

직선 Slot 용접의 유한요소해석 및 용접잔류응력 분포특성[§]

박치용^{**} · 이경수^{*} · 김만원^{**} · 송기오^{***}

*한전전력연구원, **한국수력원자력(주), ***케이엘이에스(주)

Finite Element Analysis of Straight Slot Welding and Characteristics of the Weld Residual Stress Distribution

Chi-Yong Park^{**}, Kyoung-Soo Lee^{*}, Maan-Won Kim^{**} and Ki-Oh Song^{***}

* KEPCO Research Institute, ** KHNP NETEC, *** KLES Co., Ltd.

(Received June 3, 2010 ; Revised July 19, 2010 ; Accepted July 19, 2010)

Key Words: Weld Residual Stress(용접잔류응력), Slot Weld(슬롯용접), Finite Element Analysis(유한요소해석), X-ray Diffraction Method(X-선회절법)

초록: 본 연구에서는 316L 스테인리스강 테스트 시편으로 직선 슬롯(slot) 용접을 수행하고 X-선 회절법을 이용하여 용접 잔류응력을 측정하였다. 또한 3차원 유한요소해석을 통하여 슬롯용접을 모사하고 시편의 용접잔류응력 분포를 구하였다. 슬롯용접은 용접잔류응력 특성을 고찰하는데 있어 맞대기 용접에 비하여 고려할 변수가 적으며, 용접 시작부터 종료까지 용접잔류응력 분포 특성을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다. 테스트 시편의 표면에서 용접잔류응력을 용접 시작부와 중간부분, 종료부의 세 위치에서 측정값과 해석값을 비교하였고 용접잔류응력 분포특성을 고찰하였다. 유한요소해석 결과로부터 시편 내부의 용접잔류응력 분포특성을 살펴보았다.

Abstract: In this study, straight slot welding was carried out using a 316L stainless steel test block, and numerical simulation of the slot weld process was performed using finite element analysis. Data on the residual stress were obtained at equally spaced points on the top surface of the test block along directions parallel and perpendicular to the welding direction. After electrolytic polishing of the top surface of the block, the residual stress was measured by the X-ray diffraction method. The calculated weld residual stresses were compared with the measured data, and they were in good agreement with the data. The weld residual stress distribution inside the plate was determined from the results of finite element analysis, and the characteristics of the distribution were discussed in detail in this paper.

1. 서론

대형화와 구조용 재료의 발전 등으로 인하여 이들 구조용 재료의 신뢰성있는 용접품질을 위한 연구들이 꾸준히 수행되어 왔다. 용접 구조물의 용접잔류응력은 용접 방법, 용접부 형상, 입열량, 구속조건, 소재 특성 등의 많은 변수에 의하여 영향을 받으므로 정확한 예측이 힘들다. 최근 용접잔류응력을 측정하기 위한 방법들도 많이 개발되어 측정 정확도가 높아지고 있다. 용접잔류응

력을 계산하기 위하여 유한요소해석, 용융점 근처의 물성치 변화를 고려할 수 있는 전문 소프트웨어 등과 같은 수치해석방법도 개발되어 왔다.

그러나 여전히 많은 변수들로 인하여 용접잔류응력의 예측이 힘들다. 본 연구에서는 용접 시편을 제작하여 슬롯(slot) 용접을 수행한 후 X-선 회절법을 사용하여 시편 표면에서의 용접잔류응력을 측정하고 슬롯용접에 대한 유한요소해석을 수행하여 용접잔류응력을 계산하였다. 슬롯용접은 시편의 중앙에 직선의 홈 그루브(groove)를 가공한 후 2 패스 용접을 수행한 것으로서 맞대기 용접에 비하여 용접 시작점과 종료점이 판의 자유표면 경계에서 시작하지 않으므로 판의 자유표면 경계의 영향을 배제할 수 있으며, 두께 방향(홈

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회(2010. 5. 27.-28., 전남대 컨벤션홀) 발표논문임

† Corresponding Author, cypark@kepri.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

깊이 방향)으로의 영향도 줄일 수 있어 용접잔류응력 특성을 파악하기 위한 기초 연구로서의 가치를 부여할 수 있다.

