

비선형 탄성계수를 이용한 재료변질 상태평가에 대한 기초적 연구 (A Basic Research on Estimation of Material Condition by Using Nonlinear Elastic Modulus)

김경조* (한양대 대학원), 장경영(한양대 정밀기계공학과)
K. J. Kim* , K. Y. Jhang (HanYang University)

key words: nonlinear elastic modulus(비선형 탄성계수), ultrasonic velocity(음속), UT(ultrasonic test)(초음파 검사), nondestructive test(비파괴 검사)

Abstract : In the conventional linear elasticity, ultrasonic velocity is determined by elastic modulus and density of the medium which ultrasonic wave propagates through. But, practical ultrasonic wave depends on the stress acting in the medium, and as the stress increases such dependency becomes nonlinear. This nonlinear dependency of ultrasonic velocity on stress can be identified by using nonlinear elastic modulus up to 4th order.

In this paper, with the above background, relationships between nonlinear elastic modulus and the internal status of materials, normal, plastic deformed or heat stressed, are discussed.

For this purpose, a new type of measuring system extended from the general nondestructive UT(ultrasonic test) equipment is constructed.

1. 서론

압연이나 전조, 용접 가공 등에 의해 제조되어지는 금속 부품 또는 재료의 내부에는, 제조과정에서 가해지는 열에 의한 온도 구배 또는 내부 결정의 불균형한 변형에 의하여 이른바 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, 갑작스러운 파괴에 의한 불의의 사고를 방지할 수 있다. 따라서 이러한 잔류 응력, 취화 상태 등 재료 내부의 응력 상태를 비파괴적으로 평가하는 것은 매우 중요한 과제이다.

그런데, 종래로부터 응력을 평가하는 방법으로 광탄성, X선회절 [4], 게이지 [5], 화상처리 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. [9-10]

본 연구는 이와 같은 음속의 응력에 대한 비선형적 의존관계로부터 4차까지의 비선형탄성계수를 구하고, 이를 이용하여 재료 내부의 응력 상태 또는 변질 상태를 비파괴적으로 평가하기 위

한 기초적 연구로서, 범용 UT장비를 이용하여 음속을 측정할 수 있는 계측시스템을 구성하고, 실제 알루미늄 재료에 적용하여 비선형 탄성계수와 재료의 상태와의 관계를 정량적으로 검토하는 것을 목적으로 한다.

실험에서는 알루미늄 5052, 알루미늄 2024, 가공경화한 알루미늄 5052, 열처리(급냉)한 알루미늄 5052에 대한 응력-음속관계의 데이터를 구한 후, 이 데이터를 곡선적합시켜 3차와, 4차의 비선형 탄성 계수를 추정하여 실제 재료 내부의 상태와 비교 평가한다.

2. 응력에 대한 음속의 비선형 의존성

2-1 비선형 탄성계수의 도입

선형탄성이론에 대한 응력-변형률의 관계는 후크의 법칙에 의해 2차의 탄성 계수만으로 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 응력사이의 이러한 비선형적인 의존성을 표현하기 위해, 응력-변형률의 관계를 선형 탄성계수 f (외에도 3차와 4차의 비선형 탄성계수 g, h 를 도입해서 다음처럼 표현한다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} I, J, K &= 1, 2, \dots, 6. \\ T_1 &= T_{xx}, T_2 = T_{yy}, T_3 = T_{zz} \\ T_4 &= T_{xz}, T_5 = T_{xy}, T_6 = T_{yx} \\ S_1 &= S_{xx}, S_2 = S_{yy}, S_3 = S_{zz} \\ S_4 &= S_{yz}, S_5 = S_{xz}, S_6 = S_{xy} \end{aligned}$$

이고, 제1 첨자는 면을, 제2 첨자는 작용방향을 나타내고, f, g, h는 각각 2차, 3차, 4차 탄성 계수를 나타낸다.

2-2 응력-음속관계의 정식화

2-1에서 도입했던 비선형 탄성 계수를 이용해서 응력-음속 관계를 구하기 위해 Fig. 1과 같은 모델을 생각한다.

