

# 3 차원 유한요소법을 이용한 AISI 304 표면용접평판의 잔류응력해석

이경수<sup>†</sup> · 김태룡\* · 김만원\*\* · 박재학\*\*\*

## Residual Stress Analysis of AISI 304 Surface Welding Plate by 3D Finite Element Method

Kyoung-Soo Lee<sup>†</sup>, Tae-ryong Kim\*, Maan-Won Kim\*\* and Jai-Hak Park\*\*\*

**Key Words :** Weld Residual Stress (용접잔류응력), Residual Stress Measurement (잔류응력측정), Instrumented Indentation Method (계장압입법), Finite Element Method(유한요소법)

### Abstract

This study is performed to understand three dimensional characteristics of weld residual stress for the surface weld on the stainless steel plate. AISI 304 plate with one path weld on the surface was used as a test specimen. Finite element analysis was done to analyze thermal transient and residual stress due to weld. The result of finite element analysis was validated by previous paper and measurement data. Among various techniques for residual stress measurement, instrumented ball indentation method was applied. The calculated residual stresses by finite element analysis showed good agreement with the measured results.

## 1. 서 론

최근 세계적으로 가압경수로 원전의 이중금속 용접부의 일차수응력부식균열이 주요 안전현안이 되고 있다<sup>(1)</sup>. 균열의 원인으로서 용접과정 중에서 발생한 잔류응력이 예상보다 클 수 있다는 의견이 제시되고 있으나 용접잔류응력은 용접과정의 복잡한 현상으로 인해 아직 정확한 해석 및 측정이 쉽지 않은 분야이다. 현행 관련 코드<sup>(2)-(4)</sup>에서는 보수적인 평가방법이 제시되어 있으나 보다 정확한 평가를 위한 많은 연구가 국내외에서 수행되고 있다<sup>(5)</sup>. 한전 전력연구원에서도 이중금속용접부의 잔류응력을 정확하게 평가하기 위한 기술개발을 수행 중이며 본 논문은 이에 대한 연구의 일환으로 수행된 결과이다.

본 연구에서는 냉간압연 가공된 판재에 one pass 표면용접을 수행하고 3 차원 유한요소모델을 작성하여 실제 용접과 동일한 조건하에 열전달해석과 열응력해석을 수행하였다. 유한요소해석의 정확성을 검증하기 위하여 열전달 해석에서 얻어진 온도 변화를 용접수행시 측정된 값과 비교하였다. 용접 잔류응력 측정은 계장압입 시험법(instrumented indentation method)을 사용하였다. 또한 냉간압연 가공에 의한 잔류응력만을 따로 측정하여 기계적 가공에 의한 잔류응력의 영향을 살펴보았다.

## 2. 실험

### 2.1 용접시험 및 온도측정

크기가 180 x 120 x 16.1(t) mm 인 Type 304 스테인리스강판에서 one pass 표면용접을 수행하였다. 강판은 냉간 압연가공으로 제작되었으며 시험 대상 중앙에 길이 60 mm, 폭 10 mm 의 크기로 용접하였다. 이때 사용된 용접봉은  $\phi$ 2.4mm 의 ER308 이며 380V 3 상 전압과 60A 의 전류를 인가하였다. One pass 용접시간은 34 초이다. Fig. 1 은 용접시편

<sup>†</sup> 회원, 한전전력연구원

E-mail : leekys@kepri.re.kr

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

\* 회원, 전력연구원

\*\* ㈜지엔이씨

\*\*\* 충북대학교 안전공학과

의 형상을 나타낸 것이다. Fig.1 에 나타낸 바와 같이 용접선 중앙에서 위쪽으로 25mm 떨어진 세 위치 2, 3, 4 에 열전대를 부착하여 1 초 간격으로 용접시험 중 온도변화를 측정하였다.

### 2.2 용접잔류응력 측정

용접수행 후 계장압입시험으로 시편 표면의 용접 잔류응력을 측정하였다. 이를 위하여 Fig. 2 에 서와 같이 용접선 중앙에서 상하로 각각 10mm 씩 떨어진 측정선 Line 1 과 Line 2 를 설정하고, 용접선에 수직한 방향으로 측정선 Line 3 을 설정한 후 Line 1 과 Line 2 에서는 16 점을, Line 3 에서는 10 점을 선택하여 용접잔류응력을 구하였다. 이때 용접으로 인하여 시편의 바닥면이 둥근 형태로 변형되었으므로 시편 바닥면의 0.4 mm 를 밀링(milling) 가공하여 절단하였다. 또한 시편표면 조도를 확보하기 위해 Sand paper No. 1200 까지 표면 연마(polishing)를 수행하였다.

