

X-ray 회절을 이용한 화력발전소용 P92 강 용접부의 잔류응력 특성

현중섭#, 유근봉*, 최현선*

The Characteristics of Residual Stresses in the Welded Joint of P92 Steel for Fossil Power Plant by the X-ray Diffraction

Jung Seob Hyun[#], Keun Bong Yoo^{*} and Hyun Sun Choi^{*}

ABSTRACT

In the fossil power plant, the reliability of the components which consist of the many welded parts depends on the quality of welding. The residual stress is occurred by the heat flux of high temperature during weld process. This decreases the mechanical properties as the strength of fatigue and fracture or causes the stress corrosion cracking and fatigue fracture. Especially, the accidents due to the residual stress occurred at the weld parts of high-temperature and high-pressure pipes and steam headers. Also, the residual stress of the welded part in the recently constructed power plants has been brought into relief as the cause of various accidents. The aim of this study is the measurement of the residual stress using the x-ray diffraction method. The merits of this are more accurate and applicable than other methods. The materials used for the study is P92 steel for the use of high temperature pipe on super critical condition. The variables of tests are the post-weld heat treatment, the surface roughness and the depth from the original surface. The test results were analyzed by the distributed characteristics of the full width at half maximum intensity (FWHM) in x-ray diffraction intensity curve and by the relation of hardness with FWHM.

Key Words : Residual Stress (잔류응력), P92 Steel (P92 강), X-ray Diffraction (엑스선회절), FWHM (반가폭)

1. 서론

화력발전소 보일러, 배관 등 주요 설비들은 수많은 용접부재들로 이루어져 있기 때문에 설비의 품질은 주로 용접품질에 좌우된다. 용접과정 중에 높은 열에 의해 발생하는 잔류응력은 운전중 재료의 파괴나 피로강도를 저하시키고, 응력부식균열이나 피로파괴 등을 일으킨다. 특히 P92 강은 최근

800 MW 급 화력발전소의 배관과 튜브에 사용되고 있으나, 균열로 인해 용접부의 파열사고가 빈번히 발생되고 있고, 높은 잔류응력의 발생이 손상원인으로 평가되고 있다. 따라서 화력발전소용 P92 강의 용접부에 발생하는 잔류응력의 적절한 평가방법이 시급히 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 X 선 회절을 이용한 잔류응력 측정법의 타당성과 응용분야에 대해 고찰하

접수일: 2007년 6월 5일; 게재승인일: 2008년 3월 11일
교신저자: 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소
E-mail: jshyun@kepri.re.kr Tel. (042) 865-5332
* 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소

고자 한다. 일반적으로 홀드릴링법은 측정이 간단하면서도 다양한 재료에 이용이 가능하지만, 파괴적인 방법으로 데이터의 해석이 복잡하다. 그러나, X 선 회절법은 비파괴적이며, 거시적 응력뿐만 아니라 미시적 응력의 측정도 가능한 방법이다. 이러한 X 선 회절법을 이용하여 용접부에 내재된 잔류 응력 분포를 관찰하고, 후열처리 전후의 반가폭 분포 특성과 경도와의 관계에 대해서도 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시편

본 실험에 사용된 재료는 P92 페라이트 강이다. P92 강은 590 °C 이상 온도 영역에서도 고온 강도와 내산화성이 있고, 스테인레스강에 비해 저렴하며, 큰 열팽창 계수와 낮은 열전도율 때문에 고온 영역에서 사용상 한계가 있는 종래의 2.25Cr-1Mo 강을 대체할 수 있는 9Cr-2W 강이다. P92 재료의 화학조성 및 기계적 특성은 Table 1, 2 와 같으며, 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of P92(wt. %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	others
0.07	0.3			0.5	8.5	0.3	V:0.15-0.25
-	-	0.02	0.01	max	-	-	W:1.5-2.0
0.13	0.6				9.5	0.6	

Table 2 Mechanical properties of P92

Yield stress (σ_y , MPa)	Tensile strength (σ_u , MPa)	Elongation (ϵ_t , %)	Elastic Modulus (E, GPa)
506	674	24%	214(70°F)

Table 3 X-ray diffraction condition

Test condition	Multiple method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	{211}
Tube Voltage	30 kV
Tube Ampere	10 mA
Irradiated area	3 Φ

