

AISI 304 표면용접평판 시편의 용접잔류응력 측정 특성 연구

이경수[†], 이정근^{*}, 송택호^{*}, 최현선^{**}, 노동성^{***}, 박재학^{****}

A Characteristic Study of Weld Residual Stress Measurement for AISI 304 Plate Surface Weld Specimen

Kyoung-soo Lee, Jeong-keun Lee, Taek-ho Song, Hyun-sun Choi, Dong-seong Rho, Jai-hak Park

Key Words : Residual Stress Measurement(잔류응력측정), Weld Residual Stress(용접 잔류응력), Hole Drilling Method(구멍뚫기법), X-ray Diffraction Method(엑스선회절법), Instrumented Indentation Method(계장압입법)

Abstract

This study is performed to compare characteristics of various measurement technique for weld residual stress. AISI 304 plate with one path weld on the surface was manufactured for this study. Hole drilling method, X-ray diffraction method and instrumented indentation method were used to measure the residual stress before and after welding. All the results were compared and analyzed.

1. 서론

금속재료는 제작 및 용접과정에서 가해지는 기계적, 열적 하중에 의해 표면 또는 내부에 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 제작상의 잔류응력은 균열 또는 부식의 원인이 되기 때문에 대부분 열처리를 통해 허용범위 이내로 제거되지만, 현장 용접의 경우 여건에 따라 잔류응력을 제거하기 어려운 경우도 존재한다.

원자력발전소에는 많은 용접부가 존재하고 있는데, 그 중 탄소강과 스테인레스강이 연결되는 이중금속 용접부에서 최근 균열사례가 보고되고 있으며 그 원인으로 용접중 발생했던 과도한 잔류응력이 지목되고 있다⁽¹⁾. 그러나, 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 잔류응력의 크기를

정확하게 예측하는 일은 현재의 기술로서도 쉽지 않으며 전력연구원에서는 이의 해석 및 측정 방법을 표준화하기 위한 연구를 수행하고 있다⁽²⁾.

본 논문은 이 연구의 일환으로서 단순한 시편을 제작하고 다양한 방법으로 잔류응력을 측정한 결과이며 각 방법간의 특성 및 차이를 확인할 수 있었다. 시험을 위해 AISI304 사각 평판 표면에 1-path 용접한 시편을 제작하였으며 구멍뚫기법, 엑스선회절법 및 계장압입법으로 잔류 응력을 측정하였다. 시편가공 과정에서 표면에 작용하는 잔류응력의 영향을 확인하기 위해 용접전의 표면잔류응력을 병행 측정하였다.

2. 용접잔류응력 측정 원리

일반적으로 잔류응력 측정기법은 파괴적기법과 비파괴적 기법으로 구분된다. 파괴적 기법은 재료 내부에 형성되어 있는 잔류응력의 구속상태를 절단 또는 제거할 때 완화되는 변형률을 스트레인게이지를 이용하여 측정하고 이를 잔류응력으로 환산하는 기법이다. 대표적인 방법으로 구멍뚫기법(hole drilling method), 절단법

[†] 회원, 한전 전력연구원

E-mail : leekys@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5652 FAX : (042)865-5604

^{*} 회원, 한전 전력연구원

^{**} 회원, 피레타(주)

^{***} 회원, 프론틱스(주)