### 2.3 기계가공 잔류응력 측정

용접시험에 사용된 시편의 경우 냉간압연 가공한 판재이므로 압연 후 시편 표면에 잔류응력이 잔존한다. 본 연구에서는 용접후 얻어진 최종 잔류응력에 대하여 압연에 의한 잔류응력의 영향을 고려하기 위하여 Line 3 에 균등하게 분할한 9 점 에서 계장압입시험으로 잔류응력을 측정하였다.

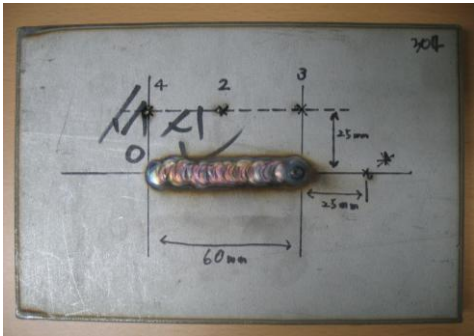


Fig. 1 Specimen and temperature measurement points

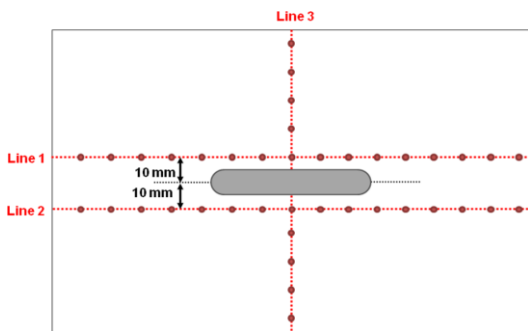


Fig. 2 Lines and points for residual stress measurement

## 3. 유한요소해석

### 3.1 용접열전달 해석

유한요소법을 사용하여 용접열전달 해석을 수행하였다. 유한요소모델의 형상 및 치수는 실제 용접시편과 동일하게 하였다. Fig. 3 은 유한요소모델의 요소격자 형상을 나타낸 것이다. 용접부와 열영향부에는 상대적으로 조밀한 요소격자를 배치하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 8 절점의 3 차원 열전달요소이며 총 요소수는 8240 개, 절점수는 10216 개 이다. 총 용접길이는 60mm 이고 총 용접시간은 34 초이므로 유한요소해석에서는 이를 10 등분하여 각각 3.4 초씩 가열하면서 오른쪽으로 진행하고 최종 10 번째 용접부 요소를 가열 한 후에는 2000 초 동안 자연냉각조건을 적용하였다. 용접재가 용입되는 현상을 모사하기 위하여 element birth and death technique 를 사용하였다.

용접열량은 body flux 형태로 용접부 요소에 가하였다. 일반적으로 Alloy 600 계열의 용접재에 대하여 용접시 용융부의 온도는 1648~1927℃ (3000~3500°F) 정도이며 용접부와 모재 사이의 열영향부에서는 약 1093℃(2000°F) 정도인 것으로 알려져 있다. 본 해석에서는 용접입열량에 의하여 각 용접 요소마다 이와 같은 온도분포가 얻어지는 것을 확인하였다.

용접이 진행되는 동안 열전달은 시편의 내부에서는 전도에 의하여 이루어지며 시편의 표면에서는 공기중으로 대류열전달에 의하여 일어난다. 본 해석에서는 28℃의 대기 중으로의 대류열전달 조건을 부여하기 위하여 입열이 이루어지는 용접부 요소를 제외한 시편의 상부 표면과 네 측면에 열전달계수 28.391W/m<sup>2</sup>·℃(5BTU/hr-ft<sup>2</sup>·F)를 가하였고, 시편의 하단은 철판 테이블과 맞닿아 있으므로 등가 대류열전달계수를 고려하였다.

