

발전소 고온배관 용접부 잔류응력 측정에 관한 연구
Study on the Residual Stress Measurement of High-Temperature Pipe Line Welds in Fossil Power Plants

이 상국*, 정 민화**

* 한국전력공사 전력연구원

** 한국전력공사 전력연구원

1. 서 론

용접구조물에서 발생하는 잔류응력은 용접부의 수축 및 변형이나 크랙을 발생시켜 결과적으로 파괴의 주원인이 될 수도 있다. 구조물에 존재하는 잔류응력 또한 압연, 절삭, 소성가공, 용접 등의 기계적 가공이나 운전중 조건에 의하여 발생되며, 기계요소나 구조물의 파괴와 피로수명, 취성파괴, 응력부식균열(stress corrosion cracking)에 영향을 미치므로 구조물의 수명과 안정성에 상당한 영향을 미친다. 따라서 용접구조물이나 발전설비의 잔류응력문제를 해결하기 위하여서는 잔류응력을 측정하여 잔류응력이 어떻게 분포되며, 그 크기는 얼마인지에 대한 명확한 정보를 알아야하며, 이를 최소한의 크기로 이완시켜 주거나 적절한 대응책을 강구하여야할 필요성이 있다.

특히 발전설비와 같은 중요 설비에서는 구조물, 재료 등의 여러 가지 결합을 초래할 수 있는 인자를 탐지하여 안전성 및 신뢰성을 향상시키는 것이 중요하며, 산업구조설비의 대형화, 대용량화에 따라 이러한 설비들의 관리능력을 향상시키기 위해 잔류응력측정 및 이와 관련된 기술의 중요성은 날로 증가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 현재 발전소 고온배관 용접부에 적용중인 방법을 개선하기 위하여, 신뢰도면에서 우수한 신기술인 초음파법을 이용하여 실제 발전소 고온배관 용접부 재료에 대해 잔류응력을 측정평가함으로써 잔류응력 측정을 위한 비파괴적 방법에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 용접부 잔류응력 발생특성 및 발생기구

다결정 재료에서 잔류응력은 일반적으로 3가지 종류로서 분류할 수 있다. 첫 번째는 거시적 응력(macro stress)로서 넓은 면적에 걸쳐 균일하게 분포되는 응력으로 정의된다. 거시적 응력 형태의 응력은 여러개의 입자에 걸쳐 균일하게 분포하며, 여러 입자에 걸쳐서 평균한 응력으로서 분류된다. 두 번째 형태의 잔류응력은 미시적 응력(micro stress)로서 입자 하나 또는 그 일부분의 차수에서 균일하게 나타나는 응력으로 정의하며 세 번째 잔류응력형태는 아주 작은 격자 길이의 차수에서도 균일하게 나타나지 않는 응력으로서 준미시적 응력(submicro stress)이다. 각각의 잔류응력 형태에 관한 개념적인 정의는 Fig.1에 나타나 있다¹⁾.

준미시적 잔류응력(submicro residual stress)는 결정에 있어서 점결함(point defects), 선결함(line defects)과 같은 격자결함(lattice defects)에 의하여 주로 발생된다. 잔류응력은 또한 열처리나 화학적 처리, 기계적 하중에 의하여 입자에 부가되며 전위(dislocation)의 누적에 의하여 발달되는 응력은 기계적 하중에 의하여 나타나는 것도 한 예이다. 다른 예는 고체의 다른 상(phase)의 삽입에 의하여 나타나는 경우이다. 거시적 잔류응력(macroscopic residual stress)은 구조물에서 불균일한 소성변형에 의하여 일반적으로 발생한다. 용접부에 있어서 소성변형은 주로 용접과정중의 여러 가지 단계에서, 큰 온도 구배로부터 기인한 열응력(thermal stress)에 의하여 발생한다. 일반적으로 구조물에서 나타나는 잔류응력은 앞에서 언급한 3가지 종류가 혼합된 형태로서 나타나며 때때로 이러한 응력들을 상호 분리하여 확인해야할 필요성이 대두될 경우도 있으나, 공학적인 적용에서 가장 중요한 것은 거시적 응력이다. 따라서 본 논문에서는 대부분의 응력은 거시적 잔류응력을 나타낸다.