잔류응력 측정값과 유한요소해석 결과를 비교하여 고찰하였다. X-선 회절법은 표면에서의 잔류응력분포만을 측정할 수 있으므로 용접 시편 내부의 잔류응력분포는 유한요소해석 결과로부터 고찰하였다.

2. 잔류응력 측정

2.1 용접시편 및 측정방법

슬롯용접 시편의 크기는 300 mm × 200 mm × 25 mm (가로×세로×두께) 인 평판이며 소재는 SA182 Grade F316L 스테인리스강이다. Fig.1에 슬롯용접 시편의 형상과 치수를 나타내었다. 시편의 중앙에 길이 100 mm, 깊이 10 mm, 폭 16 mm, 루트반경 4 mm인 슬롯을 연마(grinding)에 의해 가공하였다. 용가재는 Alloy 82 이며 2 패스 용접을 수행하였다.

용접잔류응력 측정은 X-선 회절법을 이용하였다. 사용된 X-선 파장은 V 필터를 제거한 Cr-Kβ이며, 회절각은 148.52°이다. 측정을 위하여 전해연마를 약 40초(40 mm 제거)간 실시하였다. 전해연마 시 열영향부가 아닌 용접부에서 멀리 떨어진 부근에서는 가공경화에 의한 잔류응력이 형성됨을 확인할 수 있었다. 결정립이 조대한 용접부 측정은 X선의 특성상 신뢰도가 떨어져 측정하지 않았다.

Fig. 2는 용접잔류응력 측정점을 나타낸 것이다. 그림에서 치수의 단위는 mm 이다. 측정된 값을 정리하기 위하여 가로선 P1, P2 와 세로선 V1, V2, V3를 선정하고, 용접진행방향을 X, 수직 방향을 Y로 나타내기로 한다.

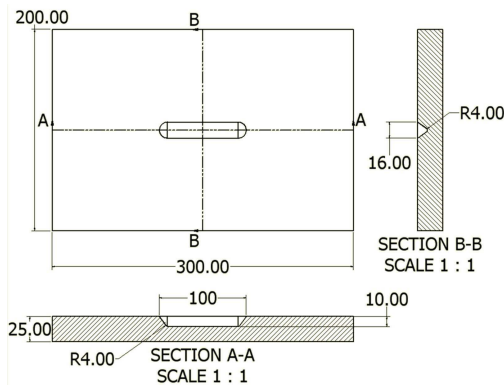


Fig. 1 Dimension of slot welding test specimen

2.2 용접잔류응력 측정 결과

Fig. 3 ~ Fig. 5는 각각 V1, V2, V3 선의 각 측정점에서 측정한 용접잔류응력을 나타낸 것이다. 그림에서 X와 Z 심볼은 각각 Fig. 2에 나타낸 X와 Z 방향의 응력을 나타낸다. 전체적으로 용접 방향에 수직인 Z 방향 응력이 인장을 나타냈으며, 용접 시작부와 종료부인 V1과 V3 에서 보다 V2에서 절대값이 훨씬 큰 잔류응력 분포를 나타내었다. 이는 시작 및 종료부분 보다 중간지점이 더 큰 열변형을 받았음을 나타낸다.

