

본 연구는 1994년 교육부 학술 연구 조성비 (기계공학:ME94-C-15)에 의하여 연구되었음.

음속의 응력의존성을 이용한 재료 상태평가에 대한 기초적 연구

김경조*, 장경영**

A Basic Research on Estimation of Material Condition by Using Stress Dependency of Sound Speed

K. J. Kim*, K. Y. Jhang**

ABSTRACT

In the conventional linear elasticity, sound speed is determined by only elastic modulus and density of the medium. In actual, however, sound speed depends on the stress and this dependency becomes nonlinear as the stress increases. These phenomena can be explained by introducing nonlinear elastic modulus. In this paper, relationships between nonlinear elastic modulus up to 4th order and the internal status of materials are discussed through computer simulations and experiments.

For the measurement of sound speed, a new type of measurement system using ultrasonic wave is proposed on the basis of ultrasonic pulse echo method which has been generally used in nondestructive ultrasonic test equipment. In order to confirm the stress dependency of sound speed, several experiments are carried out for alumina specimen.

Key Words : nonlinear elastic modulus(비선형 탄성계수), Sound Speed(음속), UT(ultrasonic test)(초음파 검사), nondestructive test(비파괴 검사), Stress(응력)

1. 서론

압연이나 전조, 용접 가공 등에 의해 제조되어지는 금속 부품 또는 재료의 내부에는, 제조과정에서 가해지는 열에 의한 온도구배 또는 내부 결정의 불균형한 변형에 의하여

이러한 잔류 응력이 존재하게 되며, 이것은 재료의 피로, 강도 저하 및 파괴의 원인이 되기도 하기 때문에 강도 설계에 있어서 불확정 요인으로 크게 문제시 되고 있다.⁽¹⁻³⁾

또 반복하중에 의한 재료의 피로, 가공 경화, 취화(脆化) 등의 진전도를 알 수 있다면 재료의 수명은 예측할 수 있고,

* 한양대학교 대학원
** 한양대학교 정밀기계공학과

갑작스러운 파괴에 의한 불의의 사고를 방지할 수 있다. 따라서 이러한 잔류 응력, 취하 상태 등 재료 내부의 응력 상태를 비파괴적으로 평가하는 것은 매우 중요한 과제이다.

그런데, 종래로 부터 응력을 평가하는 방법으로 광탄성, X선회절⁽⁴⁾, 게이지⁽⁵⁾, 화상처리⁽⁶⁻⁸⁾ 등 여러 가지 방법이 제안되어 왔으나, 대부분 표면 응력만을 측정할 수 있는 방법이며 X선회절법의 경우 측정가능 깊이가 제한되어 있고, 사용에 많은 제약을 가진다. 이에 대하여 음속의 응력 의존성을 이용하는 방법은 비교적 사용에 간편하고 대상재료에 큰 제약이 없어 광범위하게 적용될 수 있을 것으로 생각되어 지고 있으며, 특히 음속의 응력에 대한 비선형적 의존성이 최근 주목 받고 있다.⁽⁹⁻¹⁵⁾

본 연구에서는 이러한 음속과 응력의 비선형 의존관계를 2차탄성계수(일반적인 종탄성계수가 이에 해당됨) 외에 3차, 4차의 비선형 탄성계수를 도입하여 표현함으로써 실측된 음속-응력 데이터로부터 곡선적합(curve-fitting)에 의해 이들 계수를 추정하고자 하였으며, 이들 계수가 재료내부의 응력상태와 어떤 관련을 갖는지에 대하여 실험적으로 검토하고자 하였다. 또한, 본 연구에서는 음속-응력 데이터를 얻기 위한 측정장치의 구체적인 구성에 대하여 논하였으며, 특히 범용 UT(초음파 검사)장비를 사용하여 고가의 전용장비 없이 측정이 가능하도록 하였다.

제한한 방법의 정당성을 검증하기 위하여 응력-음속 관계에 대한 계산기 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교검토 하였으며, 재료내부의 상태변화에 따른 비선형 탄성계수의 변화를 실험적으로 알아보기 위하여 정상적인 알루미늄 시편과 인위적으로 가공경화시킨 시편 및 급냉열처리한 시편을 준비하여 실험하였다.

