$$

여기서  $d$ 는 시편의 두께이다.

식 (13)의  $V$ 를 스넬법칙으로부터  $V_w \sin\theta_r / \sin\theta_i$ 로 대체하고,  $\theta_r$ 에 대해 풀면 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{\sin\theta_i}{\cos\theta_i - \frac{\Delta t V_w}{d}} \quad (14)$$

위상속도 벡터  $n$ 의 성분들은 식 (14)로부터 구할 수 있다.

이제 스넬법칙과 식 (14)를 결합하여 위상속도를  $\Delta t$ 와 다른 측정가능한 양으로 표시하고자 한다.

$$V = V_w \frac{\sin\theta_r}{\sin\theta_i} \quad (15)$$

$$= V_w \tan\theta_r \frac{\cos\theta_r}{\sin\theta_i} \quad (16)$$

$$= V_w \frac{\tan\theta_r}{\sin\theta_i \sqrt{1 + \tan^2\theta_r}} \quad (17)$$

식 (14)를 식 (17)에 대입하면 다음의 위상속도 식을 얻을 수 있다.

$$V = \left[ \frac{1}{V_w^2} - 2 \frac{\Delta t}{V_w d} \cos\theta_i + \frac{\Delta t^2}{d^2} \right]^{-1/2} \quad (18)$$

에너지속도와 위상속도의 주행시간 동시성은 수직, 경사면 입사시험의 해석을 대단히 간단하게 해주고 있다. 파의 실제 주행거리는 에너지 벡터방향이지만, 굴절각과 위상속도의 계산을 위해서 단지 스넬법칙에 의한 위상속도 벡터의 거리만을 고려하면 된다.

그러나 실제 실험에서 시편이 없을 때와 시편이 있을

경우  $\theta_r=0$ 의 수직 입사 때 주행시간 측정을 위하여 수신 탐촉자는 "R1"의 위치에서 송신 탐촉자와 마주보아야 한다(Fig. 1 참조). 그러나, 시편이 있는 경우 경사면 입사 때는 수신 탐촉자를 "R2"로 이동시켜야 하며, 이동거리는 굴절각  $\theta_r$  및 에너지 이탈각  $\Psi$ 에 의해 결정된다. 이방성 재료의 경우 평방향 이동거리  $Y$ 는 다음과 같고

$$Y = AC \sin(\theta_r - \theta_i + \psi) \quad (19)$$

$$= \frac{d \sin(\theta_r - \theta_i + \psi)}{\cos(\theta_r + \psi)} \quad (20)$$

여기서  $\theta_r$ 은 식 (14)에 주어져 있으며,  $\Psi = \cos^{-1}(V/V_s)$ 이다. 일반적으로 이탈각  $\Psi$ 는 미지수이다. 최대 신호는 수신 탐촉자를  $Y$ 만큼 이동시킬 때 얻어지며, 시편이 있는 경우 주행시간은 수신 신호가 최대일 때 측정해야 된다. 등방성 재료의 경우 수평이동거리  $y$ 는 식 (20)에서  $\Psi=0$ 으로 두면 계산할 수 있다.

#### 3.1 수직입사와 비교

$\theta_i=0$ 의 수직입사인 경우 위상속도는 다음과 같다.

$$V = \left[ \frac{1}{V_w} - \frac{\Delta t}{d} \right]^{-1} \quad (21)$$

$$= \left[ \frac{1}{V_w^2} - 2 \frac{\Delta t}{V_w d} + \frac{\Delta t^2}{d^2} \right]^{-1/2} \quad (22)$$

경사면 입사시의 위상속도 식 (18)과 수직입사시의 식 (22)를 비교하면, 두 식에서의 차이는  $\cos\theta_i$ 이다.  $\theta_i=0$ 이면 식 (18)은 식 (22)가 된다.

