[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 26, No. 5 (2006. 10)

축대칭 고체내부의 단축 응력에 의한 초음파 복굴절 특성 연구

Study on Ultrasonic Birefringence by Uniaxial Stress in Axisymmetric Solids

김노유*,†, 장영철*

Nohyu Kim*,† and Young-chul Chang*

초 록 축대칭 단축 응력은 이론적으로는 초음파 응력측정 기술에서 가장 단순한 대상이지만 두 횡파를 이용하는 기존의 초음파 복굴절 응력측정 기술은 축대칭 구조에서 사용되기 어렵다. 또한 선형 음탄성 이론에 근거한 초음파 진행거리 시간 측정방법 역시 적용에 한계가 있는 경우가 많은데 그 이유는 초음파 길이(ultrasonic length)와 재료의 음탄성 특성을 정확히 알아야 한다는 점 때문이다. 본 논문에서는 축대칭 구조의 고체내부에 축 응력이 존재할 때 나타나는 초음파 복굴절 특성을 음탄성 이론을 이용하여 분석하였다. 이를 위해 서로 다른 편광특성을 가지는 두개의 초음파가 축 방향으로 입사될 때 만들어지는 속도 변화를 음탄성 이론식으로부터 결정하고 이를 이용하여 축 응력과 복굴절 특성의 관계를 유도한 후 이 결과를 간단한 인장 실험결과로부터 검증하였다.

주요용어: 복굴절 효과, 초음파 응력측정, 축대칭 구조, 단일 축 하중, 초음파 속도

Abstract Uniaxial stress in an axisymmetric body is the simplest example of ultrasonic stress measurement. However, the birefringence theory cannot be applied for axisymmetric solids because the axisymmetric stress field in the body does not make any velocity difference in SH waves propagating in the axisymmetric direction. Conventional ultrasonic technique using the time-of-flight method also needs ultrasonic lengths of the unstressed and stressed body, which is very impractical. In this paper, the birefringence effect in axisymmetric solids under uniaxial stress is formulated to evaluate the axial stress inside the solid without measuring the ultrasonic length. Theoretical derivation for the birefringence characteristics in the axisymmetric solids is made using the longitudinal and shear waves instead of two horizontally polarized shear waves. Tension test is conducted for carbon-steel specimen to measure the birefringence coefficient and investigate the validity of the theory. It is observed from experimental results that the velocity difference in two differently polarized acoustic waves is proportional to the uniaxial stress in the axisymmetric solid with a good agreement with the theoretical value.

Keywords: Birefringence Effect, Ultrasonic Stress Measurement, Axisymmetric Body, Uniaxial Stress, Ultrasonic Velocity

1. 서 론

봉재와 같은 실린더형 축대칭 고체내부에 발생하는 축 방향 응력은 초음파 응력측정 기술 중에서 가장 간단한 형태이지만 가장 중요한 대상중의 하나이기도 하다. 일반적으로 고체 내부의 (잔류) 응력을 측정하는 초음파 기술은 음탄성 이론상 1차원 응력은 물론 2차원 응력의 계측이 가능하다.

(접수일: 2006. 9. 11, 심사완료일: 2006. 10. 14) * 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부, † Corresponding author: School of Mechatronic Engineering, Korea University of Technology and Education, Chunan 330-860, (E-mail: nykim@kut.ac.kr)

하지만 응력에 대한 초음파 속도 변화가 매우 미미하고 정밀측정이 요구돼 아직까지 초음파를 이용한 응력측정은 1차원 축응력 측정에 머무르는 것이 현실이다.