2. 응력에 대한 음속의 비선형 의존성

2-1 비선형 탄성계수의 도입

선형탄성이론에 대한 응력-변형률의 관계는 후크의 법칙에 의해 2차의 탄성 계수(종탄성계수 혹은 횡 탄성계수가 해당됨)만으로 표현되는 직선 관계로 된다. 이 경우 음속은 이 2차의 탄성 계수와 밀도만으로 결정되고, 응력에 관계없이 일정하다. 그러나, 이러한 선형 관계가 보장되는 응력 구간은 매우 작으며, 엄밀히는 응력-변형률 관계는 비선형적이다. 따라서, 음속-응력의 관계도 비선형적이다.

여기서는 음속과 응력 사이의 이러한 비선형적인 의존

성을 표현하기 위해, 응력T-변형률S의 관계를 선형 탄성계수 f 외에도 3차와 4차의 비선형 탄성계수 g, h를 도입해서 다음처럼 표현하기로 한다.

$$S_I = f_{IJ}T_J + g_{IJK}T_JT_K + h_{IJKL}T_JT_KT_L \quad (1)$$

여기서, $I, J, K, L = 1, 2, \dots, 6$ 이고, $T_1 = T_{XX}, T_2 = T_{YY}, T_3 = T_{ZZ}, T_4 = T_{YZ}, T_5 = T_{XZ}, T_6 = T_{XY}$. 이며, S_I 의 첨자 I도 이와 같다.

2-2 응력-음속관계의 정식화

2-1에서 도입했던 비선형 탄성 계수를 이용해서 응력-음속 관계를 구하기 위해 Fig. 1과 같은 모델을 생각하며 음속의 유도 과정은 문헌⁽¹²⁾의 선형탄성과 이론을 참고하였다.

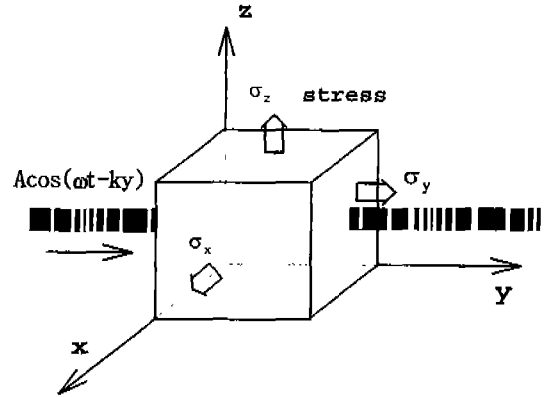


Fig. 1 Orientation of stress and ultrasonic wave

즉, 등방성 재료의 미소 영역에, 정적인 3축응력(three axis stress) $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 이 가해진다고 하고, 여기에 음속측정용 프루브파(probe wave)로서 진폭 A, 각주파수 ω , 파수 k의 탄성 초음파(종파)를 y축 방향으로 가할 경우에 초음파의 각주파수 ω 에 관계된 y방향의 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.(부록참조)

$$S_2 = A \cos(\omega t - \omega y) \left[\begin{aligned} & \left\{ (f_{22} - af_{21}) + 2(g_{212} - ag_{211})(\sigma_x + \sigma_z) \right\} \\ & + 3(h_{2112} - h_{2111})(\sigma_x + \sigma_z)^2 \right\} \\ & \times \left\{ 2(g_{222} - ag_{212}) + 6(h_{2122} - ah_{2112})(\sigma_x + \sigma_z) \right\} \sigma_y \\ & + 3(h_{2222} - ah_{2122})\sigma_y^2 \end{aligned} \right] \quad (2)$$

여기서, $\alpha = \frac{2f_{21}}{f_{22} + f_{21}}$ 이다.

한편, 같은 $S_2(\omega$ 에 관계된 성분)를 주목하고 있는 미소영역에서의 운동 방정식을 이용하여 구해 보면 다음과 같이 된다.

$$S_2 = \frac{k^2}{\rho\omega^2} A \cos\{\omega t - ky\} \quad (3)$$

그러면, (2)식과 (3)식에 의해 응력-음속의 관계식이 다음과 같이 얻어지는데,

$$C = \left[\rho \left\{ \begin{aligned} & (f_{22} - \alpha f_{21}) + 2(g_{212} - \alpha g_{212})(\sigma_x + \sigma_z) + \\ & 3(h_{2122} - \alpha h_{2111})(\sigma_x + \sigma_z)^2 \\ & + 2(g_{222} - \alpha g_{212})\sigma_y + 6(h_{2122} - \alpha h_{2112})(\sigma_x + \sigma_z)\sigma_y \\ & + 3(h_{2222} - \alpha h_{2122})\sigma_y^2 \end{aligned} \right\} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

