

이종금속 평판 맞대기용접의 용접잔류응력 분포특성[§]

이경수* · 박치용** · 김만원** · 박재학***

* 한전전력연구원, ** 한수원(주), ***충북대

Distribution Characteristics of Weld Residual Stress on Butt Welded Dissimilar Metal Plate

Kyoung-Soo Lee*, Chi-Yong Park**, Maan-Won Kim** and Jai-Hak Park***

* KEPCO Research Institute, ** KHNP NETEC, *** Chungbuk Nat'l Univ.

(Received June 3, 2010 ; Revised July 5, 2010 ; Accepted July 6, 2010)

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

초록: 본 연구에서는 최근 원자력 발전소에서 이종금속용접 접합 소재로 많이 사용되고 있는 SA 508과 Type 304 스테인리스강의 이종금속 용접잔류응력 분포특성을 살펴보기 위하여 이종금속 용접시편을 제작하여 직접 용접을 실시하고 X-선 회절법을 이용하여 용접시편의 표면에서 용접 잔류응력을 측정하였다. 또한 3차원 유한요소해석을 통하여 이종금속 맞대기용접을 전산모사하고 시편의 용접잔류응력 분포를 구하였다. 측정된 잔류응력과 유한요소해석 결과 계산된 잔류응력을 고찰함으로써 3차원 평판 이종금속 맞대기 용접부의 잔류응력분포 특성을 살펴보았다.

Abstract: In this study, the weld residual stress distribution at a dissimilar-metal welded plate of low alloy carbon steel and stainless steel, which are widely used in nuclear power plants, was characterized. A plate mock-up with butt welding was fabricated using SA 508 low alloy steel and Type 304 stainless steel plates and the residual stresses were measured by the X-ray diffraction method after electrolytic polishing of the plate specimen. Finite element analysis was carried out in order to simulate the butt welding of dissimilar metal plate, and the calculated weld residual stress distribution was compared with that obtained from the measured data. The characteristics of the three-dimensional residual stress distribution in a butt weld of dissimilar metal plates were investigated by comparing the measured and calculated residual stress data.

1. 서론

최근 금속 소재 가공기술의 발달과 구조물 설계, 해석 및 건설기술의 발달로 인하여 구조물의 건전성 및 안전성이 향상되었다. 그러나 용접부의 경우 여전히 건전성 확보를 위한 많은 연구가 시도되고 있다. 현장에서 사용할 수 있는 용접부의 코드화된 용접잔류응력 분포는 ASME,⁽¹⁾ R6 Code,⁽²⁾ API Code 등⁽³⁾에서 제시되어 있다. 그러나 최근 발전소 등에서 안전관련 이슈인 것은 이종금속 용접부의 문제이며⁽⁴⁻⁶⁾ 수치해석적인 방법

을 이용한 이종금속 용접부의 잔류응력 평가에 대한 연구도 국제적으로 활발하게 수행되고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 3차원 용접잔류응력을 예측하기 위한 유한요소해석은 2차원 유한요소해석에 비하여 모델링과 계산에 많은 시간과 노력이 소요되기 때문에 많은 양의 연구결과가 발표되지 않았으나 최근 전산기술의 발달과 메모리 용량 및 전산능력의 향상으로 많은 관심을 받고 있다.

원자력발전소의 경우 큰 압력과 하중에 견디기 위하여 주기기는 탄소강을 사용하여 제작하고 연결 배관은 내식성 등의 이유로 스테인리스강으로 제작된 경우가 있다. 이 때 두 금속간의 이종금속용접 접합이 실시되는데 이종금속 용접부에서는 매우 큰 용접잔류응력이 분포하는 것으로 알

§ 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

려져 있다. 따라서 체계적인 연구를 위하여 국내에서 노즐부의 이중금속용접 전산해석에 관한 라운드로빈 연구가 수행된 바 있다.⁽¹¹⁾

한편 평판의 이중금속 용접의 경우, 3차원 잔류응력 특성에 관한 연구가 이경수 등⁽¹²⁾에 의하여 수행되었는데, SA508/ F316L 스테인리스강의 이중금속 평판 용접부에 대하여 용접시편을 제작하고 잔류응력을 측정하여 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그러나 용접선에 수직한 방향의 판 길이가 작기 때문에 3차원 효과가 크게 나타났다. 용접잔류응력의 측정은 구멍뚫기방법(hole drilling method)을 사용하였는데, 스트레인게이지를 부착하기 위한 표면 연마의 영향도 측정결과에 포함되었다.