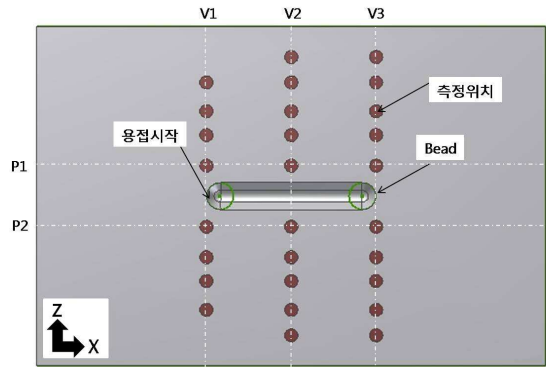


Fig. 2 Weld residual stress measurement points

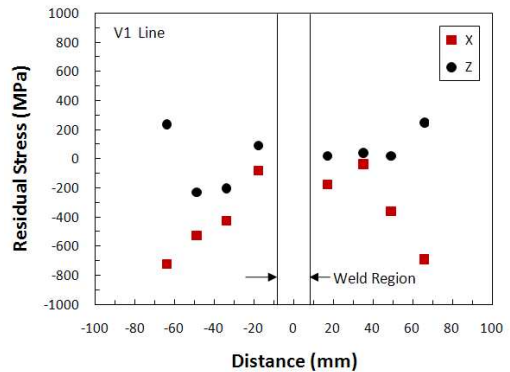


Fig. 3 Residual stress on V1 line

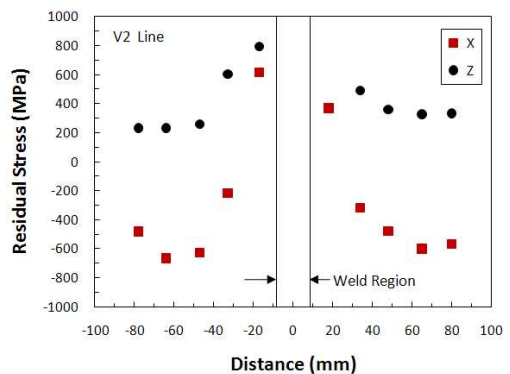


Fig. 4 Residual stress on V2 line

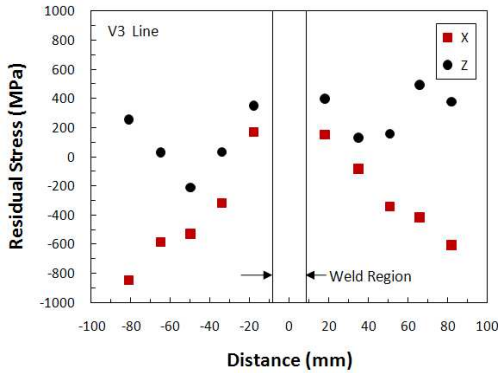


Fig. 5 Residual stress on V3 line

용접부(weld region)으로 표시된 선에서 가장 가까운 점들은 P1과 P2선 위의 측정점에서 측정된 값들이다. 또한 용접부를 중심으로 양 측의 측정점은 대칭위치에 있다. Fig. 3 ~ Fig. 5에서 측정값은 용접부를 중심으로 정확한 대칭을 나타내지 않는다. 특히 V2와 P1의 교점에서 측정된 잔류응력은 약 1000 MPa로 매우 크게 나타났는데, 측정값의 이러한 분포는 X-선 회절 측정시 측정점의 표면연마와 측정점 내에서의 위치와 연관이 있는 것으로 생각된다. 특히 용접부와 가까운 열영향부에서는 일반적으로 큰 응력분포 변화가 있으므로 약간의 거리 차에서도 측정값의 차이가 크게 나타날 수 있다. 그러나 이러한 차이에도 불구하고 Fig. 3 ~ Fig. 5에서 잔류 응력분포의 경향은 같다.

3. 용접잔류응력 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

유한요소해석은 ABAQUS Version 6.9를 사용하여 수행하였다. 3차원 유한요소해석 모델을 작성하였다. 용접시편의 형상과 유한요소해석 소요시간을 고려하여 대칭모델로 하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 전체 유한요소격자와 용접부 요소의 상세 형상을 나타낸 것이다. 용접부는 총 2층의 용접 패스로 구성하였으며, 각 패스는 10개의 용접 비드요소로 구성하였다. 용접의 순서는 X 방향으로 진행하며 순차적으로 용접비드요소를 활성화시켰고, 아래층에서 위층의 순서로 진행하였다. 용접열전달과 열응력 해석을 위한 재료 물성치는 송태광 등^(1,2)에서 사용된 물성치와 동일하게 하였다.

