

음탄성에 의한 비파괴적 잔류응력 측정

박익근 · 이철구

Measurement of Nondestructive Residual Stress by Acoustoelasticity

I. K. Park and C. K. Lee



박 익근/서울산업대학교
/기계공학과/비파괴평
가기술연구소/1958/비
파괴평가/초음파비파괴
평가기술



이 철구/서울산업대학교
/기계공학과/1949/고
상용접/용접공정기술

1. 개 요

국내에 건설되어 거의 20~30년 가동되고 있는 발전설비, 석유화학 플랜트 등 거대설비 기기의 건전성(integrity) 및 신뢰성 확보와 잔존수명 예측을 위해서는 구조물 내부 또는 표층부에 존재하는 결함의 특성을 아는 것과 함께 그 재료의 특정 부위에 어느 정도의 응력이나 변형이 있는가를 아는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 강 용접부의 비파괴적 결함검출에는 주로 SV파(vertically shear wave)와 SH파(horizontally shear wave)라 불리는 횡파를 이용한 초음파사각탐상법이 실용화되어 이용되고 있다. 그러나 비파괴적인 방법에 의한 실험적인 잔류응력 측정, 변형해석법에는 전기저항 및 자기 스트레인게이지법, X선회절법, 광탄성법(photoelasticity), 모아레(Mohr's)법, 레이저스펙클(Laser speckle)법, 응력도료법, Barkhausen Noise법, Caustics법 등이 제시되어 있으나 그 유용성 면에서는 아직 해결되야 할 문제가 많이 남아있는 실정이다.

응력이나 변형을 해석하는 방법으로 이론적 방법, 계산적 방법, 실험적 방법이 있다. 이론적 방법에는 재료 역학적으로 취급하는 방법, 탄성론 등이 있고, 계산적인 방법에는 유한요소법이 있지만, 이론적 방법이나 계산적 방법만으로는 해석이 불가능한 경우가 많기 때문에 실험적 방법이 필요하게 된다. 이 글에서는 파괴

시험 또는 다른 비파괴평가기술에 비해 간편한 측정, 높은 측정정도, 시험결과 도출의 신속성, 검사비용의 절감 등 많은 장점을 가지고 있고 실험적으로 유용성이 일부 검증되고 있는 음탄성법(Acoustoelasticity)에 의한 잔류응력 측정법에 관해 소개하고자 한다.

2. 음탄성법이란?

응력·스트레인측정법으로는 전기저항스트레인게이지법과 투명한 모델 시험편에 의한 광탄성법에 가장 친숙해 있다. 전자는 표면스트레인을, 후자는 평균스트레인의 정보를 제공한다. 광탄성법은 응력, 스트레인을 해석하는 구조물의 모델을 에폭시수지 등의 고분자재료로 만들고, 외력에 의해서 생기는 광학적 복굴절(birefringence)량을 측정함으로써 재료내의 응력을 해석하는 방법이다.

금속재료에 힘을 가하고 초음파를 입사시키면 이와 유사한 현상이 발생한다. 즉, 힘을 가하면 역학적으로 이방성이 생기고, 탄성파의 음속이 변하기 때문에 이 음속변화를 측정하면 금속내부의 응력을 알 수 있다. 이 방법은 1959년에 실험적으로 확인되었고¹⁾, 광탄성과 유사한 현상이기 때문에 음탄성법이라 불리게 되었다. 음탄성법은 불투명한 금속재료에서 광 대신에 횡파를 입사시켰을 때 응력에 의해 역학적으로 이방성이 된 탄성체가 전단파에 대해 복굴절을 나타내고 2개 성분파의 음속차가 주응력차에 비례하는 것²⁾을 이용하

는 새로운 응력측정법이다.