^{****} 회원, 충북대학교

등이 이에 해당한다. 비파괴적 방법은 잔류응력 발생 전, 후의 물리적 성질 또는 결정학적 변화를 감지하여 변화인자와 잔류응력간의 상관관계를 이용하여 잔류응력을 측정하는 기법으로서 X-선 및 중성자 회절, 자기적인 방법과 초음파 속도 측정법 등이 있다. 계장화 압입시험은⁽³⁾ 아직 널리 알려져 있지는 않으나 압입자를 통해 재료에 하중을 인가 및 제거하는 과정 중의 변위를 연속적으로 측정하여 압입하중과 변위 곡선의 상관관계를 구하고 이를 통해 잔류응력을 구하는 방법이다. 기계적 물성을 이용하면서도 100um 정도의 작은 압흔만을 남기고 시험하기에 준-비파괴적인 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 구멍뚫기법, 엑스선회절법, 계장압입법의 세 가지 방법을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 구멍뚫기법은 ASTM E831-99 에 측정법이 제시되어 있는 표준화된 측정방법으로서 2mm 이내의 표면의 잔류응력을 측정하는데 널리 사용되지만 두께를 통한 응력의 변화가 비선형적으로 변화할 때는 크기를 예측하기 어려운 단점이 있다. 스트레인게이지의 반경이 4~6mm 이므로 반경 4~6mm, 두께 2mm 체적의 평균 잔류응력값을 측정한다고 할 수 있다. 일반적으로 측정오차는 $\pm 20\sim 30\text{MPa}$ 정도인 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾.

엑스선 회절법은 잔류응력으로 인해 격자간 거리가 달라지는 것을 이용하는 방법으로서 엑스선의 금속에 대한 침투깊이가 수십 μm 이내이므로 표층에서의 잔류응력, 또는 격자단위의 미세조직의 국부 잔류응력을 측정하는데 유용하다. 표면의 상태에 매우 민감하므로 표면상태가 고르지 못할 경우 위치에 따라 큰 값의 편차를 나타낼 수 있다. 균일재료의 경우 $\pm 30\text{MPa}$ 정도의 측정오차를 갖는다.

계장압입법은 재료에 인장/압축 잔류응력이 존재하면 잔류응력이 존재하지 않는 상태에 비해서 압축 잔류응력상태에서는 높은 압입하중이, 인장잔류응력상태에서는 낮은 압입하중이 필요하므로 이러한 압입하중의 감소 및 증가분으로서 잔류응력을 평가한다. 이경우 등의 논문⁽³⁾에서는 Fig.1 로 표시되는 비 등방향 2 축 잔류응력상태에서의 잔류응력을 다음 식으로 제시하였다.

$$L_{res} / \Psi A_c = (1 + p) \sigma_{res} / 3 \quad (1)$$

여기서, L_{res} 는 잔류응력 유도 수직하중, Ψ 는 소성구속인자, $A_c =$ 접촉면적, $p =$ 비등방 2 축응

력계수로서 1/3 로 가정, $\sigma_{res} = x$ 또는 y 방향의 잔류응력이다. Fig. 1 에서 압입자 직하에 존재하는 코어는 구형 공동모델을 고려하여 공동내부의 정수압 응력(hydrostatic stress)는 항복강도(σ_y)의 2/3 로 가정한다.

한편, 최민재 등의 논문⁽⁵⁾에서는 Knoop 압입자를 사용하여 이방성 계수를 구할 수 있음을 제시한 바 있다. 본 논문에서는 Knoop 압입자를 이용하여 측정위치의 이방성 계수를 결정하였고 p 값은 전체적으로 약 2/3 정도의 값을 보였다.

3. 시편제작

실험시편으로서 원자력발전소 배관재료로 널리 사용되는 AISI 304 재료를 선택하였으며 측정결과를 쉽게 비교할 수 있도록 가장 단순한 평판재를 사용하였다. 시편은 냉간압연(cold-rolled)으로 제작되었고 표면에는 별도의 절삭작업을 수행하지 않았다. 시편의 크기는 180 x 120 x 16.1(t) mm 이었으며 시편 중앙에 Fig.2 와 같이 길이 60 mm, 폭 10 mm 의 크기로 용접을 수행하였다. 용접은 가스텅스텐아크용접 (GTAW)을 사용하였고 용접조건은 Table 1 과 같다. 동일한 방법으로 2 개의 시편을 제작하였으며 1 개는 천공법에, 다른 1 개는 엑스선회절법과 압입법에 사용하였다.