여기서 2차, 3차의 비선형 변형은 선형적인 것이 2회 또는 3회 작용하는 것으로 생각하여 프와송비 ν 에 대해서 다음과 같은 관계가 성립한다고 가정하면,

$$-\nu = \frac{f_{21}}{f_{22}} = \frac{g_{212}}{g_{222}} = \frac{g_{211}}{g_{212}} = \frac{h_{2122}}{h_{2222}} = \frac{h_{2112}}{h_{2122}} = \frac{h_{2111}}{h_{2112}} \quad (5)$$

음속은 최종적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C = \left[\rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \left\{ \begin{aligned} & f_{22} + 2g_{222}\{\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\} + \\ & 3h_{2222}\{\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\}^2 \end{aligned} \right\} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

3. 음속의 계측 원리 및 계측계의 구성

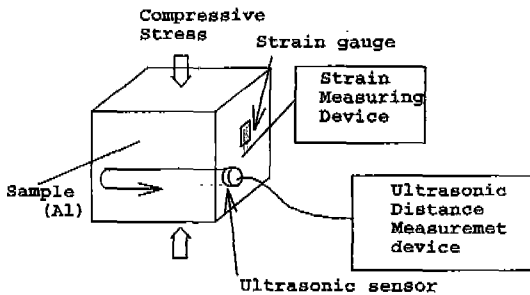


Fig. 2 Experimental Equipment

본 연구에서는 음속을 측정하기 위한 별도의 전용장치를 제작할 필요없이 범용 UT(초음파 검사)장치를 확대 사용할 수 있는 음속측정방법을 제안한다.

Fig. 2는 음속을 변화시켜 갈 때 음속의 변화를 측정하기 위한 계측계의 구성을 나타낸다. 여기서, 압축응력은 유압압축기를 사용하여 가했으며 UT장치로는 USD-10(Kraut-Kramer사, 독일)를 사용하였다. 음속의 측정 원리는 UT장치에 의한 두께 측정원리와 유사하다. 즉, 한쪽면에서 초음파 펄스를 송신하고 반대면에서 반사된 펄스를 수신하여 송수신 시간차를 구하고 이미 알고 있는 음속으로 부터 시편의 두께를 구하는 것이다. 지금 응력이 작용하지 않는 초기상태에서의 음속을 C_0 라 하고 측정된 송수신 시간차를 T_0 라 하면, 시편의 두께 l_0 는 다음과 같이 주어진다.

$$l_0 = \frac{T_0 C_0}{2} \quad (7)$$

그런데, 본 연구에서와 같이 응력을 가할 경우 음속과 시편의 길이가 동시에 변화하므로 이 때의 송수신 시간차 T는 시편의 길이변화 ΔC 에 따른 전파시간의 변화와 음속의 변화 Δl 에 따른 전파시간의 변화를 동시에 고려하여야 한다. 즉,

$$T = \frac{2(l_0 + \Delta l)}{C_0 + \Delta C} \quad (8)$$

그러면, UT장비에서 추정되는 시편의 길이 l_1 은 송수신 시간차 T와 초기음속 C_0 (UT장치에는 음속이 C_0 로 이미 고정되어 있음)로 부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$l_1 = \frac{TC_0}{2} = \frac{l_0 + \Delta l}{C_0 + \Delta C} C_0 = l_0 \frac{C_0}{C_0 + \Delta C} (1 + \epsilon\nu) \quad (9)$$

여기서 ϵ 은 응력작용방향의 길이변형율으로서, $\epsilon\nu$ 는 응력작용방향과 수직방향으로의 길이변형율을 나타낸다. 따라서 최종적인 음속은 다음과 같이 표현된다.

$$C = C_0 \frac{l_0}{l_1} (1 + \epsilon\nu) \quad (10)$$

여기서, 변형율은 스트레인 게이지를 시편에 부착시켜 측정함으로써 구한다. 또한, 금속 재료 내에서 음속의 응력에 의한 변화는 매우 작기 때문에, 통상의 주파수로는 음속의 변화를 구하는 것이 곤란하여, 10MHz의 고주파 초