### 4. 직교이방성 재료의 탄성계수 측정

본 절에서는 직교이방성 재료의 9개의 강성매트릭스 성분을 결정하는 절차를 소개한다. 재료가 제작된 방법에 따라, 3개의 대칭면 또는 대칭축을 아주 적은 오차로 선택할 수 있다. 보통 직육면체의 시편을 각 면이 재료의 대칭면과 평행하도록 준비한다. 시편의 크기는 경사면 입사시 굴절각 뿐만 아니라 에너지 이탈을 고려해서 결정하되, 시편/물의 경계면에서 나오는 파의 빛이 시편의 다른면에 의해서 방해받지 않도록 해야 된

다. 오실로스코프의 시간축에서 QL파와 QT파의 분리도 시편의 크기를 결정하는데 또한 고려할 사항이다.

직교이방성 재료의 탄성계수는 9개의 독립성분으로 표시된다. 이 성분들은 축소된 점자를 사용하여 아래와 같은 강성매트릭스로 간편하게 나타낼 수 있다.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (23)$$

4.1 대각선 성분  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ 의 측정

탄성파의 전달이론으로부터 이 성분들은 각각  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  방향으로 전파하는 종파의 속도로부터 결정할 수 있다. 예로서  $C_{11}$ 을 측정하기 위해서 수직법으로 종파펄스를  $x_1$ 축과 평행하게 수직 입사 시킨다. 이 경우 파의 단위 전달 벡터는  $(n_1, n_2, n_3) = (1, 0, 0)$ 이다. 시편이 없는 경우와 있는 경우의 주행시간 차이  $\Delta t$ 를 구하여, 위상속도  $V$ 를 식(21)로부터 계산한다. 그런 다음  $C_{11} = \rho V^2$ 으로부터 구할 수 있으며,  $\rho$ 는 시편의 밀도이다. 식(21)에서 종파의 물에서의 속도  $V_w$ 는 일반적으로 온도의 함수이며, 직접 측정하거나 핸드 북에 나와 있는 값을 사용할 수 있다. 같은 방법으로 시편의  $x_2$ ,  $x_3$  방향의 종파 위상속도를 각각 측정함으로써  $C_{22}$ 와  $C_{33}$ 를 구할 수 있다.

4.2 대각선 성분  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ ,  $C_{66}$ 의 측정

이 성분들은 원칙적으로 대칭축 방향으로 전파하는 횡파의 속도로부터 결정할 수 있다. 횡파는 물속에서 전파하지 않으므로, 수직입사를 사용할 경우 접촉법을 사용해야 된다. 예로서  $C_{66}$ 를 구하기 위해 횡파를 전파 방향  $x_1$ , 입자변위 벡터방향  $x_2$  또는 전파방향  $x_2$ , 입자변위 벡터방향  $x_1$ 이 되게하여 횡파의 속도를 측정한다. 두 개의 횡파 탐촉자로서 투과법을 사용할 경우, 횡파의 전달속도는 연속된 두 펄스사이의 주행시간 차이  $\Delta t$ 로부터  $V = 2d/\Delta t$ 가 되며  $C_{66} = \rho V^2$ 로 계산된다. 같은 방법으로  $C_{55}$ 는 전파방향  $x_1$ , 입자변위 벡터방향  $x_3$  또는 전파방향  $x_3$ , 입자변위 벡터방향  $x_1$ 으로부터,  $C_{44}$ 는 전파방향  $x_2$ , 입자변위 벡터방향  $x_3$  또는 전파방

향  $x_3$ , 입자변위 벡터방향  $x_2$ 로부터 구할 수 있다.

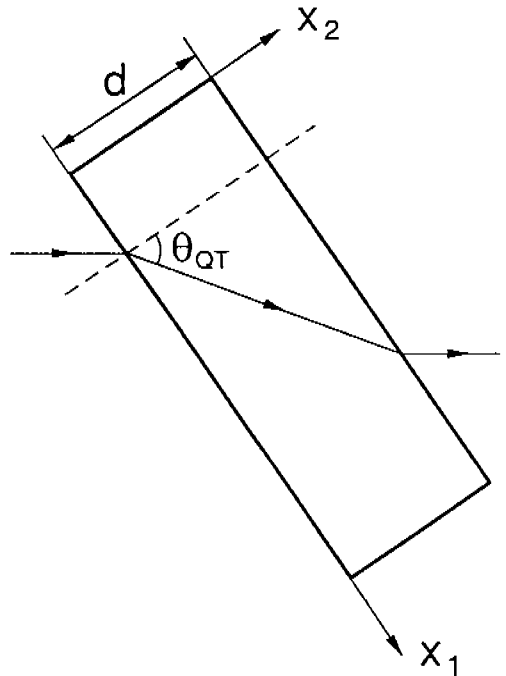
이 성분들은 또한 수직, 경사면 입사를 이용하여 비대각선 성분  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$ 와 함께 비선형 최소자승법으로 특성방정식을 풀면 구할 수 있다. 이 방법이 다음 절에 자세히 소개되어 있다.