본 연구에서는 시편의 크기 및 소재, 용접잔류응력 측정 방법을 달리하여 용접시편을 제작하였다. 탄소강인 SA508에 Alloy 82 버터링(buttering)을 육성한 후 304 스테인리스강과 맞대기용접을 수행하였다. 이때 용가재(filler metal)는 Alloy 182를 사용하였다. 용접시편의 잔류응력 측정에는 X-선 회절법을 사용하였다. 또한 실험과 동일한 형상 및 조건에 대하여 3차원 유한요소해석을 통하여 용접잔류응력을 계산하였다. 이때 용접방향으로 유한요소격자를 조밀하게 배치하여 모델링하였다. 측정된 용접잔류응력과 유한요소해석 결과를 비교 고찰 하였다.

2. 잔류응력 측정

2.1 용접시편 및 측정방법

이중금속 맞대기용접에 사용된 시편의 크기는 246 x 180 x 13 mm (가로x세로x두께) 인 평판이다. 모재부 소재는 탄소강 SA508 Gr.3와 304 스테인리스강(SS)이며, 버터링은 Alloy 82 이고 용가재는 Alloy 182 이다. SA 508 Gr.3은 밀링에 의해 제작된 소재를 사용하였으며 304SS는 기성품으로 판매되고 있는 압연재를 사용하였다. SA 508부는 버터링 용접 후 610 °C 에서 30분간 유지하였다가 노내에서 냉각하여 풀림처리 하였으며 304SS부는 그루브 가공 후 1100 °C에서 30분간 유지하였다가 액화질소에 급냉하여 고용화 열처리한 후 맞대기 용접을 실시하였다.

Fig. 1에 용접시편의 형상과 치수를 나타내었다. 용접부 루트부의 길이는 4 mm이며, 용접패스 순서와 개략적인 용접부 형상은 Fig. 2와 같다.

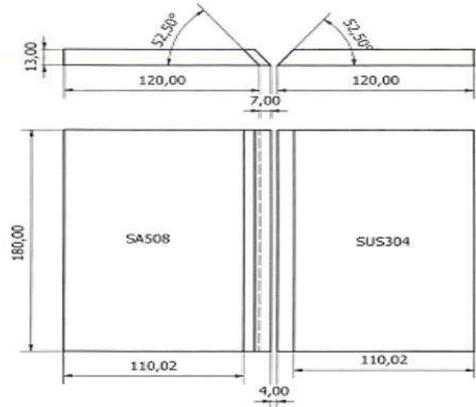


Fig. 1 Geometry and dimension of welding test specimen

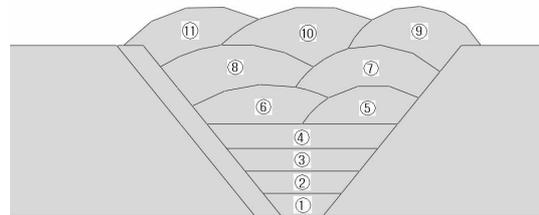


Fig. 2 Welding pass of welding test specimen

맞대기 용접 시 예열은 수행하지 않았으며 대기의 온도는 17 °C 이었다. 용접을 위하여 Fig. 3과 같이 tack-weld로 여덟 부위를 고정하였다. 1~3 패스는 피복 아크용접(shield metal arc welding), 4~11 패스는 가스텅스텐 아크용접(gas tungsten arc welding)을 사용하였고 입열조건은 전압이 25V, 전류가 150A였으며 층간온도는 130°C 이하로 진행하였다. 용접 도중에 9번째 패스 후 ③, ④, ⑤ 부위가 분리되었고, 10 번째 패스 후 ⑥, ⑦ 부위가 분리되었다.