초음파를 이용하여 축대칭 고체내부의 축 응력을 측정하는 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째 방법은 응력에 의해 발생하는 길이 변화(변형율)를 초음파의 비행시간(time-of-flight, TOF)를 이용하여 측정함으로서 재료 탄성 물성치로부터 축응력을 계산하는 방법이다. 두 번째는 연속 초음파를 고체의 주 응력방향을 따라 발생시켜 재료의 양단 사이에서 초음파를 공진시킴으로서 반복적인 반사 신호로부터 공진주파수를 측정하고 이로부터 재료의 늘어난 길이나 혹은 초음파 속도를 측정함으로서 응력을 계산하는 방법이 있다. 세 번째 방법은 주응력성분 중심축을 따라 서로 다른 편광 성질을 가지는 두개의 초음파의 속도 변화를 각각 측정하여 이 두개의 속도차로부터 축력을 계산하는 소위 초음파 복굴절(birefringence) 방법이 있다. 이 방법은 원래 평판형태의 재료 내에 발생하는 응력을 측정하기 위해 개발된 방법으로서 평면에 수직인 기하학적인 축에 이 축에 따라 진행하면서 그 편광특성이 서로 다른 두개의 횡파(SH waves) 초음파의 속도가 응력에 따라 변화하는 특성을 이용하는 방법이다[1,2]. 일반적인 초음파 복굴절 방법은 주로 평판 구조체로서 이방특성(anisotropy)을 가지는 재료에 대해 개발되어 이방성 재료의 비선형 거동을 분석하기 위해 사용되고 있다.

그러나 앞에서 언급된 세 가지 방법을 포함한 모든 초음파 응력측정 기술은 초음파 속도를 직접 측정하거나 그 영향을 고려해주어야 하기 때문에 매우 높은 정밀도의 계측방법과 계측기기가 필요하며 실제 그렇게 측정한다 하더라도 항복 응력 근처에서도 초음파 속도는 1% 정도밖에는 변하지 않기 때문에 측정결과의 오차는 매우 크다. 이러한 오차의 원인은 부정확한 재료물성 특성(음탄성)과 속도측정 에러인데 전자의 경우는 정확한 물성 데이터 베이스를 많은 재료에 대해 모두 확보하기 어렵기 때문이고 후자의 경우는 음속을 결정하기 위해서는 응력이 가해지기 전과 후의 초음파 길이, 즉 변형전후의 길이를 정밀 측정해야 하기 때문이다. 더구나 축대칭 구조의 고체 내부 응력을 측정하는 기존의 방법들의 문제점으로는 고체 내에 축방향 하중이 작용하면 발생 응력에 의해 재료의 길이도 변화하는 것은 물론 초음파의 속도도 변하기 때문에 이로 인한 오차를 보정하기 위해 보정식을 개발해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 1차원 축대칭 고체에 대한 복굴절 음탄성 특성을 이론적으로 해석하고 인장시험을 통해 그 결과를 비교, 분석하였다. 고체 변형전후에 길이를 측정하는 대신 서로 다른 두 초음파의 복굴절 음탄성 계수를 이용함으로서 축 응력의 영향을 정량적으로 결정할 수 있는 복굴절 음탄성 특성식을 이론적으로 유도하였다. 또한 이 특성을 축대칭 고체 시편에 대하여 실험적으로 관찰함으로서 그 유효성을 확인하였다.

2. 2차원 평면에서의 음탄성 특성

재료의 음탄성(acousto-elasticity)이란 광탄성(photo-elasticity)과 비슷한 상사(analogy)적 개념으로서 탄성 변형된 재료의 변형 방향에 평행 또는 수직인 편광특성을 가지는 탄성파(초음파)가 진행하면 그 속도가 변형크기에 따라 달라지는 현상을 의미한다. 음탄성 이론은 원래 1950년대 이방성 수정결정체의 3차 탄성계수(third order elastic constants or TOE)를 측정하기 위해 사용되었는데 그 중에서 복굴절(birefringence) 특성은 서로 다른 편광특성을 가지는 두 개의 초음파의 속도차이를 이용하여 응력을 산출해 내는 기법이다[3]. Fig. 1은 그 개념을 설명하고 있는데 평면응력 상태의 측정 대상체가 2차원 좌표 상에 놓여 있고 그 위에 주응력 σ_1과 σ_2이 작용하고 있는 상태에서 다른 편광방향(polarization direction)을 가지는 두 개의 초음파가 진행하는 모습을 나타내고 있다. 이 평판에 두개의 편광 초음파가 x_1, x_2 축을 따라 전파되고 있다고 가정하자. 이 때 이방성재료이거나 소성변형을 포함한 비선형 변형의 경우 다음과 같은 2차 탄성계수(second order elastic constant, SOE) 및 3차 탄성계수(third order elastic constants, TOE)에 의해 표현된다[4].

$$\sigma_{ij} = C_{ij\alpha\beta}\epsilon_{\alpha\beta} + C_{ij\alpha\beta pq}\epsilon_{\alpha\beta}\epsilon_{pq}\,, \quad i,j,\alpha,\beta = 1,2,3 \tag{1}$$

그런데 등방성 재료에 대해서는 SOE와 TOE가 다음과 같이 비교적 간단한 관계식으로 표시될 수 있다.