3. 용접부 잔류응력 초음파측정 이론

초음파를 이용한 응력측정의 모든 방법들은 Hook's Law($\sigma = \epsilon M$; σ =stress, M =탄성계수)의 선형성

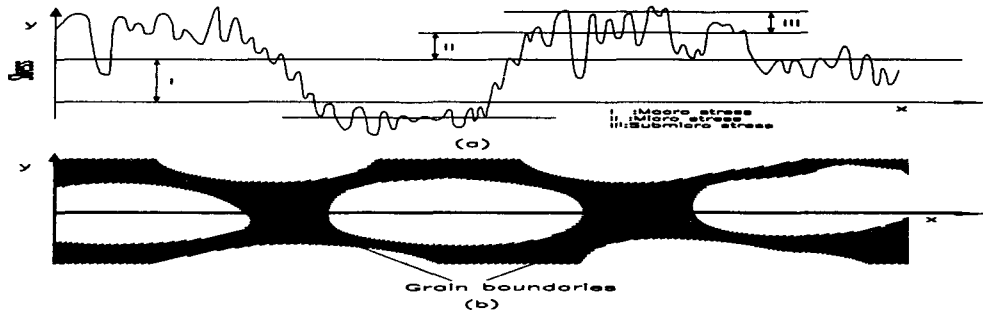


Fig.1 Definition of residual stresses kind I, II, III

(a) Schematic presentation of three types of stress (I, II, III) varying with distance in a material, (b) The microstructure in the material to the same scale

으로부터 금속의 반응으로의 편차(deviation)를 이용한다. 이것은 고체의 무조화(anharmonic) 성질로서 언급되어져 왔으며, Power Series로서 $\sigma = M\varepsilon + C\varepsilon^2 + D\varepsilon^3 \dots$ 으로 다시 표현할 수 있다. 여기서 C는 3차 무조화 상수이며 D는 4차 무조화 상수이다. 거시적응력의 측정에 사용되는 무조화성질의 효과는 다음과 같은 것들이 있다. 아주 간단한 무조화 응력 변형률 법칙의 형태는 $\sigma = M\varepsilon + C\varepsilon^2$ 로 쓸 수 있고 $\sigma = \varepsilon(M + C\varepsilon)$ 로 다시 쓸 수 있다. 괄호안의 항은 음속의 $\rho V^2 = M + C\varepsilon$ 과 근사적으로 관련될 수 있다. 여기서 ρ 는 매질의 밀도이며 V는 음속이다. 이 식은 변형률에 의존하는 속도의 항으로 나타내면, $V = \sqrt{\frac{M}{\rho} \left\{ 1 + \frac{C}{2M} \varepsilon \right\}}$ 으로 다시 쓸 수 있다. 이 식을 변형률에 대하여 풀면, $\varepsilon = 2(V\sqrt{M\rho} - 2M)/C^2$ 이 되고 탄성계수와 밀도의 속도 의존성을 보려면 $\rho V^2 = M + C\varepsilon$ 을 $V^2 = \frac{(M + C\varepsilon)}{\rho}$ 로 다시 쓰면 $V = \sqrt{\left\{ \frac{M + C\varepsilon}{\rho} \right\}}$ 와 같이 된다. 여기서 $M + C\varepsilon = M'$ 로 하면 $V = \sqrt{\left\{ \frac{m'}{\rho} \right\}}$ 이식을 미분하고 V로 나누어주면 $\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta m'}{m'} - \frac{\Delta \rho}{\rho} \right]$ 이 된다. 이 식으로부터 탄성계수나 밀도의 비율 차이가 속도변화에 얼마나 영향을 미치는가를 알 수 있다. 음탄성계수(acoustoelasticity)는 파의 속도가 응력에 의존한다는 점에 있어서 photoelasticity와 유사하나 음파의 특성상 분극방향이 세 방향이므로 photoelasticity 보다 복잡하다. Murnaghan³⁾은 응력이 없는 상태에서는 탄성적으로 등방적인 고체가 응력을 받게 되면 이방적인 특성을 보인다는 것을 밝혔다. Hughes와 Kelly⁴⁾는 Murnaghan의 finite strain formulation을 사용하여 응력을 받았을 때의 응력에 따라 변하는 초음파 속도를 나타내는 아래와 같은 7가지의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 V_{ep}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{P}{3K_0} (7\lambda + 10\mu + 6l + 4m) \quad (1)$$