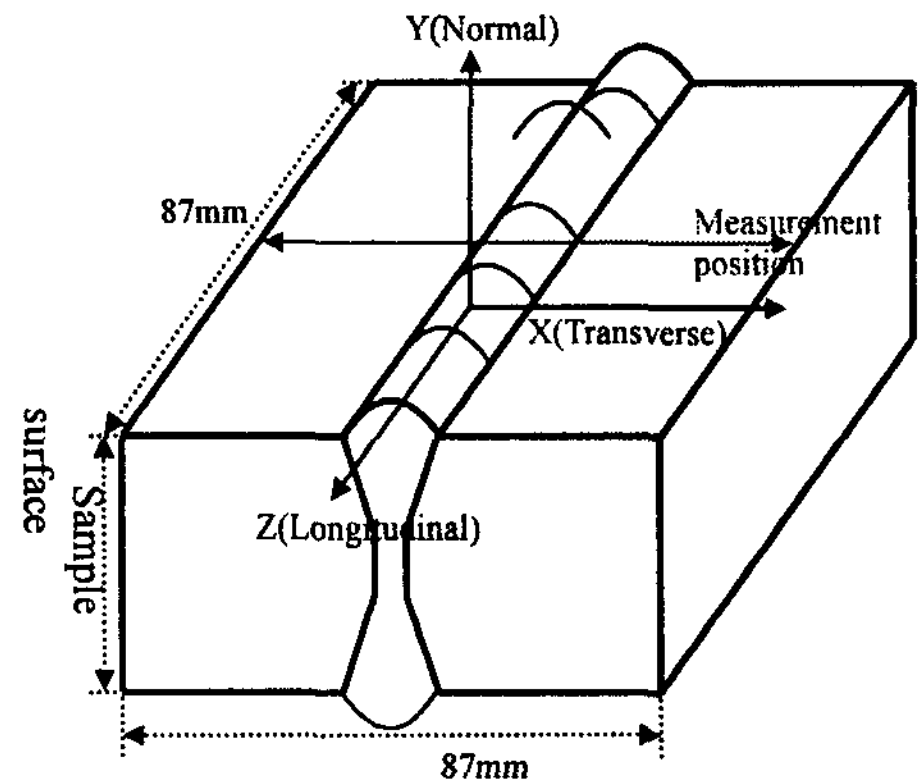


Fig. 1 Schematic view of specimen

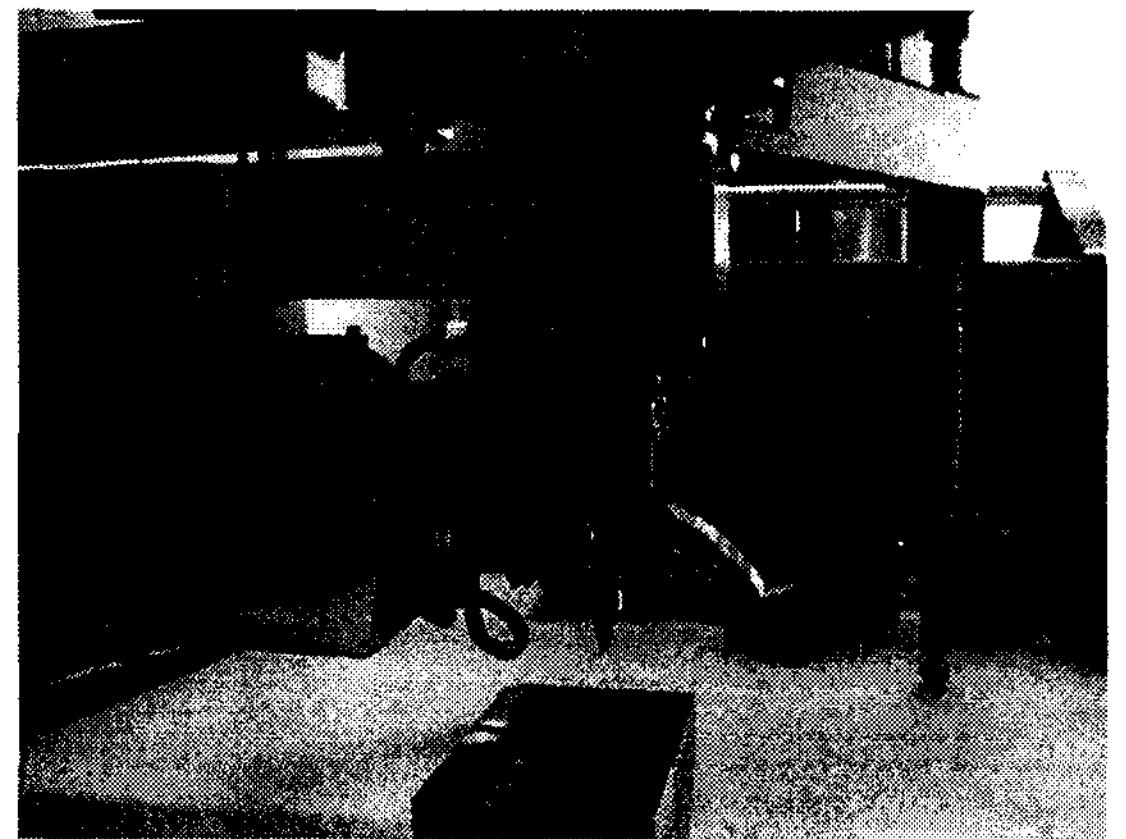


Fig. 2 X-ray equipment used in residual stress

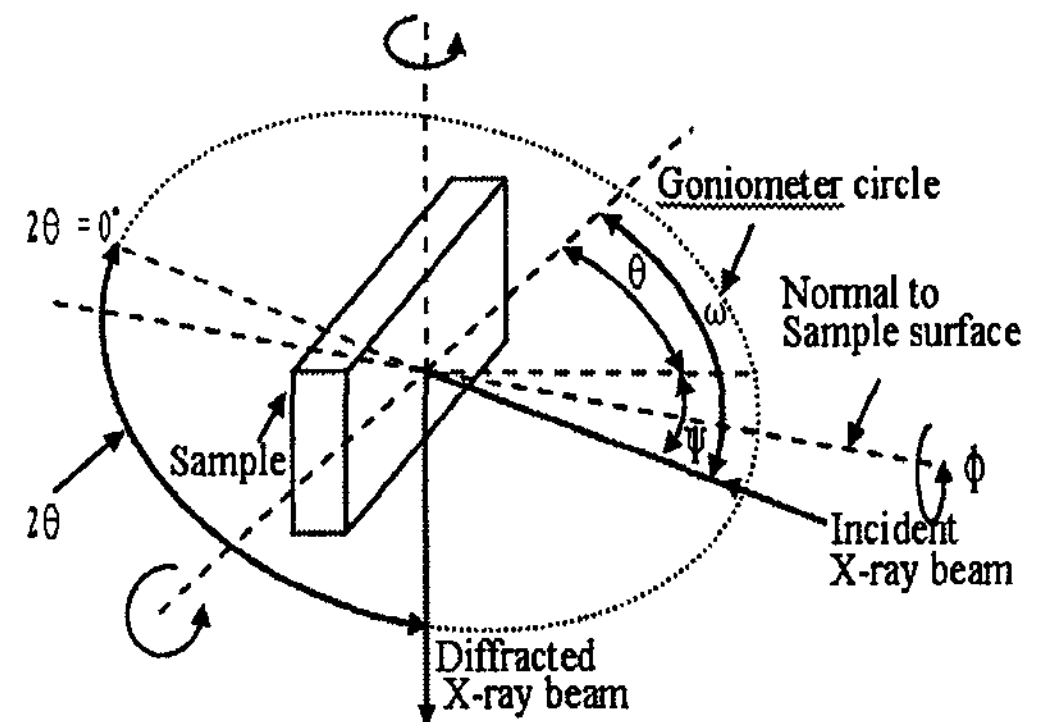


Fig. 3 Angles and rotations used in residual stress measurement

사용된 시편은 노말라이징(1050℃, 1 시간, 상온 냉각)과 템퍼링(760℃, 3 시간, 상온냉각)하였으며, 용접조건은 Table 4 와 같다.

Table 4 Welding parameters for GTAW and SMAW

Process	Bead Layer	Amp.	Volts.	Speed (cm/min)	Preheat/ Interpass(°C)
GTAW	1	120~130	12~13	12~14	200~300
	2~8	150~180	13~16	13~17	
SMAW	9~76	140~160	24~26	15~17	

※ Shielding Gas : Ar(99.9%, 13~15 ℓ/min), Backing Gas : Ar(99.9%, 13~15 ℓ/min), GTAW : Gas Tungsten Arc Welding, SMAW : Shield Metal Arc Welding

2.2 잔류응력 및 반가폭 측정법

본 시험에 사용된 X-선 회절장치는 Fig. 2 와 같이 STRESSTECH 사¹의 XSTRESS 3000 을 사용하였으며, X-선 회절 시험조건은 Table 3 과 같다. 또한, 순수 용접에 의한 잔류응력만을 측정하고자 그라인딩 처리 등 용접과정 이외에 유입된 잔류응력 제거를 STRUERS 사²의 Movipol-3 을 이용해 약 500 μm 전해연마 하였다.

측정방식은 장치가 Fig. 1 과 같이 장치의 측정 위치(measurement position)가 X 방향을 따라 용접부 중앙을 중심으로 우측 (+) 및 좌측 (-)으로 측정하며, 측정방법은 참고문헌³의 방식과 같이 표준 응력측정법에 의해 측정하였다. Fig. 3 에서와 같이 (211) 회절면에 대해서 회절피크(2θ = 156.4°)를 측정하고 입사각을 ±방향으로 각각 5 회(ψ = 0, 20.7, 30, 37.8, 45°) 기울여 격자간격(d)을 측정하여 d·sin²ψ 법⁴에 의해 잔류응력을 측정하였다. X-선 회절에 의한 잔류응력 측정은 스트레인(strain) 대신에 회절피크 위치의 변화량을 측정하여 계산하는 것이다.