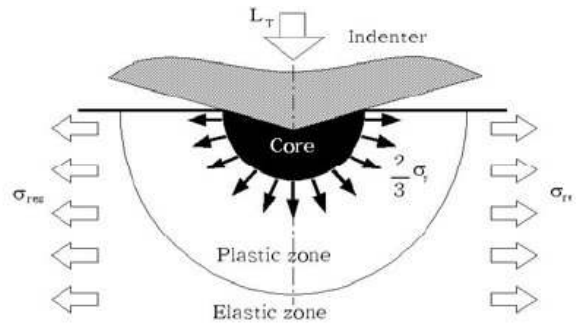


Fig. 1 Stress condition under ball indentation

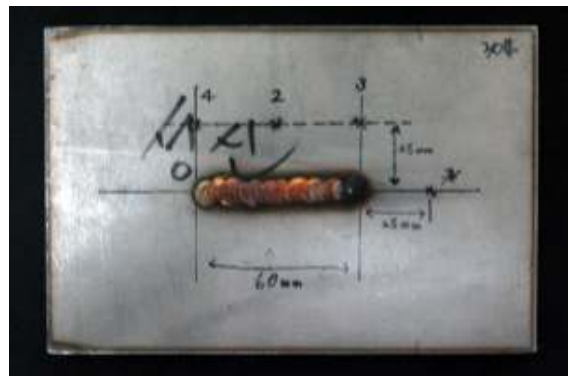


Fig. 2 Weld specimen

Table 1 Weld condition

모재	용접 봉	용접봉 직경	용접 전압	용접 전류	용접 시간
AISI304	ER308	2.4 φ	380V	60A	32 초

4. 잔류응력 측정

4.1 구멍뚫기법

구멍뚫기법을 이용하여 용접잔류응력을 측정하였다. 측정장비로는 Vishay Americas 사의 RS-200 을 사용하였고 스트레인게이지는 Micro-measurement 사의 CEA-XX062UL-120 을 사용하였다. Fig. 3 에 측정장비를 도시하였다.

시편 제작과정 중에 발생한 잔류응력을 확인하기 위해 용접하지 않은 상태에서의 잔류응력을 측정하였으며 그 결과는 Fig.4 와 같았다.

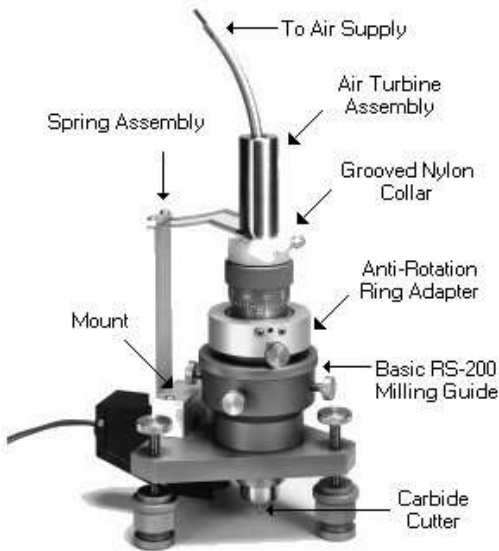


Fig. 3 RS-200 Milling Guide

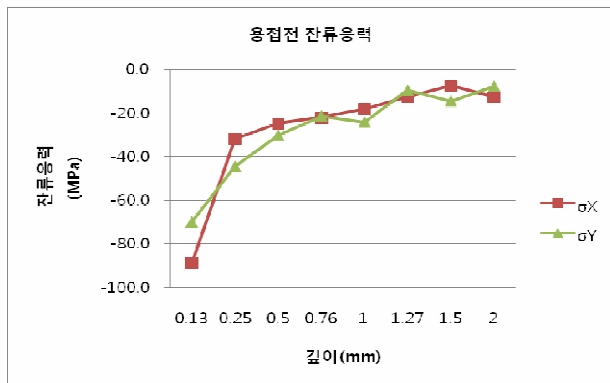


Fig. 4 Measured stress before welding by HDM

Fig. 4 에 의하면 AISI 304 스테인리스강을 냉간 압연하여 평판제작할 경우, 표면잔류응력은 0.13mm 깊이에서 압연방향으로 -90MPa, 압연의 수직방향으로 -70MPa 정도이며 약 1.5mm 깊이에서는 거의 '0'에 가까워짐을 알 수 있다. 다만, 천공법으로 측정된 값은 특정위치에서의 값이 아닌 해당깊이까지의 누적평균 잔류응력값임을 유의해야 한다.