음파를 이용하였다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응력-음속 곡선과 비선형 탄성계수와와의 관계평가

응력작용방향과 초음파전파방향이 직각일 경우와 같은 경우에 음속이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여, 다음과 같은 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

4-1 응력작용방향과 초음파전파방향이 직각일 경우

먼저 응력방향과 초음파 진행방향이 직각일 경우, 즉 $\sigma_x = \sigma_y = 0, \sigma_z = -\sigma_z$ 인 경우 응력-음속 관계는

$$C = [\rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} (f_{22} + 2g_{222}\nu\sigma_z + 3h_{222}\nu^2\sigma_z^2)]^{-1/2} \quad (11)$$

로 된다. 여기에 시편으로 사용할 재료인 알루미늄 5052에 대한 물성치 $\nu = 0.33, \rho = 2.68 \text{ Mg/m}^3$ 을 대입하면 최종적으로 (12)식을 얻을 수 있다.

$$C = [1808.8f_{22} + 1193.8g_{222}\sigma_z + 590.9h_{222}\sigma_z^2]^{-1/2} \quad (12)$$

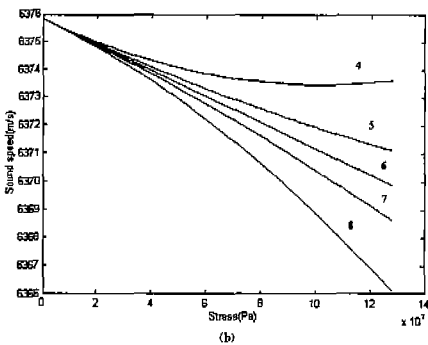
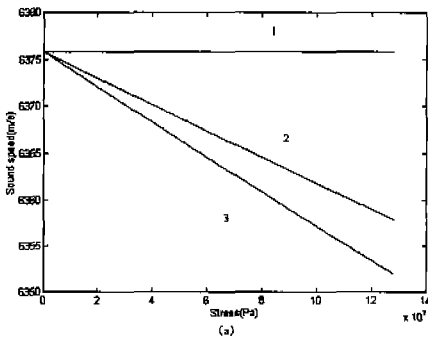


Fig. 3 Change of stress-sound speed curve when g or h changes in simulation 1

이 관계식을 이용하여 g, h의 값을 Table 1과 같이 변화시켜 가며 C의 값이 어떻게 변하는지를 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 살펴본 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서, f는 $1.36 \times 10^{-11} (\text{m}^2/\text{N})$ 으로 고정된다. 이것은 알루미늄 5052의 종탄성계수의 역수에 해당되는 값으로 후술되는 실험결과에서도 알 수 있듯이 응력의 변화에 따라 거의 변화하지 않기 때문이다.

(a)는 g값만의 변화에 따른 C의 변화를 나타내며, (b)는 h값만의 변화에 따른 C의 변화를 나타낸다.

Table 1 The value of g and h used in simulation 1

곡선	g	h
1	0	0
2	3×10^{-22}	0
3	4×10^{-22}	0
4	3×10^{-22}	-3×10^{-30}
5	3×10^{-22}	-1×10^{-30}
6	3×10^{-22}	0
7	3×10^{-22}	1×10^{-30}
8	3×10^{-22}	3×10^{-30}

곡선 1은 $g=h=0$ 으로 비선형 탄성효과를 무시한, 즉 선형탄성의 경우와 동일하며, 예상할 수 있듯이 음속은 응력에 무관하게 일정함을 보여준다. 또한, 곡선2와 곡선 6은 동일한 경우로서 비교의 편이를 위해서 삽입되었다. 이 결과를 보면 g는 주어진 응력범위에서 응력-음속 곡선의 선형기울기에 관여하고 h는 그 곡률에 관여함을 알 수 있다.

한편, 음속은 하중의 증가에 따라 감소해 감을 보여 주는데, 이는 후술되는 실험결과와 일치하는 경향이다.