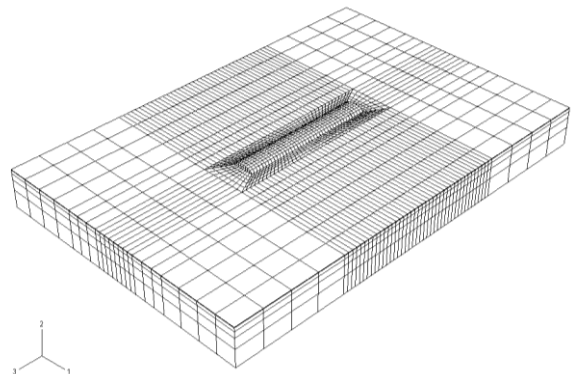


Fig. 3 Finite element mesh for welding simulation

용접열전달 유한요소해석에 사용된 재료 물성치는 상온에서 2000℃까지의 온도에 따른 밀도, 열전도도, 비열 및 잠열이다. 본 연구에서는 모재와 용접재의 물성치로 참고문헌 6에서 사용된 TP304 및 ER316L의 물성치를 사용하였다.

### 3.2 열응력 해석

용접열전달 해석에서 구해진 용접시간에 따른 시편의 온도분포와 유한요소모델 형상 및 치수를 사용하여 열응력 해석을 수행하였다. 열응력 해석에서도 열전달 해석과 마찬가지로 element birth and death technique이 사용되었다. 열응력 해석을 위한 재료물성치로 온도에 따른 탄성계수, 열팽창계수 및 소성응력-소성변형률 값을 입력하였다. 본 연구에서는 모재와 용접재의 물성치로 참고문헌 6에서 사용된 TP304 및 ER316L의 물성치를 사용하였다. 푸아송비는 0.27로 일정하게 하였다. 용접부의 용융과 재결정효과는 어닐링(annealing) 온도를 지정하여 고려하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 용접 열전달

용접시 Fig. 1에서 표시한 세 온도측정 지점에서 얻어진 시간에 따른 온도변화와 유한요소해석 결과로 얻어진 온도변화를 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. 용접 진행방향으로 측정점이 4, 2, 3의 순서로 있으므로 온도상승 시점은 실험과 유한요소해석에서 모두 동일한 순서로 시작되었다. 2번 점은 가운데 위치하고 있으므로 용접열원에 의한 충분한 열전달이 일어났으나 3, 4번 점에서는 2번 점에 비하여 최대 온도가 작게 나타났다.

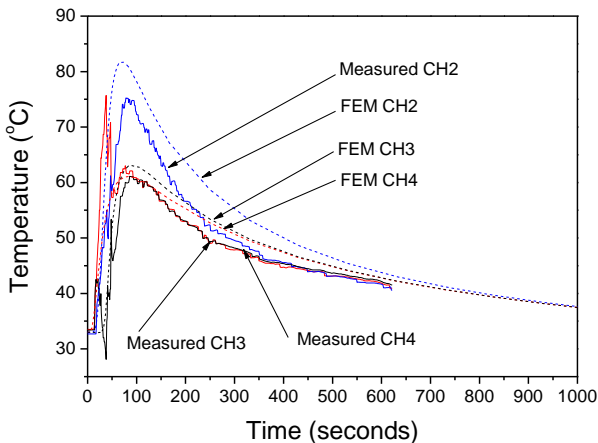


Fig. 4 Temperature at three measurement points

이는 4번 점의 경우 처음부터 용접열원에서 멀어지는 위치이며 3번 점의 경우 용접열원의 이동이 멈추는 부분에 위치하고 있으므로 바로 냉각되었기 때문이다. 용접선에 가까운 3, 4번 점의 측정 데이터에서는 온도 상승시 온도 요동(oscillation)이 나타났는데, 이는 측정시 환경적인 요인에 의한 것으로 판단된다. 측정점 3과 4에서 온도 상승시 나타난 온도요동을 제외한 최고 온도는 각각 61.1℃와 65.5℃이며 유한요소해석에서는 62℃ 및 60.1℃로 계산되었다. 측정점 2에서 최대 온도상승값은 실험에서 75.3℃로 측정되었으며 유한요소해석에서 81.7℃로 나타났다. 이와 같이 실험에 의한 측정과 유한요소해석에서 온도상승 최대값의 차이는 세 점 모두 8.5% 이내였다. 따라서 열전달 해석이 비교적 정확하게 수행되었다고 판단된다.

