

## 발전설비 배관용접부에 대한 잔류응력측정 연구

박 상 기\*<sup>†</sup> · 안 연 식\* · 길 두 송\*

\*전력연구원 기술전문센터

## The Study of Measurement of Residual Stress for Pipe Weldments of Power Plant

Sang-Ki Park\*<sup>†</sup>, Yean-Shik Ahn\* and Doo-Song Gil\*

\*Technology Profession Center Korea Electric Power Corporation Research Institute

<sup>†</sup>Corresponding author : skpak@kepri.re.kr

## 1. 서 론

발전소 용접부 품질을 확보하기 위해서는 용접으로 인한 결함을 방지하고, 용접 재질의 적절한 물성관리가 이루어져야 한다. 용접부 결함은 비파괴검사를 실시하여 철저히 관리되고 있으나, 용접재질의 물성분야는 용접 후열처리에만 의존하고 있는 실정이다. 최근 발전설비 용접사고 유형은 용접결함으로 인한 손상은 감소하고 있는데 비하여 용접 열영향부와 용접 재질의 물성 부적정으로 인한 손상은 계속적으로 발생되고 있다. Fig. 1의 주증기 배관 용접부의 손상원인 분석 결과, 용접잔류응력이 주요원인인 것으로 밝혀졌다. 용접작업은 용접열의 급격한 가열과 냉각이 반복되므로 부적절한 용접 시에는 용접변형으로 인한 잔류응력이 발생하게 되며, 피로수명, 취성파괴, 응력부식균열에 영향을 미치게 되어 구조물의 수명저하와 사고발생의 요인이



Fig. 1 Example of weld section cutting damage by residual stresses in main steam pipe of power plant

된다. 특히 발전설비의 운전특성상 고 신뢰도가 요구되는 배관 용접부의 잔류응력 문제를 해결하기 위해서는 잔류응력을 측정하여 잔류응력이 어떻게 분포되며, 그 크기는 얼마인지에 대한 명확한 정보를 알아야하고 이를 최소한의 크기로 이완시켜 주거나 적절한 대응책을 강구하여야 한다. 이를 위해서는 현장 용접부에 대해 비파괴적인 방법으로 잔류응력을 측정할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 비파괴적 방법으로 잔류응력 측정이 가능한 압입시험법의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 또 화력발전소 배관 용접부에 대해 용접후열처리 전, 후의 잔류응력을 측정하여 용접후열처리가 잔류응력 이완에 미치는 효과도 확인하고자 하였다.

## 2. 용접 잔류응력과 측정법

## 2.1 용접잔류응력의 분포

용접을 수행할 경우, 국부적으로 집중적인 열이 가해져서 구조 부재는 급속한 열팽창과 수축으로 열변형이 주위에 의해 구속됨에 따라 용접이 종료된 후에도 부재에는 응력이 잔류하게 되는데, 이를 용접잔류응력이라 한다. 용접부에 대한 잔류응력의 일반적인 분포에 대한 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. (+) 부호는 인장잔류응력을 의미하고, (-) 부호는 압축 잔류응력을 의미한다. 인장 잔류응력은 피로나 응력부식과 같은 파괴에 대한 민감도를 상승시키므로 일반적으로 구조물 자체에 유익하지 않은 영향을 미친다. 압축 잔류응력은 일반적으로 인장잔류응력으로 인하여 나타나는 문제를 감소시켜 줌으로써 유익하게 작용될 때가 많다. 공학적인 구

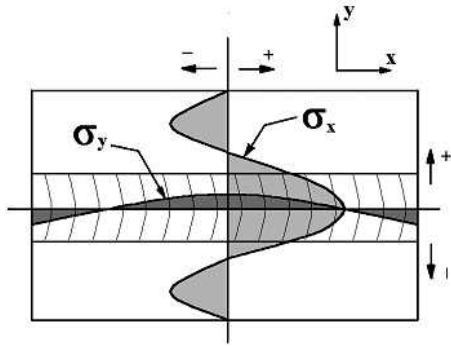


Fig. 2 Schematic illustration of typical distribution of longitudinal ( $\sigma_y$ ) and transverse ( $\sigma_x$ ) residual stresses in a butt weld

조물의 파괴에 가장 중요한 모드인 피로파괴와 응력부식파괴는 표면에 민감한 현상이므로, 표면잔류응력이 적절하게 평가 되어야한다<sup>1)</sup>.

