

보수용접부 폭에 따른 용접잔류응력의 변화 및 재분배 거동 평가

박치용* · 이휘승** · 허남수**†

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, ** 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Investigation into Variations of Welding Residual Stresses and Redistribution Behaviors for Different Repair Welding Widths

Chi-Yong Park*, Hwee-Sueng Lee** and Nam-Su Huh**†

* Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Corporation

** Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received September 22, 2013 ; Revised November 28, 2013 ; Accepted December 18, 2013)

Key Words: Dissimilar Metal Butt Weld(이종금속 맞대기 용접), Finite Element Analysis(유한요소해석), Repair Welding(보수용접), Welding Residual Stress(용접잔류응력)

초록: 본 논문에서는 보수용접부 폭 변화에 따른 이종금속 맞대기 용접부(Dissimilar metal butt weld) 용접 잔류응력의 분포 및 동종금속용접/기계적 하중에 의한 재분배 거동을 평가하였다. 이를 위해 5가지 다른 보수용접부 폭을 고려한 상세 2차원 유한요소 열해석 및 응력해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 보수용접에 의한 용접잔류응력 분포를 평가하였으며, 동종금속용접 및 기계적 하중에 의한 응력 재분배 특성을 평가하였다. 보수용접에 의해 배관 내면에서는 큰 인장 용접잔류응력이 축방향과 원주방향에 대해 발생하는 것으로 나타났으며 보수용접부 폭이 특정값 이상이 되면 용접잔류응력 분포가 변하는 것으로 나타났다. 그러나 동종금속용접과 기계적 하중을 고려하면 인장잔류응력값이 크게 감소하였으며 그 경향은 보수용접부 폭에 무관한 것으로 나타났다.

Abstract: In this study, we investigated the variations in welding residual stresses in dissimilar metal butt weld due to width of repair welding and re-distribution behaviors resulting from similar metal welding (SMW) and mechanical loading. To this end, detailed two-dimensional axi-symmetric finite element (FE) analyses were performed considering five different repair welding widths. Based on the FE results, we first evaluated the welding residual stress distributions in repair welding. We then investigated the re-distribution behaviors of the residual stresses due to SMW and mechanical loads. It is revealed that large tensile welding residual stresses take place in the inner surface and that its distribution is affected, provided repair welding width is larger than certain value. The welding residual stresses resulting from repair welding are remarkably reduced due to SMW and mechanical loading, regardless of the width of the repair welding.

1. 서론

원자력발전소 건설 혹은 유지보수 시 기기 설치를 위해 많은 용접이 수행되며, 특히 배관의 경우에도 배관끼리의 연결 및 각종 기기와의 연결을 위해 많은 용접이 수행된다. 이에 따라 용접잔류응력은 원자력기기의 건전성과 관련하여 주요하게

다뤄지는 하중 인자 가운데 하나이다. 특히 저합금강(Low alloy steel)으로 제작된 기기와 스테인리스강(Stainless steel)으로 제작된 배관의 연결을 위해서 많은 이종금속용접(Dissimilar Metal Weld, DMW)이 수행되며 이 가운데 용접재로 Alloys 82/182 합금을 사용한 경우에는 용접부에서 발생하는 인장 용접잔류응력과 배관 내부를 흐르는 1차 원자로 냉각수(Primary reactor coolant), 그리고 재료 자체의 부식 민감성의 상호 작용으로 인해 1차수 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC) 현상이 다수 발생한다.⁽¹⁾

† Corresponding Author, nam-su.huh@seoultech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