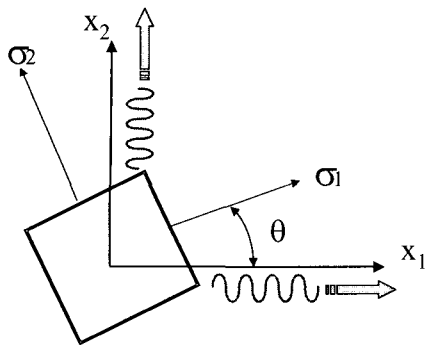

Fig. 1 Ultrasonic wave propagation in 2-dimensional plane stress state

$$
\begin{aligned}
C_{ij\alpha\beta} &= \lambda\delta_{ij}\delta_{\alpha\beta} + \mu\left(\delta_{i\beta}\delta_{j\alpha} + \delta_{i\alpha}\delta_{j\beta}\right) \\
C_{ij\alpha\beta pq} &= l\delta_{ij}\delta_{\alpha\beta}\delta_{pq} + m\left[\delta_{ij}\left(\delta_{\alpha p}\delta_{\beta q} + \delta_{i\alpha}\delta_{\beta p}\right)\right. \\
&\quad + \delta_{\alpha\beta}\left(\delta_{ip}\delta_{jq} + \delta_{iq}\delta_{jp}\right) \\
&\quad \left. + \delta_{pq}\left(\delta_{i\alpha}\delta_{j\beta} + \delta_{i\beta}\delta_{j\alpha}\right)\right] \\
&\quad + n\left[\delta_{i\alpha}\left(\delta_{jp}\delta_{\beta q} + \delta_{jq}\delta_{\beta p}\right)\right. \\
&\quad + \delta_{j\beta}\left(\delta_{ip}\delta_{\alpha q} + \delta_{iq}\delta_{\alpha p}\right) \\
&\quad + \delta_{i\beta}\left(\delta_{jp}\delta_{\alpha q} + \delta_{jq}\delta_{\alpha p}\right) \\
&\quad \left. + \delta_{j\alpha}\left(\delta_{ip}\delta_{\beta q} + \delta_{iq}\delta_{\beta p}\right)\right]
\end{aligned} \tag{2}
$$

여기서, λ, μ는 Lame 상수이고 l,m,n는 3차 Murnaghan 상수들[5]이다. 이와 함께 변형율-변위의 관계식 및 운동방정식을 도입하고 그 해를 조화운동을 하는 1차원 파동(i방향)이라고 가정하면 그 연립방정식의 결과는 미지의 변위와 그에 상응하는 위상속도에 대한 연립방정식인 Christoffel 방정식 형태로 결정된다. 본 연구에서 고려하는 축대칭 고체가 약한 이방성재료라고 가정하고 일정 방향(x_1 방향)으로의 단축응력(unidirectional stress)상태라면, 즉 $\sigma_{11}=\sigma_1, \sigma_{22}=0$이라면 이 Christoffel 방정식은 x_1축 방향의 초음파 속도 v_{11}(축방향 1로 진행하는 종파)과 변형율(혹은 응력)사이의 다음과 같은 관계식으로 표현된다[5].

$$
\begin{aligned}
\rho v_{11}^2 &= \lambda + 2\mu - \epsilon_1(7\lambda + 14\mu - 6l) \\
&\quad - 2\nu\epsilon_1(3\lambda - 6l - 2m)
\end{aligned} \tag{3}
$$

1차원 응력 상태를 가정하였으므로 $\sigma_1 = E\epsilon_1$ (E: Young's modulus)로부터 속도 v_{11}를 표현하면 다음과 같다[5].