### 2.2 잔류응력 측정법과 적용

잔류응력을 측정하기 위한 홀 드릴링, 톱 절단에 의한 기계적 방법(sectional)과 X-선 회절, 바크하우젠 노이즈, 초음파등을 이용한 물리적 방법, 금속의 탄, 소성특성을 이용한 압입시험에 의한 방법이 있으며, 각 방법별 특성은 Table 1과 같다<sup>2)</sup>.

잔류응력을 측정하는 방법을 어느 방법을 적용할 것인가는 구조물의 형태, 측정목적, 비파괴성, 현장 적용성, 신뢰성 등을 고려하여 목적에 적합한 기법을 적용하는 것이 바람직하다. 기계적 방법은 피측정물을 부분

Table 1 Methods of residual stress test

Method Factor	Sectioning	X-Ray	Indentation	Magnetic	Ultrasonic
Parameter	displacement	diffraction angle	elasticity	Barkhausen Noise	Ultrasonic wave speed
Minimum of analyze depth	1mm	20 $\mu$ m	1mm	100 $\mu$ m	15 $\mu$ m
Precision	$\pm 10$ Mpa	$\pm 20$ Mpa	$\pm 20$ Mpa	$\pm 30$ Mpa	$\pm 30$ Mpa
Measuring time/ 1 point	40 min	20 min	10 min	5 min	10 min
Measuring depth	All	50 $\mu$ m	3mm	1mm	3mm
Nondestructive	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Pre-treatment	Normal	Precision	Normal	Precision	Precision
Portable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Application material	Every-thing	can not big grain material	Every-thing	can not non magnetic	carbon steel

적 또는 전체를 자를 때 발생하는 변형률의 변화를 스트레인게이지로 측정함으로써 비교적 정확한 측정이 가능하지만 시험체를 손상하게 되는 문제점이 있다. 바크하우젠노이즈법은 자성체가 아닌 재질에 대해서는 시험이 불가능하고 X선 회절법은 비결정재질을 측정하기 어려운 면들이 있다. 본 연구에서는 발전소 현장에 설치된 배관 용접부에 대해 비파괴적으로 측정이 가능하고 기계적 강도특성도 동시에 측정이 가능한 압입시험에 의한 잔류응력 측정법을 적용하였다.

## 3. 압입시험에 의한 잔류응력측정

### 3.1 압입시험법의 원리

경도시험법은 실험의 간편성 때문에 현장에서 물성을 예측할 수 있는 기준 값으로 많이 사용되어 왔으며, 경도시험법의 이러한 장점을 이용하여 경도를 통하여 잔류응력을 측정해보고자 하는 연구도 시도되어 왔다. 그러나, 잔류응력에 의해서 물질의 고유 경도는 변하지 않는다는 연구 결과가 보고되었고, 실제로 잔류응력에 의한 경도값은 변화가 없다<sup>3)</sup>. 잔류응력이 존재하는 시편에 압입을 행할 경우, 경도 값에는 차이가 없지만 재료가 반응하는 현상에는 차이를 보여 연속적으로 하중과 변위를 측정하게 되면 그 값에 차이를 보이게 된다. 즉, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 재료에 인장응력이 존재하는 경우에는 무응력 상태와 비교할 때 완만한 기울기를 갖고, 압축응력에서는 좀 더 급한 기울기를 갖게 된다. 이러한 곡선의 변화양상과 압입자 하부의 응력상태를 비교하면 재료에 존재하는 잔류응력을 정량적으로 판단할 수 있다.