용접잔류응력 측정은 X-선 회절법을 이용하였다. 사용된 X-선 파장은 SA 508부는 V 필터를 부착한 Cr-K α이며 회절각은 156.08°이고 304SS부는 V 필터를 제거한 Cr-K β이며 회절각은 148.52°이다. 표면거칠기에 의한 측정오차를 최소화하기 위해 SA508 부는 전해연마를 통해 약 50µm, 304SS부는 약 40µm의 표면층을 제거하였다. SA508 부의 경우 전해연마액에 의해 생성되는 부식생성물이 측정결과에 영향을 주지 않게 최대한 신속하게 측정하였으며, 결정립이 조대한 용접부 측정은 X-선의 특성상 신뢰도가 떨어져 측정하지 않았다

Fig. 4는 용접잔류응력 측정점을 나타낸 것이

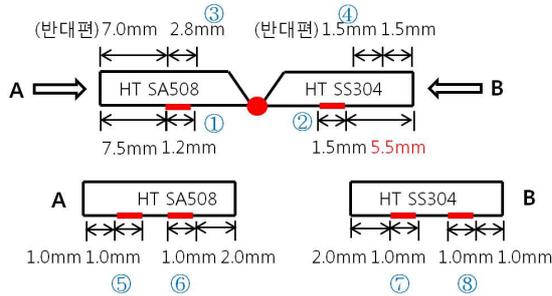


Fig. 3 Tack-weld location. Where the circled numbers do not mean tack-weld order

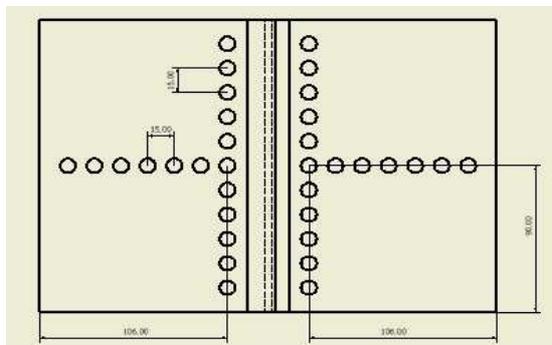


Fig. 4 Weld residual stress measurement points

다. 용접잔류응력은 두 모재부에서 각각 측정하였으며 용접선과 평행한 방향으로 용접부 경계로부터 15 mm 거리에서 용접방향과 평행한 선에서 15 mm 간격으로 11 지점을 측정하였고, 용접부에 수직인 방향으로 판 중앙에 15 mm 간격으로 SA508과 304SS에서 각각 7 지점씩 측정하였다. 편의를 위하여 용접진행방향을 X, 수직인 방향을 Z로 나타내기로 한다.

2.2 용접잔류응력 측정 결과

Fig. 5는 용접선에 수직인 방향의 선을 따라 측정한 잔류응력값을 나타낸 것이다. 그림에서 X와 Z 심볼은 각각 용접선 방향 잔류응력과 용접선에 수직인 방향 잔류응력을 나타낸다. X방향 응력과 Z방향 응력 모두 용접부 근처에서 인장값을 나타내고 멀어질수록 압축응력이 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 SA 508 모재부와 304 SS 모재부에서 용접선에 평행한 선을 따라 측정한 잔류응력값을 나타낸 것이다. X방향 응력과 Z 방향 응력이 전체적으로 유사하게 분포하였는데, 판의 중간부에서 인장응력이 분포하고 양쪽 모서리로 갈수록 압축응력이 분포하였다. 이는 2차원 수치해석으로 구현할 수 없는 3차원 특성으로 용

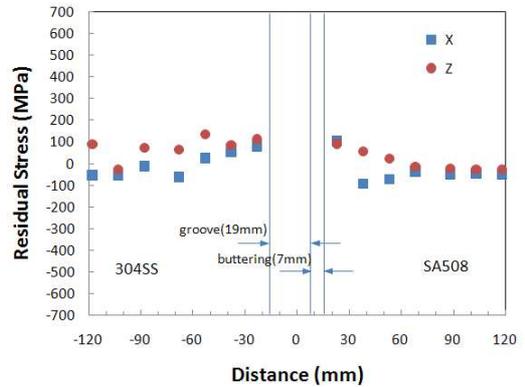


Fig. 5 Residual stress distribution along the center line normal to welding direction