$$\rho_0 V_{sp}^2 = \mu - \frac{\rho}{3K_0} (3\lambda + 6\mu + 3m - n/2) \quad (2)$$

$$\rho_0 V_{ex}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{T}{3K_0} \left(\frac{\lambda + \mu}{\mu} [4\lambda + 10\mu + 4m] + \lambda + 2l \right) \quad (3)$$

$$\rho_0 V_{ey}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K_0} (2\lambda/\mu [\lambda + 2\mu + m] - 2l) \quad (4)$$

$$\rho_0 V_{sx}^2 = \mu + \frac{T}{3K_0} (4\lambda + 4\mu + \lambda n/4\mu) \quad (5)$$

$$\rho_0 V_{sy}^2 = \mu + \frac{T}{3K_0} (\lambda + 2\mu + \lambda n/4\mu) \quad (6)$$

$$\rho_0 V_{sz}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} (2\lambda - m + n/2 + \lambda n/2\mu) \quad (7)$$

여기서 ρ_0 는 밀도이고 V 는 초음파속도, λ 와 μ 는 2차탄성계수인 Lamé 상수이고, l , m , n 은 Murnaghan이 정의한 3차 탄성계수이다. P 는 hydrostatic pressure를 나타내고 T 는 일축 인장력이며 K_0 는 체적상수인 $1/3(3+2\mu)$ 이다. 첫번째 첨자 l 은 종파를 s 는 횡파를, 두번째 첨자인 p 는 정압 (hydrostatic pressure)을 나타내고 x , y , z 는 각 방향으로의 일축 인장력을 나타낸다.

4. 실험방법

Fig.2는 잔류응력 측정을 위한 초음파 측정 시스템을 나타내고 있다. 이 실험장비는 초음파 펄스를 발생시켜 탐촉자에서 되돌아오는 파를 수신하여 오실로스코프에서 시간을 측정하는 순서로 작동된다. 본 실험에서는 실험을 수행하기에 앞서 하중에 따른 속도의 변화에 대하여 보정(calibration)을 수행하였다.

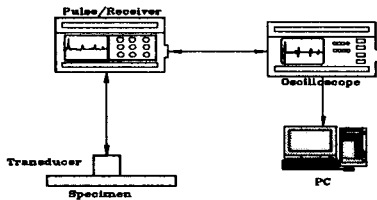


Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic

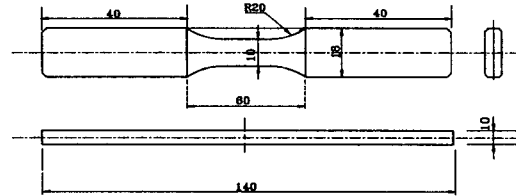


Fig.3 Shape and dimension of specimen

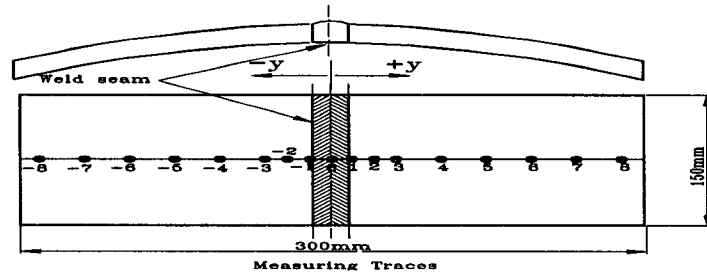


Fig.4 Sketch of welded plate together with positions of the measuring traces residual stress measurement experimental apparatus

실험재료는 부산화력 1호기 주증기관재질인 1.25Cr0.5Mo강으로서 주요성분 및 화학적 조성은 Table 1과 같다. 본 실험에서는 먼저 미사용재에 대하여 일정응력에 따른 초음파속도의 변화를 대변할 수 있는 음탄성계수를 실험적으로 측정한 후, 사용재인 용접부에 대한 초음파속도를 음탄성계수를 이용하여 측정함으로써 미사용재와 사용재간의 초음파속도변화를 관찰하여 잔류응력을 계산하였다. Fig. 3은 음탄성계수를 측정하기 위한 시험편이며, Fig.4는 부산화력 1호기 주증기관 시험편의 치수와 초음파 속도 측정위치를 나타내고 있으며 2.25MHz 수직탐촉자(normal probe)를 사용하였다.