4-2 응력작용방향과 초음파전파방향이 평행한 경우

응력작용방향과 초음파전파방향이 평행한 경우에는 $\sigma_x = \sigma_z = 0, \sigma_y = -\sigma_y$ 를 (6)식에 대입하고, 앞에서와 마찬가지로, 알루미늄 5052에 대한 물성치를 대입하면 음속은 다음과 같이 표현된다.

$$C = [1808.8f_{22} - 3617.6g_{222}\sigma_z + 5417.9h_{222}\sigma_z^2]^{-1/2} \quad (13)$$

여기서, 2항과 3항의 계수가 (12)식에서와 다르고, 특히 2항의 부호가 반전됨을 알 수 있다. 이 관계식을 이용하여 g, h의 값을 곡선 7에서 h의 값을 0.3×10^{-30} 로 사용하고, 곡선 8에서 h의 값을 0.6×10^{-30} 로 사용한 것을

제외하고는, Table 1에서와 같이 변화시켜 가며 C의 값이 어떻게 변하는지를 살펴본 결과를 Fig.4에 나타내었다. 여기서도, f 는 $1.36 \times 10^{-11}(\text{m}^2/\text{N})$ 으로 고정되었다.

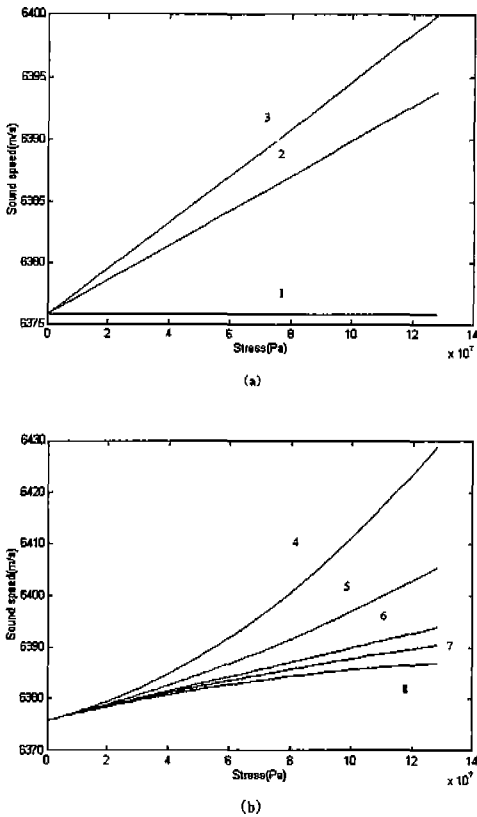


Fig. 4 Change of stress-sound speed curve when g or h changes in simulation 2

시뮬레이션 결과는 앞에서와 유사하다. 단, 앞에서는 응력이 증가함에 따라 음속이 감소하는 곡선이 되었던 것에 비하여 이번에는, 응력이 증가함에 따라 음속이 증가하는 곡선이 된다. 이는 (13)식의 제 2항의 부호가 (12)식과 반대이기 때문이며, 이 또한 실험결과와 같은 경향을 나타내는 것으로, 이로부터 앞에서 유도된 관계식의 결과와 같은 결과로 됨을 알 수 있었다.

5. 실험 및 고찰

5-1 시험편과 실험방법

시험편은 길이가 $45 \times 45 \times 45\text{mm}$ 인 정육면체 형상의 알루미늄으로 하였으며, 서로 다른 내부상태를 나타내기 위

하여 정상상태의 A15052, 정상상태의 A16061, 100MPa로 가공 경화한 A15052, 350°C 로 열처리한 후의 A15052의 4가지 시험편을 준비하였다. 이하 부터는 편의상 각각 시험편 ①, ②, ③, ④라고 부른다. 각각의 시험편에 대하여 응력을 알리미늄 5052의 탄성한계인 90MPa를 넘어서는 120MPa까지 2MPa간격으로 증가시켜 가면서 음속의 변화를 측정한다.

5-2 응력작용방향에 따른 응력-음속곡선의 변화

먼저, Fig.5는 앞 절에서 언급한 시뮬레이션에 대응하는 실험결과를 보여주는 것으로, 시험편 ①에 대하여 (a)는 Fig.3과 같은 조건, (b)는 Fig.4와 같은 조건에서 측정한 결과이다. 즉, 응력작용방향과 초음파 전파방향이 수직인 경우 음속이 응력의 증가에 따라 감소하며, 응력작용방향과 초음파전파방향이 동일한 경우 음속이 응력의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다.