$$
\begin{aligned}
\rho v_{11}^2 &= \lambda + 2\mu - \frac{\sigma_1}{E}\left[(7\lambda + 14\mu - 6l)\right. \\
&\quad \left. - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)\right]
\end{aligned} \tag{4}
$$

또한 이러한 x_1방향으로 진행하는 횡파 v_{12}(수직방향 2로 진동하며 축방향 1으로 전파)와 종파 v_{22}(축단면 방향 2로 진동하며 축단면 방향 2으로 진행)는 같은 방법으로 다음처럼 주어진다.

$$
\begin{aligned}
\rho v_{12}^2 = \rho v_{21}^2 &= \mu - \frac{\sigma_1}{E}\left[(\lambda + 2\mu - \frac{m}{2})\right. \\
&\quad \left. - \nu(2\lambda + 4\mu + m + \frac{n}{2})\right] \\
\rho v_{22}^2 &= \lambda + 2\mu - \frac{\sigma_1}{E}\left[(3\lambda - 2m - 6l)\right. \\
&\quad \left. - 2\nu(5\lambda + 7\mu - 6l - m)\right]
\end{aligned} \tag{5}
$$

위의 식 (4)와 (5)는 1차원 평면 응력 상태에서의 초음파 음속에 대한 비선형 음탄성 지배방정식이 된다.

3. 축대칭 실린더 구조에서의 복굴절 특성

Fig. 2에서 보여주는 바와 같은 실린더 구조의 축대칭 고체에 대해 축 방향으로 균일한 응력이 단면에 작용하고 있는 상태를 고려하자. 그리고 고체의 반경이 초음파 파장에 비해 매우 크고 반경방향으로의 응력변화를 무시할 수 있다고 가정하면 축 방향으로 발생 가능한 초음파의 편광특성(polarization)은 두 종류로서 앞장에서의 2차원 음탄성 특성과 매우 흡사하다. 그러나 앞장에서의 경우가 x_1 방향으로 진행하는 두 종류의 횡파라면 이 경우는 x_1 방향으로의 종파와 횡파이다.

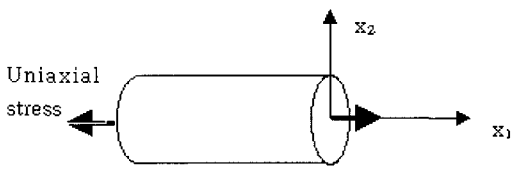

Fig. 2 Polarization direction of ultrasound in an axi-symmetric cylinder under uniaxial stress

3.1. 비선형 음탄성 특성의 선형화

앞장의 식 (4)를 속도에 대한 식으로 표현하면 다음처럼 나타내 질 수 있는데 이 때 β는 3차 탄성계수와 2차 탄성계수로 이루어진 음탄성 계수이

다. 즉,

$$v_{11}^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}(1 - \beta\sigma_1) \tag{6}$$

여기서

$$\beta = \frac{1}{E(\lambda + 2\mu)}[(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)]$$

식 (6)에서 우변의 첫 항은 비선형성이 없는 무한 탄성체에 대한 음속(종파)의 표현식이므로 이를 $V_0 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho}$라고 표현하고 $v_{11}^2 = V^2$라고 다시 쓰면 비선형 음탄성 계수 β가 작을 때, 즉 $\beta\sigma_1 \ll 1$, 위식은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$V^2 = V_0^2(1 - \beta\sigma_1) \text{ or}$$
$$V = V_0\sqrt{1 - \beta\sigma_1} \approx V_0(1 - \frac{1}{2}\beta\sigma_1) \tag{7}$$

마찬가지로 횡파에 대한 응력과 속도와의 선형화된 관계식은 다음처럼 표시될 수 있다.

$$v_{12}^2 = \frac{\mu}{\rho}(1 - \alpha\sigma_1) \text{ or}$$
$$v_{12} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}(1 - \frac{1}{2}\alpha\sigma_1) \text{ for small } \alpha\sigma_1 \tag{8}$$

where
$$\alpha = \frac{1}{\mu E}[(\lambda + 2\mu + \frac{m}{2}) - \nu(2\lambda + 4\mu + m + \frac{n}{2})]$$