용접해석은 용접 열전달해석과 열응력해석을 순차적으로 수행하였다. 열전달해석 시 용접 입

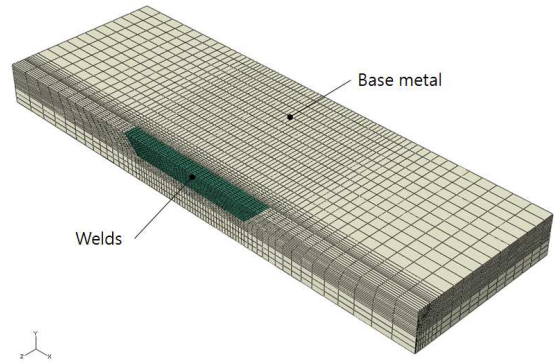


Fig. 6 Finite element mesh of full model

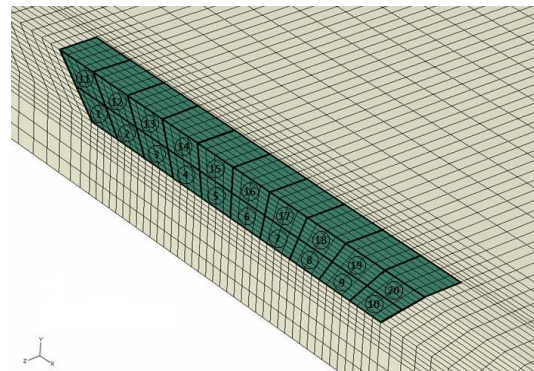


Fig. 7 Bead elements of slot welds

열량은 2.1절에서 용접실험에 사용된 (용접효율×전류×전압) 값을 용접패스의 체적으로 나누어 단위체적당 입열량을 계산한 후, 단위체적당 입열량에 용접봉이 해당 용접비드요소를 지나가는 시간을 곱하여 가하였다. 실제 용접에서는 한 패스 용접 동안 용접봉 진행방향을 따라 연속적으로 입열되지만, 열전달해석에서는 한 패스에서 용접 비드요소를 10 개의 구간으로 나누었으므로 용접 봉 진행방향을 따라 10 번의 입열이 순차적으로 이루어지도록 하였다.

용접해석에서 대기의 온도는 21℃로 가정하였으며, 열용입중인 비드요소의 표면을 제외한 모든 공기와 접촉하고 있는 표면에서 대류열전달 계수 10 W/m²·℃를 적용하였다. 단, 한 패스에서 용접비드의 열용입이 끝나고 다음 용접비드의 열용입이 진행될 때에는 이전 용접비드요소의 공기와 접촉표면에 대류열전달계수를 적용하였다. 용접패스 간에는 층간온도인 130℃가 되도록 냉각 시간을 조절하였다.

Fig. 8은 12 번째 비드요소 용입 시 온도분포를 나타낸 것이다. 현재 용융상태인 비드요소의 중심은 최대온도가 약 1770℃ 이며 용융부 주변의

열영향부에서는 약 1090℃ 정도이다. 열전달해석 시 용접 순서에 따라 모든 비드요소에 대하여 이와 같은 온도분포가 되도록 하였다. 각 비드요소의 열영향부는 Fig. 7에 나타난 용접비드요소의 경계 부근의 모재부이다. 이러한 온도조건은 EPRI 연구결과^(3,4)와 동일한 것이며, 본 논문에서는 이와 같은 방법으로 열전달해석이 정상적으로 수행되었음을 확인하였다.

열전달 해석 결과 얻어진 시간변화에 따른 해석 모델의 온도분포를 사용하여 열응력 해석을 수행하였다. 열응력해석에서 재료의 경화거동은 등방경화이론(isotropic hardening theory)을 따른다고 가정하였다. 용접부의 용융과 재결정효과는 ABAQUS의 ANNEAL TEMPERATURE 명령어를 사용하여 어닐링(annealing) 온도를 지정하여 고려하였다. 본 논문에서는 F316L 스테인리스강은 1420℃를, Alloy 82는 1393℃를 어닐링 온도로 입력하였다.

열응력해석 시 구속조건으로 대칭면에 대칭조건을 부여하였고, 판의 좌우 하단을 고정시켰다가 최종 냉각 후 구속을 제거함으로써 가접 조건을 고려하였다.

3.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과 구해진 상부표면에서의 잔류응력분포를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9는 용접선에 평행방향(X)의 응력을 나타낸다. 용접부에서는 용접비드의 수축 후에 인장응력이 나타났으며 용접선에 수직인 방향의 판 끝부분에서는 압축잔류응력분포가 나타났다. 이는 표면에서 용접잔류응력의 분포가 이 방향으로 자기평형(self-equilibrium) 분포를 가지기 때문이라고 생각된다. Fig. 10은 용접선에 수직인 방향(Z)의 응력