이러한 회절피크 위치의 변화는 격자 간격이 변화했음을 의미하고, 그것은 곧 스트레인을 의미하는 것이다. 따라서, 기울기 변화에 따른 격자간격을 측정하고 d·sin²ψ 그래프에서 기울기를 구하면 식(1)을 이용하여 산술적으로 잔류응력을 측정할 수 있다.

$$\sigma_z = \sigma_m(z) - 4\sigma_m(H) \left(\frac{\Delta Z}{H} \right) \quad (1)$$

여기서 H 는 시험편 두께, ΔZ 은 두께변화, σ_m 은 층이 제거된 후의 잔류응력, σ_z 는 새롭게 보정된 잔류응력이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 깊이에 따른 잔류응력 측정결과

깊이에 따른 잔류응력 변화를 측정하기 위해 시험편의 깊이 방향으로 단계적으로 전해연마를 수행한 후 각각에 대해 잔류응력을 측정하였다.

Fig. 4 는 기계가공 및 전해연마 후 시험편 표면으로부터 두께방향으로 잔류응력 분포를 나타낸다. 두께방향으로의 잔류응력 분포는 표면에서 약 0.02 mm 까지는 급격히 압축응력이 증가하다가, 약 0.04 mm 까지 압축응력이 감소한 후, 0.1 mm 까지 약 200 MPa 의 압축응력이 유지된 후 그 이후에는 인장응력이 증가되는 것으로 측정됨으로써 본 시험편의 표면으로부터의 잔류응력 깊이는 약 0.17mm 로 평가되었다. 이러한 시험결과는 다른 문헌에서도 시험편이나 재질에 따라 약간의 차이는 있으나, 일반적으로 표면에서 약 0.3 mm 정도까지는 잔류응력이 내재되어 있는 것으로 보고되고 있다.^{3,5,6} 이러한 결과는 향후 정확한 잔류응력 측정을 위해서는 표면으로부터 최대 약 0.3 mm 까지는 전해연마 등을 통해 표면층을 제거하여야 함을 시험을 통해 입증하였다.

또한, 깊이 방향으로 잔류응력 분포를 측정할 목적으로 전해연마를 수행하여 층을 제거했을 때 제거된 표면의 잔류응력은 완화되지만, 기계가공 등으로 표면의 잔류응력이 완전히 완화되지 않고 재 분포되어 이후 잔류응력 측정에 영향을 미칠 경우에는 깊이에 따라 잔류응력을 보정해야 한다. 일반적인 평판에서의 깊이에 따른 잔류응력의 재 분포에 대한 해는 Moore 와 Evans⁵에 의해 제안되었고, Sikarskie⁶에 의해 일반화되었다. 상기 문헌들에서는 박판일 경우에는 잔류응력의 변화가 뚜렷하여 보정이 필요하지만, 후판의 경우는 잔류응력 변화가 미미하여 보정이 필요 없는 것으로 보고되고 있다.

따라서, 본 시험의 경우는 시험편의 두께가 60mm 로 표면층 제거 후 식(1)에 의해 재 분포된 잔류응력을 계산한 결과, 잔류응력의 변화는 1 % 미만으로 거의 변화가 없기 때문에 이후의 시험은 보정하지 않고 시험하였다.

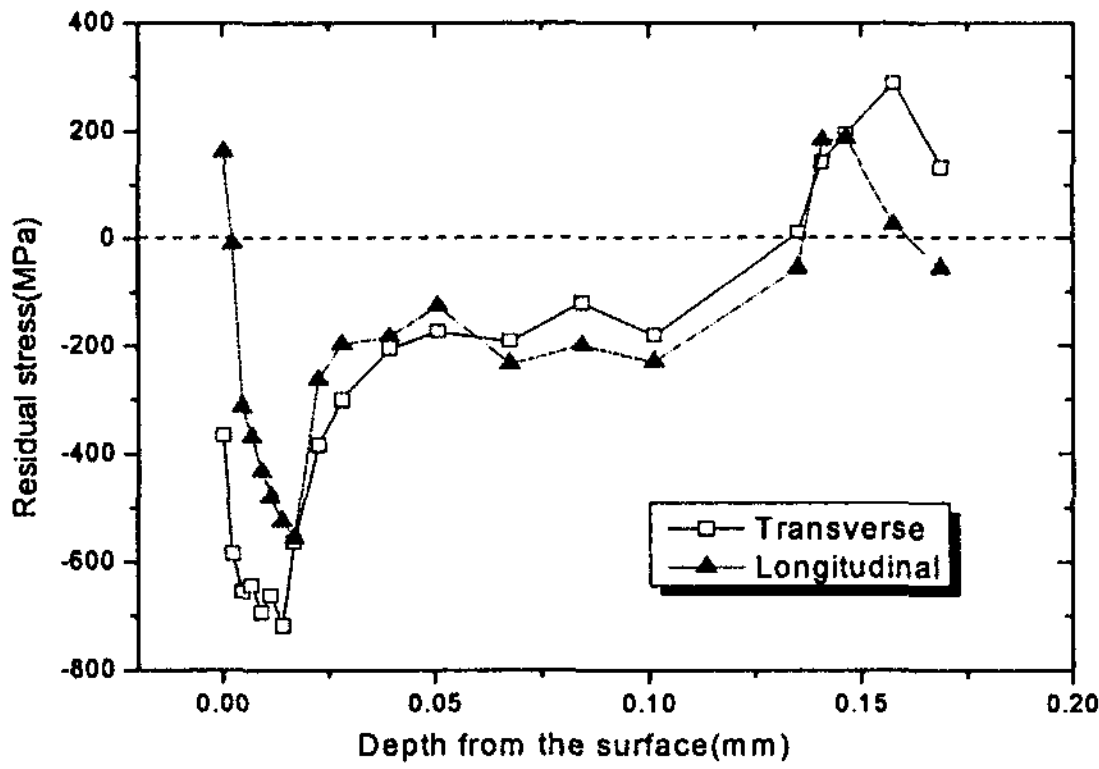
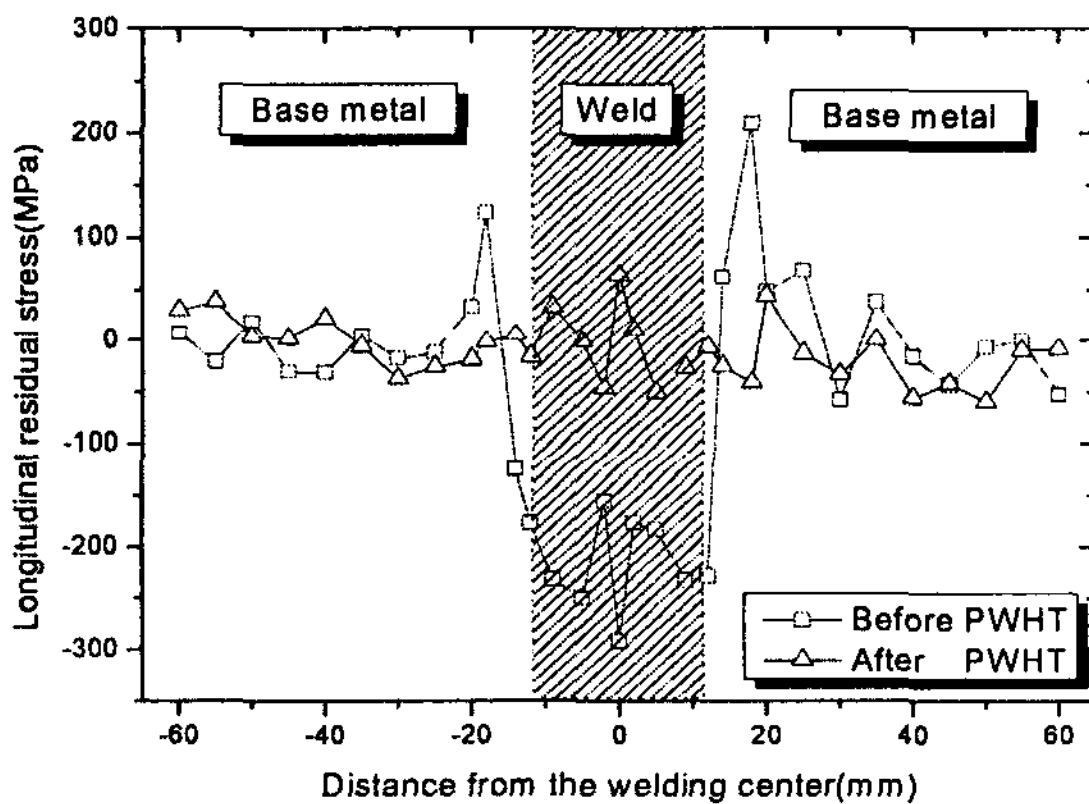
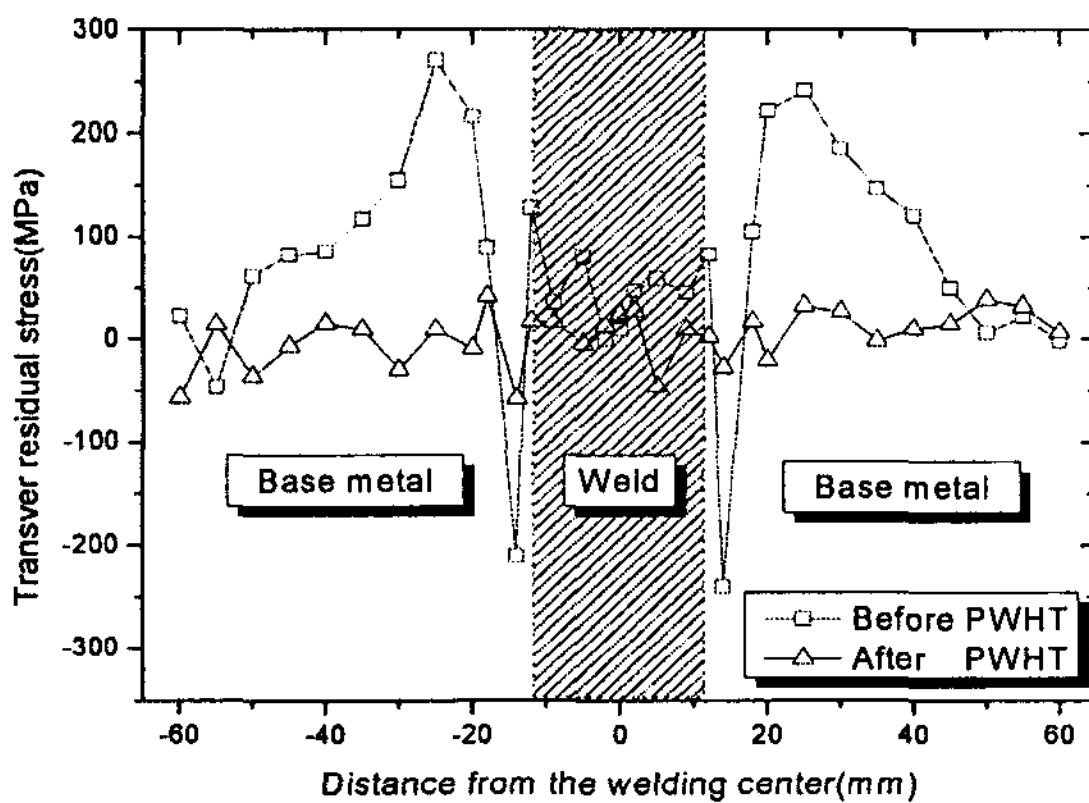