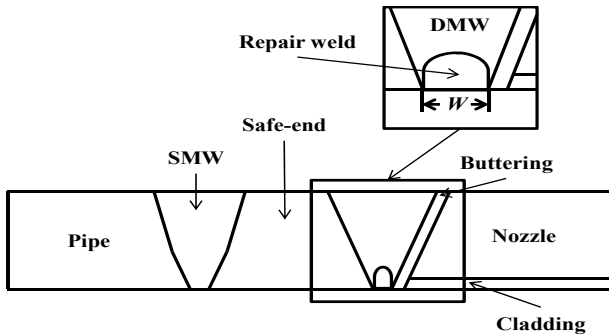


Fig. 1 Geometry of dissimilar metal butt weld considered in the present study

또한 배관 계통에 대한 용접 수행 후 비파괴 검사를 수행하여 용접부에서 결함이 발견되면 국부적으로 이를 제거하고 되메우는 보수용접(Repair welding)이 수행되게 된다. 이와 같은 추가적인 보수용접은 PWSCC 위험성이 있는 배관 내면에서 더 큰 인장 용접잔류응력을 야기할 수 있는 것으로 알려져 있다.^(2,3) 따라서 PWSCC에 의한 균열 성장량 예측 및 건전성 평가를 위해서는 정확한 용접부 응력상태 예측이 주요 인자가 된다. 그러나 용접부에서 발견된 결함 형상에 따라 보수용접부의 폭, 깊이 등의 형상 변수들이 다양하게 변할 뿐만 아니라 실제 원자력기기는 복잡한 용접이력을 경험하기에 정확하게 보수용접부의 용접잔류응력을 예측하는 것은 어렵다. 이에 따라 가압기 안전/방출 노즐 DMW 등에 대해 보수용접 깊이, 보수용접 시작위치 등이 보수용접에 의한 용접잔류응력에 미치는 영향 등이 평가된 바 있다.^(2,3) 또한 Dong 등⁽⁴⁾과 Elcoate 등⁽⁵⁾은 비록 DMW는 아니지만 단일 재료로 제작된 배관 맞대기 외면(outer surface) 보수용접부에 대해 보수용접부의 원주방향 길이가 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, Zhang 등⁽⁶⁾은 배관 맞대기 용접부 DMW에서 배관 외면에 부분적으로 작게 보수용접을 수행하면 이에 의한 응력 변화가 거의 없을 수 있음을 보인 바도 있다.

또 다른 중요한 점 가운데 하나는 보수용접을 수행한 후 재가동하여 정상운전압력과 같은 기계적 하중이 다시 작용한다면 보수용접에 의해 생성된 과도한 인장 용접잔류응력이 재분배되어 그 분포 특성이 변할 수 있다. 많은 경우 PWSCC에 의한 균열 성장량을 보수적으로 예측하기 위해 보수용접만을 고려하여 구한 용접잔류응력을 직접 사용하지만 지나치게 큰 인장 용접잔류응력 적용으로 인해 균열 성장량이 과도하게 예측될 수 있다.

Table 1 List of materials employed in the present study⁽⁷⁾

Part	Material
Cladding	TP316 stainless steel
DMW / Buttering	Alloys 82/182
Nozzle	SA508 Cl.2
Safe-end	TP316
SMW	ER316L
Pipe	TP316 stainless steel

따라서 이러한 과도한 보수성을 정량화하기 위해서는 재분배 특성을 엄밀하게 고려할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소의 원자로 배관 이종금속 맞대기 용접부를 대상으로 유한요소해석을 수행하여 보수용접부의 폭 변화가 이종금속 맞대기 용접부의 용접잔류응력 분포 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 5가지의 보수용접부 폭을 고려하였으며, 특히 추가적인 동종금속용접(Similar Metal Weld, SMW)과 기계적 하중(수압시험 및 정상운전하중)이 보수용접에 의해 발생한 과도한 인장 용접잔류응력의 재분배 거동에 미치는 영향을 평가하여 PWSCC에 의한 균열 성장량 평가 시 실제 운전 조건을 반영한 실제 건전성 평가가 수행될 수 있도록 하였다. 그리고 보수용접부 폭에 따른 재분배 거동의 차이도 평가하였다.

2. 해석 대상 및 운전 조건

Fig. 1은 본 논문에서 고려된 국내 원자력발전소의 원자로 입구 노즐 이종금속 맞대기 용접부 형상을 대략적으로 나타낸 것이다. 배관의 두께는 84.14 mm이며 배관 내면에서의 DMW 폭은 6.35 mm이다. 또한 배관 내면에서의 SMW 폭은 6.35 mm, 그리고 클래딩(Cladding)의 두께는 8 mm이다.

Table 1은 부분별 재료를 정리하여 나타낸 것이다. 보수용접에 의해 생성된 용접잔류응력의 재분배 특성 평가를 위한 기계적 하중으로 수압시험 압력과 정상운전 중 운전 압력을 고려하였다.

수압시험 시 시험 온도와 압력은 각각 21.11 °C와 21.42 MPa이며, 정상운전 시 운전 온도와 압력은 각각 286.11 °C와 15.51 MPa이다.

3. 용접해석 및 응력해석

본 논문에서는 범용 유한요소해석 프로그램인

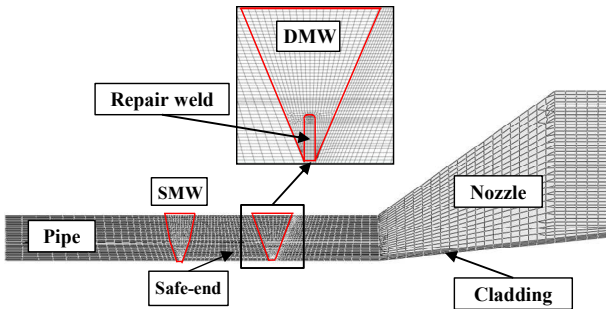


Fig. 2 Finite element meshes employed in the present study (Repair depth=30% of thickness)

ABAQUS⁽⁸⁾를 사용하여 유한요소 용접공정 해석 및 기계적 응력 해석을 수행하였다. 유한요소해석 시에는 2차원 축대칭 모델을 적용하였다. 해석 시 적용된 요소는 4절점 축대칭 요소(4-nodes axisymmetric element, DCAX4 for temperature analysis and CAX4 for stress analysis in ABAQUS element library)이다. 즉, 2차원 축대칭 해석을 수행했기에 보수용접은 배관의 전체 원주에 대해 수행된 것으로 가정하였다. Fig. 2는 해석 시 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것으로 각 용접 비드의 두께는 실제 용접층의 크기와 유사하도록 3.5 mm 정도로 모델링 하였다.