### 4.2 용접 잔류응력

Fig.5~7은 Fig. 2에 나타낸 세 측정선 상의 각 측정점에서 용접잔류응력을 측정하고 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다.

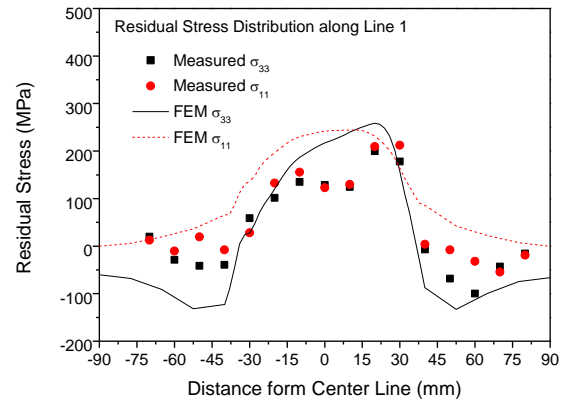


Fig. 5 Residual stress along Line 1

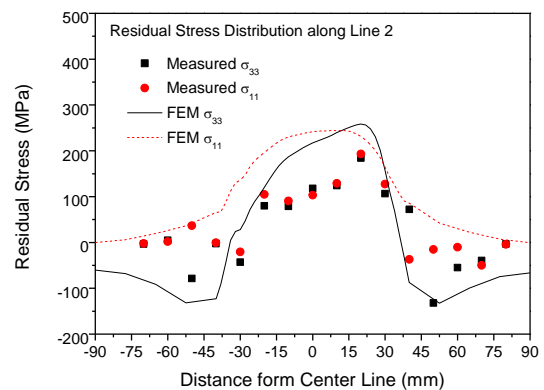


Fig. 6 Residual stress along Line 2

그림에서  $\sigma_{11}$  과  $\sigma_{33}$  는 각각 용접선에 수직방향 응력과 수평방향 응력을 나타낸다. 재료가 균일하고 용접이 정확하게 중심선을 따라 수행되었다면 이론적으로 Line 1 과 Line 2 의 결과는 일치해야 하고 Line3 의 결과는 상부와 하부가 상호 대칭이 되어야 할 것이다. 해석 및 측정 결과를 살펴보면, 해석결과는 완벽한 일치를 보이며 측정 결과 또한 이러한 요건을 만족함으로써 신뢰도가 높게 측정이 잘 수행되었음을 보인다.

Fig.5, 6 에 의하면 Line1, 2 위치에서  $\sigma_{11}$  은 전체적으로 인장상태이며 용접지역에서는 인장응력값이 크게 상승함을 나타내었다. 이와 달리  $\sigma_{33}$  는 용접지역에서는 강한 인장상태를 보이지만, 용접지역을 벗어나면서 급격하게 압축상태로 변화함을 보였다. 그러나 Fig.8, 9 는 이러한 응력상태가 용접부로부터의 거리에 따라 경향이 달라질 수 있음을 보인다.

한편, 유한요소메쉬간 간격이 용접지역에서는 2mm, 용접외 지역에서는 12mm 로서 해석값은 동구간에서의 평균값임을 감안해야 한다.

