1998년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제 17 권 제 2(s) 호

초음파현미경을 이용한 잔류 응력 측정
Residual stress measurement using acoustic microscope

김 현*, 고 대식**, 전 계석*
Hyun Kim*, Deasik Ko, Kyesuk Jun*

* 경희대학교 전자공학과
** 목원대학교 전자공학과
* Dept. of Electronic. Engineering Kyunghee Univ.
** Dept. of Electronic. Engineering Mokwon Univ.

In this paper, we have studied measurement technique for inhomogeneous residual stress using acoustic microscopy with quadrature detector. In experiment, aluminum tensile specimen with the flaw has been made and loaded by Instrone. A spherical typed acoustic transducer of center frequency 5MHz has been used for sending a longitudinal acoustic wave into a stressed specimen. It has been shown in experimental results that the phase has largely changed around the flaw that residual stress has been largely distributed and acoustic microscopy has been used in the field of residual stress measurement.

Ⅰ.서 론

고체에 외부로부터 물리적인 힘이 가해졌을 경우 그 물체의 내구력과 파괴의 주된 원인의 결함이며 이러한 결함이 고체에 미치는 영향을 알아보기 위하여는 고체내의 분포되어 있는 잔류응력을 분석하여야 한다. R.T.Smith[2,3]등은 고체 상태에 따른 음향파의 속도변화를 주로 연구하였으며, 1979년 G.S.Kino[5,6]등은 잔류응력분포를 구하는데 속도변화를 보다 정확히 측정하기 위하여 초음파의 double pulse-echo 기술을 이용하여 고체내에 존재하는 잔류응력을 비파괴적으로 측정하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 초음파현미경을 이용하여 이러한 잔류응력을 비파괴적으로 측정하는 방법을 연구하였다. 이를 위하여, 인장 응력을 가한 결함이 존재하는 고체에 초음파를 입사시켰을 때 고체표면과 배면에서 반사되어오는 신호의 왕복주행시간을 가지고 위상 변화를 구하여 잔류응력을 결정한다. 본 실험에서는 알루미늄 시편에 원통형 결함을 만들고 Instrone에 의하여 인장응력을 가하여 인위적으로 잔류응력을 형성한다. 실험을 위하여 중심주파수가 5㎒인 초음파변환기를 사용하여 퀴드러춰 검출방식의 초음파현미경을 구성하였다.

Ⅱ. 응력에 의한 음향파의 속도변화

음향파의 속도는 고체내에 존재하는 응력에 의해 영향을 받으며, 따라서 응력분포에 따라 음향파의 속도가 달라진다. 고체내에 존재하는 평면응력에 대한 종파속도 V_p는 다음과 같다.

$$V_p = V_{po} + V_{po}\left[\frac{\mu\{-\lambda(m+\lambda+2\mu)}{\mu(\lambda+2\mu)(3\lambda+2\mu)}\right](\sigma_x+\sigma_y) \quad (1)$$

여기에서, λ와 μ는 Lamé 상수, l, m은 Murnaghan 상수를 나타낸다. 또한 V_{po}는 초기상태에서의 종파속도를 나타내며, 변형전 물질의 밀도를 ρ_0라 할 때 다음같이 표현되어진다.

$$V_{po}=[\frac{\lambda+2\mu}{\rho_0}]\nu_2 \qquad (2)$$

식 (1)에서 종파속도의 변화량을 구하면 식(3)과 같이 두 개의 응력항 σ_x, σ_y의 합에 비례함을 알 수 있다. 식(3)에서 C를 물질상수라 한다.

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{V_p-V_{po}}{V_{po}} = C(\sigma_x+\sigma_y) \qquad (3)$$

$$C=\frac{\mu l-\lambda(m+\lambda+2\mu)}{\mu(\lambda+2\mu)(3\lambda+2\mu)} \qquad (4)$$

고체내부로 전달되는 음향파의 위상은 주파수, 속도, 두께에 따라 변화된다. 평면 고체내에 입사되는 음향파의 왕복주행시간 T는 다음과 같다.

$$T=\frac{2h}{V} \qquad (5)$$

여기에서 h는 두께, V는 음향파 속도를 나타낸다. 고체의 표면과 배면에서 반사된 신호 사이의 위상차는 식(6)와 같이 표현된다.

$$\phi=\omega T \qquad (6)$$

식(5)을 식(6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\phi=\frac{2\omega h}{V} \qquad (7)$$