4.3  $C_{12}$ ,  $C_{66}$ 의 측정

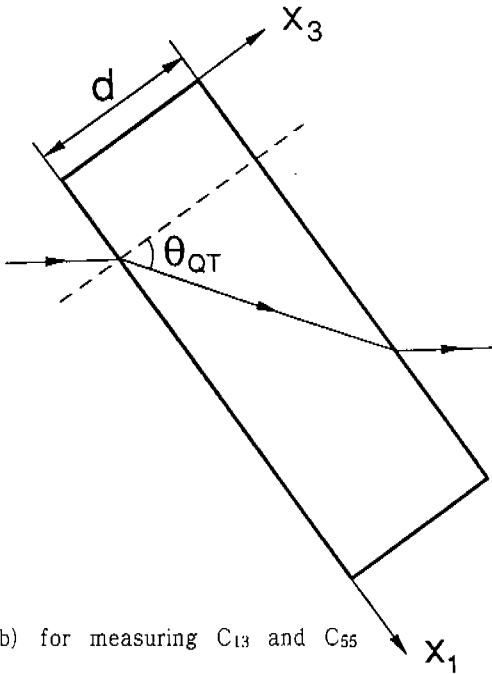
이제 Fig. 3(a)에서와 같이 시편의  $x_3$ 축이 수직으로 향하고  $x_1$ - $x_2$  평면내에서  $x_2$ 축과  $\theta_{QT}$ 의 각도를 이루면서 전파하는 파의 전달을 생각해 보자. 이 경우 하나의 QL파와 하나의 QT파가 모드변환에 의해 생기며, 이중 속도가 더 빠른 것이 QL파이고, 느린 것이 QT파이다. 여기서는 편의상 QT파만을 고려한다. 이 파의 단위 전달벡터 성분은  $(n_1, n_2, n_3) = (\sin\theta_{QT}, \cos\theta_{QT}, 0)$ 이고 다음의 Christoffel 식을 만족한다(1).

$$(n_1^2 C_{11} + n_2^2 C_{66} - \rho V^2)(n_1^2 C_{66} + n_2^2 C_{22} - \rho V^2) - n_1^2 n_2^2 (C_{12} + C_{66})^2 = 0 \quad (24)$$

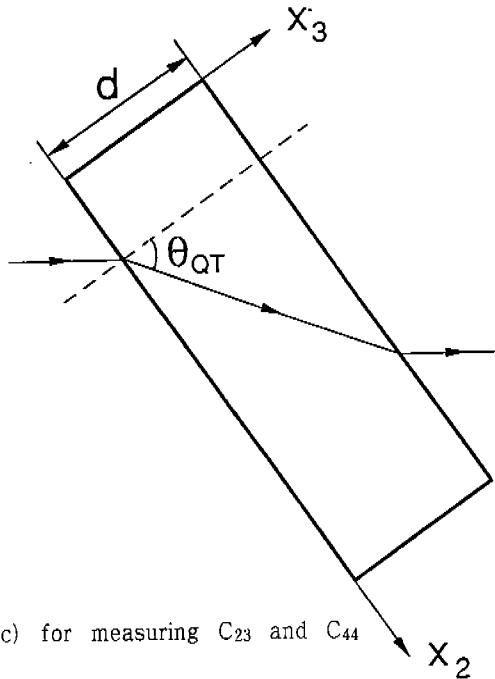
$C_{11}$ 과  $C_{22}$ 는 이미 결정되었으므로, 식(24)에는 두개의 미지수  $C_{66}$ 와  $C_{12}$ 가 있다. 따라서 두개의 다른  $(\theta_{QT}, V)$