재료 초기의 탄성변형이 음파(미소진동의 탄성파)의 전파특성에 미치는 영향을 음탄성효과(acoustoelastic effect)^{3,4)}라 한다. 음파의 전파특성으로는 음속과 그것에 대응하는 모드가 대표적인 것이다. 이 효과는 응력·스트레인의 비례관계로부터 외력(물리적 비선형성)과 변형에 의한 형상변화(기하학적 비선형성) 때문에 초기변형과 음파에 의한 변형 사이에는 중첩의 원리가 성립하지 않는 것에 기인한다. 따라서, 현상론적인 설명·해석에는 비선형탄성론을 이용할 필요가 있다.

음탄성 효과의 연구·이용에서는 3차 탄성정수의 측정과 응력측정의 2가지로 나누어진다. 스트레인 ϵ 과 응력 σ 사이의 관계를

$$\sigma = C_s \epsilon + \frac{1}{2} C_T \epsilon^2 + \frac{1}{6} C_F \epsilon^3 + \dots$$

로 표시할 때 C_s 는 선형탄성론에 나타나는 2차 탄성계수, C_T, C_F 는 3차, 4차의 탄성계수이고, 고체물리학에서 $C_T, C_F \dots$ 는 산란 등에 의한 결정의 비조화성을 나타내는 중요한 양이다. 2차탄성계수 C_s 는 무응력상태에서의 밀도 ρ_0 와 음속 $v_0 = (\frac{C_s}{\rho_0})^{1/2}$ 로부터 구할 수 있으나 스트레인 ϵ 의 변형상태에서는 탄성계수가 $C_s + C_T \epsilon + \dots$ 으로 변화하고(물리적 비선형성), 밀도는 $\rho_0(1 - \epsilon + \dots)$ 로 변화하기(기하학적 비선형성) 때문에 음속은

$$v = \left\{ \frac{C_s + C_T \epsilon}{\rho_0(1 - \epsilon)} \right\}^{1/2}$$

이 된다.

음탄성법은 원칙적으로 평행한 경계면을 갖는 부분에 면내응력의 평균값을 측정하는 것이다. 송신과 수신을 별개의 진동자로 하는 투과법 또는 1개의 진동자로 송수신하는 반사법 어느 것을 이용해도 좋다. 직접 접촉법의 경우에는 탐촉자와 시료면 사이에 확실한 음향결합을 유지하는 것이 중요하다.

3. 음탄성법의 종류

초기에 음탄성법은 횡파의 복굴절효과를 이용하였으나 현재에는 종파(longitudinal wave), 표면파(Rayleigh wave), 사각SH파, 표면SH파 등의 음탄성효과를 이용하는 측정도 가능하게 되어 최근에는 이들 모두를 포함하여 음탄성법이라 불린다.

3.1 복굴절 음탄성법

2축응력상태에 있는 탄성체에서 주응력방향으로 편향된 2개의 횡파 음속을 각각 V_1, V_2 라 하고 재료의 직교 이방성의 축과 주응력방향이 일치하는 경우에는 주응력차와 음속차가 비례하는 다음 식의 음탄성법칙이 성립한다. 이것을 복굴절 음탄성법이라 불린다.

$$B = \frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)/2} B_0 + C_A (\sigma_1 - \sigma_2)$$

여기서

B : 음향복굴절, V_1, V_2 : 주응력 방향으로 편향된 2개의 횡파음속, V_1^0, V_2^0 : 무중력상태의 V_1, V_2 , B_0 : 조직의 이방성에 근거한 복굴절량

($\{ = \frac{V_1^0 - V_2^0}{(V_1^0 + V_2^0)/2} \}$), C_A : 복굴절 음탄성계수 ($-7.3 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{SS400}$)이다.

보통 구조재에서의 음속은 음탄성효과에 의해 부하응력에 수반하여 직선적으로 변화한다. 그러나, 압연재의 음탄성 측정은 압연온도나 압하율 등의 압연조건이 바뀌면 압연집합조직이 변하고 복굴절 음탄성계수 뿐만 아니라 조직이방성도 변한다.

