

보수용접 모사 방법에 따른 원자로 배관 이종금속 맞대기 용접부 응력 분포[§]

이휘승* · 허남수[†] · 김진수** · 이진호**

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, ** 한국원자력안전기술원 건설원자력규제단

Stress Distribution in the Dissimilar Metal Butt Weld of Nuclear Reactor Piping due to the Simulation Technique for the Repair Welding

Hwee-Seung Lee*, Nam-Su Huh[†], Jin-Su Kim** and Jin-Ho Lee**

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

** Korea Institute of Nuclear Safety

(Received December 28, 2012 ; Revised March 5, 2013 ; Accepted March 5, 2013)

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

초록: 이종금속용접부에 대한 실제 용접 공정 중 용접부에서 결함이 발견되면 이를 제거하고 보수용접이 수행된다. 일반적으로 보수용접을 수행하면 용접부에서 인장 잔류응력이 크게 증가될 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 Alloy 82/182를 사용하여 보수용접이 수행된 이종금속용접부의 일차수 응력부식균열 현상을 평가하기 위해서는 보수용접에 의한 용접부의 응력 변화를 정확하게 평가해야 한다. 본 논문에서는 비선형 유한요소해석을 수행하여 보수용접에 의한 원자로 이종금속 맞대기 용접부의 응력 분포를 평가하였다. 특히 보수용접 공정 모사를 위한 여러 유한요소 해석방법이 이종금속용접부의 응력 분포에 미치는 영향을 평가하였다.

Abstract: During welding, the dissimilar metal butt welds of nuclear piping are typically subjected to repair welding in order to eliminate defects that are found during post-weld inspection. It has been found that the repair weld can significantly increase the tensile residual stress in the weldment, and therefore, accurate estimation of the weld residual stress due to repair weld, especially for dissimilar metal welds using Ni-based alloy 82/182 in nuclear components, is of great importance in order to assess susceptibility to primary water stress corrosion cracking. In the present study, the stress distributions of dissimilar metal butt welds in nuclear reactor piping subjected to repair weld were investigated based on detailed nonlinear finite element analyses. Particular emphasis was placed on the variation of the stress distribution in the dissimilar metal butt weld according to the finite element welding analysis sequence for the repair welding process.

1. 서론

Alloy 82/182 합금을 기반으로 용접이 수행된 원자력발전소 이종금속용접부(Dissimilar Metal Weld, DMW)에서 일차수응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)에 의한 균열 손상⁽¹⁾이 보

고된 이후 전세계 원자력 산업계에서는 이에 의한 손상을 예측하거나 방지하기 위해 많은 연구를 수행한 바 있다. 특히 PWSCC에 의한 균열 발생의 대표적인 원인 가운데 하나가 DMW 및 동종금속용접(Similar Metal Weld, SMW)에 의한 인장 용접잔류응력 이기에 용접과정 중 발생하는 용접잔류응력을 정확하게 예측하기 위한 연구가 다양한 DMW 부위에 대해 수행되고 있다.

원자력기기 용접 공정 중에는 용접 공정 상 결함이 발생할 수 있는데 만약 용접 공정 중 결함이 발견되면 이를 제거하고 국부적으로 보수 용접을

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012.

11. 7.-9., CECO) 발표논문임

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

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 List of materials employed in the present study⁽²⁾

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

Table 2 Hydrostatic test and normal operating conditions

	Hydrostatic test	Normal operating conditions
Pressure (MPa)	21.42	15.51
Temperature (°C)	21.11	286.11

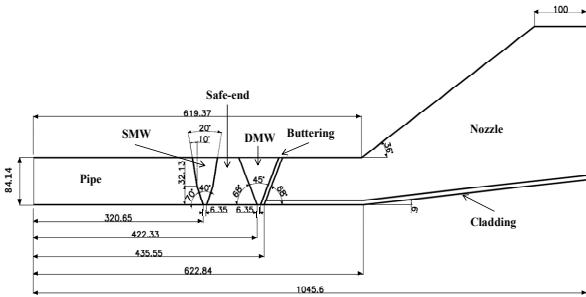


Fig. 1 Geometries of dissimilar metal butt welds considered in the present study (Unit: mm)