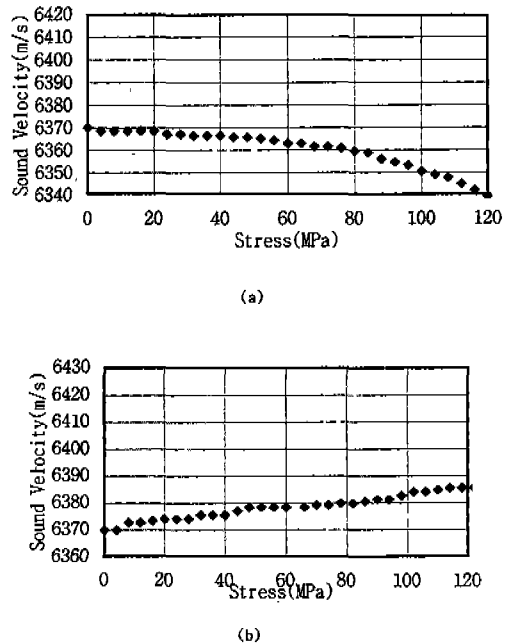


Fig. 5 Stress-sound speed data measured when directions of stress and ultrasonic wave are (a)perpendicular, and (b)parallel to each other

5-3 재료의 변질에 따른 응력-음속곡선의 변화

Fig. 6은 재료의 다른 내부상태에 따른 응력-음속 곡선의 변화를 살펴보기 위하여 앞에서 준비된 네가지 시험편

에 대하여 응력작용방향과 초음파전파방향을 직각으로 하였을 때 실측한 음속-응력 관계를 보여준다.

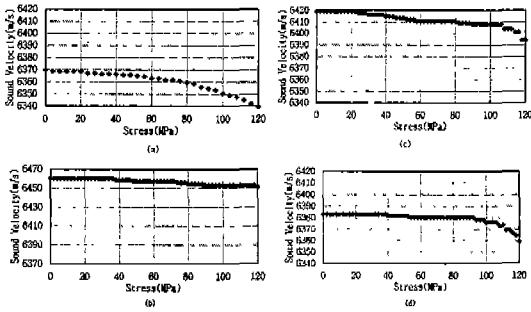


Fig. 6 Measured sound speed when the stress is increased up to 120MPa for four types of specimen (a) ①, (b) ②, (c) ③, (d) ④

응력-음속 데이터를 식(12)에 곡선 적합하여 f , g , h 를 구한 결과를 Table.2에 나타내었다. 여기서, 응력-음속 곡선의 특징으로 부터 선형 구간과 비선형 구간의 두 구간으로 나누어 표시했으며, 구간의 경계는 알루미늄 5052의 탄성한계 응력인 90MPa전후에 해당된다. 단, 6061은 전구간이 탄성영역이고 응력-음속 곡선도 선형적 이므로 단일 구간으로 표시하였다.

먼저, 전체적인 경향에 대해서 살펴보면, 선형탄성계수인 f 의 값은 대체적으로 유사하며, 따라서 선형탄성계수만으로는 재료의 상태변화가 정확히 예측될 수 없음을 알 수 있다. 이에 반하여 g 와 h 의 값은 선형 구간에 비하여 비선형 구간에서 현저히 크게 나타남을 알 수 있는데, 이것은 고응력에서 음속의 응력에 대한 비선형적 의존성이 현저함을 의미하고, 재료의 상태변화에 민감함을 보여주는 것이다.

Table. 2 Values of f , g and h estimated by curvefitting the stress-sound speed data to eq. (12).

	Stress Range	$f(m^2/N)$ ($\times 10^{-11}$)	$g(m^4/N^2)$ ($\times 10^{-22}$)	$h(m^6/N^3)$ ($\times 10^{-30}$)
Specimen ①	Linear	1.36	0.675	18.1
	Non linear	1.39	111	134
Specimen ②	Linear	1.32	2.85	3.55
	Non linear	1.34	8.73	57.0
Specimen ③	Linear	1.34	304	314
	Non linear	1.36	2.01	2.26
Specimen ④	Linear	1.44	251	274
	Non linear			

다음으로 시편 ①과 ②를 비교해 보면 ②의 시편은 항복 응력이 276MPa인데, 본 실험에서는 120MPa까지만 가압했으므로 작용응력이 아직 탄성한계 이내에 있다고 생각할 수 있으며 h 의 값이 매우 작은 것을 볼 수 있다. 이는 시편 ②의 응력-음속 곡선이 Fig.6에서 보는 바와 같이 실험 응력범위 내에서 거의 직선에 가까우므로 매우 당연한 결과라고 할 수 있다.