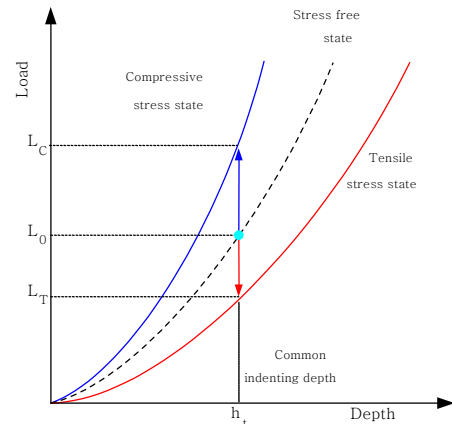


Fig. 3 Variation of the indentation loading curves with the changes in the stress states

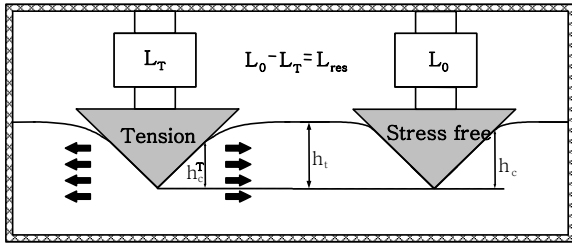


Fig. 4 Outline of material figure and contact load on maximum depth controlled stress relaxation

잔류응력이 존재하는 경우에는 압입하중 인가시 하중 인가곡선의 변화가 발생하게 된다. 잔류응력 완화과정 중 압입자와 시편의 접촉형상의 구체적인 변화는 Fig. 4 모식도를 통해서 설명될 수 있다. 인장 잔류응력을 가진 시편에  $L_T$ 의 하중을 인가하여 최대 압입깊이  $h_t$ 를 형성시킨 뒤, 강체의 프레임으로 압입자와 시편을 구속하여 잔류응력 제거시에도 최대 압입깊이는  $h_t$ 로 유지되도록 하고 인장 잔류응력을 완화하면 압입자를 시편표면에서 밀어내려는 힘이 작용하게 된다. 그러나, 강체 프레임의 구속에 의해 최대 압입깊이는 유지되고, 시편이 압입자를 밀어내려 했던 힘은 압입하중의 증가로 발생한다. 즉, 응력의 완화과정에 의해서 잔류응력 유도 수직하중 만큼 압입하중이 증가하고, 접촉깊이도  $h_c^T$ 에서  $h_c$ 로 증가한다. 인장 잔류응력시 압입하중과 최대 압입깊이인 ( $L_T, h_t$ )은 최대 압입깊이를 유지하면서 잔류응력을 제거한 상태인 ( $L_0, h_t$ )와 등가인 상태 (equivalent state)로 볼 수 있으며, 두 상태에 대한 압입하중 사이에는 식 (1)의 관계가 존재한다.

$$L_0 = L_T + L_{res} \quad (1)$$

반면에 압축 잔류응력 상태에서 최대 압입깊이를 일정하게 유지하면서 잔류응력을 제거하면, 접촉깊이의 감소와 함께 잔류응력 유도 수직하중 만큼 압입하중이 감소한다. 박막 잔류응력은 인장 및 압축 잔류응력과 무관하게 식 (2)와 같이 잔류응력 유도 수직하중인  $L_{res}$ 를  $L_0$ 에서의 접촉면적  $A_c^0$ 로 나눈으로써 평가할 수 있다.

$$\sigma_{res} = \frac{L_{res}}{A_c^0} \quad (2)$$

압입시험에 의한 잔류응력 측정은 이러한 원리에 근거하여 이루어진다<sup>4)</sup>.

### 3.2 압입시험법의 신뢰성 검증

압입시험법에 의한 잔류응력 측정의 신뢰성을 검증하기 위하여 톱절단(saw cutting)법과 굽힘시험에 의한 잔류응력 측정시험을 실시하여 비교하였다.

#### 3.2.1 톱 절단법과 비교

압입시험에 의한 잔류응력 측정법에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여 톱절단법에 의한 잔류응력 측정시험을 실시하였다. 시험편은 재열증기 배관 용접부와 동일하게 GTAW/SMAW 방법에 의해 제작하여 후열처리하지 않은 상태에서 시험하였다. 시험은 Fig. 5와 같이 시험편 용접선 중심에서 5mm 간격으로 압입시험을 실시하여 측정된 잔류응력과 톱으로 용접선 수직방향으로 절단할 때 잔류응력의 이완되는 것을 스트레인게이지로 측정하여 비교하였다.