실제 용접 공정을 고려하여 해석을 수행하였으며 가장 먼저 DMW 공정을 유한요소해석으로 모사하고 보수용접 공정을 이어서 모사하였다. 그 후 SMW 공정을 모사하고 수압시험 조건과 정상운전 조건을 고려하였다. Fig. 3은 DMW 보수용접부 유한요소망을 보다 상세하게 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 보수용접부 폭의 영향을 고려하기 위해 5가지 보수용접부 폭을 고려하였다. 기존 DMW 내면에서의 용접 그루브(Groove) 폭을 W 로 정의하여(Fig. 1 참고) W , $1.5W$, $2W$, $3W$ 그리고 $5W$ 인 경우를 고려하였다. 뿐만 아니라 보수용접부의 깊이도 내면으로부터 배관 두께의 10%, 30% 그리고 80%의 3가지 경우를 고려하였다.

보수용접은 보수용접부에 해당되는 부위의 유한요소망을 제거한 후, 보수용접 시 생성되는 신규 비드가 보수용접부 안쪽부터 재생성 되도록 수행하였다. 보수용접부의 용접재 역시 DMW와 동일하게 Alloys 82/182를 사용하였다. 보수용접부 폭이 $1.5W$ 이상인 경우부터는 보수용접 공정 모사를 위한 비드 제거 시 안전단(Safe-end), 버터링(buttering), 클래딩, 그리고 노즐 쪽 재료도 일부 제거되게 되는데 이후 보수용접 시에는 해당 부위의 원재료가 실제와 동일하게 용접재인 Alloys 82/182로 변경되도록 설정하여 보수용접 공정을 모사하였다.

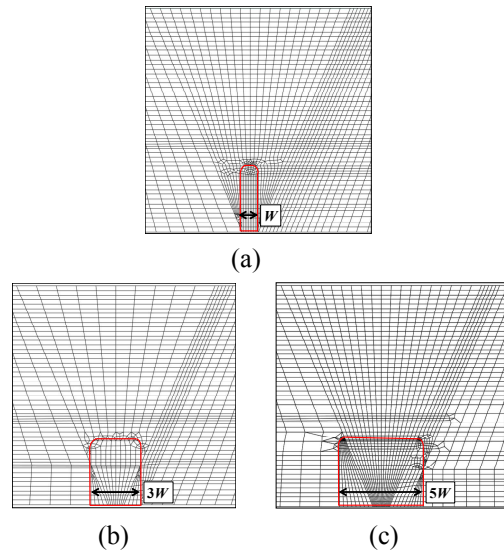


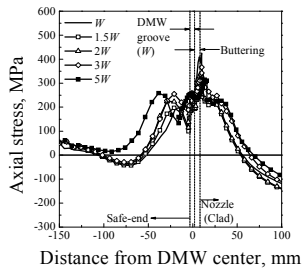
Fig. 3 Examples of finite element meshes for repair welding; (a) W , (b) $3W$ and (c) $5W$

DMW, SMW, 그리고 보수용접에 대한 용접 공정 온도 해석 시에는 기존 연구⁽⁹⁻¹²⁾를 통해 정립된 온도경계조건을 이용한 용접 비드 적층 방법이 적용되었다. 즉, 새로 생성되는 용접 비드가 용융점 이상 온도인 1700°C 로 새로이 용착되도록 하였다. 이때 용융점 이상 온도까지의 온도의존적 재료물성치가 모두 고려되었다.⁽¹³⁾

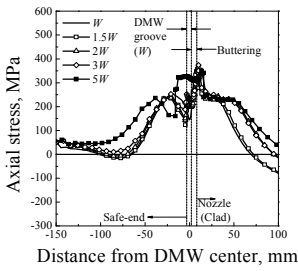
수압시험 및 정상운전 조건의 경우에는 배관 내압 적용 시 end-cap 효과를 고려하여 배관 끝단에 등가인장하중을 적용시켰다. 특히 용접에 의한 잔류응력 해석 시 기계적 경계조건은 해석 결과에 매우 큰 영향을 미친다.⁽⁷⁾ 이에 따라 본 논문에서는 노즐 측은 축방향으로만 구속하고, 배관 측은 구속하지 않았다.⁽⁶⁾