식(7)에서 ϕ의 변화량을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta\phi=\frac{2h}{V}\Delta\omega+\frac{2\omega}{V}\Delta h-\frac{2\omega h}{V^2}\Delta V \qquad (8)$$

$\phi=2\omega h/V$에 의해 위의 방정식을 나누면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\phi}{\phi}=\frac{\Delta\omega}{\omega}+\frac{\Delta h}{h}-\frac{\Delta V}{V} \qquad (9)$$

식(9)에서 두께의 상대적 변화는 고체의 plane stress를 고려할 경우, 응력의 항을 포함하는 법선 strain ϵ_z로서 나타내며 식(10) 같다.

$$\epsilon_z=\frac{-\lambda}{2\mu(3\lambda+2\mu)}(\sigma_x+\sigma_y) \qquad (10)$$

식(9)에서 주파수의 변화가 없다고 가정하면 이며, 식(9)은 식(11)와 같이 정의된다.

$$\frac{\Delta\phi}{\phi}=\frac{\Delta V}{V}-\epsilon_z \qquad (11)$$

식(3)와 식(10)을 식(12)에 대입하여 풀면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\phi}{\phi}=-\frac{\Delta T}{T}=P(\sigma_x+\sigma_y) \qquad (12)$$

식(13)에서 P는 다음 식으로 표현되어 진다.

$$P=\frac{\mu l-\lambda(m+\lambda+2\mu)}{\mu(\lambda+2\mu)(3\lambda+2\mu)}+\frac{\lambda}{2\mu(3\lambda+2\mu)} \qquad (13)$$

식(13)에서 물질상수 P는 물질특성을 나타내는 상수값이며 위상의 상대적인 변화를 측정하므로써, 각 지점에서의 응력을 구할 수 있다.

III. 실험 및 고찰

본 실험에서는 초음파에 의한 고체내의 잔류응력을 측정하기 위하여 중심주파수 5MHz, 비대역폭 40%인 구면형 변환기를 사용하여 초음파현미경을 구성하였다. 시편 표면과 배면에서 반사되어 돌아오는 신호의 시간변화를 측정하기 위하여 그림1과 같은 장치를 구성하였으며, 고체내의 응력분포를 500㎛으로 변환기를 스캐닝하여 구하였다.

그림1은 본 실험의 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 인장실험은 인장실험기기인 Instrone을 이용하여 행하여졌으며, 각 시편에 가해진 응력값은 chart에 그려진 선의 눈금을 읽어 계산하였고, 인장실험시의 cross head 속도는 5mm/min으로 하

였다. 시편은 알루미늄 6061-T6를 선택하여 두께 6.26mm, 폭 25mm(KS규격 5호)로 제작하였으며, 시편에 지름11.5mm인 원통형 결함(hole)을 형성하여 0.169GP$_a$의 인장응력을 가하였다. 그림2는 실험에 사용된 시편을 도식적으로 나타낸 경우이다.

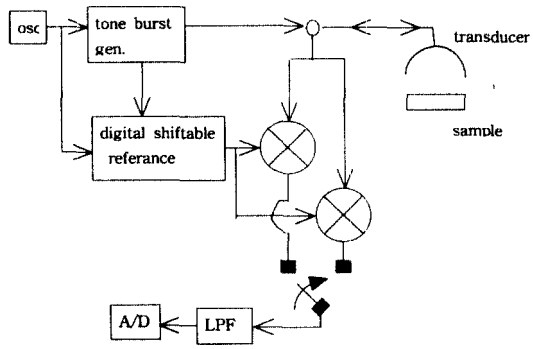

그림 1. 실험을 위한 초음파현미경의 블록선도

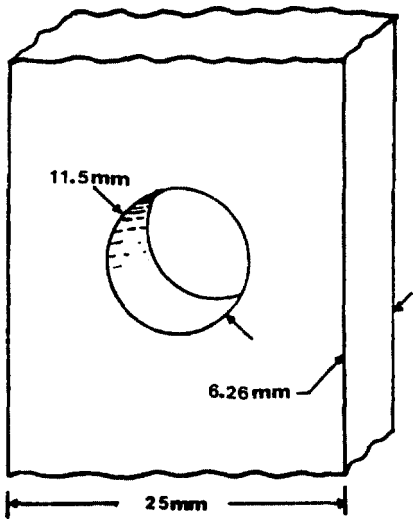

그림 2. 실험에 사용된 시편 도식도

그림 3은 그림 2의 시편에 대한 표면과 배면 신호의 상대적인 위상차를 이용하여 얻어진 영상으로 영상의 픽셀간의 간격은 500㎛이며 영상의 이미지 필드는 60×60으로 하여 얻었다. 이때의 등고선은 영상에서 동위상변을 연결한 것으로서 인장응력에 대해서 원통결함 부변이 밀도가 가장 크게 나타남을 볼 수 있다.