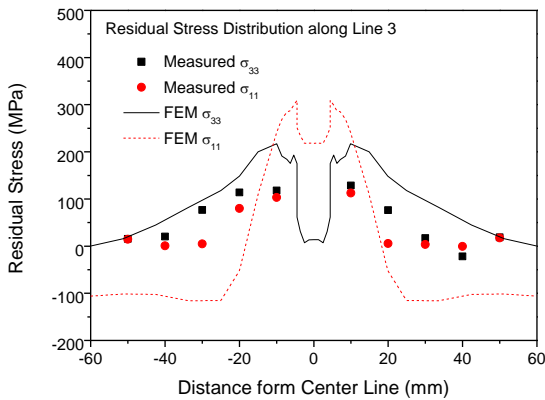


Fig. 7 Residual stress along Line 3

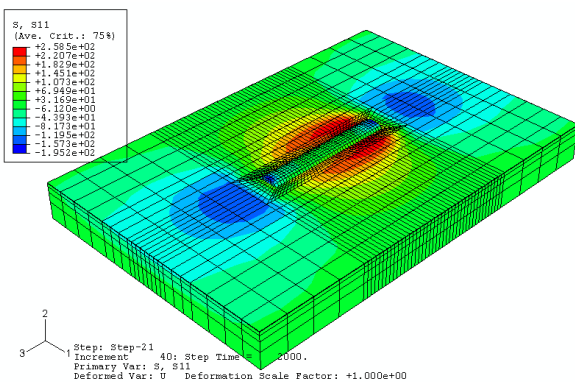


Fig. 8 Transverse residual stress ( $\sigma_{11}$ ) distribution

Fig.7 및 Fig.8,9 에 의하면 최대인장응력은 용접부 근처에서 발생하고 용융부에서는 오히려 인장값이 크게 감소함을 보였다. 이는 용융부가 표면에서 돌출된 상태이기 때문에 상대적으로 수축이 많이 발생하지 않기 때문으로 추정된다. 모재에 흠을 관 상태에서 용접을 수행했다면 용접부에서 최대잔류응력이 발생할 것으로 예상된다. 한편, 용접비드의 거친 표면 때문에 용접부에서의 잔류응력은 측정할 수 없었다.

용접선 하부 내면의 잔류응력 분포를 Fig.10, 11 에 나타내었고 그 결과를 Withers 등의 연구결과<sup>(7)</sup> 와 비교하였다.

용접으로 인해 용접부 근처에서는 인장잔류응력이 존재하지만 용접부에서 멀어질수록 인장상태가 약해지거나 압축상태로 바뀌어짐을 알 수 있다. 또한 용접선 바로 아래에서  $\sigma_{33}$  는 전체적으로 균일한 인장상태를 나타내는 반면  $\sigma_{11}$  는 용접이 끝나는 지점에서 제일 큰 인장값을 보였다.

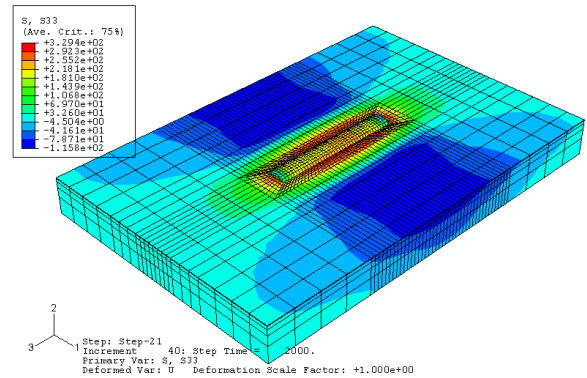


Fig. 9 Longitudinal residual stress ( $\sigma_{33}$ ) distribution

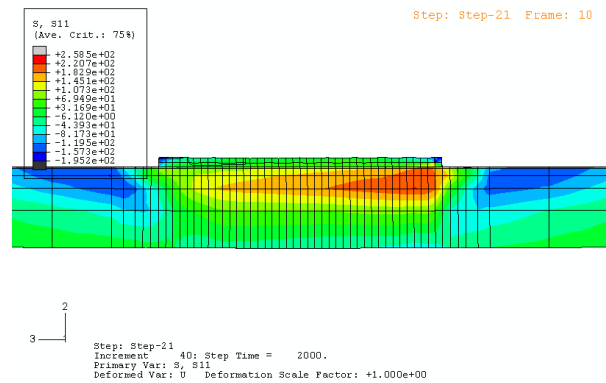


Fig. 10  $\sigma_{11}$  field along welding direction as evaluated by FEM

이는 Fig. 5, 6 에서도 관측되었으며 Fig. 12 의 결과와도 잘 일치한다. Fig. 12 는 중성자회절(neutron diffraction) 시험과 등고선방법(contour method)에 의한 결과(7)를 나타낸 것이다.

한편, 압연 관재는 압연가공에 의한 잔류응력이 존재할 수 있기 때문에 압연에 의한 영향을 고려하기 위해 용접전 시편에 대한 잔류응력을 측정하였다. 측정된 냉간압연 가공에 의한 잔류응력값을 Table 1 에 나타내었다. Line 3 을 따라 9 지점에서 측정한  $\sigma_{11}$  과  $\sigma_{33}$  의 평균값은 각각 -19.89 MPa 과 -30.24 MPa 이다.