4. 보수용접에 의한 용접잔류응력 분포 및 재분배 거동

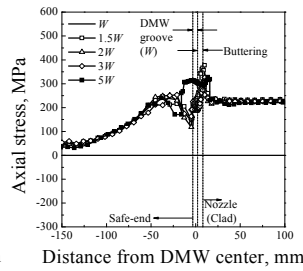
Fig. 4와 Fig. 5는 3가지 보수용접 깊이와 5가지 보수용접부 폭을 고려한 배관 내면을 따른 축방향 응력분포를 나타낸 것이며, Fig. 6과 7은 원주방향 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 6은 보수용접을 수행한 직후의 보수용접에 의한 용접 잔류응력 분포이며, Fig. 5와 Fig. 7은 여기에 SMW, 수압시험, 그리고 정상운전 조건을 고려하여 재분배된 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 보수용접부의 폭이 $W \sim 3W$ 인 경우에는 보수용접부 폭이 배관 내면 응력 분포에 미치는 영향이 미미하였다. 그러나 보수용접부



(a)

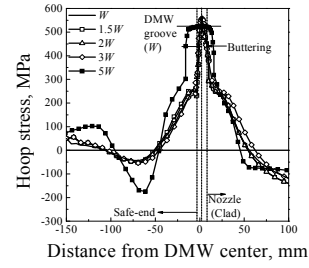


(b)

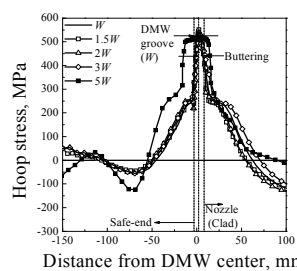


(c)

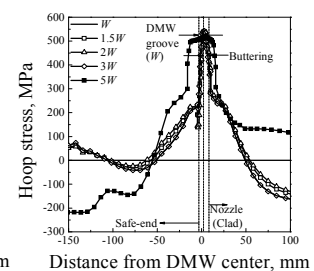
Fig. 4 Axial stress distribution at inner surface after repair welding for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%



(a)

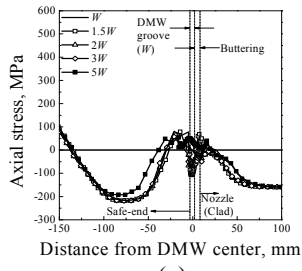


(b)

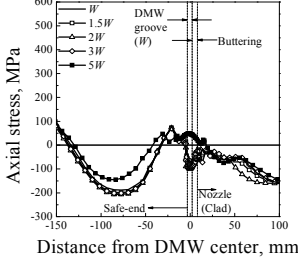


(c)

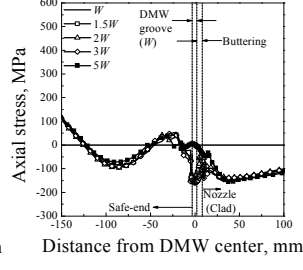
Fig. 6 Hoop stress distribution at inner surface after repair welding for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%



(a)

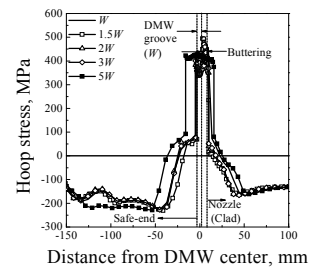


(b)

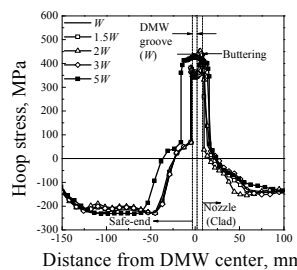


(c)

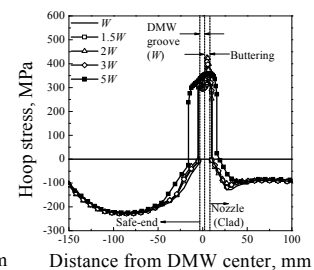
Fig. 5 Axial stress distribution at inner surface after SMW, hydrostatic and normal operating pressures for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Hoop stress distribution at inner surface after SMW, hydrostatic and normal operating pressures for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

폭이 원래 DMW폭의 5배(5W)인 경우에는 DMW 영역 및 내면에서 인장 용접잔류응력이 발생하는 구간이 크게 증가하였으며 그 값도 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 이러한 경향은 보수용접부 깊이에 무관한 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 5에 나타난 바와 같이 SMW와 수압시험 및 정상운전하중과

같은 기계적 하중이 작용하면 보수용접에 의해 발생한 용접잔류응력이 재분배되어 전반적으로 보수용접에 의해 생성된 인장 용접잔류응력값이 크게 감소하였으며 특히 보수용접에 의한 인장 용접잔류응력이 나타나는 영역이 매우 컸던 5W인 경우도 다른 경우와 유사한 수준으로 그 값이