(a) for measuring  $C_{12}$  and  $C_{66}$



(b) for measuring  $C_{13}$  and  $C_{55}$



(c) for measuring  $C_{23}$  and  $C_{44}$

Fig. 3 Sample orientation for measuring the off-diagonal stiffnesses together with the shear stiffnesses in the oblique incidence, immersion testing mode

를 알면 이들 미지수를 구할 수 있다. 그러나, 실험오차와 재료의 비균질성 때문에 두개의 서로 다른 입사각으로  $C_{66}$ 와  $C_{12}$ 에 대한 신뢰성 있는 값을 구하기 힘들다. 대신에 미지수의 숫자보다 많은 입사각을 사용하여 식(14)와 식(18)로부터 각각  $(\theta_{QT}, V)$ 를 구한 다음 식(24)로부터 비선형 최소자승법을 사용하여<sup>(7)</sup>  $C_{66}$ 와  $C_{12}$ 의 값을 구한다. 원칙적으로 QL 및 QT파를 모두 이용가능 하나, QT파의 굴절각이 QL파의 굴절각 보다 작아 일반적으로 QT파의 속도가 많이 사용되고 있다.

#### 4.4 $C_{13}, C_{55}$ 의 측정

$C_{13}$ 와  $C_{55}$ 를 구하기 위해서 Fig. 3(b)와 같이  $x_2$ 축이 수직으로 향하게 시편을 설치하면 굴절된 QT파는  $x_1$ - $x_3$ 면내에서 다음의 특성식을 만족하면서 전파한다.

$$(n_1^2 C_{11} + n_3^2 C_{55} - \rho V^2)(n_1^2 C_{55} + n_3^2 C_{33} - \rho V^2) - n_1^2 n_3^2 (C_{13} + C_{55})^2 = 0 \quad (25)$$

이 경우 단위 전달벡터는  $(n_1, n_2, n_3) = (\sin\theta_{QT}, 0, \cos\theta_{QT})$ 가 된다. 4.3절에서와 같은 방법으로  $C_{13}, C_{55}$ 를 구할 수가 있다.

#### 4.5 $C_{23}, C_{44}$ 의 측정

$C_{23}$ 와  $C_{44}$ 를 구하기 위해서 Fig. 3(c)에서와 같이  $x_1$ 축이 수직으로 향하게 시편을 설치하면 굴절파는  $x_2$ - $x_3$ 면내에서 다음의 특성식을 만족하면서 전파한다.

$$(n_2^2 C_{22} + n_3^2 C_{44} - \rho V^2)(n_2^2 C_{44} + n_3^2 C_{33} - \rho V^2) - n_2^2 n_3^2 (C_{23} + C_{44})^2 = 0 \quad (26)$$

이 경우 단위 전달벡터  $(n_1, n_2, n_3) = (0, \sin\theta_{QT}, \cos\theta_{QT})$ 이다. 이 경우에도 마찬가지로 4.3절의 방법을 사용하여  $C_{23}$ 와  $C_{44}$ 를 결정할 수 있다.

직교이방성 재료보다 더 높은 대칭성을 가진 재료의 탄성계수도 같은 방법으로 구할 수 있으며, 이 경우 파의 전달 방향을 잘 선택하므로써 중복 측정을 피할 수 있다.

### 5. A1/SiC 복합재료의 탄성계수

#### 5.1 시편

실험에 사용된 시편은 7091A1 합금에 0-30%의 SiC

입자로 보강된 금속복합재료로서, 분말야금과 압출공정으로 제조하였다. 두께 약 1.2cm로 압출된 복합재는 T6 열처리 하였다. 이들 재료는 직교이방성으로 가정하였고, 세개의 대칭축은 압출방향을  $x_1$ , 압출면내의  $x_1$ 과 직각방향을  $x_2$ , 두께방향을  $x_3$ 로 선택하였다. 수침, 경사면 입사 시험시의 굴절과 가능한 에너지 이탈을 고려하여, 길이×폭×두께=4.0cm×1.5cm×1.2cm 크기의 직육면체 시편 두개씩을 각 면이 재료의 대칭면과 평행하도록 취하였다. 시편의 표면은 연마하여 5 $\mu$ m 이내로 서로 평행하게 하였으며 시편의 밀도는 Archimedes의 방법으로 구하였다.