용접후 시편에 대해서 Fig. 5 와 같이 용접선 중심선에 상,하부 각각 10mm 떨어진 평행선(Line 1, 2)과 용접선에 수직한 방향(Line 3)을 따라 잔류응력을 측정하였다. 측정구멍간의 영향을 받지 않도록 측정간격을 30mm 로 하였다.

Fig. 6 은 시편에 스트레인게이지를 부착한 상태의 사진이며 Table 2 는 Line1,2,3 를 따라 표면으로부터의 0.13mm 깊이의 측정결과이다. σ_x 는 용접선에 평행한 응력성분, σ_y 는 용접선에 수직한 방향의 응력성분이다. Table 2 에서의 위치좌표 부호는 시편 중심부를 원점으로 하여 왼편은 '-', 오른편은 '+'이고, 상부는 '+', 하부를 '-'로 하였다. 응력의 부호는 인장은 '+', 압축은 '-'이다.

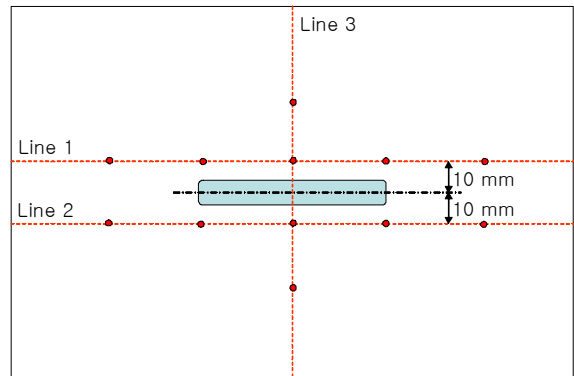


Fig. 5 Measuring location

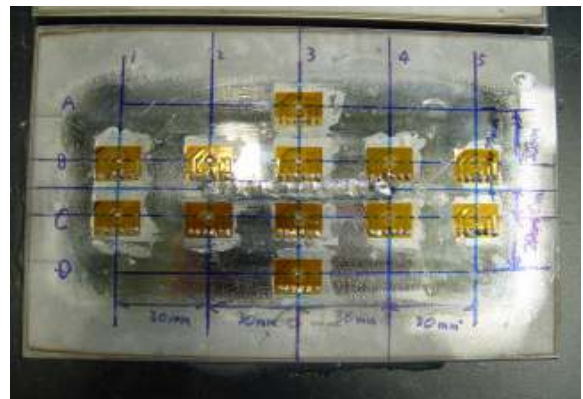


Fig. 6 Strain gauges attached to the specimen

Table 2 에 의하면 Line 1,2 간 마주 보는 지점의 값과 Line 1, 2 각각의 좌, 우 대칭점에서의 값이 비교적 잘 일치함을 보이고 있으나 용접 끝 지점인 $\pm 30\text{mm}$ 지점에서의 값은 비교적 큰 편차를 보인다. 이는 용접 끝 지점에서는 매우 응력기울기가 큰 지점이므로 측정위치가 조금만 달라져도 응력값이 크게 달라지기 때문인 것으로 판단된다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 7, 8 과 같다.