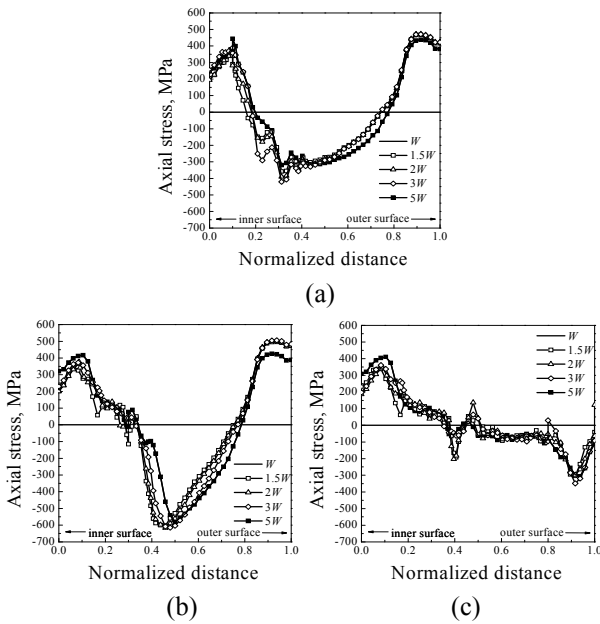


Fig. 8 Axial stress distribution along the wall thickness at the center of DMW after repair welding for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

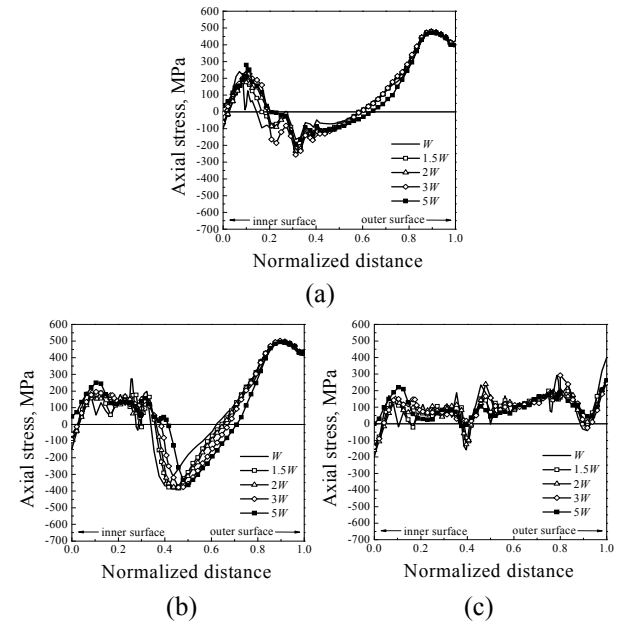


Fig. 10 Axial stress distribution along the wall thickness at the center of DMW after hydrostatic and normal operating pressures for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

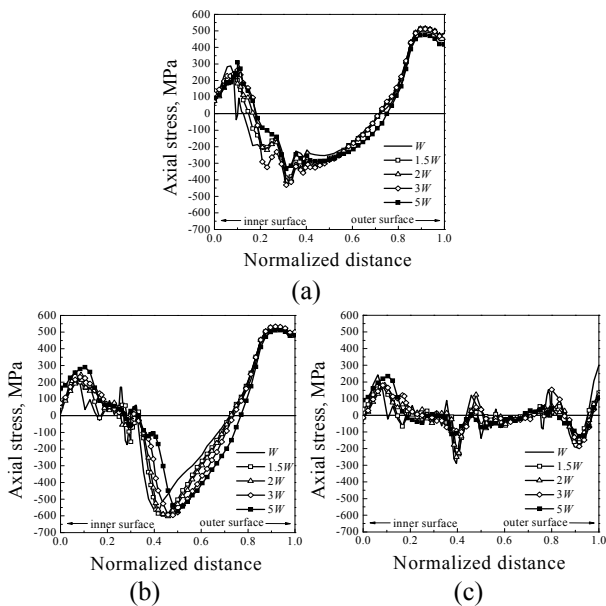


Fig. 9 Axial stress distribution along the wall thickness at the center of DMW after SMW for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

크게 감소하였으며 인장 용접잔류응력이 나타나는 영역도 크게 감소하였다.

Fig. 6~Fig. 7의 원주방향의 경우도 축방향 응력과 동일하게 보수용접부 폭이 W ~ $3W$ 인 경우에는 보수용접부 폭이 배관 내면 응력 분포에 미치는 영향은 미미하였다. 그러나 $5W$ 인 경우에는 내면을 따른 용접잔류응력 분포가 차이를 보였으며 특