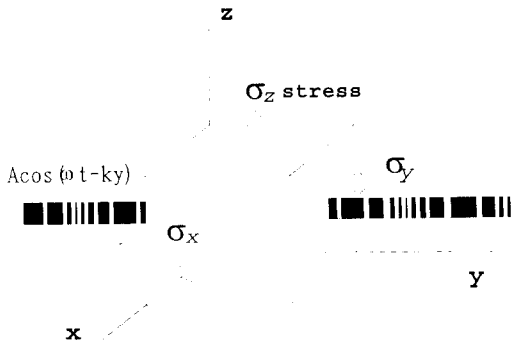


Fig. 1 Orientation of stress and ultrasonic wave

즉, 등방성 재료의 미소 영역에, 정적인 3응력 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)이 가해진다고 하고, 여기에 음속측정용 프루브 파로서 진폭 A, 각 주파수 ω , 파수 k의 탄성 초음파(종파)를 y 축 방향으로 가할 경우에 y방향의 변형율은 다음과 같이 표현될 수 있다. [13]

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

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

한편, 같은 S_2 를 주목하고 있는 미소영역에서의 운동 방정식을 이용하여 구해 보면 다음과 같이 된다. [13]

$$S_2 = \frac{k(x, y, z)^2}{\rho \omega^2} A(x, y, z) \cos\{\omega t - k(x, y, z \cdot t)y\} \quad (3)$$

따라서, (2)식과 (3)식에 의해 응력-음속의 관계식이 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} C &= [\rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \{f_{22} + 2g_{222}(\sigma_x - \nu(\sigma_x + \sigma_z))\} \\ &+ 3h_{2222}(\sigma_x - \nu(\sigma_x + \sigma_z))^2]^{-1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

단, 여기서 프와송비 ν 에 대해서 다음과 같은 관계를 이용하였다.

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

3. 음속의 측정 원리 및 측정계의 구성

응력변화에 따른 음속의 변화를 측정하기 위한 측정계의 구성을 Fig. 2에 나타낸다. 음속측정원리는 UT용 초음파 장치를 이용한 두께측정원리와 유사하다.

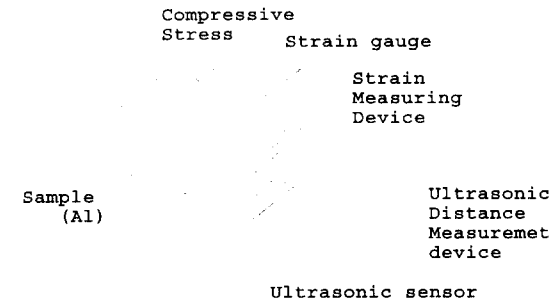


Fig. 2 Schematic Diagram of Dependence Sound Velocity upon Stress

본 연구에서는 초음파 속도측정을 위한 별도의 전용장치를 제작할 필요없이 범용의 UT장치를 확대 사용할 수 있도록 범용 UT장치 USD-10을 이용, 한쪽면에서 펄스를 송신하고 반대면에서 반사된 펄스신호를 수신 하여, 송수신 펄스의 시간차와 시편의 길이로 부터 음속을 구하고자 하였다.

UT장치에서는 음속은 이미 알고 있는 것으로 하고 전파시간차 T를 측정하여 시편의 길이 ℓ 을

$$\ell = CT \quad (C:\text{음속})$$

으로 구하게 되는데, 본 연구에서와 같이 응력을 가할 경우 음속과 시편의 길이가 동시에 변화하므로 단순히 전파시간차만을 측정하여 음속 C를 추정할 수 없게 된다. 즉, 시편의 길이변화에 따른 전파시간의 변화와 음속의 변화에 따른 전파시간의 변화를 동시에 고려하여야 하며, 따라서 가압후 시편의 길이 ℓ_1 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ell_1 = \ell_0 + \Delta\ell + \alpha = \frac{1}{2}(C_0 + \Delta C)(T + \Delta T) \quad (6)$$

여기서, ℓ_0 : 원래의 길이 (45mm)

$\Delta\ell$: 부하에 의한 시편의 길이 변형량

α : 음속변화효과

C_0 : 무 부하시의 음속 [m/sec]

ΔC : 응력에 의한 음속 변화량

T : 무 부하시의 전파시간

ΔT : 시편길이의 변화에 기인하는 전파시간 변화량

즉, $\Delta\ell$ 은 $\frac{1}{2}(C_0 + \Delta C)\Delta T$ 에 해당하고, ℓ_0 는 $\frac{1}{2}CT$ 이므로, 이를 (6)식에 대입하면 α 는 $\frac{1}{2}\Delta CT$ 이므로 최종적으로 가압 후 음속 C는 다음처럼 표시된다.

$$C = C_0 + \frac{C_0}{\ell_0}\alpha \quad (7)$$

여기서, $\alpha = \ell_1 - (\ell_0 + \Delta\ell)$ 로서 얻어지며, $\Delta\ell$ 은 스트레인 게이지를 시편에 부착시켜 변형율을 측정함으로써 구할 수 있다.