시험결과 재열증기 배관 용접시험편에 대해 압입시험법과 톱 절단법에 의한 잔류응력 측정결과는 Fig. 6과 같다. 두 방법 모두 용접 비드부에서 가장 큰 인장잔류응력이 측정되었는데, 톱 절단법에서는 250 MPa이 측

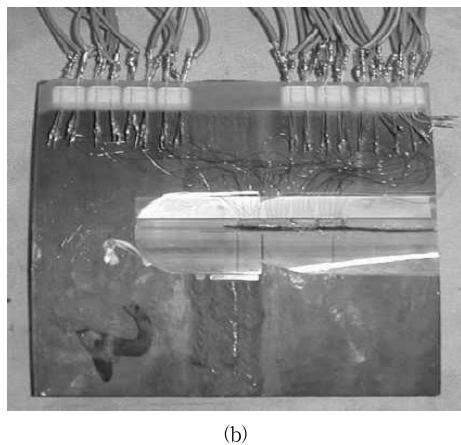
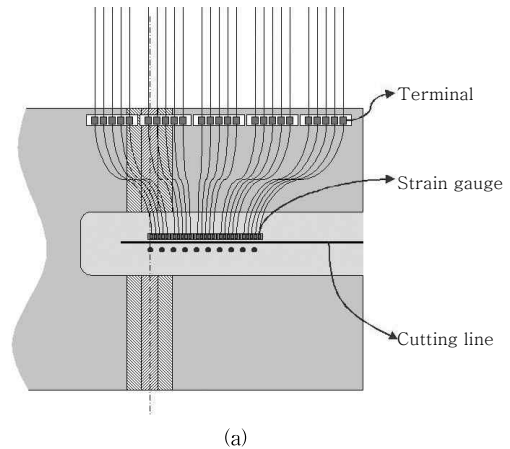


Fig. 5 Estimated drawing of test and test specimen (a) test method (b) used specimen

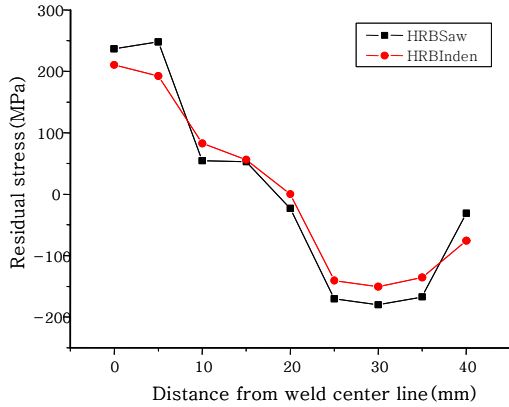
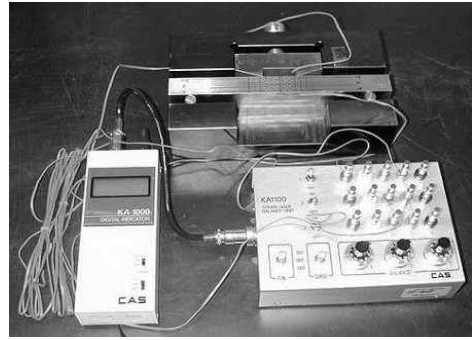


Fig. 6 Comparison of saw cutting method and indentation method

정되었고 압입시험법에서는 210 MPa이 측정되었다. 용접선 중심으로부터 30mm 거리의 모재 부위에서 가장 큰 압축잔류응력이 측정되었는데, 톱절단법에서는 -175 MPa이 측정되었고 압입시험법에서는 -150 MPa이 측정되었다. Fig. 6에서 용접선으로부터 각 위치에서 측정되는 잔류응력의 추이가 두 측정방식이 유사성을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 톱 절단법과 압입시험법에 의해 측정된 결과가 어느 방식이 정확한 값이라고는 평가할 수 없지만 톱 절단법은 파괴적 방법을 수반하여 측정되는 것인 만큼 정확성이 높을 것으로 추정된다. 압입시험법은 비파괴적 방법으로 측정되었지만 파괴적 방법인 톱절단법 측정값과 추이가 유사성을 가지고 있는 것으로 볼 때 신뢰성이 있다고 평가되었다<sup>5)</sup>.