Fig. 4 Distribution of residual stress with depth by electrolytic polishing



(a) Longitudinal residual stress



(b) Transverse residual stress

Fig. 5 Residual stress before and after PWHT

3.2 후열처리 전, 후의 측정결과

Fig. 5는 후열처리(PWHT)전, 후의 용접선 방향(longitudinal)과 용접선에 직각방향(transverse)의 잔류응력을 측정된 결과이다.

먼저, 열처리전 용접선 방향의 잔류응력은 용접부 중앙에서 291 MPa의 최대 압축응력이 발생되며, 열영향부에서 급격하게 최대 209 MPa의 인장응력으로 바뀌고 용접부에서 멀어지면서 점차 0으로 접근하는 경향을 나타내고 있다.

용접선 직각방향의 잔류응력은 용접부내에서 약 100 MPa 이내에서 분포하며, 열영향부에서는 최대 240.1 MPa의 압축응력이 발생되다가 중심으로부터 약 20-25mm 거리에서 다시 최대 270.1 MPa의 인장응력이 발생하고 용접부에서 멀어지면서 점차 0으로 접근한다.

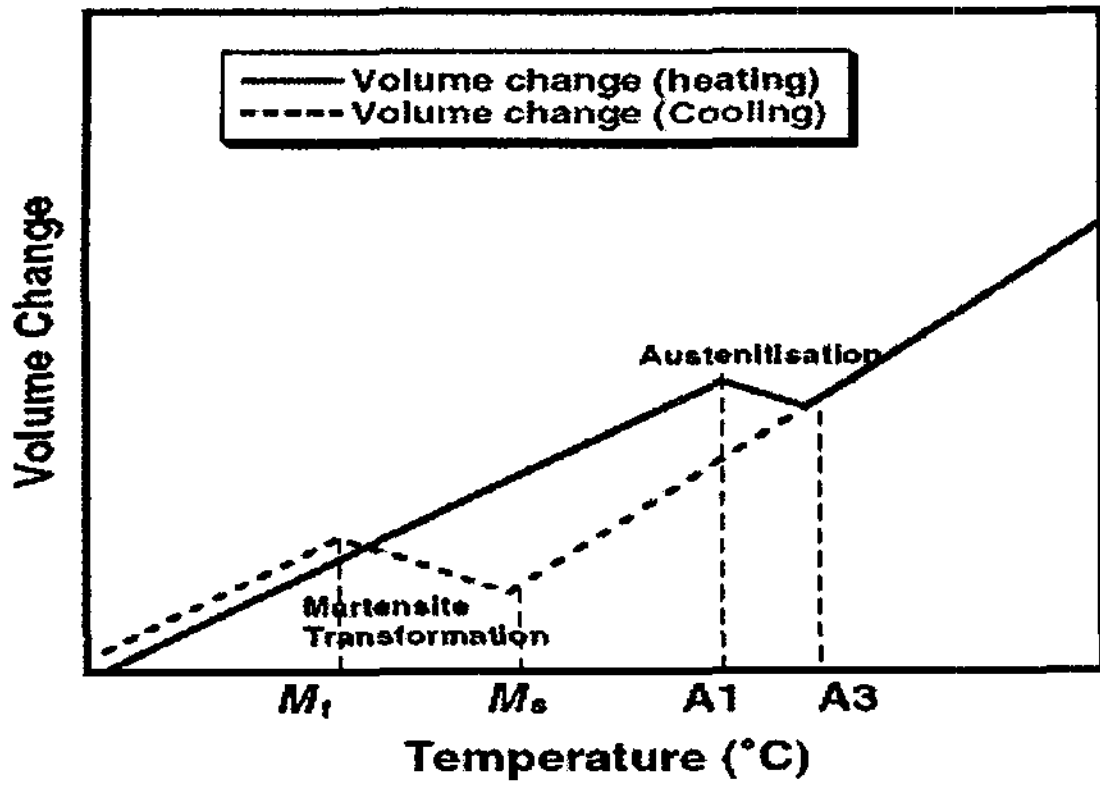
이러한 잔류응력은 후열처리 시험편의 시험결과, 두 방향 모두 ± 50 MPa 이내로 측정되어 잔류응력을 완화시키기 위한 후열처리 효과가 열처리전에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