Table 2 Measured stress after weld by HDM

	위치	Line 1	Line 2	위치	Line 3
σ_X (MPa)	-60mm	-72.8	-80.8	30mm	-94.5
	-30mm	67.3	115.7	10mm	116.0
	0mm	116.0	111.6	-10mm	111.6
	30mm	95.5	250.0	-30mm	-109.2
	60mm	-95.0	-90.8		
σ_Y (Mpa)	-60mm	-64.3	-75.8	30mm	-106.9
	-30mm	-57.5	63.2	10mm	164.4
	0mm	164.4	88.9	-10mm	88.9
	30mm	86.5	-34.6	-30mm	-60.5
	60mm	-138.5	-85.9		

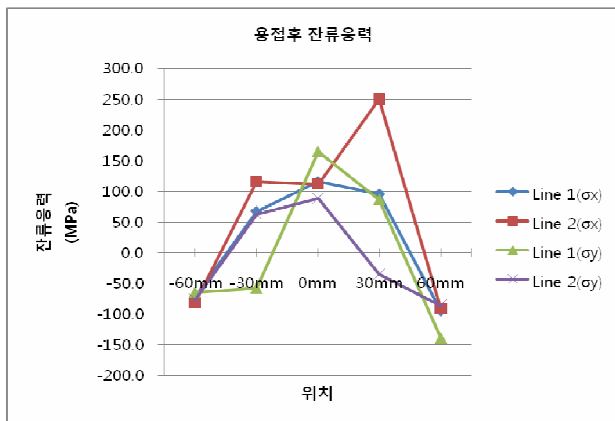


Fig. 7 Residual stress after weld (L1, L2)

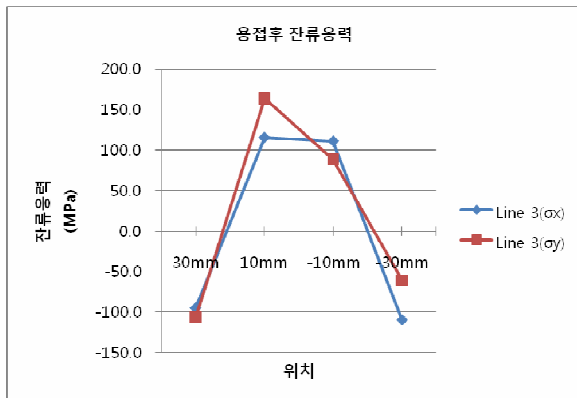


Fig. 8 Residual stress after weld (L3)

4.2 엑스선 회절법

두번째 시편에 대해서 구멍뚫기법과 동일한 절차를 따라 엑스선회절법으로 잔류응력을 측정하였다. 엑스선회절법으로 측정된 용접하지 않은 시편에서의 표면잔류응력은 평균적으로 σ_x 가 -352.9MPa , σ_y 가 -365.5MPa 이었다. 경험적으로 엑스선회절법은 표면상태에 매우 민감하며 수십 μm 이내의 표층에서의 값을 지시한다. 0.25mm 까지 전해연마를 해가면서 표면 하부의 잔류응력을 측정한 결과 Fig. 9 와 같은 지시를 나타내었다. 표면으로부터 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 의 깊이변화에 따라 매우 급격하게 잔류응력이 변화하며 약 0.25mm 지점에서는 거의 '0' 에 도달하였다. 이는 시편제작과정 중 압연에 의해 시편표면에 가해진 잔류응력은 표면 0.25mm 정도까지만 작용했음을 나타낸다. 측정장비는 Stresstech 사의 XSTRESS3000 을, Target 은 망간을 사용하였다. 용접후 시편에 대해서 Line 1,2,3 를 따라 5mm 간격으로 측정을 수행하였으며, 측정결과는 Fig. 10, 11 과 같다. 구멍뚫기법에 비해 Line 1,2 간, 좌우 대칭점에서의 값이 상당히 정확하게 일치함을 보였다.