식 (7)과 (8)은 음파속도와 응력과의 관계를 이론적으로 설명하는 식으로서, β가 양인 경우 인장응력이 작용할 때 초음파 전파속도는 감소하고 압축응력이 작용할 때 증가할 것으로 예상할 수 있다. 여기서 응력과 음속의 비례 상수인 파라미터 β는 재료의 SOE와 TOE로 구성되는 일정한 값을 가지기 때문에 식 (7)의 관계로부터 응력은 다음과 같이 초음파 전파속도의 변화율에 의해 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{2}{\beta}\frac{V_0 - V}{V_0} \tag{9}$$

3.2. 축대칭 실린더에서의 복굴절 특성 및 계수 결정

앞 절의 식 (7) 또는 (9)는 한 종류의 편광특성을 가지는 초음파를 사용하여 응력을 구할 수 있는 음탄성 식인데 응력이 가해지지 않은 상태에서의 음속(또는 TOF)을 측정하고 다시 응력이 가해진 후의 고체내 음속을 측정하는 방법이다. 이 두 음속을 측정하기 위해서는 응력이 가해지기 전후의 변형길이의 변화를 정확히 측정할 수 있어야 하기 때문에 현실적으로 제약이 따르는 경우가 많고 오차도 크게 발생할 수 있다. 이러한 점을 개선하기 위해서 두 종류의 편광특성을 가지는 서로 다른 두개의 초음파의 속도 차이를 이용하면 제약이나 오차를 부분적으로 개선할 수 있다. 이러한 복굴절 효과는 축대칭 고체 내에서 복굴절 계수로서 표현되는데 그것은 다음과 같이 정의될 수 있다[4,5].

$$B = \frac{t_S - t_L}{t_S + t_L}, \quad B_0 = \frac{t_{0S} - t_{0L}}{t_{0S} + t_{0L}} \tag{10}$$

여기서 t_L은 종파의 거리 비행시간(TOF)이고 t_s는 횡파의 거리 비행시간이며 아래첨자 0은 응력이 없는 상태에 대한 첨자이다. 이렇게 정의된 계수들로부터 선형화된 음탄성 관계식은 축 응력 σ_1에 대해 다음처럼 간단히 표시할 수 있다[5].

$$B - B_0 = M \cdot \sigma_1 \tag{11}$$

여기서, 비례상수 M은 재료 고유의 물성 값으로서 다음 장에서 이론적으로 유도될 계수이다. 그러므로 실험적으로 M값을 측정하거나 미리 알 경우 같은 재료에 대해 초음파의 복굴절 계수차 $B - B_0$를 측정하면 응력을 결정할 수 있다.

식 (11)을 유도하기 위해 식 (7)과 (8)로부터 종파속도(v_{11}, 횡파 속도v_{12}, 그리고 응력을 편의상 $V_L = v_{11}$, $V_T = v_{12}$, $\sigma = \sigma_1$로 바꾸어 표시한 후 식 (10)에서 정의되었던 복굴절 계수 B를 V_L과 V_T의 정의와 t_L 및 t_S의 관계로부터 다시 쓰면 다음과 같이 표현된다.

$$B = \frac{t_S - t_L}{t_S + t_L}$$
$$= \frac{\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}(1 - \frac{1}{2}\beta\sigma_1) - \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}(1 - \frac{1}{2}\alpha\sigma_1)}{\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}(1 - \frac{1}{2}\beta\sigma_1) + \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}(1 - \frac{1}{2}\alpha\sigma_1)} \tag{12}$$
$$= \frac{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} - \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}) - \frac{1}{2}(\beta\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} - \alpha\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})\sigma_1}{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} + \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}) - \frac{1}{2}(\beta\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} + \alpha\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})\sigma_1}$$

그런데 위식의 우항을 $\alpha,\beta \ll 1$ 인 경우에 대해 근사하여 정리하면

$$B = \frac{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}-\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})}{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}+\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})} + \sigma \cdot \frac{\beta(\frac{\lambda+2\mu}{\rho})-\alpha(\frac{\mu}{\rho})}{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}+\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})^2} \quad (13)$$