히 보수용접부 깊이가 두께의 80%인 경우(Fig. 6(c))는 그 변화가 다른 경우에 비해 컸다. 또한 모든 경우에 있어 DMW 영역에서의 최대 응력값은 크게 변화가 없는 것으로 나타났으나 최대 인장응력값이 나타나는 영역은 보수용접부 폭만큼 넓어졌다. SMW, 수압시험, 그리고 정상운전조건을 고려한 경우(Fig. 7)에는 축방향 응력과 마찬가지로 재분배 현상이 발생하여 보수용접부를 제외한 모든 영역에서 압축 응력으로 변화하였으며 보수용접부 폭에 해당하는 영역을 제외하면 나머지 영역은 보수용접부 폭에 관계없이 유사한 응력분포를 나타내었다. 보수용접부 근처에서도 비록 인장응력 상태를 유지하였지만 그 크기는 약 100 MPa 정도 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8~Fig. 10은 3가지 보수용접 깊이와 5가지 보수용접부 폭을 고려한 경우에 대해 DMW 중앙에서 두께를 따른 축방향 응력분포를 나타낸 것으로, Fig. 8은 보수용접을 수행한 직후의 용접잔류응력 분포를 나타낸 것이며, Fig. 9는 SMW를 수행한 후의 용접잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 10은 수압시험과 정상운전조건을 고려하여 최종적으로 재분배된 응력 분포를 나타낸 것이다.

DMW 중앙에서 두께를 따른 응력분포의 경우는 균열 성장량 평가 측면에서 중요하며 또한 SMW에서 상대적으로 멀리 떨어져 있기에 각각

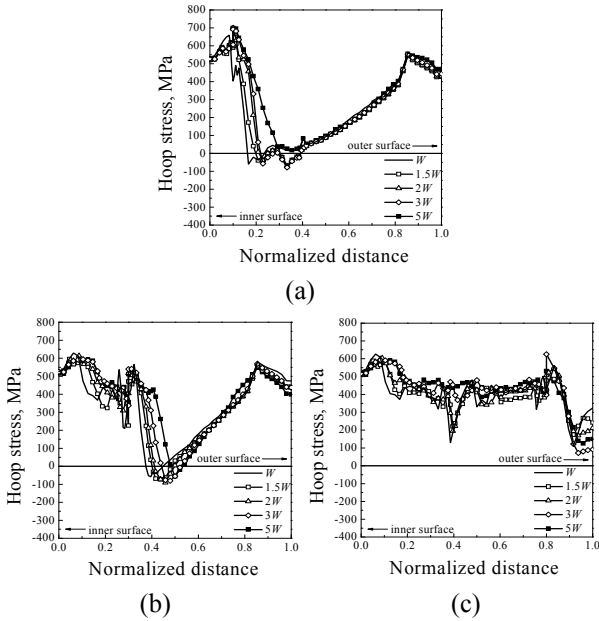


Fig. 11 Hoop stress distribution along the wall thickness at the center of DMW after repair welding for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

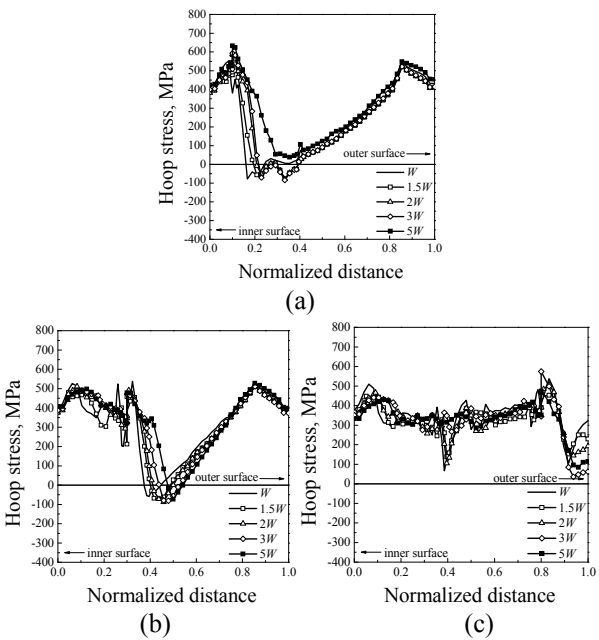


Fig. 12 Hoop stress distribution along the wall thickness at the center of DMW after SMW for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

공정에 의한 영향을 따로 평가하였다. 먼저 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 보수용접에 의한 축방향 용접잔류응력은 자기평형성(Self-equilibrium) 조건을 만족하였다. 그리고 모든 경우에 있어 배관 내면에서 약 200 MPa 이상의 인장 용접잔류응력이