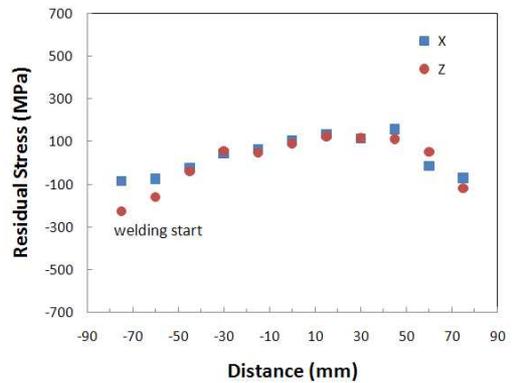


Fig. 6 Residual stress distribution along the line parallel to welding direction in SA 508 Gr.3 plate

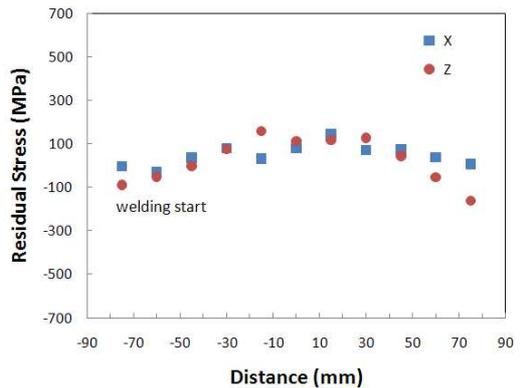


Fig. 7 Residual stress distribution along the line parallel to welding direction in 304SS plate

접 시작 및 종료부가 판의 자유 모서리이므로 응력분포의 자기평형(self-equilibrium) 형성 관점에서 이해될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 6에서 가로축에 대하여 응력값이 대칭으로 분포하지 않는 이유는 용접 도중에 2.1절에서 기술한 바와 같이 몇몇 tack-weld 부위가 분리되었

기 때문인 것으로 추측된다.

Fig. 7에서도 tack-weld분리의 영향이 나타난 것으로 판단된다. 용접부와 모재부 사이의 버터링 부 소재인 Alloy82의 열팽창계수가 모재부 소재인 SA508에 비하여 크므로 측정지점에서 급격한 응력변화가 나타나는데, 잔류응력 측정 시 X-선 조사 범위의 미세한 차이에도 측정된 응력값의 크기가 크게 변하는 것으로 생각된다.

3. 용접잔류응력 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

이종금속 판재의 맞대기용접을 전산모사하기 위하여 3차원 유한요소모델을 작성하고 열전달해석과 열응력해석을 수행하여 용접잔류응력분포를 구하였다. 유한요소해석은 ABAQUS Version 6.9⁽¹³⁾를 사용하여 수행하였다. 이종금속평판 맞대기용접 시편의 유한요소모델링 형상과 치수, 용접방향, 용접패스 적층 순서 및 구성소재는 Fig.1 및 Fig.2와 동일하게 하였다.

Fig. 8은 구성된 유한요소모델의 전체 요소격자 형상을, Fig. 9는 용접부 상세 요소격자 형상을 나타낸 것이다. 사용된 요소의 종류는 8절점 육면체요소이며 열전달해석에서는 DC3D8 요소를, 열응력해석에서는 C3D8R 요소를 사용하였다. 용접비드요소는 용접방향을 따라 10mm의 길이로 18개를 배치하였다. 유한요소모델의 총 절점 수는 23865 개이며, 총 요소 수는 21204 개이다. 유한요소 모델에서 X 방향은 용접선에 수직인 방향이며 Z방향은 용접선 방향이다.

용접 열전달해석과 열응력해석을 위한 재료 물성치는 송태광 등^(10,11)에서 사용된 물성치와 동일하게 하였다.