단, 금속 재료 내에서 음속의 응력에 의한 변화는 매우 작기 때문에, 통상의 주파수로는 음속의 변화를 구하는 것이 곤란하며, 10MHz 정도의 고주파의 초음파를 이용한다. 또한, 본 연구에서는 직접 제작한 가압기로 전파 방향과 수직인 방향으로 가압하면서 음속을 계속하였으므로, 센서를 임의로 부착시킬 수 있고 손상의 염려도 없으며, 계측의 오차도 줄일 수 있다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응력-음속 관계와 비선형 탄성계수와의 관계설명

응력-음속 데이터를 곡선 적합하기 위해서 우선 (4)식에 이 실험에서 사용한 실험 조건 $\sigma_x = \sigma_y = 0$ 을 대입하면 (4)식은

$$C = \left[\rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} (f_{22} - 2g_{222}\nu\sigma_z + 3h_{2222}\nu^2\sigma_z^2) \right]^{-1/2} \quad (8)$$

로 된다. 여기에 시편으로 사용된 재료 알루미늄 5052에 대한 물성치 $\nu=0.33$, $\rho=2.68 \text{ Mg/m}^3$ 을 대입하면 최종적으로 (9)식을 얻을 수 있다.

$$C = [1808.8f_{22} - 1193.8g_{222}\sigma_z + 590.9h_{2222}\sigma_z^2]^{-1/2} \quad (9)$$

이 관계식을 이용하여 g, h의 값을 Table 1과 같이 변화시켜 가며 C의 값이 어떻게 변하는지를 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 살펴본 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서, f는 12×10^{-12} 으로 고정된다.

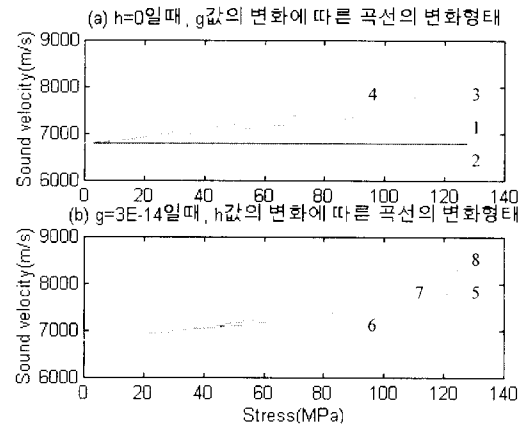


Fig. 4 Change of stress-sound velocity curve when f, g, h changes

(a)는 g의 값의 변화에 따른 C의 변화를 나타내며, (b)는 h의 값의 변화에 따른 C의 변화를 나타낸다.

Table 1 f, g, h by simulation

곡선	g	h
1	0	0
2	-3×10^{-14}	0
3	3×10^{-14}	0
4	4×10^{-14}	0
5	3×10^{-14}	0
6	3×10^{-14}	1×10^{-16}
7	3×10^{-14}	-1×10^{-16}
8	3×10^{-14}	-3×10^{-16}

(a)의 곡선 1은 $g=h=0$ 으로 놓고 한 경우로서 비선형 탄성효과를 무시한, 즉 선형탄성의 경우와 동일하며, 예상할 수 있듯이 직선으로 나타난다. 또한, (a)의 곡선3과 (b)의 곡선 5는 동일한 경우로서 비교의 편이를 위해서 삽입되었다. 이 결과를 보면 g 값은 응력-음속 곡선의 선형기울기에 관여하고 h 의 값은 곡률에 관여함을 알 수 있다.

5. 재료 변질에 따른 음속-응력관계에 대한 실험 및 고찰

5-1 알루미늄 시험편에 대한 실험 결과

시험편 길이가 $45 \times 45 \times 45$ mm인 정육면체 형상의 알루미늄으로 하였으며, 서로 다른 내부상태를 나타내기 위하여 정상상태의 A15052, 정상상태의 A12024, 100MPa로 가공 경화한 A15052, 350 °C로 열처리한 후의 A15052의 4가지 시험편을 준비하였다. 이하 부터는 편의상 각각 시험편 ①, ②, ③, ④라고 부른다. Fig. 5, 6, 7, 8은 각각의 시험편에 대하여, 실측한 음속-응력 관계이다.