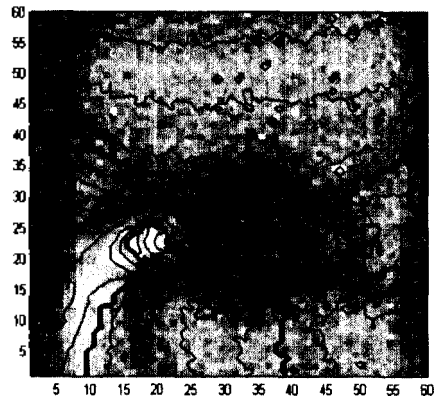

그림 3. 잔류응력 분포도

Ⅳ 결론

본 연구에서는 결함이 존재하는 고체내의 잔류응력을 위상 측정이 가능한 쿼드러춰 검출기를 사용한 초음파현미경을 사용하여 측정하는 방법을 연구하였다. 이러한 응력의 분포검출은 시편의 표면과 배면에서 반사되어 돌아오는 신호의 상대적인 위상차와 관계되며 이를 측정하여 응력분포를 얻을 수 있었다.

잔류응력을 측정한 결과, 그림3에서 볼 수 있듯이 잔류응력분포는 원통형 결함주의에서 많이 분포하였고 특히 면적이 적은 곳에서 위상변화가 급격히 변화하고 있으며 따라서 가장 취약한 곳임을 예측할 수 있었다.

앞으로 다양한 결함형태에 대한 응력분석과 그로인한 고체상태의 평가에 관한 연구를 거듭하므로써 금속 및 재료공학분야에 많은 활용이 기대된다.

본 연구는 목원대학교 전자공학과에서 지원된 장비를 활용하여 얻어진 연구결과입니다.

참고문헌

[1] D.M.Egle, and D.E.Bary, "Measurement of Acoustoelastic and Third Order Elastic Constants for Rail Stress", J. Acoust. Soc. Am., vol.60, No3, September 1976, pp.741~744.

[2]H.J.McSkimin, and P.Andreatch, "Measurements of Very Small Changes in the Velocity of

Ultrasonic waves in Solids", j. Acoust. Soc. Am., Vol.41, No.4, 1967, pp.1052~1057
[3] R.T.Smith, R.Stern, and R.W.B.Stephens, "Third-Order Elastic Moduli of Polycrystalline Metals from Ultrasonic Velocity Measurements", J. Acoust. Soc. Am., Vol.40, No.5, 1966, pp.1002~1008
[4] D.S.Hughes and J.L.Kelly, "Second-Order Elastic Deformation of Solids", Physical Review., Vol.92, No.5, December, 1953, pp.1145~1149
[5] G.S.Kino, J.B.Hunter, G.C.Johnson, A.R.Selfridge, D.M.Barnett, G.Hermann, and C.R.Steele, "Acoustoelastic imaging of stress fields", J. Appl. Phys., Vol.50, No.4, April 1979, pp.2607~2613
[6] G.S.Kino, D.M.Barnett, N.Grayeli, G.Herrmann, J.B.Hunter, B.Ilic, G.C.Johnson, R.B.ing, M.P.Scott, J.C. Shyne, and C.R.Steele, "Acoustic Measurements of Stress fields and Microstructure", J.Nondestructive Evaluation, Vol.1, No.1, 1980, pp.67~77
[7] K.Salama, G.C.Barber and N.Chandrasekaran, "Measurement of Residual Stress Using the Temperature Dependence of Ultrasonic Velocity", Ultrasonics Symposium, 1982, pp.877~884
[8] R.B.King and C.M.Fortunko, "Evaluation of Residual states of stress and Material Texture Using Ultrasonic Velocity Measurements with Electromagnetic Acoustic Transducers", Ultrasonics Symposium, 1982, pp885~888