용접 열전달해석은 각 용접패스 마다 용접방향으로 시작부터 종료까지 18개의 용접비드요소를 차례로 활성화 시켜 비드요소에 체적열원(body heat source)을 가함으로써 실제 움직이는 열원을 모사하였다. 열용입 중인 활성화된 용접비드 요소를 제외한 나머지 대기와 접촉하고 있는 표면에서는 $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ 의 대류열전달계수를 적용하여 공기 중으로의 자유 표면냉각을 고려하였다. 한 용접패스 내에서 활성화된 용접비드 요소의 열용입 후 다음 용접비드요소를 활성화하여 열용입할 때, 직전에 열용입한 비드요소의 자유표면은 대류열전달 조건을 적용하여 자연냉각 되도록 하였

다. 한 패스 용접 후 충분한 냉각시간을 두어 각 용접패스 사이의 층간온도가 실험에서 측정된 온도에 근접하도록 하였다.

Fig. 10은 열 한 번째 용접패스의 열 세 번째 비드요소 열용입 시 온도분포를 나타낸 것이다. 용융상태인 비드요소의 중심에서 최대온도는 약 1700C 이며 용융부 주변의 열영향부에서 온도는 약 1090C 정도이다. 용접 순서에 따라 모든 비드요소에 대하여 이와 같은 온도분포가 되도록 하였다. 이러한 온도조건은 EPRI 연구결과^(14,15)와 동일한 것이다. 본 논문에서는 이와 같이 용접부 및 주변의 온도를 조절하는 방법과 층간온도 도달 시간으로 열전달해석이 정상적으로 수행되었음을 확인하였다. 열응력해석 시 용접기간 동안에는 구속조건으로 Fig. 3에 나타낸 tack-weld와 용접도중의 일부 분리를 동일하게 설정하였다.

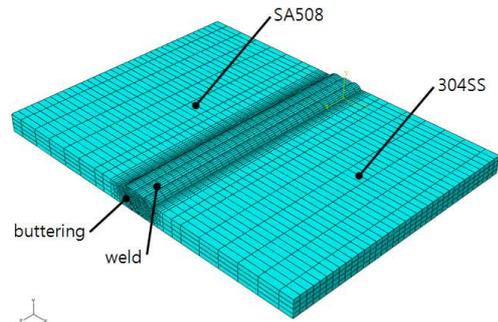


Fig. 8 Finite element mesh of full model

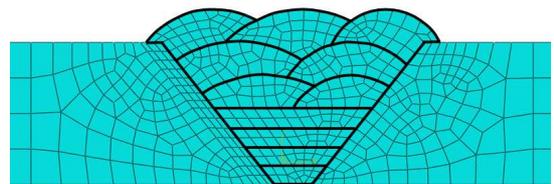


Fig. 9 Bead elements: welding pass order is same with the order depicted in figure 2

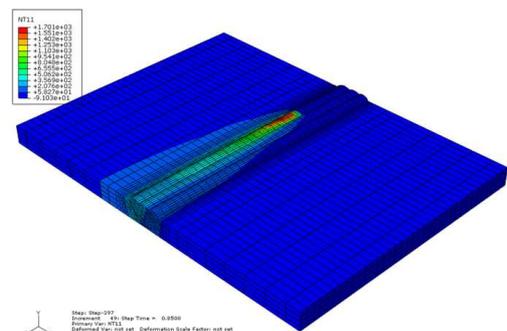


Fig. 10 Temperature distribution during the 8th bead element heating on the 1st pass

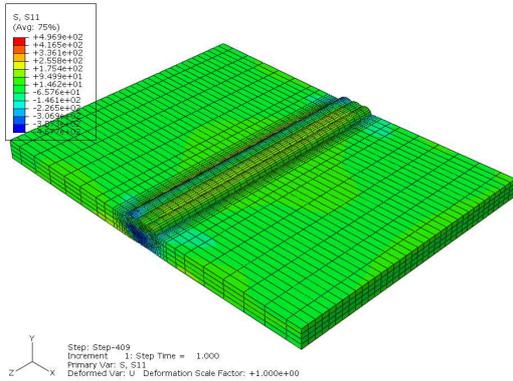


Fig. 11 X-directional weld residual stress distribution of the upper surface of test plate