용접부 잔류응력의 원인으로서는 용접과정에서 P92 강의 냉각 시 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 원인으로 알려져 있으며, Fig. 6과 같이 상변태 시 부피가 팽창하며, 부피 팽창이 없을 경우와 비교했을 때 용접부위 잔류응력의 크기와 부호를 변화시킨다고 알려져 있다.⁴

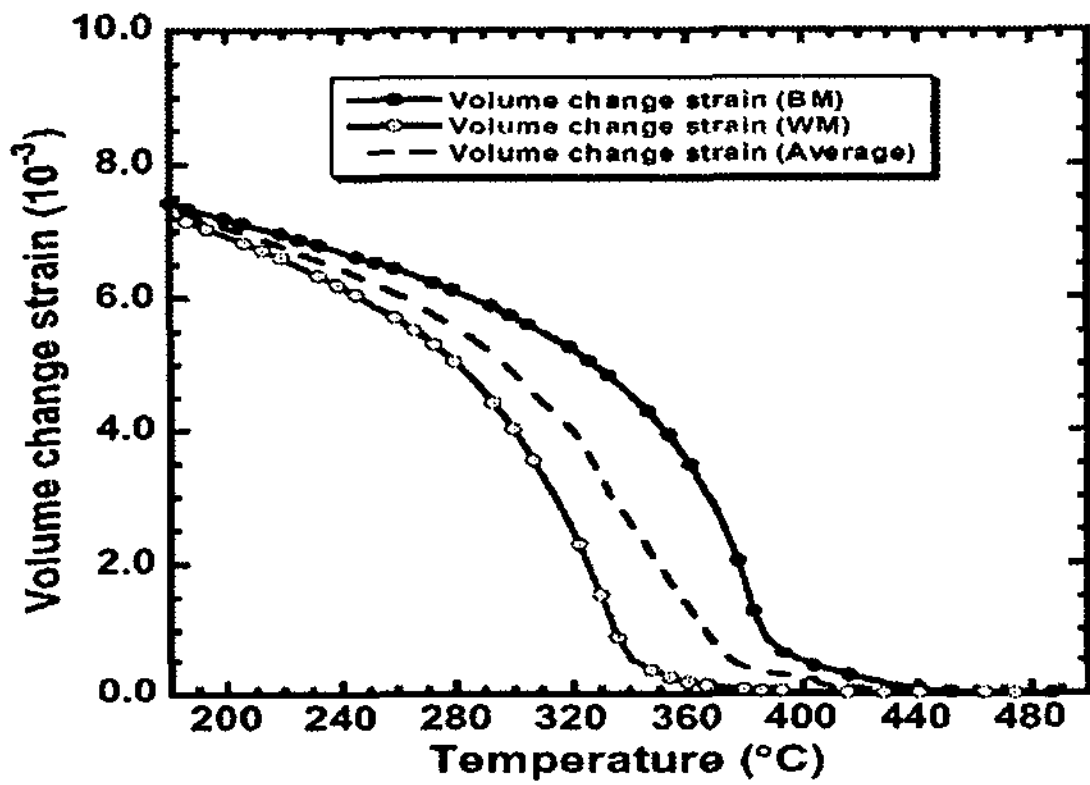
이러한 결과를 토대로 분석하면, 본 실험에 사용된 P92 강 용접부는 용접 시 냉각에 의한 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 일어나 용접부 중앙에서 용접선 방향의 압축잔류응력이 발생되었을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 본 시험에서 많은 측정결과 중 $\psi = 20.7^\circ$ 에 대해 계산된 $d \cdot \sin^2 \psi$ 그래프를 나타낸다. P91 강은 2.25Cr-Mo 강과 달리 그래프상에 진동(oscillating)이 심하게 나타나는데, 이것은 거시적으로 소성변형이 불균질하게 분포하거나, 외력이나 거시적응력 때문에 발생한 변형률에 기인한다고 보고되고 있다.³

진동하는 $d \cdot \sin^2 \psi$ 그래프에서 잔류응력을 계산하는 것은 비선형 최소자승법을 통해서 어느 정도는 가능하지만, 수반되는 많은 조건들이 필요하고, 진동폭이 클 경우 비교적 큰 에러를 동반하기 때문에 아직까지 만족스럽게 해결되지 못하고 있는 상태이다.



(a) Phase transformation



(b) Volumetric change

Fig. 6 Schematic diagram of volume change due to phase Transformation (a) and volumetric change of 9Cr-1Mo weld metal during cooling (b)³