### 3.2.2 굽힘시험법과 비교

굽힘시험에 의한 검증은 시험편에 인위적으로 굽힘응력을 가하여 응력의 크기를 알고 있는 상태에서 압입시험을 실시하여 두 방법간의 측정결과를 비교하였다. 시험은 Fig. 7에서와 같이 시험편에 스트레인 게이지 부착하고 굽힘응력을 가하여 측정되는 응력과 압입시험을 실시하여 측정되는 응력을 비교하였다. 굽힘시험을 행하기 전 시험편에 구획선을 만들고 상하에 스트레인 게이지를 한 개씩 부착하였다. 부착된 지점은 굽힘하중을 가할 시 최대 인장응력과 최대 압축응력이 인가될 지점을 나타내는 점으로서 이 값을 읽게 되면 빔 굽힘 이론에 따라서 시험편 전체의 응력을 계산할 수 있게 된다. Fig. 7 (b)에서 가로줄 내에서는 같은 크기의 굽힘응력이 존재하며, 4개의 다른 응력상태에 대한 실험을 행하였다. 실험시 스트레인게이지로부터 계산한 최대인장응력과 최대압축응력을 이용하여 빔 굽힘이론을 적용한 결과 각각의 위치에서 -151.6 MPa과 154.1 MPa이 걸림을 알 수 있었다. 이러한 응력상태를 압입시험을



(a) Strain gauge equipment



(b) Specimen

Fig. 7 Residual stress test by strain gauge

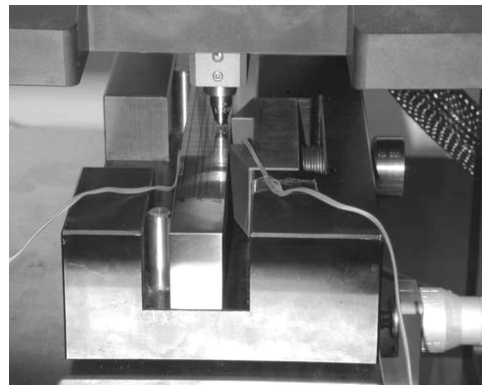


Fig. 8 Residual stress test by indentation

통하여 계산해본 결과 실제 응력이 걸린 값과 실험을 통하여 얻은 값이 거의 유사함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Fig. 9와 Table 2에 요약하였다<sup>6)</sup>.

## 3.3 현장 용접부 잔류응력 측정

### 3.3.1 잔류응력시험 방법

압입시험법을 이용하여 건설하고 있는 발전소의 주요 배관 용접부에 대하여 잔류응력측정 시험을 실시하였다. 시험은 Table 3과 같이 발전소 건설현장에서 설치되고 있는 주증기 배관(Main steam) 과 고온재열증기 배관(Hot reheat steam) 용접부에 대하여 잔류응력

Table 2 Result of residual stress test

Distance (mm)	Calculated (MPa)	Measured (MPa, average)
-7.5	-151.5975	-146.8
-2.5	-49.7125	-61.4
2.5	52.1725	60.7
7.5	154.0575	146.8

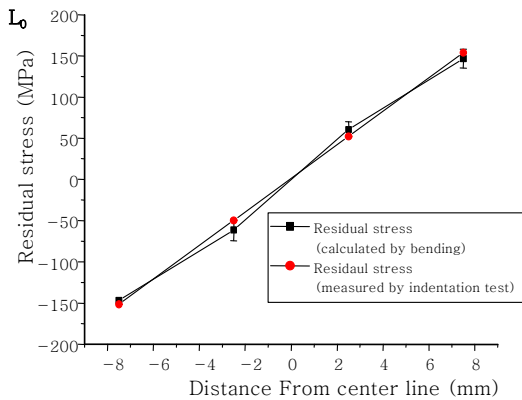


Fig. 9 Result of bending test and indentation

Table 3 Specification of tested pipe

Pipe	Pipe spec(mm)		Material	Weld material
	Out dia	Thick-ness		
Main steam	508	79	9Cr-1Mo (A335-P91)	AWS 9016
Hot reheat	812	27	9Cr-1Mo (A335-P91)	AWS 9016