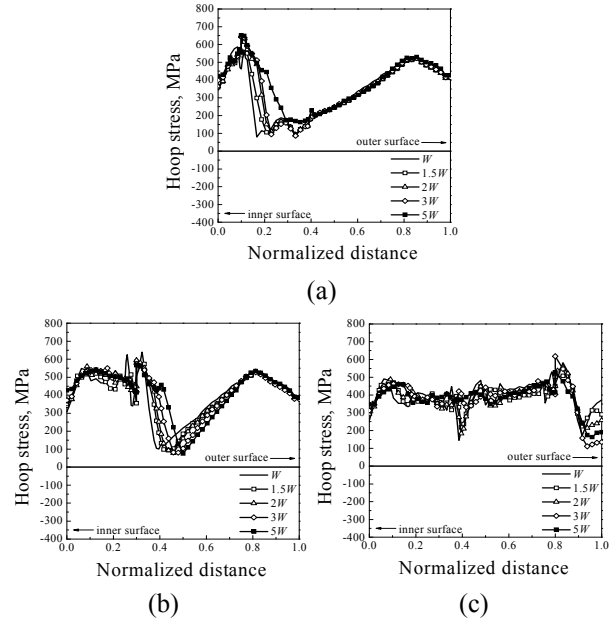


Fig. 13 Hoop stress distribution along the wall thickness at the center of DMW after hydrostatic and normal operating pressures for 5 different values of repair welding width; (a) depth=10%, (b) depth=30% and (c) depth=80%

보수용접에 의해 생성되는 것으로 나타났다. 보수용접 깊이(Fig. 8(a)~(c))에 따른 용접잔류응력 분포는 보수용접부 깊이가 깊을수록 배관 내면부터 인장 용접잔류응력이 발생하는 영역이 증가하였으며, 보수용접부 폭이 $5W$ 인 경우에 가장 큰 내면 인장 용접잔류응력이 발생하며 다른 경우에 비해 약 150 MPa 정도 큰 값을 나타내었다. 그러나 보수용접부 폭이 W ~ $3W$ 인 경우는 거의 그 값이 유사하거나 혹은 70 MPa 정도의 범위에서 변화하였다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 SMW 공정에 의해서도 DMW 중앙에서의 응력분포는 영향을 받는 것으로 나타났다. 비록 SMW 공정에 의해 내면에서의 응력이 감소하기는 하지만 대부분 인장응력 상태를 유지하고 있으며 내면에서의 응력감소에 따른 자기평형성 유지를 위해 외면에서는 응력값이 증가하였다. 최종적으로 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 수압시험과 정상운전하중을 고려하면 기계적 하중에 의해 재분배되어 내면에서 대부분의 경우에 대해 압축응력으로 변하는 것으로 나타났다. 그러나 $5W$ 의 경우에는 그 값이 크게 감소하기는 하지만 약 30 MPa 정도로 인장응력 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 8~Fig. 10의 결과로부터 최종적으로 기계적 하중까지 고려하면 보수용접에 의해 생성된 큰 축방향 인장 용접잔류응력이 재분배되어 압축응력 상태로 변하거나 혹은 그 값이

크게 감소하므로(보수용접부 폭이 큰 경우) 만약 PWSCC에 의한 배관 이종금속 맞대기 용접부 균열 성장량 평가 시 보수용접에 의한 용접잔류응력만을 고려하여 균열 성장량을 평가하면 실제 운전 조건에서 균열 성장량이 지나치게 과대 평가될 수 있음을 유추할 수 있다.

Fig. 11~Fig. 13은 DMW 중앙에서 두께를 따른 원주방향 응력분포를 보수용접 직후와 SMW 수행 후, 그리고 수압시험 및 정상운전하중을 고려한 이후에 대해 나타낸 것이다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 보수용접폭이 변함에 따라 배관 내면 근처에서의 응력 분포는 비교적 영향을 받았으나 내면에서의 인장 원주방향 용접잔류응력값은 약 500 MPa 정도로 보수용접부 폭에 관계없이 비교적 유사한 것(약 10 MPa 정도의 범위에서 변동)으로 나타났다. Fig. 12는 SMW 수행 후 분포로 내면에서 보수용접에 의해 생성된 용접잔류응력이 SMW 공정에 의해 약 100~150 MPa 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 13에 나타난 바와 같이 최종적으로 수압시험과 정상운전하중을 고려하면 약 50~70 MPa 정도 더 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 내면에서의 최종 응력값은 폭이 5W인 경우가 가장 컸다. 축방향 응력과 달리 원주방향 응력은 기계적 하중에 의해 최종적으로 재분배되어도 여전히 매우 큰 인장응력을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 이 경우에도 응력 재분배를 고려하지 않고 보수용접에 의한 용접잔류응력만을 고려하여 PWSCC에 의한 축방향 균열 성장량을 예측하면 균열 성장량이 크게 예측될 것을 유추할 수 있다. 이상의 결과를 모두 종합하면 보수용접이 수행된 배관 이종금속 맞대기 용접부의 경우에는 원주방향 균열에 비해 축방향 균열이 더 중요하게 고려되어야 할 것으로 생각된다.