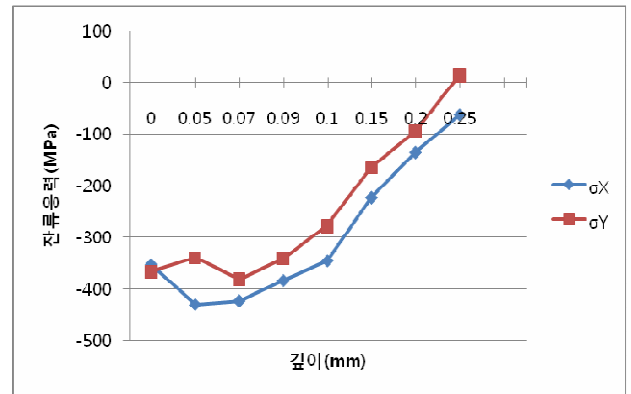


Fig. 9 Measured stress before welding by XRD

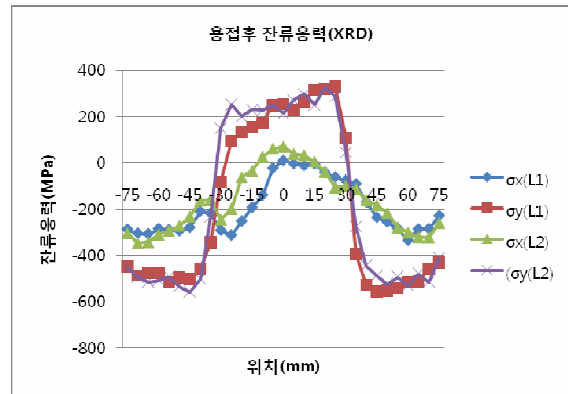


Fig. 10 Residual stress after weld by XRD(L1, L2)

엑스선회절법으로는 용접열영향부위(L3, ±5mm 지점)와 용융부(L3, 0mm 지점)의 잔류응력도 측정이 가능하였으며 열영향부위 및 용융부에서 최대인장잔류응력값을 나타내었다.

계장압입법과 동일한 조건에서 결과를 비교하기 위해서 압입법 측정조건으로 시편표면을 10~20 μm 연마(polishing)한 상태에서 10mm 간격으로 재측정을 시도하였으며 그 결과는 Fig. 12, 13 과 같았다.

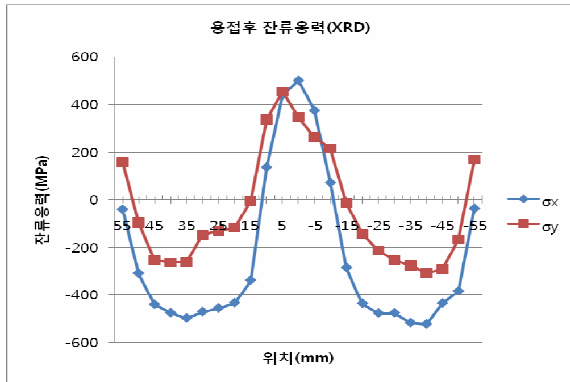


Fig. 11 Residual stress after weld by XRD (L3)

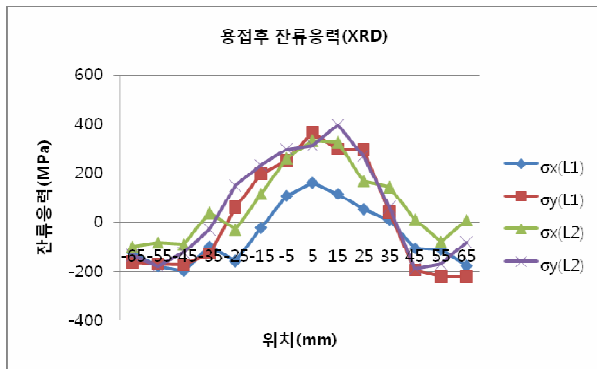


Fig. 12 Residual stress at polished condition (L1, L2)