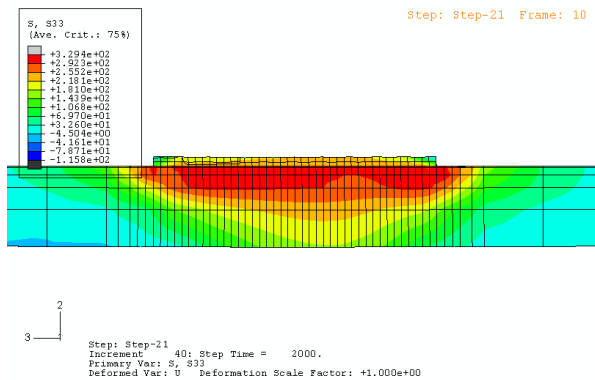


Fig. 11  $\sigma_{33}$  field along welding direction as evaluated by FEM

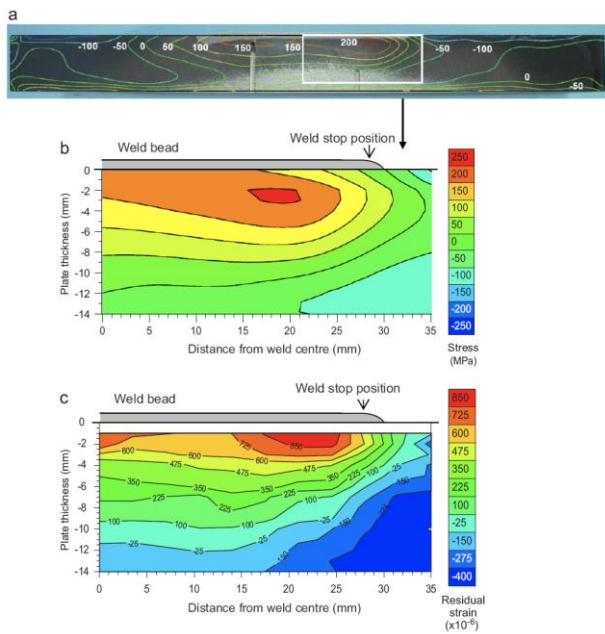


Fig. 12  $\sigma_{11}$  field along welding direction as evaluated by contour method (a, b) and neutron diffraction method (c) (Figures from reference 7)

Fig. 13~15 은 Fig. 5~7 의 용접잔류응력 측정값에서 압연 가공에 의한 평균 잔류응력값을 뺀 결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5~7 보다 훨씬 해석결과와 유사한 결과를 보였다. 이는 계장압입법으로 용접잔류응력을 측정할 때는 용접전, 후의 잔류응력을 각각 측정하여 용접전 상태의 값을 보정하는 것이 더 정확한 값을 얻을 수 있음을 의미한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 냉간압연관재의 one pass 표면용접을 수행한 후 계장압입시험을 통하여 용접잔류응력을 측정하고 유한요소해석 결과와 비교하였다. 유한요소해석 결과의 정확성을 검증하기 위하여 용접열전달 해석의 온도변화를 용접수행시 측정값과 비교하였다. 온도 및 잔류응력의 측정결과는 유한요소해석 결과 및 선행연구 결과와 잘 일치하였으며, 다음의 결론을 얻었다.

- (1) AISI304 스테인리스강관 표면에 동종의 용접봉으로 용접을 수행할 경우, 최대인장잔류응력은 용접인근 열영향부에서 발생한다. 용접선을 기준으로 축방향 응력( $\sigma_{33}$ )은 용접부 근처에서 전반적으로 균일한 인장응력을 갖는 반면, 수직응력( $\sigma_{11}$ ) 용접이 끝나는 지점 근처에서 최대값을 갖는다.
- (2) 돌출용융부에서는 열영향부에 비해 상대적으로 매우 낮은 잔류응력값을 갖는다.
- (3) 표면의 잔류응력분포는 시편의 폭 및 길이와 용접길이에 영향을 받으며 용접선으로부터의 거리에 따라 크게 달라진다.