이 식으로부터 응력이 가해지지 않은 경우, 즉 $\sigma=0$ 일 경우의 B값은 B_0가 되므로 실제 정의와 일치한다. 즉,

$$B = \frac{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}-\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})}{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}+\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})} = \frac{t_{0S}-t_{0L}}{t_{0S}+t_{0L}} = B_0 \quad (14)$$

식 (14)에서 $\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} = V_{0L}$이며 $\sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = V_{0T}$로서 $\sigma=0$ 인 재료의 종파와 횡파 속도를 나타낸다. 그리고 식 (11)과 식 (13), (14)의 비교로부터 음탄성 비례상수 M도 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$B_0 = \frac{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}-\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})}{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}+\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})}, \quad M = \frac{\beta(\frac{\lambda+2\mu}{\rho})-\alpha(\frac{\mu}{\rho})}{(\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}+\sqrt{\frac{\mu}{\rho}})^2} \quad (15)$$

결국 2차, 3차 탄성계수를 실험적으로 결정하거나 이미 알려진 경우 식 (13)과 식 (15)는 1차원 단축응력 σ와 복굴절 계수간의 관계를 나타내는 선형 음탄성 특성식이다.

4. 복굴절 계수의 평가

앞장에서 유도된 특성식은 축응력과 복굴절 계수간의 관계를 나타내는 식인데 그 정량적 특성을 조사하기 위해 물성값 B_0와 M값을 탄소강에 대해서 계산하였다. 사용된 입력값을 Table 1에 나타내었는데 3차 탄성계수는 상대적으로 작다고 가정하여 무시하고 2차 탄성계수 값만을 가지고 계산하였다. Table 2는 그 계산된 결과이다. 계산 결과를 보면 복굴절 특성 계수인 M값이 0.01172 GPa^{-1}로서 재료의 항복응력을 900 MPa로 가정할 때 대략 복굴절 계수값의 변화는 약 0.01 정도인 것을 알 수 있는데 B_0가 1보다 작은 값이므로 항복응력 부근에서 복굴절 계수값의 변화는 1%를 약간 상회하는 것으로 판단된다. 그러므로 복굴절 계수의 작은 변화를 측정하기 위해서는 전통적인 방법과 마찬가지로 초음파의 속도 혹은 TOF를 정확히 측정할 필요가 있지만 이 방법은 한 종류의 초음파만을 이용하는 식 (9)에 비해 오차에 상대적으로 작다. 그 이유는 식 (9)에서는 응력에 의한 변형 전과 후의 속도 차(혹은 TOF차)를 계산하는데 반해 복굴절 방법에서는 그렇지 않기 때문이다.

5. 복굴절 계수 측정 실험

실험에서 사용된 축대칭 실린더 재질(봉재)은 탄소강을 사용하였는데 길이는 약 134 mm이고 직경은 ϕ20 mm로서 인장 시험기를 이용하여 축응력을 부가하였다. Fig. 3은 복굴절 계수 B를 측정하기 위해 사용된 실험 장치의 구성을 설명하고 있는데 스트레인 게이지가 부착된 재료를 지그에 장착한 후 10 ton 용량의 인장시험기(Shimadzu)에서 인장력을 가하면서 초음파 센서로부터 발생하는 종파와 횡파의 왕복 시간차를 각각 측정하여 복굴절 계수값을 산출하였다. 사용된 초음파는 종파의 경우 Panametrics 사의 A125S 2.25 MHz, 직경이 0.375인치의 종파 탐촉자를 사용하였으며, 횡파는 Panametrics 사의 V154 2.25 MHz, 직경이 0.5인치 탐촉자를 사용하였다. 시험편에 응력이 증가함에 따른 복굴절 계수의 변화를 모니터링 하기 위하여 게이지 저항이 120Ω인 스트레인게이지를 부착하여 인장력과 스트레인 값을 초음파와 함께 측정하였다.