수행하게 된다. 따라서 실제 원자력기기는 다양한 용접 이력을 경험하며 이로 인해 용접부의 정확한 잔류응력을 예측하는 것은 어렵게 된다. 특히 보수용접의 경우는 더 높은 인장잔류응력을 유체와 접하는 용접부 내면에 생성시키는 것으로 알려져 있으며 이는 보수용접이 DMW의 PWSCC 민감성을 증대시킴을 의미한다. 이러한 이유로 보수용접에 의한 잔류응력 변화를 예측하기 위한 연구들도 다수 수행된 바 있다.^(3,4)

전술한 바와 같이 보수용접으로 인한 용접잔류응력의 변화는 DMW 건전성 측면에서 매우 중요하기에 수치해석적으로 보수용접에 의한 용접잔류응력을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하며 특히 보수용접 공정을 수치적으로 모사하기 위한 다양한 해석 방법이 적용되고 있다. 일례로 실제 보수용접부의 경우에는 보수 이력이나 보수용접부 형상 등에 대한 엄밀한 정보를 얻기가 힘든 경우가 많아 해석 시 보수적인 결과를 얻을 수 있도록 하기 위해 모든 용접 공정은 생략하고 보수용접부만을 고려하는 경우도 있다.⁽⁵⁾ 이는 보수용접을 수행하면 이전 공정에서 형성된 잔류응력은 보수용접을 위한 이전 용접 비드 제거 시 재분배되고 보수용접에 의한 잔류응력이 지배적일 것이라는

공학적 가정에서 기인한 것이다. 그러나 아직 이와 같은 다양한 보수용접 모사 방법에 따른 응력 분포 특성에 대한 연구는 부족한 실정이며, 보수용접 모사 방법에 따른 응력분포 특성에 대한 연구를 통해 보다 효율적인 보수용접 모사가 가능할 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소의 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부를 대상으로 유한요소해석을 수행하여 이중금속 맞대기 용접부의 초기 용접잔류응력 상태를 예측하였고, 보수용접을 고려하였을 경우 응력 분포의 변화를 평가하였다. 특히 보수용접 공정 모사를 위한 이전 용접 비드 제거 방법이 해석 결과에 미치는 영향을 평가하였으며, 3가지 서로 다른 보수용접 모사 방법을 적용하여 보수용접 모사 방법에 따른 DMW에서의 응력 변화 거동도 평가하였다.

2. 해석 대상

본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소의 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부 중 원자로 입구 노즐(inlet nozzle)을 대상으로 해석을 수행하였으며, 대략적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1은 부위별 재료를 정리하여 나타낸 것이다. 또한 수압 시험과 정상운전 시 배관에 작용하는 온도와 압력조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 유한요소 응력해석

본 논문에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁶⁾를 사용하여 온도/응력 해석을 수행하였으며, 2차원 축대칭 모델을 적용하였다. 해석 시 적용된 요소는 4절점 축대칭 요소(4-node axisymmetric element, DCAX4 for temperature analysis and CAX4 for stress analysis in ABAQUS element library)이다.⁽²⁾ Fig. 2는 해석 시 사용된 유한요소모델을 나타낸 것으로 각 용접 비드의 두께는 실제 용접층의 크기와 유사하

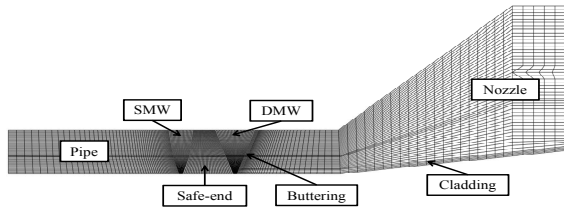


Fig. 2 Finite element meshes employed in the present study

도록 3 mm 정도로 모델링 하였으며, 따라서 DMW와 SMW를 각각 24개의 층으로 모델링 하였다.