5.2 초음파 시험

시편은 0.1°의 정확도를 가진 회전대 위에 올려 놓고, 입사각은 회전대를 회전시켜 변화시켰다. 중심 주파수 5MHz, 직경 6.35mm의 종파 탐촉자를 사용하여, 수침 투과법으로 시험하였다. 0.5MHz-30MHz 주파수 범위에서 위상속도를 주파수의 함수로 측정된 결과 0.5% 이하의 속도 차이를 보였으므로, 분산 영향을 무시하고 수신 펄스의 주행시간으로부터 속도를 측정하였다. 주행시간은 LeCroy 9400 디지털 오실로스코프의 AVERAGE, STORE, EXPAND 등의 기능을 이용하여 수동으로 정확하게 측정할 수 있다. 먼저 시편없이 물속을 통과한 신호를 100회 평균하여 저장한다. 다음에 시편을 두 탐촉자의 중간에 설치하고 처음 투과한 펄스를 같은 방법으로 평균하여 저장한다. EXPAND를 이용하여 각각의 신호를 원하는 시간 해상도를 갖도록 확장시킨 후에 각 신호의 처음 장점에 시간 커서를 이동시켜 시간을 읽고 이로부터 주행시간 차이  $\Delta t$ 를 구한다. 여기서는 시간 해상도가 1 ns 되게 측정하였다. 본 실험에서는 두 신호 사이의 상응하는 점을 이용하여 시간차이를 측정하였으나, 펄스 중첩법(pulse overlap method)<sup>(8, 9)</sup>을 이용하면 펄스의 전체 모양을 일치시켜 시간차를 구할 수 있다. 물에서의 종파속도는 온도의 함수이므로 실험온도를 측정하여 Kroebel<sup>(10)</sup>의 관계식을 사용하였다. 수직입사의 경우 식(21)로부터 위상속도를 구하였고, 경사면 입사의 경우 QT파의 속도를  $\pm 6^\circ$ ,  $\pm 8^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ 에서 각각 측정하여 그 평균값을 구한 다음 비선형 최소자승법으로 비대각선 성분의 강성과 대각선 성분  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ ,  $C_{66}$ 를 구하였다. 또한  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ ,  $C_{66}$ 는 중심 주파수 2.25 MHz, 직경 9.5mm

횡파 탐촉자로서 접촉식 방법으로도 직접 측정하였으며, 그 결과를 수침, 경사면 입사법으로 측정한 값과 비교하였다.

5.3 인장시험

초음파 시험에서 구한 Young 상수를 인장시험 결과와 비교하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 두께방향의 제한 때문에 압출면 내에서  $x_1$  방향과  $x_2$  방향으로 게이지 부분이 두께 2.54mm, 폭 12.7mm, 길이 25.4mm 되게 인장시편을 준비하였다. 시험은 하중속도 0.25mm/min로서 상온에서 실시하였다. 시편 게이지부의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 이로부터 얻은 응력-변형도 곡선의 기울기로부터 Young 상수값을 측정하였다.

5.4 결과 및 고찰

초음파 속도를 이용하여 측정된 7091 Al/SiC 시편의 탄성계수를 Table 1에 수록하였다. 9개의 강성매트릭스 성분과 Young 상수값이 함께 수록되어 있다.  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  방향의 Young 상수는 다음의 관계식으로부터 구하였다.  $E_{11}=1/S_{11}$ ,  $E_{22}=1/S_{22}$ ,  $E_{33}=1/S_{33}$ . 여기서  $S_{ij}$ 는 유연도 매트릭스로서  $[S]=[C]^{-1}$ 이다.  $x_2$ - $x_3$ ,  $x_1$ - $x_3$ ,  $x_1$ - $x_2$  면에서의 전단계수는 강성매트릭스 성분과