복굴절 음탄성법에서는 이 조직이방성을 음향복굴절로부터 분리할 필요가 있으나 이 분리는 일반적으로 어렵고 응력 분포에 기하학적 특징이 있는 경우에만 분리할 수 있다.

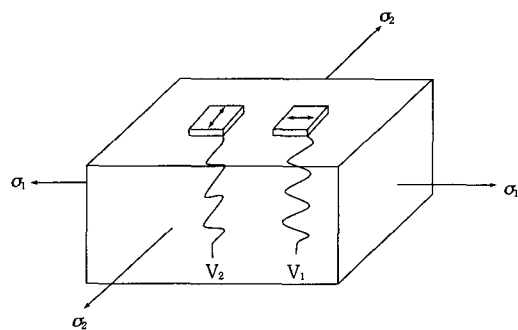


Fig. 1 복굴절 음탄성법

3.2 음속비법

복굴절 음탄성법에서는 조직이방성을 알고있는 부재의 경우 주응력차를 측정할 수 있다. 이에 대해 종파 음속과 횡파의 평균음속과의 비인 음속비를 측정하면 주응력합을 구할 수 있다.

$$R = \frac{V_L}{(V_1 + V_2)/2} = R_0 + C_R (\sigma_1 + \sigma_2)$$

여기서, R; 음속비, V_L ; 종파음속, R_0 ; 무응력음속비 ($= \frac{V_L^0}{(V_1^0 + V_2^0)/2}$), V_L^0 ; 무응력시의 종파음속, C_A ; 음탄성계수 ($-9.2 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{SS400}$)이다. R_0 와 B_0 를 알고 있는 재료에서는 음속비법과 복굴절 음탄성법과를 조합하면 주응력을 분해하여 구하는 것이 가능하다.

○ 음속은 다음 식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)/2} = \frac{t_2 - t_1}{(t_1 + t_2)/2}$$

윗 식으로부터 음속변화는 시간변화에 따라 구할 수 있고, 초음파 전파시간의 고정도 계측에는 싱어라운드법(sing-around method), 펄스에코오버랩법(pulse-echo overlap method) 등이 있지만, 가장 널리 사용되는 것은 싱어라운드법이다. 그 외에도 복굴절한 횡파펄스의 진폭측정법과 합성파의 주파수 스펙트럼을 이용하는 스펙트럼해석법⁵⁾, Cepstrum법, 그리고 최근에는 탄성파의 데이터해석에 시간-주파수 해석법인 Wavelet변환⁶⁾을 적용하면 탄성파의 전파거동을 각주파수성분마다 분해할 수 있어 단일에코파형에 포함된 각 주파수성분의 속도와 감쇠계수의 고정도 계측이 가능하여 재료의 비파괴평가의 신뢰성 향상 또는 새로운 비파괴적 재료특성 평가 기술의 확립을 기대할 수 있다.

3.3 표면SH파법

재료의 표층부를 따라 전파하는 표면SH파에 의한 음탄성법칙은 다음 식으로 주어진다. (그림 2 참조)

$$\phi_s = \frac{V_{s1} - V_{s2}}{(V_{s1} + V_{s2})/2} = C_s(\alpha_1 - \alpha_2)$$

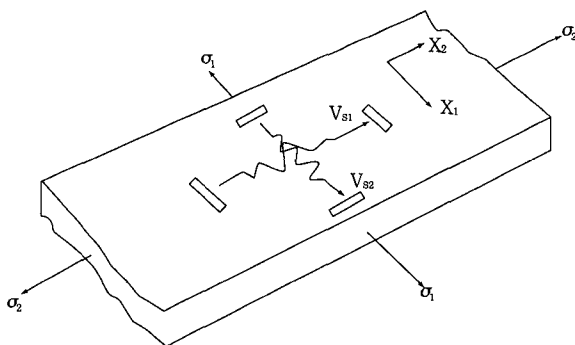


Fig. 2 표면 SH파법

여기서, ϕ_s ; 음향이방성, V_{s1} , V_{s2} ; 편향방향이 각각 X_1 , X_2 방향의 표면SH파의 음속, C_s ; 표면SH파 탄성계수 ($-6.09 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{SS400}$)이다.