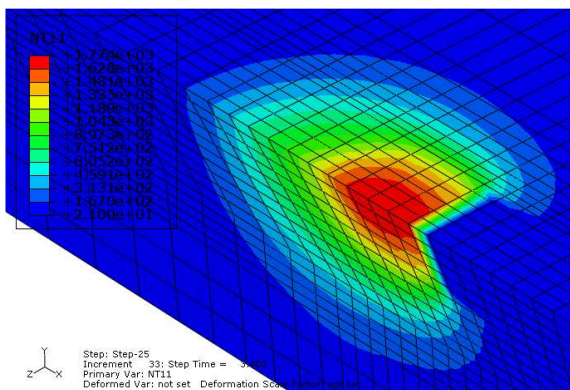


Fig. 8 Temperature distribution during the 12th bead element heating

분포를 나타낸다. Fig. 9와 마찬가지로 용접부 수축으로 인해 용접부에 수직인 방향으로 인장응력이 분포하며, 용접선 방향으로 용접부에서 떨어진 부분에 자기평형으로 인해 압축응력분포가 나타났다.

Fig. 2에서 정의한 V1, V2, V3 선을 따라 계산된 용접잔류응력 분포를 각각 Fig. 11 ~ Fig. 13에 나타내었다. 가로축은 용접부 중앙에서 판 끝까지의 거리를 나타내며 용접선에 평행한 방향(X)응력과 용접선에 수직인 방향(Z)의 응력을 나타내었다. 각 응력값은 용접 시작과 종료부분에 비하여 중간 부분에서 크게 나타났는데, 이는 입

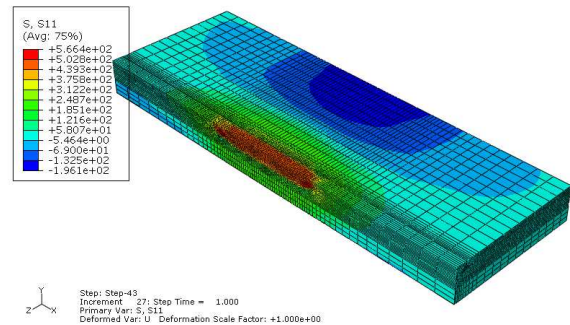


Fig. 9 X-directional weld residual stress distribution

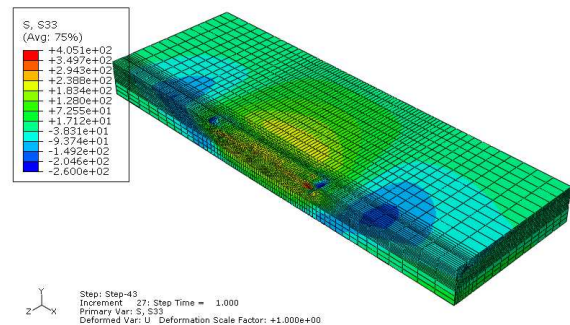


Fig. 10 Z-directional weld residual stress distribution

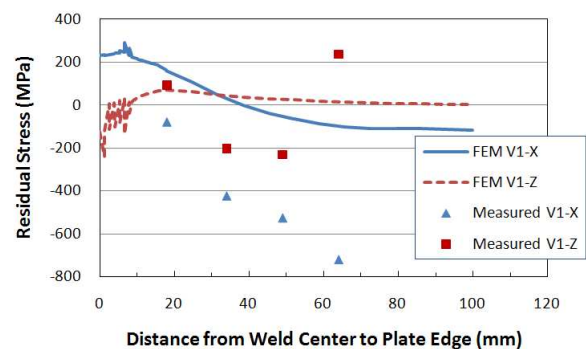


Fig. 11 FEM weld residual stress distribution on V1 line comparing with measured stress

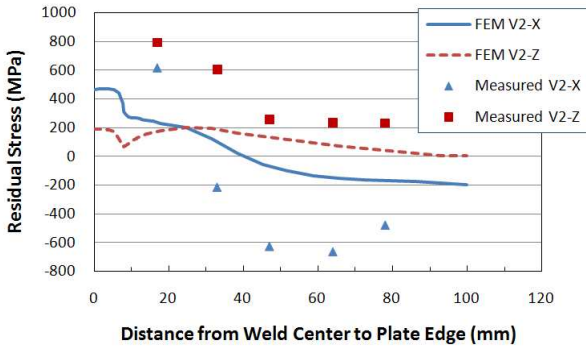


Fig. 12 FEM weld residual stress distribution on V2 line comparing with measured stress