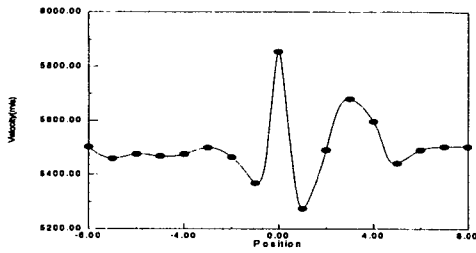


Fig.5 Sound velocity change along traces perpendicular to the weld

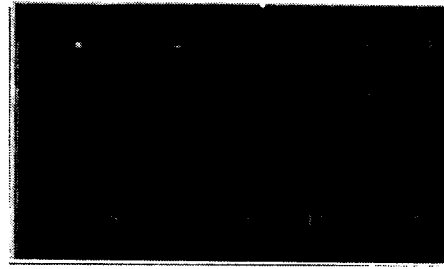


Fig.6 Time measuring screen of specimen

Table 1 Chemical composition of the testing materials(virgin material)

구 분	Alloy	Spec	Composition(%)				
			C	Si	Mn	Cr	Mo
Main Steam Line Pipe	1.25Cr-0.5Mo	SA182-P11	0.15	0.5-1.0	0.3-0.6	1.0-1.5	0.44-0.65

5. 실험결과 및 고찰

잔류응력측정을 위한 음탄성계수를 실험적으로 측정하기 위하여 인장시험기에서 응력을 증가하면서 시간을 측정하고 속도를 계산하여 음탄성계수를 측정한 결과 $-2.06^{-7}[\text{nse}/\text{cm}(\text{dyn}/\text{cm}^2)]$ 로 나타났다. 이 값은 일반적인 강에서의 음탄성계수인 $-2.225^{-9}[\text{nse}/\text{cm}(\text{dyn}/\text{cm}^2)]$ 보다 크게 나타났다. Fig. 5는 시간을 측정하기 위한 오실로스코프(oscilloscope)상의 화면을 나타내고 있으며 Fig.6은 용접부의 각각의 위치에 대하여 속도를 측정한 결과를 나타내고 있다.

일반적인 잔류응력 측정실험에서 나타나는 profile의 경향을 잘 나타내고 있다. 본 실험결과로부터 부산화력 1호기 주증기관 배관에 존재하는 잔류응력의 개략적인 크기를 계산한 결과 최대치는 약 $78 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 로 나타났다. 그러나 지금까지의 연구결과를 보면 용접부의 잔류응력은 항복응력의 90%까지 도달할 정도의 크기를 가지고 있다는 것으로 나타났으나 본 시편의 잔류응력 크기가 상대적으로 작게 나타난 것은 운전중의 다양한 열이력 효과(thermal effect)에 의하여 어니얼링(annealing) 되었을 것으로 분석된다.

6. 결 론

잔류응력과 초음파속도와의 상관관계를 알아보기 위한 단축응력(uniaxial stress)상태에서의 음탄성계수를 실험적으로 구할 수 있었으며, 화력발전소 실기 주증기관의 용접부재에 대한 초음파속도변화를 측정한 결과 속도변화는 잔류응력 profile과 동일하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 정밀측정 및 잔류응력의 절대크기 측정을 위해서는 횡파 탐촉자(transverse wave transducer)를 사용하여 여러 방향의 초음파를 진행시켜 응력의 3차원 해석이 가능하도록 측정하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. P.Palanichamy, A. Joseph : Residual Stress and Their Evaluation in Weld, Division of PIE and NDT Development India Gandhi Centre for Atomic Research, IIW-V-995-92
2. Alers, G.A : Ultrasonic Methods-Overview, Proceedings of a Workshop on Nondestructive Evaluation of Residual Stress, NTIAC-76-2(1975)
3. T.D. Murnaghan : Finite Deformation of an Elastic Solid, John Wiley and Sons, Inc., New York(1951)
4. D.S.Hughes., J.L. Kelly : Phy. Rev. Vol.92(1953), pp1145-1149