Photo 1 Residual stresses test for weldment of power plant main steam pipe

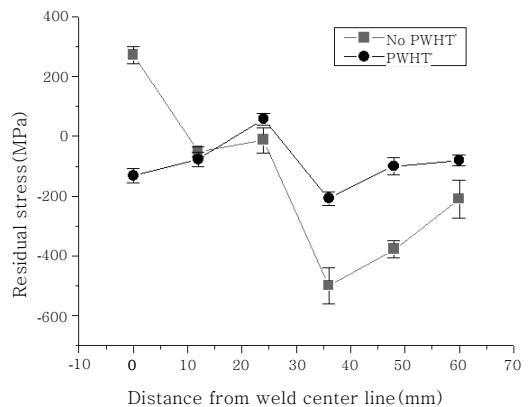
측정시험을 하였다. 시험에는 프론틱스사의 AIS 2000 계장화압입시험기를 사용하였다.

용접부에서 잔류응력의 분포를 확인하기 위하여 용접선 중앙을 기점으로 하여 10mm 간격으로 압입시험을 실시하였다. 압입시험은 하중제어방식에 의해 최대 70 kgf

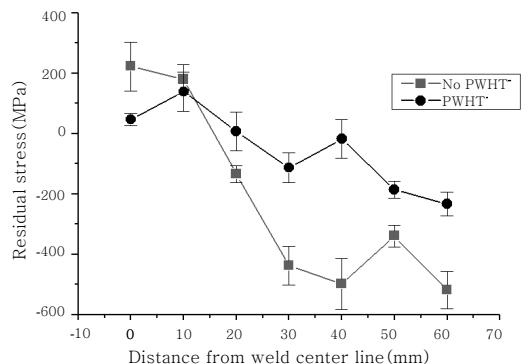
까지 인가하여 시험하였다. 또한 후열처리 효과를 측정하기 위하여 용접부 잔류응력이 이완되기 전에 시험을 실시하고 760 °C에서 2시간 30분의 후열처리를 수행한 후에 잔류응력측정시험을 실시하였다.

3.3.2 잔류응력측정시험 결과

주증기 배관과 재열증기 배관 용접부에 대한 잔류응력측정 시험을 실시한 결과 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. Fig. 10에서와 같이 용접후열처리를 하지 않은 상태에서 잔류응력의 크기는 주증기관 용접부에서는 +300 ~ -500 MPa 범위로 측정되었고, 재열증기관 용접부에서는 +250~-500 MPa로 측정되었다. 그리고 용착금속 부위에서 최고의 인장 잔류응력이 걸려있음을 알 수 있다. 용접부 후열처리를 수행한 후에도 두 용접부에서 약 100 MPa 정도의 인장 잔류응력이 측정되었다. 또한 용접후열처리로 인하여 용접부 주위의 전범위에 걸쳐서 잔류응력 완화효과가 있음을 알 수 있다. 용접후열처리를 실시하기 전과 후의 잔류응력 변화는 약 300MPa 정도의 차이를 확인할 수 있다. 따라서 용접부 잔류응력을 최소화하기 위해서는 무엇보다도 후열처리의 적절한 수행이 가장 중요한 것을 확인할 수 있었다.



(a) Test result for main steam pipe



(b) Test result for reheat steam pipe

Fig. 10 Result of residual stress before and after post weld heat treatment



3.2.3 잔류응력측정 허용여부 검토

측정된 용접 잔류응력의 허용여부를 평가하기 위해서는 강도적인 측면과 파괴역학적인 측면 등을 고려하여 평가되어야 한다. 그러기 위해서는 평가대상 용접부의 역학적 특성 및 재료 물성을 상세히 파악할 경우에만 허용여부를 평가할 수 있다. 따라서 이를 위해서는 각 용접 사양별 파괴인성 시험과 역학적 응력 해석이 수반되어야 한다. 그러나 현실적으로 현장에 적용하고 있는 모든 재료에 대하여 연구를 수행하여 잔류응력의 허용 정도를 평가하기는 어려운 상황이다. 때문에 본 연구에서는 잔류응력의 허용여부를 공학적 임계치 평가를 수행하기 보다는 항복응력의 초과여부를 기준으로 하여 평가하고자 하였다. 이러한 방법은 용접부의 소성변형이 발생하지 않기 위해서는 용접부 운전응력과 잔류응력의 합이 용접부의 항복응력을 초과하지 않아야 하는 것이 전제 조건이며, 안전성을 고려하여 항복응력의 70% 이하에서 허용될 수 있도록 아래와 같은 식을 도출하였다.