이로부터 비선형 탄성계수가 재료의 상태변화를 평가하는데 효과적인 파라미터가 될 수 있다고 할 수 있다. 단, 재료상태의 이상유무를 g 와 h 의 값으로만 판정하기 위하여는 각 재료마다의 표준적인 g , h 값을 준비해 두어야 한다. 그러나 이러한 데이터는 아직까지 확보된 예가 없으며, 따라서 본 연구에서는 다음에 제안하는 h/g 를 이용하는 것에 대하여 검토하였다.

5-4 응력변화에 따른 h/g 의 변화

h/g 값의 특성은 앞에서 보인 시뮬레이션과 실험결과를 토대로 다음과 같이 예상할 수 있다. 선형구간에서는 h 는 양의 작은 값을 갖고, g 도 양의 값을 가지므로 h/g 는 양의 값을 가지고, 비선형 구간에서는 증가하는 양의 h 값과 증가하는 음의 g 에 의해 h/g 는 음의 값을 가질 것이다. 즉, g 와 h 에 있어서의 부호변화에 매우 민감하리라는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 7에 앞에서 얻어진 각 시험편의 응력-음속 데이터를 이용하여 얻은 h/g 의 변화를 나타냈다. 여기서, g 와 h 는 해당 응력까지의 데이터를 모두 이용하여 구한 것으로, 예를 들면, 92MPa에서의 h/g 값은 0에서 92MPa까지의 데이터로부터 g , h 를 각각 구한 뒤 h/g 값을 계산한 것이다. 예상했던 바와 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 각 그림에서 h/g 값의 부호가 바뀌는 응력이 항복응력에 가까운 곳임은 매우 특징적인 결과라 할 수 있다.

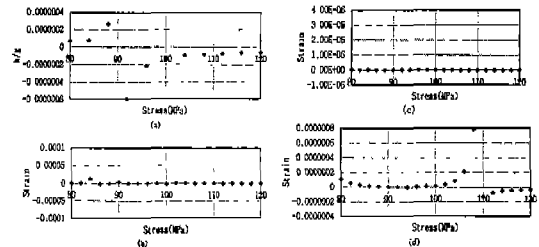


Fig. 7 Change of h/g when the stress is increased, for (a) specimen ①, (b) specimen ②, (c) specimen ③ (d) specimen ④

시편별로 살펴보면, 시편 ①은 원래 항복응력인 80~90MPa에서 h/g값이 크게 변화하고, 시편 ②는 아직 항복응력에 도달하지 않아서 큰 변화가 없다. 시편 ③은 가공경화에 의해 항복응력이 120Mpa이상으로 증가되었으며, 시편 ④는 급냉에 의한 경화효과로 항복응력이 다소 증가된 것으로 볼 수 있다. 이로부터 재료의 h/g값은 재료의 응력상태가 탄성한계 이내인지 아닌지를 구별하는 특징적인 파라미터임을 알 수 있다.

본 실험은 같은 조건에서 수개의 실험을 준비하여 시행하였으며 대부분 동일한 경향을 보였다. 이상의 결과로부터 g, h의 값 또는 h/g값을 이용하여 재료의 상태변화를 평가할 수 있음을 충분히 예상할 수 있었다.

6. 결 론

(1) 3차와 4차의 비선형 탄성계수를 이용하여 음속의 응력에 대한 비선형성을 정량적으로 나타내었으며, 각 탄성계수가 음속-응력곡선에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 분명히 하였다.

(2) 범용 UT측정장치를 이용하여 응력-음속 곡선을 얻을 수 있는 계측시스템을 제안 하였다.

(3) 정상상태와 가공경화상태 및 열처리한 알루미늄 시편에 대하여 실험한 결과 비선형 탄성계수 g와 h가 재료의 상태변화를 민감하게 반영함을 확인할 수 있었다. 특히, 재료가 탄성한계를 넘는 응력을 받을 경우 g, h의 값이 크게 변화하였으며, h/g값은 재료의 응력상태가 탄성한계 이내인지 아닌지를 구별하는 특징적인 파라미터가 될 수 있을 것으로 사료된다.

향후 더 많은 종류의 재질과 응력상태에 대하여 검토해 나가고자 하며 비선형 탄성계수와 재료변질과의 연관성에 대한 이론적 접근을 시도하고자 한다.