초음파의 왕복시간 측정방법은 인장 시험기를 이용하여 재료에 하중을 0에서 2000 kgf 까지 100 kgf 씩 증가시키면서 각 지점에서 오실로스코프 상에 나타나는 종파와 횡파의 반사 신호가 최대값을 가지는 두 지점에서의 시간을 측정하는 방법을 사용하였으며 이 과정을 3번 반복측정 결과를 평균하여 최종결과 값으로 결정하였다. 사용된 탄소강의 항복강도가 대체적으로 800-900 MPa인 점을 고려하여 항복강도의 10%정도까지 인장 응력을 증가시키

었다. 재료의 한쪽 끝단은 인장시험기에 고정하고 다른 한쪽은 초음파 센서를 접근시킬 수 있도록 Fig. 3에서와 같은 지그를 통해 인장하중을 주었다.

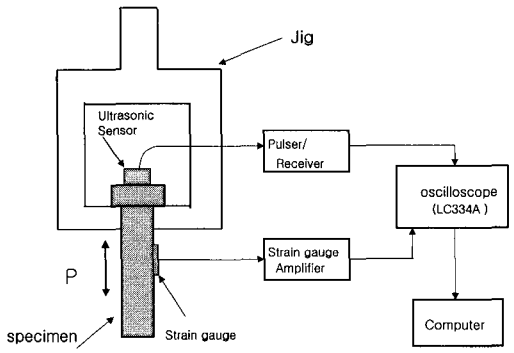

Fig. 3 Configuration of experimental system for birefringence measurement

Table 1 Acousto-elastic properties of Carbon-steel

시편	E(영률)	λ	μ	ν (프아송비)	ρ(밀도)
탄소강	206.8GPa	110GPa	80GPa	0.288	7.85Mg/m^3

Table 2 Estimated values of B_0 and M

재료	α	β	B_0	M
탄소강	0.00692GPa^{-1}	0.030GPa^{-1}	0.7049	0.01172GPa^{-1}

6. 실험 결과

Fig. 4는 본 연구에서 유도된 식을 이용하여 종파와 횡파의 속도 차이로부터 복굴절 계수를 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 수직 축은 응력이 작용하였을 때의 복굴절 계수 B와 재료에 응력이 작용하지 않았을 때의 초기 복굴절 계수 B_0의 차이를 표시하며 수평축은 축 응력의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4에서 데이터와 같이 표시된 직선그래프는 초음파의 종파와 횡파의 진행시간 차이로 측정한 결과를 최소자승법에 의해 선형으로 곡선맞춤(curve-fitting)하여 나타낸 것인데 이 비례상수는 식 (11)과 (15)에서 정의된 음향탄성계수 M을 나타낸다. 이 그래프로부터 응력이 증가함에 따라 복굴절 계수가 선형적인 증가를 보이는 것을 확인할 수 있으며 실험 결과로부터 측정된 M값이 0.01187GPa^{-1}인데 반해 Table 2에서 이론적으로 계산된 M값이 0.01172GPa^{-1}이므로 이론값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 축 응력이 가해지지 않았을 때의 종파와 횡파의 음속을 직접 측정하여 B_0값을 구하였는데 그 결과가 Table 3에 나타나 있다. 실험에서 B_0값은 0.6722로 측정되었지만 앞에서 산출된 이론값은 0.7049로서 약간의 차이가 나는데 그것은 실제 재료의 물성치가 가공중의 단조나 열처리등으로 변할 수 있으며 시험재료가 벌크재료가 아닌 특정형상을 가지는 실린더형 재료로부터 발생하는 오차라고 판단된다. 이 차이가 약 5%이기는 하나 이 오차는 전체적인 음탄성식에 지대한 영향을 준다고 할 수 있으므로 이 값의 정밀한 측정이 매우 중요하다고 하겠다. Fig. 5는 Fig. 4에서 사용된 시편과는 동일한 재질이지만 길이가 조금 다른 재료(114 mm)에 대해 측정된 복굴절 특성을 보여주고 있는 그래프이다. Fig. 5는 길이가 다르더라도 같은 재료에 대해서는 음탄성 특성(birefringence)이 거의 비슷함을 보여주고 있다. 이 시험에서는 인장 응력이 낮은 영역에서 오차가 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 초음파 TOF측정 에러와 함께 재료의 3차원 변형특성에 따라 음속측정 에러가 증폭된 것으로 추측된다.