Table 1. Ultrasonic measurement results for the 7091 Al/SiC composites (unit=GPa)

	0% SiC/Al	10% SiC/Al	20% SiC/Al	30% SiC/Al
$C_{11}$	112.9	129.5	152.0	167.4
$C_{22}$	113.4	126.6	146.7	166.5
$C_{33}$	112.2	123.2	138.8	156.3
$C_{12}$	56.9	60.0	64.7	68.0
$C_{13}$	58.0	60.4	65.2	67.6
$C_{23}$	57.7	60.6	65.1	68.8
$C_{44}=G_{23}$	26.7	31.0	37.7	45.3
$C_{55}=G_{13}$	27.2	31.6	38.3	45.9
$C_{66}=G_{12}$	26.4	32.2	41.1	49.0
$E_{11}$	74.2	90.4	111.4	127.4
$E_{22}$	74.9	87.6	106.6	125.6
$E_{33}$	72.8	84.3	99.1	116.7

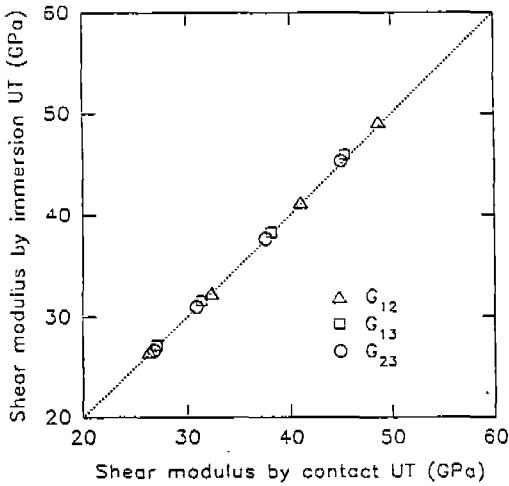


Fig. 4 Comparison of shear moduli measured by the direct contact method with those by the oblique incidence, immersion method.

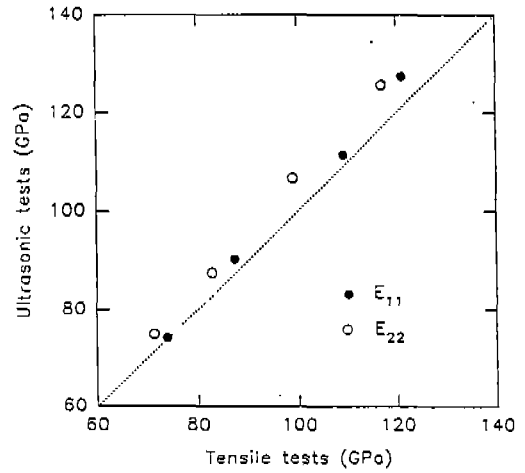


Fig. 5 Comparison of Young's moduli measured by the ultrasonic method with those obtained by the tensile test.

다음의 관계식을 갖는다.  $G_{23}=C_{44}$ ,  $G_{13}=C_{55}$ ,  $G_{12}=C_{66}$ .

Table 1을 살펴보면 SiC 입자보강 시편들은 체계적인 이방성을 보여 주고 있다.  $C_{11}>C_{22}>C_{33}$ 로서 압출 방향이 두께방향 보다 더 큰 값을 보이고 있다. 이러한 방향은 각 방향의 Young 상수 값에서도 관찰할 수 있다. 또한 전단 탄성계수도  $G_{12}>G_{13}>G_{23}$ 로서 압출면에서 더 큰 값을 보이고 있다. 이에 비하여 보강되지 않은 시편은 거의 등방성의 성질을 보이고 있다. 이와 같은 보강금속복합재의 이방성은 미시구조 분석결과 SiC 입자들이 압출방향으로 많이 향하고 있기 때문이다(11).

전단탄성계수는 접촉식에 의한 직접 측정과 경사면 입사, 수침에 의한 간접 측정의 두가지 방법으로 하였다. 이 두 결과를 Fig. 4에 비교하였는데 아주 좋은 일치율을 보이고 있다. 이는 수침, 경사면 방법으로 전단 계수를 정확하게 구할 수 있음을 말해 준다.