d - spacing

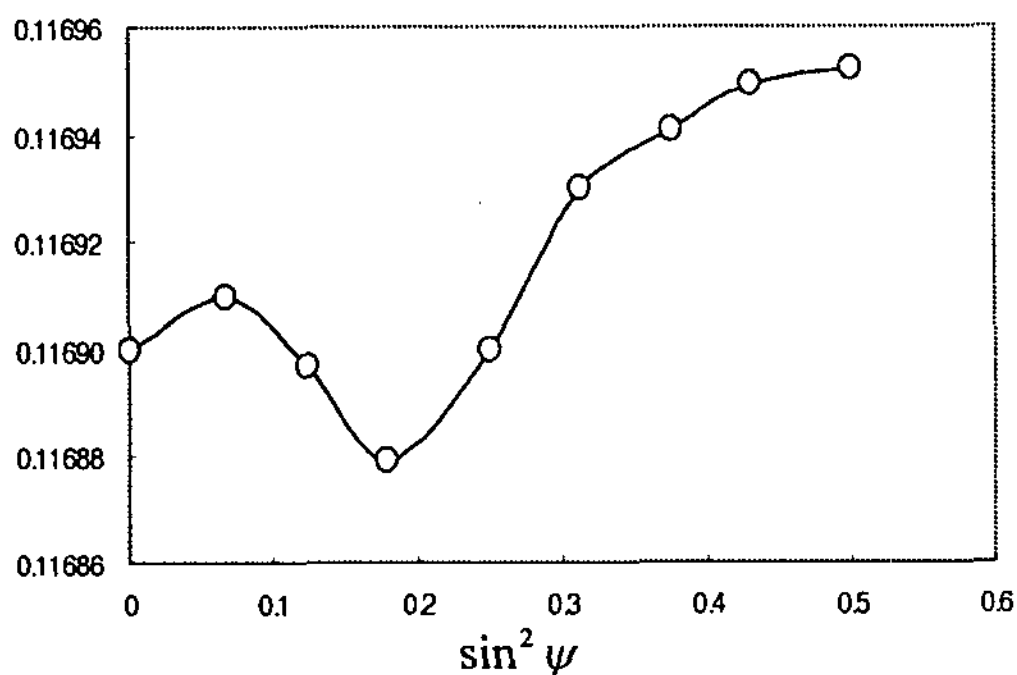


Fig. 7 Example of the oscillating *d*-sin²ψ graph

또한 해당 회절면의 탄성계수(X-ray effective elastic constant)를 측정해야 하지만, 거시적인 탄성계수(bulk elastic constant)를 사용함으로써 오차를 더욱 커지게 만들 수 있다. 탄성계수값은 격자 방향에 따라 달라지며, 이것은 모든 {211}평면이 자신의 탄성계수를 가진다는 것을 의미하고, 거시적인 탄성계수는 모든 개개의 {211}의 평균값을 의미한다. 그러므로 4 절점 굽힘시험과 결합된 X-선 탄성계수 측정 시스템 등을 이용하여 정확한 X-선 탄성계수를 측정하여야 좀 더 정확한 잔류응력 값을 구할 수 있을 것이다.

반가폭(FWHM)은 X-선 회절곡선에서 최대강도의 1/2 인 지점에서의 회절각의 폭을 의미한다.

Fig. 8 은 시편의 용접선 방향과 용접선 직각방향으로 측정한 반가폭 분포이다. 그래프에서 보듯이 후열처리 전 용접부 중앙의 반가폭은 두 방향 모두 약 3.75° 이고, 열영향부를 거치면서 급격하게 감소하여 모재에서는 약 2.0° 로 일정하게 분포한다. 이러한 분포는 후열처리 후에는 반가폭이 용접부에서 현저하게 감소하여 후열처리 전에 비해 용접부와 모재 모두 약 1.8° 상태로 모든 곳에서 일정하게 분포하였다.

따라서, X-선 회절에 의한 반가폭은 시험결과에서 알 수 있듯이 용접선 방향에 관계없이 유사한 분포를 보이고 있고 후열처리 전, 후의 상태를 정확히 표현할 수 있어, 용접부와 모재의 특성 차이와 후열처리의 적절한 수행정도를 정성적으로 평가할 수 있는 파라미터로 활용될 수 있다.

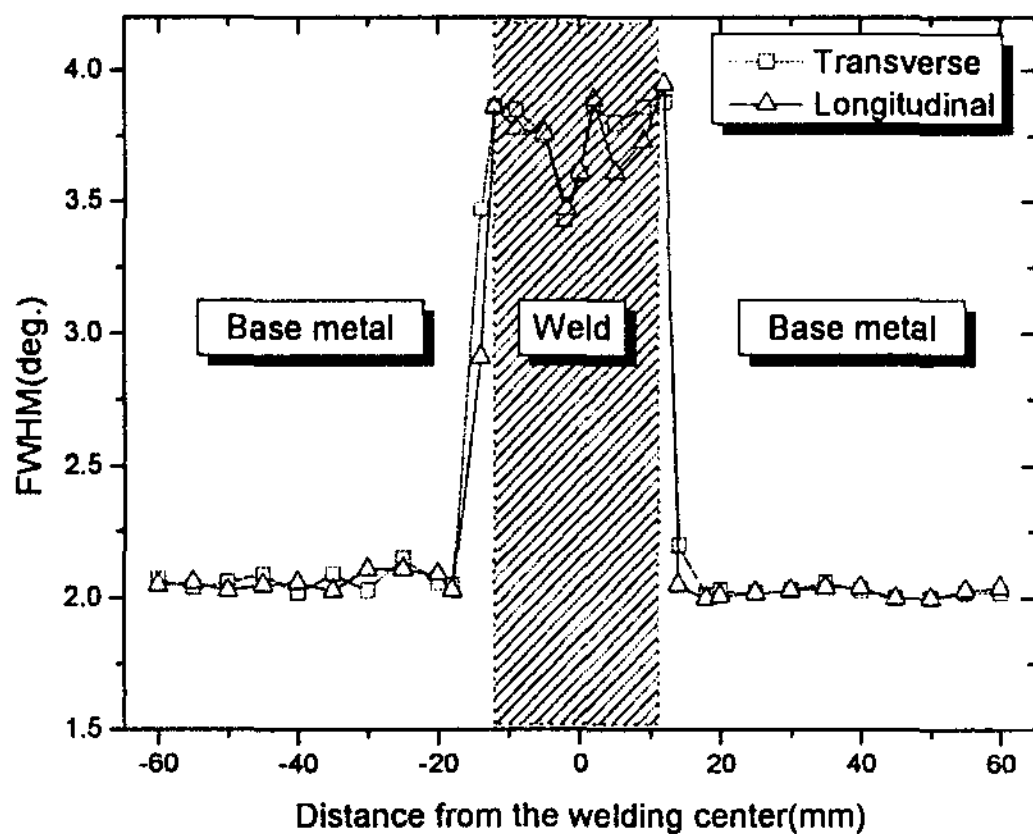
두 방향에서의 반가폭을 비교해보면 반가폭은 잔류응력과 달리 용접선 방향이나 용접선에 직각 방향에서 거의 동일한 값을 보이고 있다. 이것은 반가폭이 잔류응력과 달리 방향을 가지고 있지 않은 경도값과 같은 스칼라량이라는 것을 의미한다.

재료는 기계가공이나 열처리 등으로 조직적 불균일성이 일어나 결정격자의 뒤틀림이 발생함과 동시에 이로 인해 반가폭에 영향을 미치는 미시적 잔류응력(micro residual stress)이 발생하게 된다.⁷ 이러한 응력은 금속입자 상들 사이에서 다른 열팽창계수 때문에 생기게 되고, 순수한 재료보다는 다중상을 가지는 합금이나 복합재료에서 쉽게 생기게 된다.⁸