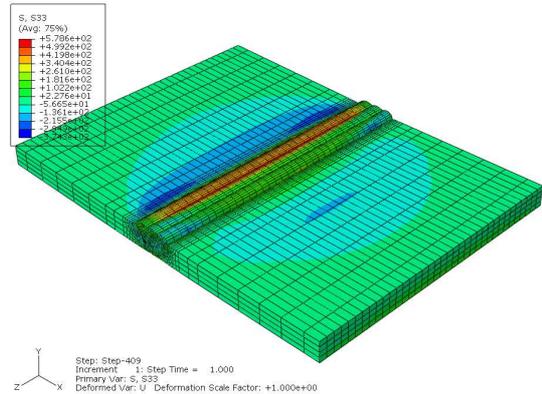


Fig. 13 Z-directional weld residual stress distribution of the upper surface of test plate

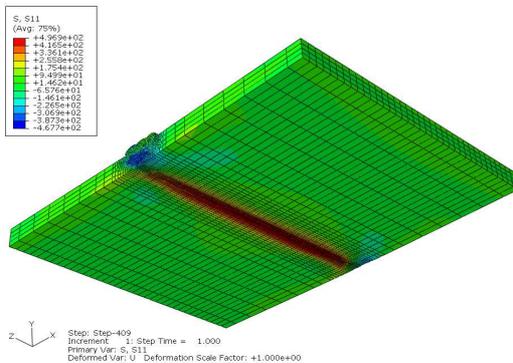


Fig. 12 X-directional weld residual stress distribution of the bottom surface of test plate

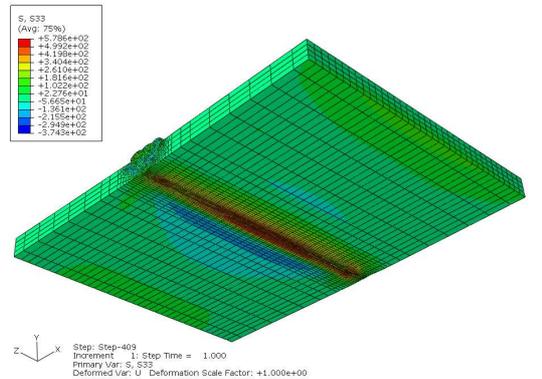


Fig. 14 Z-directional weld residual stress distribution of the bottom surface of test plate

3.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과 구해진 상하면에서의 잔류응력분포를 Fig. 11 ~ Fig. 14에 나타내었다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 상하면에서 용접선에 수직인 방향(X)의 응력을 나타낸 것이다. 윗면에서는 용접 시작 및 종료부에서 압축응력이 분포하고 전체적으로 인장응력이 분포하며, 아랫면에서는 용접 루트부와 열영향부에 높은 인장응력이 존재한다. Fig. 13과 Fig. 14는 각각 상하면에서 용접선에 평행한 방향(Z)의 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 윗면과 아랫면에서 모두 열영향부 근처에서는 압축응력이 존재하며 용접부에서 멀리 떨어진 판의 경계와 모서리부분에는 전체적으로 낮은 인장응력이 분포하였다.

특히 SA508에서는 304SS에 비하여 더 큰 압축응력이 나타났는데, 이는 Alloy 82 소재의 열팽창계수가 SA508소재의 열팽창계수에 비하여 더 크므로 재료물성의 영향으로 인한 것으로 생각된다. 유한요소해석에서 버터링과 용접부는 같은

물성치를 적용하였으므로 냉각 시 수축부위가 더 커지는 것과 같은 효과가 나타난 것이다. 304SS 모재부의 경우 열팽창계수가 용접재의 열팽창계수와 유사하므로 SA508에서 보다 낮은 압축응력 분포가 나타난 것으로 생각된다. 용접 시작 및 종료점 부근의 판 모서리에서 더 큰 압축응력이 나타난 것은 자유 모서리에 근접하여 있어 tack-weld 구속조건과 용접열전달에서 자유표면으로의 대류열전달에 의한 열원손실이 용접부 중앙부에 비하여 상대적으로 더 많은 것에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 15 ~ Fig. 17은 Fig. 4의 측정선을 따라 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 15는 SA508 모서리에서 304SS 모서리까지 용접선에 직각인 선을 따라 계산된 잔류응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 5의 측정값과 비교해 볼 때, 값이 유사하고 경향이 일치하였다. 다만, 측정값에서는 304SS에서 용접방향 응력과 그에 수직인 방향 응력간