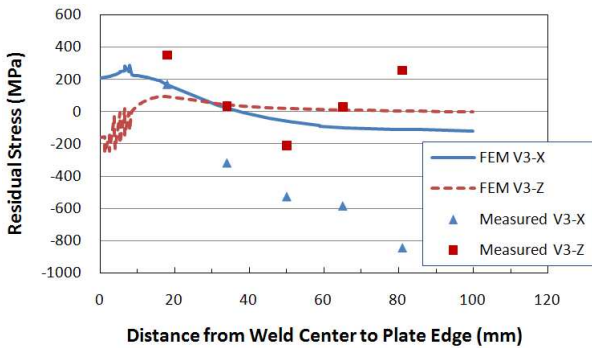


Fig. 13 FEM weld residual stress distribution on V3 line comparing with measured stress

열시 열영향이 중간부분에서 상대적으로 더 중첩되었기 때문인 것으로 생각된다. 용접부에서의 잔류응력분포는 X-방향의 잔류응력이 Z-방향의 잔류응력보다 크게 나타났으며 용접부에서 멀어질수록 반대의 경향이 나타났다. 이러한 경향은 V1과 V3에서는 용접부 중앙으로부터 약 30 mm, V2에서는 약 25mm에서 X-방향과 Z-방향 응력의 교차점이 나타났다. 이 교차점 이후의 X-방향 응력은 압축잔류응력이 되며 Z-방향 응력은 인장값이면서 값이 점점 0으로 간다. 교차점 이후의 전체적인 응력분포 경향은 크기의 차이는 있으나 Fig. 3 ~ Fig. 5의 측정값 분포와 같다.

Fig. 11 ~ Fig. 13에서 나타낸 측정값은 P1선과 V1, V2, V3 선이 교차하는 측정점에서의 잔류응력 값을 나타낸다. 교차점에서의 측정값은 유한요소해석 결과와 유사한 값을 나타내었다.

3.3 시편 내부의 잔류응력 분포

시편 내부의 잔류응력분포를 살펴보기 위하여 V1, V2, V3선과 각 선의 중간부분, V1 전방 및 V3 후방 25mm 지점 절단면에 대하여 X-방향 응

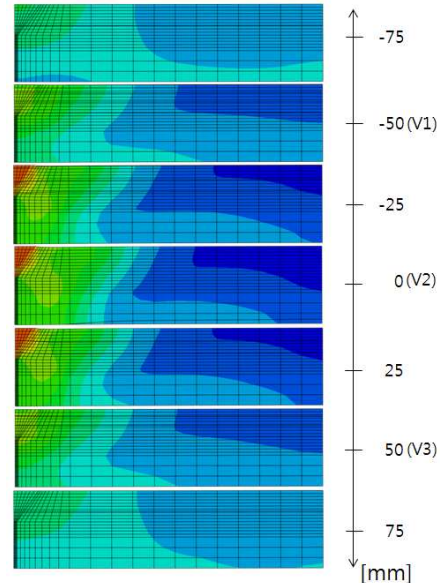


Fig. 14 X-directional residual stress (S11) distribution in some selected sections

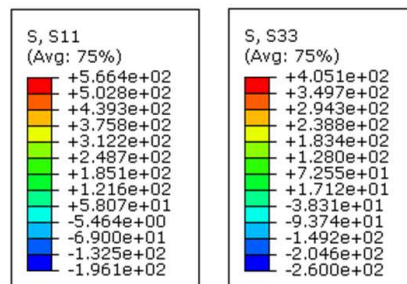


Fig. 15 Labels for stress contour plot for X-direction (S11) and Z-direction (S33)

력을 Fig. 14에 나타내었다. 각 단면의 위치는 그림의 우측에 mm 단위로 나타내었다. 이때 응력 등고선 구간의 값은 Fig. 15와 같다.

X-방향의 잔류응력은 용접부에서 인장응력으로 나타났고, 단면 우측의 용접부에서 멀리 떨어진 부분에서 압축응력으로 나타났다. 이 압축응력은 용접부 길이에 해당하는 부분에 비하여 용접 시작과 종료지점에서 떨어진 -75 mm, 75 mm 단면에서는 상대적으로 많이 감소하였다. 유한요소해석 각 단계에서 응력분포를 확인해 보면, 용접 입열 시에는 우측단에 작은 인장응력이 분포하였으나 냉각 수축 후에 상대적으로 압축잔류응력이 분포함을 알 수 있는데, 이는 용접선에 수직인 방향으로 X-방향응력이 자기평형을 이루기 때문이다.