$$S_{mr} + S_p < S_y \times 0.7 \tag{3}$$

$$S_r = (S_y \times 0.7) - S_p \tag{4}$$

여기서  $S_{mr}$ 은 측정잔류응력,  $S_p$ 는 최대허용응력,  $S_y$ 는 용접부의 항복응력,  $S_r$ 은 허용잔류응력을 나타낸다.

500MW 석탄화력발전소의 주 증기관의 운전조건 (1005°F, 3597.6psi)에서 주증기관의 설계 최대허용응력 (199.0 Mpa)과 용접부 항복응력(406.5 Mpa)을 식 (4)에 의해 계산한 결과, 최대로 허용할 수 있는 잔류응력은 85.6 Mpa 정도이다. 그러나 이러한 결과는 단지 잔류응력으로 소성변형이 발생하지 않는 것만을 평가한 것이며, 잔류응력이 미치는 여러 가지 문제점을 고려하지 않은 것이다.

4. 결 론

용접부 잔류응력은 용접 손상의 주요원인으로 알려져 있었으나 실제 현장의 용접부에서는 잔류응력 측정법의 어려움으로 인해 잔류응력이 어느 정도 존재하고 있는지를 확인할 수 없었다. 본 연구에서는 화력발전소 주 증기관, 재열증기관 용접부에서 잔류응력을 측정하고 그 허용여부를 평가하고자 하였다.

1) 압입시험법과 톱절단법에 의한 잔류응력측정 비교 결과, 측정값의 추이에서 유사성을 발견할 수 있었으며, 두 방법의 최대 차이는 16% 정도였다.

2) 주증기관 용접부에서 후열처리로 인하여 약 300 Mpa 정도의 잔류응력이 이완되었음을 확인하였다.

3) 측정된 용접 잔류응력의 허용여부를 결정하기 위하여 허용응력과 항복응력 값을 이용하여 잔류응력의 허용정도를 결정하는 방법을 시도하였으며, 주증기 배관 용접부에서는 85.6Mpa 정도가 허용되었다.

그동안 용접부에서 비파괴적으로 잔류응력을 측정하는 것이 어려운 문제였으나 이제 잔류응력 측정기술의 발달로 비교적 정확하게 측정할 수 있게 되었다. 따라서 용접부의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해서는 잔류응력의 허용정도를 평가하는 연구가 수행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. J. Lu, M. RJames and L. Mordfin : Handbook of Measurement of Residual Stresses, Society for Experimental Mechanics, Ch. 8, 1996
2. EPRI, Review and Evaluation of Nondestructive Method for Residual Stress Measurement, EPRI NP-1971 Project, 1395-1397
3. Oliver, W.C. and Pharr, G.M.: An Improved Technique for Determination Hardness and Elastic Modulus Using Load Displacement Sensing Indentation Experiments (1992), 1564-1583.
4. Yeol Choi, Jaeil Jang, Sang-Ki Park, Dongil Kwon : Nondestructive Evaluation of Welding Residual Stress in Power Plant, APCFS(2004)
5. Sang-Ki Park, Yean Shik Ahn, Yeong Sang Cho : Development of Residual Stress Measuring Technique for Pipe Weldments, KEPRI(2002), 30-37 (in Korean)
6. Sang-Ki Park, Yean Shik Ahn, Yeong Sang Cho : Development of Residual Stress Measuring Technique for Pipe Weldments, KEPRI(2002), 44-48 (in Korean)



·박 상 기  
·1958년생  
·전력연구원  
·용접구조물 신뢰도평가  
·e-mail : skpak@kepri.re.kr



·안 연 식  
·1958년생  
·전력연구원  
·발전설비 건전성평가 연구  
·e-mail : ysas@kepri.re.kr



·길 두 송  
·1968년생  
·전력연구원  
·발전설비 건전성평가 연구  
·e-mail : kds6801@kepri.re.kr