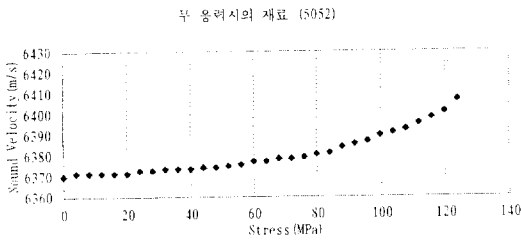


Fig. 5 Stress-Sound velocity relation of Specimen ①

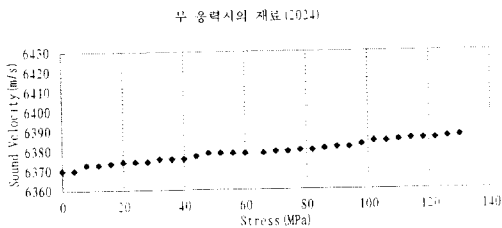


Fig. 6 Stress-Sound Velocity relation of Specimen ②

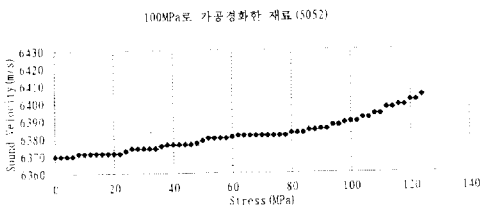


Fig. 7 Stress-Sound Velocity relation of Specimen ③

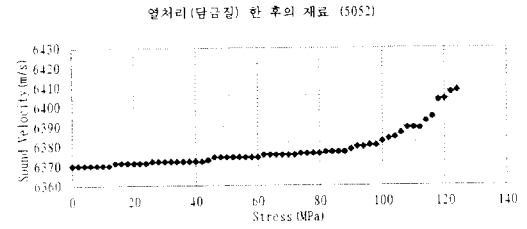


Fig. 8 Stress-Sound velocity relation of Specimen ④

5-2 실험 결과에 대한 고찰

응력-음속 데이터를 (10)식에 곡선 적합하여 f , g , h 를 구한 결과를 Table. 2에 나타내었다. 여기서, 응력-음속 곡선의 특성 상 선형 구간과 비선형 구간의 두 구간으로 표시했다. 참고적으로, 알루미늄 5052의 항복 응력은 90MPa이다.

Table. 1 Estimated value of f , g , h

		f ($\times 10^{-12}$)	g ($\times 10^{-17}$)	h ($\times 10^{-19}$)
Specimen ①	0- 80MPa	13.623	25.298	-115.42
	84- 124Mpa	13.56	-252.12	-559.82
Specimen ②	0- 124MPa	13.62	80.38	1.43
	Specimen ③	0- 78MPa	13.629	119.61
Specimen ③	80- 124Mpa	13.486	-468.11	-780.88
	Specimen ④	0- 80MPa	13.626	45.653
82- 124Mpa		12.929	-2330.5	-2756.58

먼저, f 의 값을 비교해 보면 대체적으로 유사하며, 이 결과로부터 선형탄성계수 만으로는 재료의 상태변화가 정확히 예측될 수 없음을 알 수 있다. 또한 각 재료의 선형 구간에 비하여 비선형 구간에서 g , h 의 값이 크게 나타났는데, 이것은 재료에 압력을 가한 경우 음속이 선형적으로 증가하다가 비선형적으로 증가한다는 것을 의미한다.

시험편 ①과 ②를 비교해 보면 ②의 경우는 항복 응력이 414MPa이고, 본 실험에서는 120MPa정도로 가압했으므로 아직 선형 구간에 있다고 생각할 수 있다. 따라서, g 의 값은 시험편 ①과 비슷하나 h 의 값은 거의 0에 가깝다. 즉, 4차 탄성 계수 h 의 영향

은 거의 받지 않음을 알 수 있다.

다음으로, 시편①과 ③을 비교하면, 시편③이 선형 구간에서 g 의 값이, 비선형 구간에서 h 의 값이 크므로 각 구간에서 기울기가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 재료를 한번 가공 경화했기 때문에 재료가 경화되어서 음속이 커짐을 의미한다.

또한, 시편 ①과 ④를 비교해 보면, g , h 의 값이 비선형 구간에서 매우 크게 변화했음을 알 수 있는데 이는 재료의 상태가 열처리에 의해서 크게 변화했음을 의미한다.

본 실험은 같은 조건에서 수개의 실험을 준비하여 시행하였으며 대부분 동일한 경향을 보였다. 이 결과로부터 g , h 의 값을 이용하여 재료의 상태변화를 평가할 수 있음을 충분히 예상할 수 있으며 더욱 많은 경우에 대한 실험이 필요로 된다고 사료된다.

6. 결론

- (1) 3차와 4차의 비선형 탄성계수를 이용하여 응력에 대한 음속의 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 5052시편에 대하여 실험한 결과 비선형 탄성계수가 재료의 기민한 성질변화를 민감하게 반영함을 확인할 수 있었다.

7. 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, "金屬材料および試験法", 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] 한용교, 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, pp 696-703.
- [8] E.A.Ashand and C.B.Schruby(Ed.), 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", John Wiley & Sons, Inc
- [13] 장경영, 佐藤拓栄, "비선형 탄성-음향 효과를 이용한 비선형 탄성 계수의 계측과 금속 재료의 특성 평가", 대한기계학회논문집 제 17권 제8호, 1971-1979, 1993