Fig. 16은 V1 전방 및 V3 후방 25mm 지점 절단면에 대하여 Z-방향 응력을 보여주고 있으며,

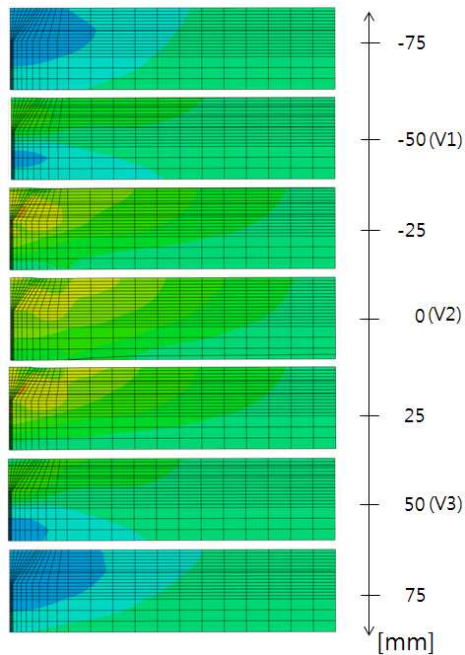


Fig. 16 Z-directional residual stress (S33) distribution in some selected sections

응력등고선 구간의 값은 Fig. 15와 같다.

Fig. 16에서 Z-방향의 잔류응력은 X-방향의 잔류응력분포 특성이 용접선 방향으로 나타남을 알 수 있다. V2선 단면의 응력분포를 살펴보면, Z-방향 잔류응력은 용접부에서 높은 값을 나타내고 열영향부 표면에서 약간 낮아졌다가 다시 높아진다. 이와 같은 분포는 용접부와 모재부의 소재가 다르므로 재료물성에 의한 차이가 슬롯의 경사각과 맞물려 나타난 것으로 판단된다. 따라서 용접 잔류응력 특성을 관찰하기 위하여 변수를 단순화 하려면 슬롯 경사각에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

슬롯용접의 잔류응력분포 특성을 살펴보기 위하여 실제 용접시편을 제작하여 X-선 회절법으로 용접시편 표면에서의 잔류응력 분포를 측정하고 유한요소

해석을 통하여 시편의 표면과 내면의 잔류응력분포를 살펴보았다. 용접 시작 및 종료 부근에 비하여 용접 중간 부분 근처에서 잔류응력이 더 높게 나타났는데, 이는 용접 입열시 열영향의 중첩에 의한 것으로 판단된다. 용접선에 수직한 방향의 응력분포는 용접부 중간 부분의 열영향부 표면에서 낮아졌다가 높아지는데 이는 슬롯 가공 시 경사각과 함께 용접부와 모재의 재료 물성 차이의 영향으로 판단된다.

본 논문에서 살펴본 슬롯용접 잔류응력분포는 보다 복잡한 조건의 용접잔류응력 예측을 위한 기초 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 수행 결과물입니다.

참고문헌

- (1) Song, T.K., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S., Park, C.Y., Yang, J.S., Huh, N.S., Kim, J.-W., Park, J.-S., Song, M.S., Lee, S.G., Kim, J.S., Yu, S.C. and Chang Y.S., 2008, "Results and Analyses for Simulational Round Robin on Welding Residual Stress Prediction in Nuclear Power Plant Nozzle," *The KSME 2008 Fall Annual Conference*, pp.79~82,
- (2) Song T. K., Kim, Y. J., Lee, K. S., Park, C. Y., Kim, J. S. and Kim, J. W., 2007, "Sensitivity Analysis of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Weld," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*.
- (3) Material Reliability Program: MRP-106, 2004, *Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy182 Butt Welds*, EPRI, PaloAlto, CA.
- (4) Material Reliability Program: MRP-113, 2004, *Alloy82/182 Butt Weld Safety Assessment for U.S. PWR Plant Designs*, EPRI, PaloAlto, CA.