Table 1 Residual stress due to cold rolling process

No.	Distance from Weld Center (mm)	Residual Stress (MPa)	
		X-axis	Y-axis
1	40	-23.37	-32.34
2	30	-25.45	-33.79
3	20	-28.22	-35.73
4	10	-15.73	-26.99
5	0	-12.46	-27.70
6	-10	-18.26	-28.77
7	-20	-23.13	-32.18
8	-30	-9.21	-22.43
9	-40	-23.20	-32.22
Average		-19.89	-30.24

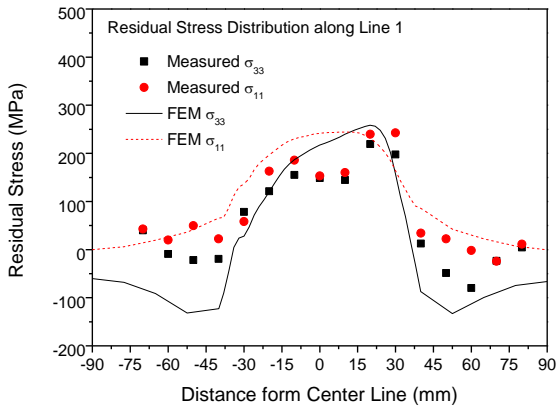


(4) 내면의 응력분포는 용접부 근처에서 최대인 장값을 갖고 용접부에서 멀어질수록 작아지거나 압축상태로 변한다.

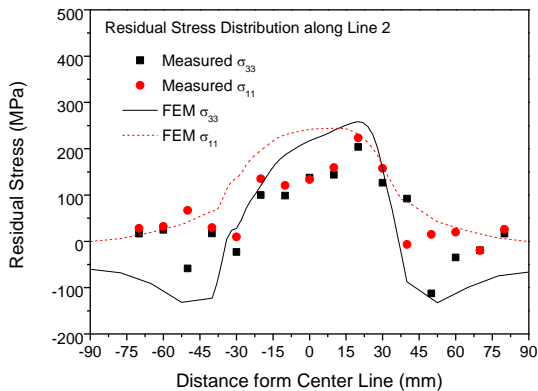
(5) 계장압입법으로 잔류응력을 측정할 때는 용접전 상태의 잔류응력값을 보정해 줌으로써 보다 정확한 용접잔류응력값을 구할 수 있다.

## 참고문헌

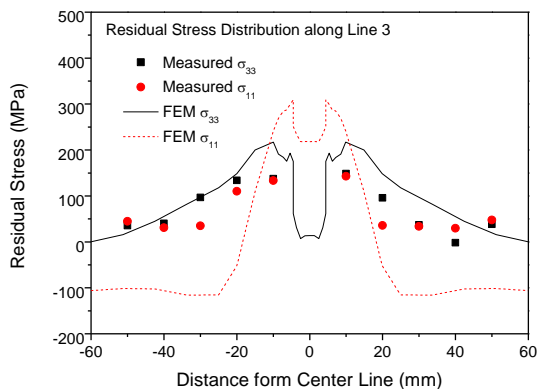
- (1) Hunt E.S., Gross D.J., July 1994, "PWSCC of Alloy 600 Materials in PWR Primary System Penetrations", TR-103696, EPRI
- (2) Section XI Task Group for Piping Flaw Evaluation of ASME Code, 1986, "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping," *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 108, pp. 352-366.
- (3) September 2000, Welding Residual Stress Distribution, R6 Revision 4, Chapter IV, Section IV.4.
- (4) API 579, Appendix E
- (5) Dong, P. and Cao, Z., 2006, "The Mechanical Basis of Residual Stress Profiles in Proposed API 579 Appendix E," *ASME PVP 2006 Conference*.
- (6) Kim, J. S. and Jin, T. E., 2007, "Development of Engineering Formulae for Welding Residual Stress Distributions of Dissimilar Welds on Nozzle in Nuclear Component," *ASME PVP 2007 Conference*.
- (7) Withers, P. J., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P. J. and Buttle, D. J., 2008, "Recent advances in residual stress measurement," *International J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp.118 ~ 127.



**Fig. 13** Residual stress distribution along Line 1 considering rolling process residual stress



**Fig. 14** Residual stress distribution along Line 2 considering rolling process residual stress



**Fig. 15** Residual stress distribution along Line 3 considering rolling process residual stress