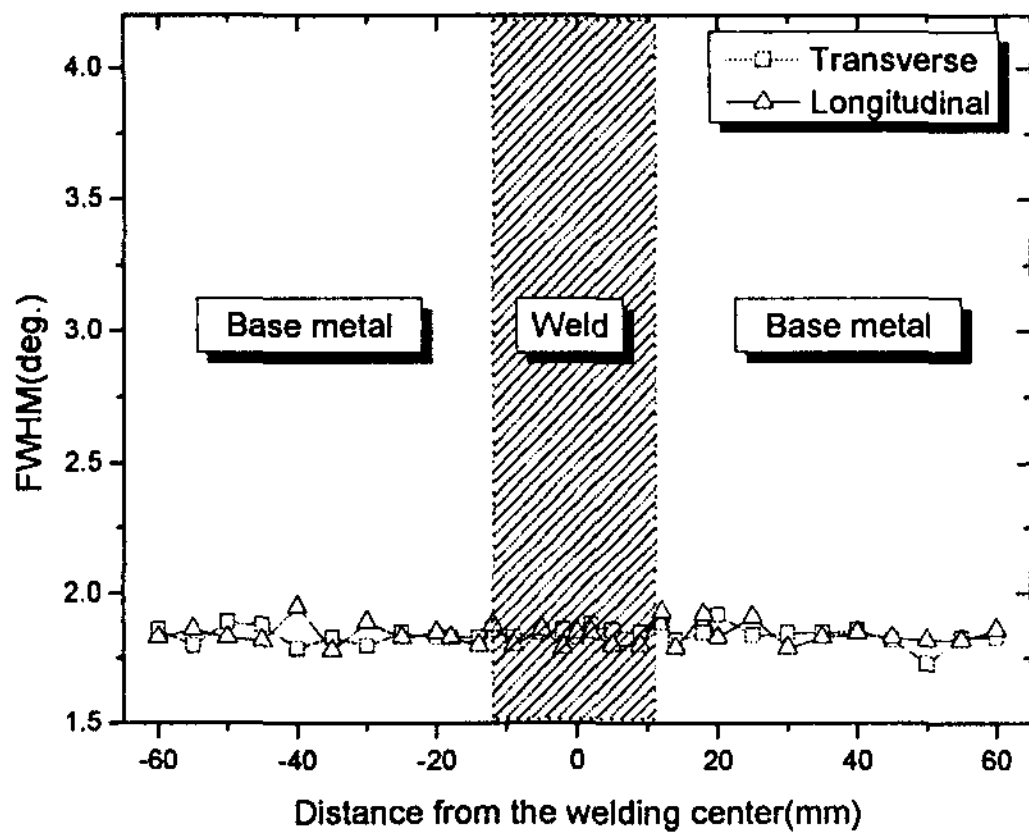
따라서, 반가폭이 크다는 것은 미세조직의 불균일 정도가 크다는 것을 의미하고, 반대로 반가폭이 작다는 것은 결정격자가 균일한 응력을 받고

있다는 것을 의미한다.

또한 반가폭은 격자 변형률, 부결정립의 치수, 전위밀도나 결정자 방위 등 복합적인 요인을 반영한 상수이므로, 이러한 반가폭을 적절히 이용한다면 재료나 용접부의 특성뿐만 아니라, 열처리, 피로 및 크립손상과 관련된 좋은 파라미터로 폭넓은 활용이 가능할 것이다.



(a) Before post weld heat treatment



(b) After post weld heat treatment

Fig. 8 Comparison of full width at half maximum in transverse and longitudinal direction

3.3 용접부의 반가폭과 경도 측정결과

경도값과 반가폭과의 상관관계를 알아보고자 X-선 회절장비를 이용하여 Fig. 9 와 같이 비커스 (Vickers) 표준경도시험편에 대하여 반가폭을 측정하였다.

Fig. 9 에서 반가폭 측정결과와 경도 측정결과가 선형적인 관계가 나타남에 따라 반가폭이 경도와 밀접한 상관관계를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 반가폭은 전위밀도(dislocation density)로 표시가 가능하며, 이것은 기계적 성질에서는 인장강도와 좋은 상관관계가 있고, 인장강도는 경도와 비례관계가 있기 때문이다.

또한 저 경도 영역에서는 반가폭은 경도차에 대하여 둔감해진다. 이것은 X-선 회절이 모재 페라이트상 만의 결정조직을 검출하는 반면, 저 경도 영역에서의 경도는 시멘타이트(cementite) 등 그 밖의 상에도 크게 영향을 끼치기 때문이다.

Fig. 10 은 본 연구에서 사용된 시편 용접부에 대해 후열처리 전, 후의 비커스 경도와 반가폭 측정결과를 비교한 것이다.

먼저, 비커스 경도측정결과는 후열처리 전에는 용접부가 약 380 Hv 를 유지하다가 열영향부를 지나면서 급격히 감소하고, 모재에서는 약 240 Hv 정도의 크기로 대체로 일정한 상태를 보인다. 그러나, 후열처리 후에는 모든 부위에서 약 225 Hv 의 크기로 일정하게 나타났으며, 후열처리 전후의 용접부 특성을 뚜렷하게 확인할 수 있다.

반가폭 측정결과는 이미 Fig. 8 에서 언급하였으며, Fig. 10 과 같이 비커스 경도측정 결과와 비교할 때, 반가폭과 비커스 경도는 약 $\pm 10\%$ 이내의 오차를 보이지만, 매우 유사한 분포 경향을 가지고 있음을 알 수 있다.

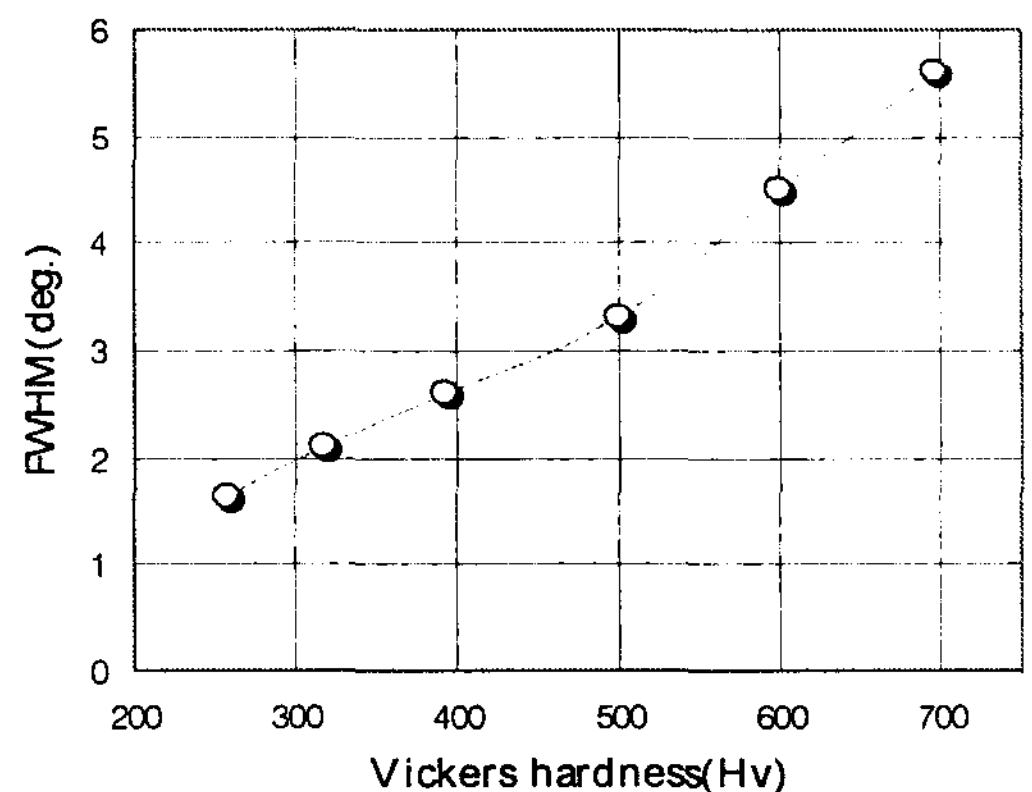


Fig. 9 Full width at half maximum for standard hardness calibration block as a function of Vickers hardness