초음파의 속도로부터 구한 Young 상수를 인장시험의 결과와 Fig. 5에 비교하였다. 초음파시험 결과와 마찬가지로 인장시험 결과도 압출방향 ( $x_1$ )이  $x_2$  방향보다 더 높은 값을 보여 주고 있다. 이 두 방법에서 구한 값들의 최대 차이는 약 7%로서 초음파 시험결과가 조금 높은 값을 갖고 있다. 그러나, 인장시험법으로 금속복합재의 Young 상수를 구할 때 선형구간의 감소로 인하여

간혹 어려움이 제기되고 있다(12).

## 6. 결 론

이방성 재료에서 에너지의 전달방향은 일반적으로 파 벡터방향과 일치하지 않으므로 탄성계수를 측정하는데 있어서 에너지 속도와 위상속도의 구별은 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 수침식 초음파 시험에서 사각으로 입사하여 이방성 재료의 대칭면내를 전파하는 파의 에너지 경로 주행시간과 위상속도 경로 주행시간은 동일함을 증명하였다. 이 주행시간 동시성을 기초로 시편이 초음파 경로상에 없는 경우와 있는 경우의 주행시간차를 이용 굴절각과 위상속도에 관한 식을 유도하였다. 또한 시편이 초음파 전달 경로상에 있는 경우 정확한 주행시간 측정을 위해 수신 탐촉자를 실제로 에너지가 나오는 위치로 이동시켜야 한다. 수직 및 경사면 입사를 이용하여 직교이방성 재료의 완전한 탄성계수를 구하는 절차를 소개하고, 입자보강 알루미늄 금속복합재료의 완전한 탄성계수를 구하였다.

## 참고문헌

1. Musgrave, M. J. P., Crystal Acoustics,



- Holden-Day, San Francisco, CA., pp.83~129, 1970.
2. Markham, M. F., "Measurement of the Elastic Constants of Fiber Composites by Ultrasonics", *Composites*, Vol. 1, pp.145~149, 1970.
  3. Gieske, J. H. and Allred, R. E., "Elastic Constants of B-Al Composites by Ultrasonic Velocity Measurements", *Exp. Mech.*, Vol. 14, pp.158~165, 1974.
  4. Wu, T.-T. and Ho, Z.-H., "Anisotropic Wave Propagation and Its Applications to NDE of Composite Materials", *Exp. Mech.*, Vol. 30, pp.313~318, 1990.
  5. Auld, B. A., *Acoustic Fields and Waves in Solids*(Second edition), Robert E. Krieger, Malabar, FL, p.222, 1990.
  6. Mignogna, R. B., "Ultrasonic Determination of Elastic Constants from Oblique Angles of Incidence in Non-symmetry Planes", in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum, New York, Vol. 9B, pp.1565~1572, 1989.
  7. Woolf, A., "An Interactive Computer Program for Analysis of Ultrasonic Modulus Data on Anisotropic Materials", *Polymer Testing*, Vol. 5, pp.375~397, 1985.
  8. Hsu, D. K. and Hughes, M. S., "Simultaneous Ultrasonic Velocity and Sample Thickness Measurement and Application in Composites", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92(2), pt. 1, pp.669~675, 1992.
  9. 정현조, "초음파의 속도와 미시역학 모델을 이용한 구조용 세라믹스의 비파괴적 평가". 한국비파괴검사학회지 투고중.
  10. Kroebel, W. and Mahrt, K. H., "Sound Velocity of Distilled Water", *Acoustica*, Vol. 35, pp.154~164, 1976.
  11. Jeong, H., Hsu, D. K. Shannon, R. E. and Liaw, P. K., "Characterization of Anisotropic Elastic Constants of Silicon Carbide Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites: Part I. Experiment", *Metall. Trans. A*, In press.
  12. Warner, T. J. and Stobbs, W. M., "Modulus and Yield Stress Anisotropy of Short Fiber Metal-Matrix Composites", *Acta Metall.*, Vol. 37, pp.2873~2881, 1989.