Table 1 Comparison of measured and FEM stress

Distance (mm)	Measured Stress(MPa)		FEM Stress(MPa)	
	X(S11)	Z(S33)	X(S11)	Z(S33)
-118	-54.32	90.13	20.38	-7.66
-103	-54.99	-25.97	1.62	-36.91
-88	-11.63	72.88	-5.75	-71.07
-68	-62.46	64.69	1.04	-87.36
-53	25.17	135.38	19.61	-120.26
-38	52.49	86.41	25.02	-136.00
-23	78.99	112.11	52.93	-17.55
23	103.75	91.84	56.19	-177.19
38	-92.91	56.13	37.41	-161.26
53	-73.59	23.55	26.59	-138.66
68	-37.55	-14.72	13.67	-105.49
88	-50.99	-22.04	-0.96	-17.67
103	-47.62	-27.93	-0.42	4.77
118	-51.90	-27.47	-0.14	15.21

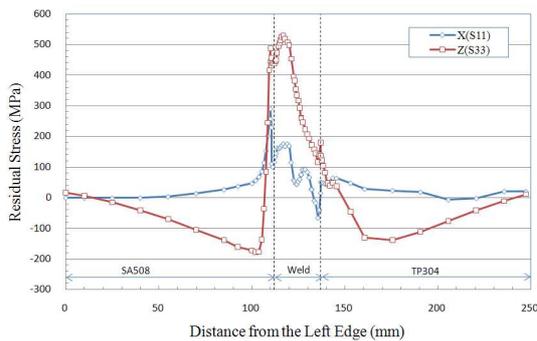


Fig. 15 FEM weld residual stress distribution along the center line normal to welding direction

에 뚜렷한 경향차이가 나타나지 않은 것은 오스테나이트 스테인리스강의 X선 측정에 있어 다소 큰 오차범위(약 $\pm 100\text{MPa}$) 때문에 용접 후에도 압축 또는 인장으로의 응력변화가 크지 않은 경우가 잔류응력이 측정값에 반영되는 것으로 생각된다. Table 1은 측정값과 유한요소해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Table 1에서 FEM 결과는 측정위치에 맞추어 선형보간하여 나타내었으므로 응력값이 급격히 변하는 부분에서 FEM 결과와 측정결과 간의 차이가 있다.

Fig. 16과 Fig. 17은 각각 SA508모재부와 304SS 모재부에서 용접선에 수평한 선을 따라 계산된 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 304SS에서 유한요소해석 결과로 얻어진 최대응력 값은 측정값에 비하여 작은 값을 나타내었다. 그러나 3차원 자

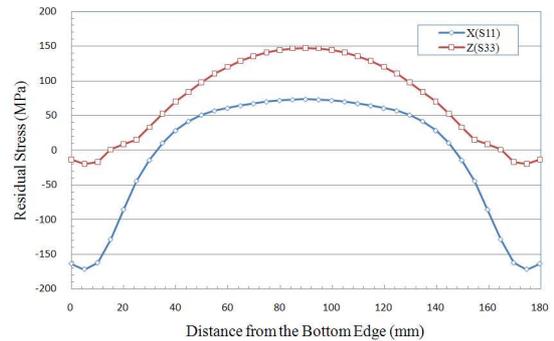


Fig. 16 FEM weld residual stress distribution along the line parallel to welding direction in SA 508 Gr.3 plate