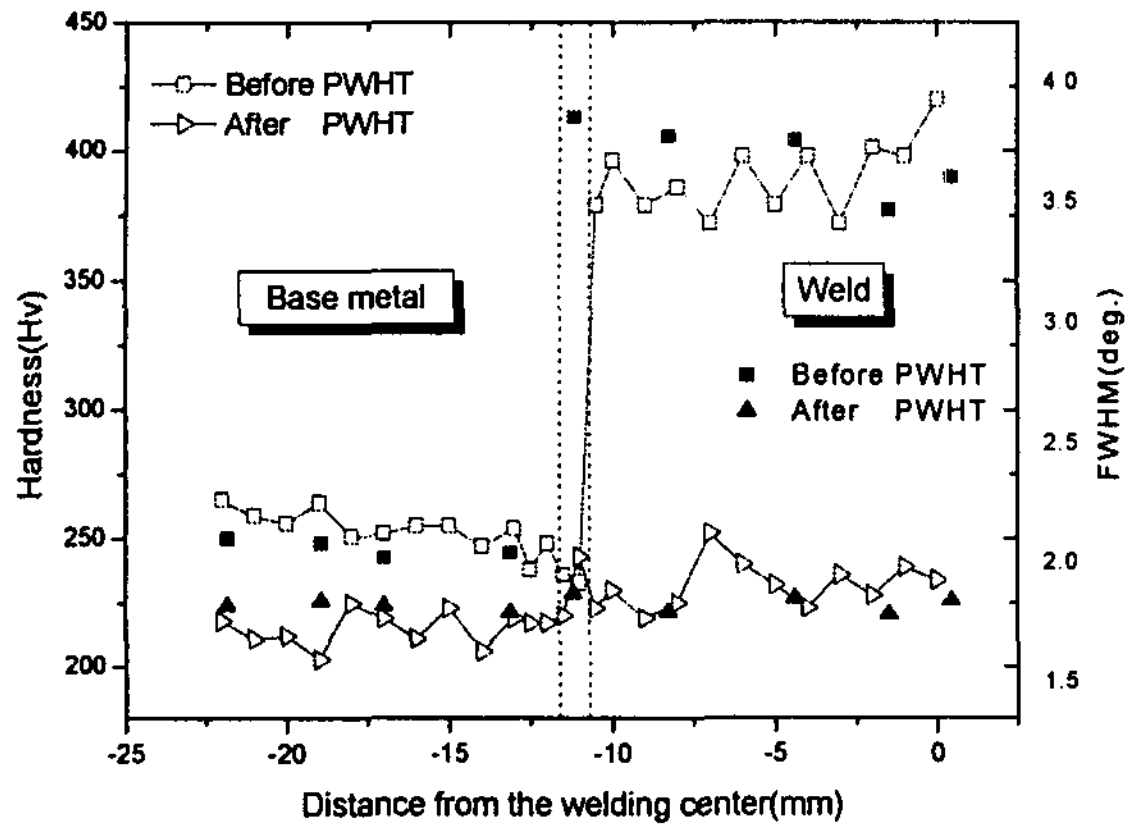


Fig. 10 Comparison of vickers hardness and full width at half maximum before and after post weld heat treatment

따라서, X-선 회절을 이용하여 잔류응력 측정 시 계산될 수 있는 반가폭은 일반적인 휴대용 경도기로 측정이 어려운 부위의 경도값을 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 X 선 반가폭은 경도와와의 관계 외에도 각종 재료의 피로수명 예측에도 사용되는 것으로 알려져 있다.⁹

4. 결론

화력발전소용 고온재료인 P92 강 용접부에 대해 휴대용 X-선 회절장치를 이용하여 $d\text{-sin}^2\psi$ 법으로 잔류응력과 반가폭을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용접부와 모재에서 기계가공에 의한 잔류응력은 깊이에 따라 서로 다른 형태로 분포한다. 표면제거로 인해 잔류응력이 재 분포되므로 적절한 방법으로 보정되어야 하나, 본 연구에서 사용된 후판 시편의 경우 최대 0.3 mm의 표면층 제거 후 잔류응력 변화는 1% 미만으로 거의 발생되지 않았다.
2. 후열처리 전후의 잔류응력의 변화는 후열처리 전에는 용접선방향의 잔류응력이 용접부에서 291 MPa, 용접선에 직각인 방향의 잔류응력은 열영향부 부근에서 270 MPa로 가장 높게 발생하지만, 이것은 항복강도(506 MPa) 보다 작은 크기이며, 이들은 용접부 중심으로부터 멀어지면서 점차 완화되어 0에 가까워지며, 후열처리 후에는 잔류응력이 50 MPa 이내로 급격히 감소

하는 경향을 나타내었다.

3. 반가폭의 특성을 평가하고자 후열처리 전, 후의 반가폭을 측정하였다. 후열처리 전에는 반가폭이 용접선 방향에 관계없이 용접부에서는 3.75°, 모재에서는 2.0°로 측정되었고, 후열처리 후에는 용접부와 모재와 관계없이 모두 약 1.8°로 일정하게 측정되었다. 그러므로 X-선 회절에 의한 잔류응력과 함께 반가폭은 용접부 특성과 후열처리의 적합성여부를 판단할 수 있는 매우 정확한 파라미터로 활용이 가능하다.
4. 반가폭 측정결과와 비커스 경도측정결과를 비교한 결과, 선형적인 관계가 있으며, 후열처리 전, 후의 용접부와 모재에서 매우 유사한 분포를 가진다. 또한, 반가폭은 잔류응력과 달리, 방향성이 없는 스칼라량으로 향후 용접부의 잔류응력과 경도의 정확성 평가에 활용될 수 있다.

참고문헌

1. Stresstech GmbH, Bahnhofstrasse 3 D-56457 WESTERBURG, Germany, www.stresstech.de
2. Struers Ltd, Unit 25a B90 4NZ Solihull West Midlands, United Kingdom, www.struers.com
3. Moore, M. G. and Evans, W. P., "Mathematical Correction for Stress in Remover Layers in X-ray Diffraction Residual Stress Analysis," Trans. of Society of Automotive Engineers, Vol. 66, pp. 355-360, 1958.
4. Noyan, I. C. and Cohen, J. B., "Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation," Materials Research and Engineering, Springer-Verlag New York Inc., pp. 117-154, 1987.
5. Sikarskie, D. L., "On a Series Form of Correction to Stresses Measured Using X-ray Diffraction," Trans. of AIME, Vol. 239, pp. 577-580, 1967.
6. Deng, D., Luo, Y., Serizawa, H., Shibahara, M. and Murakawa, H., "Numerical Simulation of Residual Stress and Deformation Considering Phase Transformation Effect," Trans. of Joining and Welding Research Institute, Vol. 32, No. 2, pp. 325-333, 2003.
7. Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T. and Grant, P. V.,

“A Review of Residual Stress Measurement Methods,” National Physical Laboratory, MATC(A)04, pp. 1-3, 2002.

8. Han, B. H. and Park, W. K., “A Study of X-ray Residual Stress Measurements on Textured Steel,” Journal of the Korean Institute of Metal and Material, Vol. 22, No. 9, pp. 768-773, 1984.
9. Cho, S. S., Kim, S. H. and Joo, W. S., “A Study on the Prediction of Fatigue Life in 2024-T3 Aluminium using X-ray Half Value Breadth,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 145-152, 2000.