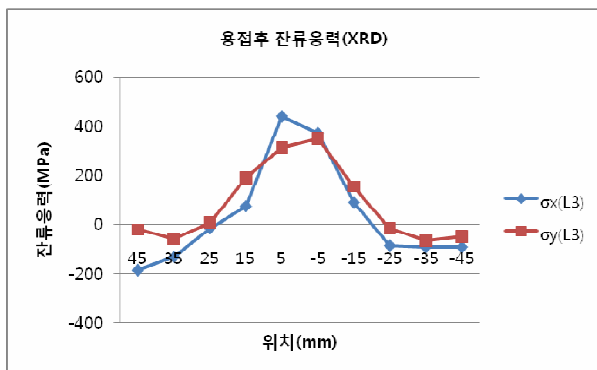


Fig. 13 Residual stress at polished condition (L3)

4.3 계장압입법

용접하기 전 시편에 대해 계장압입법으로 9 지점에 대한 잔류응력을 측정하였으며 그에 대한 평균값은 σ_x 가 -19.9MPa, σ_y 가 -30.2MPa 이었다. 시험장비는 프론틱스사의 AIS 3000 을 사용하였다.

용접시편에 대한 잔류응력을 측정하기 위해 시편을 확인한 결과 용접으로 인하여 시험면의 바닥면이 둥근형태로 변형됨을 확인하고 바닥면을 수평으로 만들기 위해 Fig. 14 과 같이 최대 0.4mm 밀링가공을 수행하였다. 이어서 시험을 위한 표면 조도를 확보하기 위해 Fig. 15 와 같이 Sand paper No. 1200 까지 표면 polishing 을 수행하였다.

계장압입법은 구멍뚫기법에 비해 인접 측정지점의 영향을 덜 받기 때문에 측정간격을 10mm 로 하였다. 계장압입법으로 측정한 잔류응력 결과를 Fig. 16 와 17 에 표시하였다. Line 1,2 의 각 지점에서의 응력성분값이 매우 정확하게 상호 일치함을 보였으며 좌우간에도 거의 대칭을 보였다. 이론적으로는 용접이 끝나는 지점(+30mm)의 잔류응력값이 최대값을 보여야 하는데 그러한 현상과도 일치하는 결과를 나타내었다. Line 3 의 데이터에서도 상부와 하부간 데이터가 거의 대칭성을 보이는 것으로 보아 계장압입법에 의한 잔류응력측정값에 대한 신뢰도가 비교적 높은 것으로 판단된다.



Fig. 14 Machining on lower surface

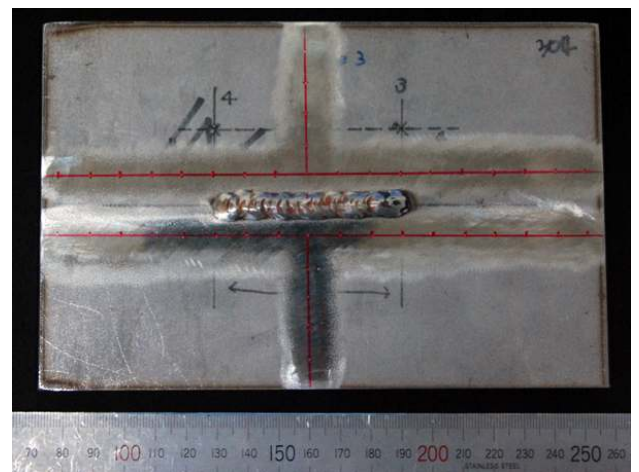


Fig. 15 Polished condition before measurement

5. 결론

구멍뚫기법, 엑스선회절법, 압입법을 이용하여 AISI 304 표면용접평판에 대한 잔류응력을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재료가공방법에 따라 표면잔류응력이 존재 하며 AISI304 스테인리스강을 냉간압연하였 을 경우, 그 크기는 최대 350MPa 정도이며 표면에서 떨어짐에 따라 급속히 감소하여 표면으로부터 0.35mm 정도 되면 거의 없어 진다.
2. 평판표면용접시 최대 인장잔류응력은 평판 용접표면의 용융부 또는 용접열영향부에서 발생하며 용접이 끝나는 지점의 인장잔류응 력이 시작점이나 중간지점에 비해 큰 값을 나타낸다.