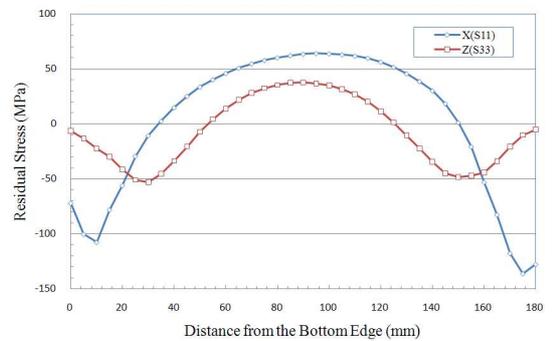


Fig. 17 FEM weld residual stress distribution along the line parallel to welding direction in 304SS plate

유단의 영향에 의해 용접 시작과 종료점 근처에서 큰 압축응력이 나타나는 것과 구속조건 중간분리의 영향으로 응력값이 가로축을 따라 약간 비대칭인 것은 측정응력분포 특성과 일치하였다.

4. 결론

SA508/304SS이종금속 맞대기용접의 잔류응력특성을 살펴보기 위하여 실제 용접시편을 제작하여 X선 회절법으로 용접시편 표면에서의 잔류응력을 측정하고 유한요소해석을 통하여 잔류응력분포를 살펴보았다. 측정 결과와 유한요소해석 결과가 동일한 경향과 잔류응력분포 특성을 나타내었다. 용접잔류응력의 분포는 열영향부 근처의 SA508모재에서 크게 변화하였는데 이는 근접한 버터링부의 열팽창계수가 더 크기 때문에 나타난 이종재의 영향으로 판단된다. 3차원 유한요소해석과 측정 결과에서 용접선의 중앙부에 비하여 용접 시작 및 종료 부근에서 압축잔류응력분포가

나타났다. 이것은 관재 맞대기용접에서 나타나는 3차원 잔류응력분포 특성이며 자유단의 영향으로 나타난 것으로 생각된다. 용접 루트부에서는 큰 인장응력분포가 나타났다.

본 논문의 연구내용은 최근 많은 관심을 일으키고 있는 원자력 발전소에서 사용되는 소재의 이종금속용접 접합 시 용접잔류응력 예측을 위한 기초 자료로 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) 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.
- (2) September 2000, Welding Residual Stress Distribution, R6 Revision 4, Chapter IV, Section IV.4.
- (3) API 579, Appendix E
- (4) Inspection and Mitigation of Alloy 82/182 Pressurizer Butt Welds: Proposed Letter Template for PWR License to NRC, 2007.1.12.
- (5) US NRC, "NRC Wolf Creek Flaw Evaluation," Presented at November 30, 2006, Public Meeting Between US NRC and MRP, North Bethesda, Maryland.
- (6) Kim, J. S., Chung, H. D. and Choi, Y. H., 2008, "The Regulatory Issues on Bimaterial Weld PWSCC and related Industrial Activity," *Proceedings of the KPVP 2008*, pp.389~390.
- (7) Bamford, W., Cipolla, R., Rudland, D. and Boo, G. D., 2008, "Technical Basis for Revision to Section XI Appendix C for Alloy 600/82/182/132 Flaw Evaluation in Both PWR and BWR Environments," *ASME PVP 2008 Conference*.
- (8) Dong, P. and Cao, Z., 2006, "The Mechanical Basis of Residual Stress Profiles in Proposed API 579 Appendix E," *ASME PVP 2006 Conference*.
- (9) 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*.
- (10) Song, T. K., Kim, Y. J., Lee, K. S., Park, C. Y., Kim, J. S., 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*, pp.63~68.
- (11) 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.
- (12) Lee, K.S., Kim, T.R., Park, J.H. Kim, M.W. and Cho, S.Y., 2009, "3-D Characteristics of Residual Stress in the Plate Butt Weld Between SA508 and F316L SS," *Trans. of the KSME(A)*, Vol.33, No.4, pp.401~408.
- (13) ABAQUS V.6.9-1, Dassault Systems, 2009.
- (14) Material Reliability Program: MRP-106, 2004, Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy182 Butt Welds, EPRI, Palo Alto, CA.
- (15) Material Reliability Program: MRP-113, 2004, Alloy82/182 Butt Weld Safety Assessment for U.S. PWR Plant Designs, EPRI, Palo Alto, CA.