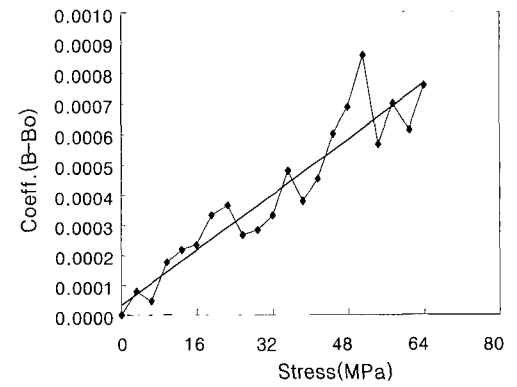

Fig. 4 Variation of birefringence coefficient by uniaxial stress

Table 3 Measured acoustic velocities and birefringence coefficient B_0 for $\sigma = 0$

실험재료	종파속도	횡파속도	속도비	복굴절 계수(B_0)
탄소강	5899m/sec	3240m/sec	0.549	0.67227

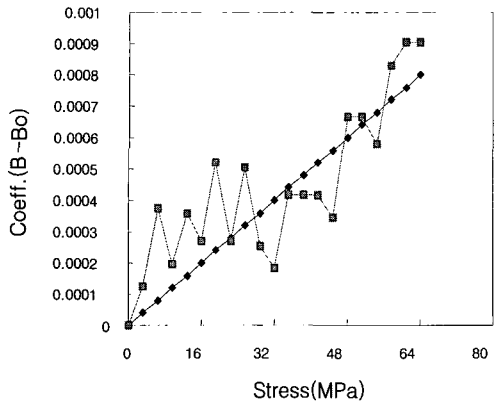

Fig. 5 Linear variation of birefringence coefficient in axisymmetric solid by uniaxial stress

7. 결 론

본 논문에서는 단일 축 응력이 작용하는 축대칭 구조의 재료에 대해 초음파 복굴절 특성을 이론적으로 해석하고 이를 실험적으로 확인하였다. 2차 및 3차 탄성계수를 도입한 비선형 음탄성 이론으로부터 축응력에 의해 발생하는 종파 초음파와 횡파 초음파 속도의 변화를 계산하였고, 복굴절 계수를 이용하여 축응력을 표현하는 음탄성 특성식을 유도하였다. 선형화된 음탄성식으로부터 종파와 횡파 초음파의 속도차가 응력에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 이것을 간단한 인장시험으로부터 실험적으로 검증하였다. 응력에 따라 변화하는 재료의 변형길이를 실험적으로 측정하는 대신 두 종류의 편광특성을 가지는 초음파의 거리 비행시간을 측정하여 재료의 음탄성 특성을 결정하였다. 실험으로부터 선형 음탄성 계수는 2차 탄성계수 값들만으로도 이론과 잘 일치하였으나 무응력 상태에서의 초기 복굴절 계수 값, 즉 B_0 값은 5%정도의 오차를 나타내었다. 이것은 재료자체의 부정확한 물성값 자체의 문제이기도 하지만 실린더형상에 의한 경계조건의 차이와 재료 성형등에 수반하는 탄성 물성의 변화 때문으로 판단되기 때문에 축대칭 재료의 음탄성 특성에서는 이러한 영향이 고려되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 전력연구 개발사업(KESRI, R-2005-B-124)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] G. Blessing, N. Hsu and T. Proctor, "Ultrasonic shear wave measurement of known residual stress in Aluminum," Exp. Mech., pp. 218-222, (1984)

[2] N. Ye. Nikitina, L. A. Ostrovsky, "An ultrasonic method for measuring stresses in engineering materials," Ultrasonic 35, pp. 605-610, (1998)

[3] D.I. Crecraft, "The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves," J. Sound & Vib., 5(1), pp. 173-192, (1967)

[4] A.V Clark, R.B. Mignogia and R.I. Sanford, "Acousto-elastic measurement of stress and stress intensity factors around crack tips," Ultrasonics, Vol. 21, pp. 57--64, (1983)

[5] A.V Clark and R.B. Mignogia, "A comparison of two theories of acoustoelasticity," Ultrasonics, Vol. 23, pp. 217--225, (1983)