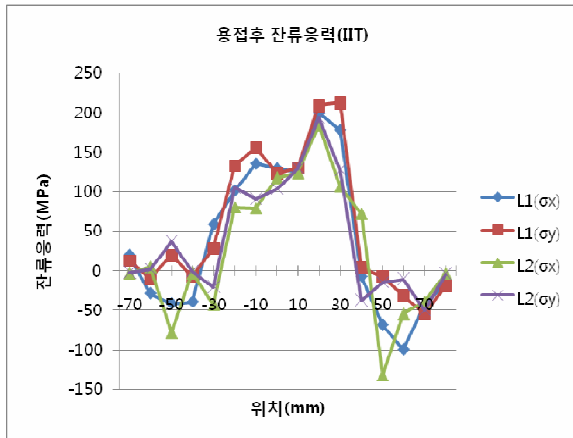


Fig. 16 Measured stress by IIT (L1, L2)

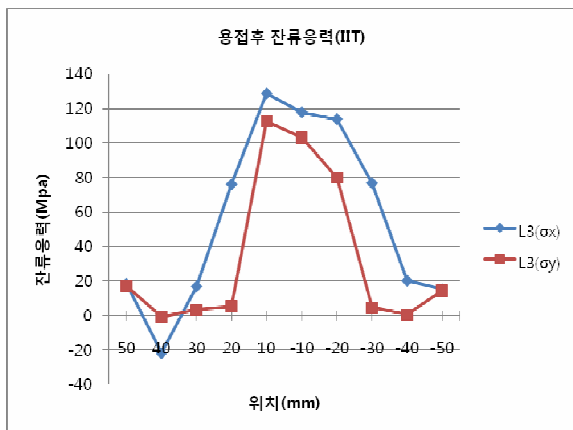


Fig. 17 Measured stress by IIT (L3)

3. 구멍뚫기법, 엑스선회절법, 계장압입법 상호 간 용접지역과 용접외 지역에서 일관된 경 향을 보였으며, 구멍뚫기법과 압입법은 그 크기 또한 유사한 값을 나타내었다.
4. 순수하게 용접에 의한 잔류응력을 측정하기 위해서는 용접전 가공과정에서 내재된 잔류 응력값을 보상해 주어야 한다. 다만, 용접부 근처와 용접부에서 멀리 떨어진 지점의 보 상방법에 대해서는 측정방법에 따라 검토가 필요하다.
5. 엑스선회절법에 의한 측정값이 인장 및 압 축에서 최대값을 보인 이유는 엑스선의 투 과 깊이가 수십 마이크로 정도 매우 작고 표면의 상태에 따라 큰 편차를 보이기 때문 이다. 엑스선회절법으로 잔류응력을 측정할 때는 특별히 표면조도를 수 μm 수준으로 유 지해야 한다.
6. 구멍뚫기법과 계장압입법은 엑스선회절법에 비해 수백 마이크로미터 정도의 매크로값을 측정하기 때문에 표면상태에 덜 민감하여 공학적인 평가에 유용한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Ahluwalia K, King C., October 2007, "Review of Stress Corrosion Cracking of Alloy 182 and 82 in PWR Primary Water Service (MRP-220)", *EPRI*.
2. Lee K.S, Park C.Y, Yang J.S, Kim Y.J, Kim J.W, 2008.1, "Interim Report – Development of Analysis Technology for Crack Management of Dissimilar Metal Weld", *KEPRI*
3. Lee K.W, Choi M.J, Kim J.W, Kim K.H., Kwon D.I , "Instrumented Indentation Technique : New Nondestructive Measurement Technique for Flow Stress-Strain and Residual Stress of Metallic Materials", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 26, No.5 p.306-314
4. Jian Lu, 1996, 'Handbook of Measurement of Residual Stress', *The Fairmont Press Inc.*
5. Choi M.J., Kang I.G., Kang S.G., Kwon D.I., October 2007 "Determination of Stress Directionality Using Knoop Indentation Technique", *Material and Strength Symposium*