참고문헌

1. 日本非破壊検査學會編 1967. "非破壊検査便覽", pp 635-790.
2. 葉山房夫, 1958, "金屬材料および試驗法", コロナ社, pp 126-140.
3. J.W. Dally and W.F.Riley, 1978, "Experimental Stress Analysis", 2nd ed. Mc Graw-Hill.
4. 大谷眞一, 1992, "單一入射法を用いた小型X線應

- 力測定装置の開発と性能"非破壊検査 Vol.41, No 2, pp 90-96.
5. T.G.Beckwith and R.D.Marangoni, 1990, "Mechanical Measurements", 4th ed., Addison Wesley, pp 446.
6. 한응교, 장경영, 1992, "정밀 계측공학", 반도출판사.
7. M. Sugiura and M.Seika, 1992, "An Application of Computer Image-Processing and Filmy Technique to the Copper Electroplating method of Stress Analysis", FENDT 92 II, pp696-703.
8. E.A.Ashand and C.B.SchrubyEd.), 1986, "Novel Techniques of Non-Destructive Examination", The Royal Society, Cambridge University Press.
9. R.N.Thurston, in Physical Acoustics, W.P.Mason Ed., 1964, Vol.1A, Academic, New York, pp 1-110.
10. R.T.Smith, R.Stern, and R.W.B Stephens, 1966, "Third-Order Elastic Moduli of Polycrystalline Metals from Ultrasonic Velocity Measurements", JASA Vol.40, No.5, pp 1002-1008.
11. R.A.Graham, 1972, "Determination of Third- and Fourth-Order Longitudinal Elastic Constants by Shock Compression Techniques-Application to Sapphire and Fused Quartz", JASA Vol.51, No.5(Part 2), pp 1576-1581.
12. B. A. AULD, 1973, "Acoustic Fields And Waves in Solids", Ch.4 pp. 68-84, John Wiley&Sons, Inc
13. R. N. Thurston, K. Brugger, "Third-Order Elastic Constants and the Velocity of Small Amplitude Elastic Waves in Homogeneously Stressed Media", PHYSICAL REVIEW, Vol. 133, No. 6A, pp A1604-A1610.
14. Robert E. Hankey, Donald E. Schuele, 1969, "Third-Order Elastic Constants of Al₂O₃", JASA Vol. 48, No. 1(Part 2), pp 190-202.

15. 岩清水幸夫 “やさしい音弾性”, 超音波Techno
Vol.2.No.6, pp.19-22.(1990)

부록-식(2)의 유도

먼저, 탄성파로 인한 탄성파 전파방향으로의 응력성분은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$T_2 = A \cos(\omega t - ky) \quad (I)$$

한편, 탄성파로 인한 x, z방향으로의 변형률 성분은 탄성파의 진폭이 매우 작으므로 (1)식의 1차의 항만을 고려하고 등방성을 가정하면,

$$S_1 = f_{11}T_1 + f_{12}T_2 + f_{13}T_3 = f_{22}T_1 + f_{21}(T_2 \times T_3) \quad (II)$$

$$S_3 = f_{31}T_1 + f_{32}T_2 + f_{33}T_3 = f_{22}T_3 + f_{21}(T_1 \times T_2) \quad (III)$$

프로브파로 이용되는 탄성파는 고주파이므로 전파방향에

수직인 변형이 구속된다고 할 수 있어서 즉, $S_1 = S_3 = 0$ 이므로, 이것과 (I)~(III)을 이용하면 x, z방향으로의 응력성분을 다음처럼 구할 수 있다.

$$T_1 + T_3 = -\frac{2f_{21}}{f_{21} + f_{22}} A \cos(\omega t - ky) \quad (IV)$$

결국, 작용하는 전응력은 (I)과 (IV)식에 정적인 응력 성분 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 을 함께 고려하면, 각각 다음식처럼 나타낼 수 있게 된다.

$$T_2 = \sigma_y(x, y, z) + A(x, y, z) \cos\{\omega t - k(x, y, z)y\} \quad (V)$$

$$T_1 + T_3 = \sigma_x(x, y, z) + \sigma_z(x, y, z) - \frac{2f_{21}}{f_{22} + f_{21}} A \cos(\omega t - ky) \quad (VI)$$

다음에, 이들을 (1)식에 대입하여 y축 방향에 대한 탄성파의 기본 주파수 ω 에 관계된 성분만을 도출하면 (2)식을 얻을 수 있다.