일반적으로 원자력 배관의 경우에는 가동 중에도 다수의 보수용접이 수행되게 된다. 그러나 본 논문에서 고려된 용접 공정 순서의 경우는 가동 전 단계에서 보수용접이 수행된 조건으로 간주할 수 있다. 이에 따라 만약 가동 중 보수용접이 추가적으로 수행된 경우라면 본 논문에서 고려된 용접 공정에 추가적으로 보수용접을 고려해야 하며 이 경우 본 논문에서 제시된 응력분포가 추가적인 보수용접에 의해 변화될 수 있다. 그러나 이러한 절차는 많은 공정을 모사해야 하기에 최근에는 다른 용접 공정은 모두 생략하고 보수용접만을 모사하는 경우도 있다.⁽¹⁴⁾ 이는 가동 중 보수용접을 위한 용접 비드 제거 시 기존 응력은 대부분 없어지

고 보수용접에 의한 응력이 지배적일 것이라는 공학적 가정에 따른 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 원자로 배관 이종금속 맞대기 용접부에서 보수용접부 폭이 용접잔류응력 분포에 미치는 영향을 상세 유한요소해석을 통해 평가하였다. 이를 위해 5가지의 다른 보수용접부 폭을 고려하였다. 뿐만 아니라 SMW와 기계적 하중(수압시험 및 정상운전조건)이 보수용접에 의해 생성된 용접잔류응력의 재분배 거동에 미치는 영향도 평가하였다. 이를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 보수용접부 폭이 $W\sim 3W$ 인 경우에는 그 폭이 배관 내면 응력 분포에 미치는 영향이 미미하였으나 $5W$ 인 경우에는 비교적 큰 영향을 미쳤다.

(2) DMW 중앙에서 두께를 따른 축방향 응력분포의 경우 보수용접에 의해 내면에서 큰 인장 용접잔류응력이 나타났으며 그 값은 보수용접부 폭이 $5W$ 인 경우가 가장 컸으며 $W\sim 3W$ 의 경우에는 그 차이가 미미하였다.

(3) 보수용접으로 생성된 DMW 중앙 내면의 축방향 응력이 SMW에 의해 감소하기는 하지만 여전히 인장상태를 유지하며, 기계적 하중까지 고려하면 $5W$ 의 경우를 제외하고 모두 압축상태로 변하였다.

(4) 보수용접으로 생성된 DMW 중앙 내면의 원주방향 응력은 보수용접부 폭에 관계없이 SMW와 기계적 하중에 의해 비슷한 수준으로 감소하였으나 인장상태를 유지하였다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) EPRI, Materials Reliability Program, 2004, "Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106)," EPRI report.
- (2) Kim, J.S., Lee, S.G., Park, H.B., Jin, T.E. and Kang, S.S., 2009, "Investigation of the Effect of Internal Repair Welding Variables on PWSCC of Dissimilar Welds on Pressurizer Safety/Relief Nozzle," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 58, pp. 270~275.
- (3) Lee, S.G., Jin, T.E., Kang, S.S. and Kwon, D.I., 2009,

- “Residual Stress Analysis for Repair Welding in Dissimilar Metal Weld,” *Journal of KWJS*, Vol. 27, pp. 376~381.
- (4) Dong, P., Hong, J.K. and Bouchard, P.J., 2005, “Analysis of Residual Stresses at Weld Repairs,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, pp. 258~269.
- (5) Elcoate, C.D., Dennis, R.J., Bouchard, P.J. and Smith, M.C., 2005, “Three Dimensional Multi-Pass Repair Weld Simulations,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, pp. 244~257.
- (6) Zhang, J., Song, S. and Dong, P., 2011, “Important Residual Stress Features in Reactor Nozzle Dissimilar Metal Welds,” ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2011-57824.
- (7) Soh, N.H., Oh, G.J., Huh, N.S., Lee, S.H., Park, H.B., Lee, S.G., Kim, J.S. and Kim, Y.J., 2012, “Effects of Finite Element Analysis Parameters on Weld Residual Stress of Dissimilar Metal Weld in Nuclear Reactor Piping Nozzles,” *Trans. of the KPVP*, Vol. 8, pp. 8~18.
- (8) “ABAQUS/Standard User’s Manual,” Version 6.11-1, Dassault Systemes Corp., 2011.
- (9) Kim, J.S., Kim, J.H., Bae, H.Y., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Song, T.K., 2012, “Welding Residual Stress Distributions for Dissimilar Metal Nozzle Butt Welds in Pressurized Water Reactors,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, pp. 137~148.
- (10) Song, T.K., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, S.H., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2009, “Effects of Similar Metal Weld on Residual Stress in Dissimilar Metal Weld According to Safe End Length,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, pp. 664~672.
- (11) Song, T.K., Bae, H.Y., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, “Effect of Preemptive Weld Overlay on Residual Stress Mitigation for Dissimilar Metal Weld of Nuclear Power Plant Pressurizer,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, pp. 873~881.
- (12) Song, T.K., Bae, H.Y., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, “Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, pp. 668~677.
- (13) Brickstad, B. and Josefson, B.L., 1998, “A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 11~25.
- (14) Limpus, C.R., Dijamco, D.G., Bax, R. and Cofie, N.G., 2007, “Effect of Size of Butt Weld Repairs on Weld Overlay Residual Stresses,” ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2007-26636.