이 음탄성법칙은 조적이방성이 포함되어있지 않기 때문에 재질이 동일하면 가공도나 열처리조건 등에 거의 의존하지 않고 일정하다.

4. 잔류응력의 측정

음탄성법은 광탄성법과 달리 실제 금속재료내부의 잔류응력을 비파괴적으로 직접 측정이 가능하다는 점이 큰 특징이다.

현재까지 용접 잔류응력장의 측정은 횡파를 이용하여 시험편의 두께방향의 평균값을 측정하는 것이다. 음탄성에 의한 응력측정은 응력에 의해 발생하는 일시적인 이방성을 초음파를 이용하여 검출하는 방법으로 횡파를 이용한 잔류응력을 측정한 예로는 압연 H형강⁷⁾, 원판, 레일축^{8,9)}, 볼트 등의 잔류응력 측정 등이 대표적이다.

최근에는 표면층의 잔류응력 검출에 표면파를 이용하는 연구가 진행되고 있다. 표면파에 의한 평가¹¹⁾는 파장 정도의 표면층을 따라 진행하는 표면파의 평균값을 이용한다. 음탄성법의 문제점^{12,13)}으로는 금속조직 상태의 영향을 어떻게 제거하는가에 있다.

5. 결 언

이 글에서는 최근 용접 잔류응력 측정과 재료 특성평가 분야에 활발한 연구가 진행되고 있는 음탄성법에 대해 설명하였다.

비파괴적인 방법에 의한 실험적인 잔류응력 측정법 중에서 음탄성법은 광탄성법과 달리 실제 금속재료 내부의 잔류응력을 비파괴적으로 직접 측정이 가능하고, X선응력측정법에 비해서 인체에 유해하지 않다는 등의 많은 장점을 가지고 있다. 반면 금속조직 상태의 영향을 어떻게 제거하는가하는 문제점이 있지만 멀지않아 그 유용성이 검증되어 극복될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. R.W. Benson and V.J.Raelson, Product Engng 30, 1958, pp 56
2. Crecraft, D. I., The measurement of applied and residual stress in metals using ultrasonic waves, J. Sound Vib., 5-1, 1967,

- pp 173-192
3. 音彈性, 日本非破壊検査協會, pp 2-35
 4. 非破壊評價工學, 日本非破壊検査協會, 1998, pp 125-128
 5. 岩清水 幸夫, 音彈性スペクトラム解析による應力測定, JSNDI 音彈性研究會 No. 10, 1994, pp 58-62,
 6. 박 익근, 이 정순, 초음파에코파형의 Wavelet 해석과 비파괴평가에의 응용, 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회, 1998, pp 39-47
 7. 福岡 秀和, 戸田 裕己, 音彈性法による壓延H形鋼の残留應力測定, 材料, 30-330, 1981, pp 261-267,
 8. 大井 清一 郎, 音彈性法によるレール軸力の評價, JSNDI 第 2回 音彈性材料評價研究會, 1995, pp 9-12
 9. 福岡 秀和, 戸田 裕己, 鐵道車輛用リム部の残留應力の音彈性解析, 日本機械學會論文集, 50-453(A), 1984, 945-952
 10. Toda, H., Fukuoka, H. and Aoki, : R-value acoustoelastic analysis of residual stress in a seam welded plate, Jpn. J. Appl. Phys., Suppl. 23-1, 1984, 86-88
 11. 岡田 健一, 超音波表面波による残留應力の檢出, JSNDI 第 2回 音彈性計測研究會, 1997, pp 64-67
 12. Don E. Bray, Don McBride, Nondestructive Testing techniques, pp 379-397
 13. 徳岡 辰雄, 岩清水幸夫 : 音彈性, 機械の研究, 27-7, 1975, 6-10