먼저 보수용접이 응력 분포에 미치는 영향을 평가하기 위해 보수용접을 고려하지 않은 이중금속 맞대기 용접부의 응력 분포를 평가하였으며 이를 위해 DMW와 SMW 공정을 먼저 모사하고 이어서 Table 2에 주어진 수압 시험과 정상운전 조건을 고려하였다.

DMW와 SMW에 의한 용접잔류응력해석 시에는 기존 연구⁽⁷⁻¹⁰⁾를 통해 정립된 온도 경계조건을 이용한 용접 해석 방법이 적용되었으며, 이때 용융점 이상 온도까지의 온도 의존적 재료물성치^(2,11,12)가 모두 고려되었다.

수압 시험 및 정상운전 조건의 경우에는 배관 내압 적용 시 end-cap 효과를 고려하여 배관 끝단에 등가인장하중을 적용시켰다. 그리고 응력 해석 시에는 Fig. 2에서 노즐 축을 축방향으로 구속하였다.

보수용접은 DMW 내면에서의 보수용접만을 고려하였으며, 보수용접에 해당되는 부위의 요소를 제거시킨 후, 해당 부위에 보수용접부 안쪽 끝단부터 표면까지 신규 비드를 채워 생성시키면서 해석을 수행하였다. 보수용접층의 두께도 기존 용접층과 동일하게 모델링 하였다.

전술한 바와 같이 먼저 보수용접부에 대한 해석을 위해 보수 용접부 비드 제거 방법이 해석 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 실제 보수용접 시에는 결함이 발견된 부위까지 내면부터 순차적으로 이전 용접 비드를 제거하게 된다. 그러나 본 연구에서는 보다 효율적인 공정 모사를 위해 보수용접을 위한 이전 용접 비드를 한번에 모두 제거하는 경우와 실제와 동일하게 표면부터 순차적으로 제거하는 경우에 대한 해석을 모두 수행하여 그 영향을 검토하였다. 두 방법 모두 이전 비드 제거 후 보수용접을 수행할 때에는 동일하게 보수

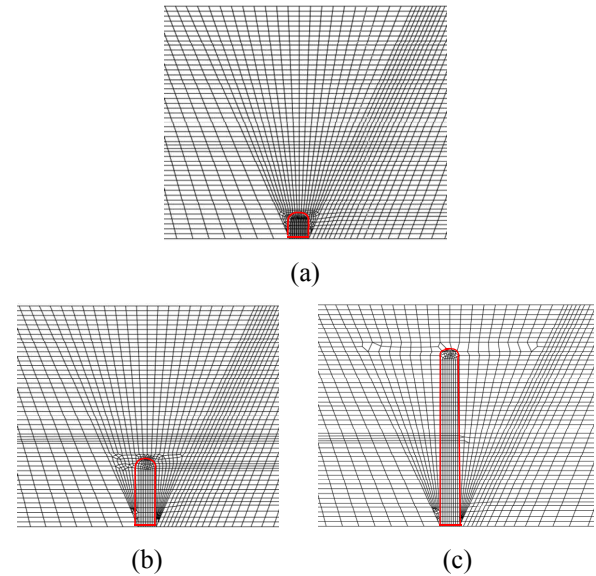


Fig. 3 Depth of repair weld considered in the present study; (a) 10%, (b) 30% and (c) 80%

용접부 내면 끝단부터 표면까지 신규 비드를 순차적으로 채워 생성시키면서 재용접 해석을 수행하였다.

또한 전체 용접 공정 상에서 보수용접 공정 모사 방법에 따른 용접부 응력분포를 평가하기 위해 3가지 보수용접 공정 모사 방법을 적용하였다. 첫 번째 방법(방법론 1)에서는 DMW 용접, 보수용접 그리고 SMW 용접을 실제 공정에 따라 순서대로 모사하였고, 두 번째 방법(방법론 2)에서는 DMW 용접은 고려하지 않고 보수용접과 SMW 용접만을 고려하였다. 이는 DMW 용접 후 보수용접을 위해 DMW의 이전 용접 비드를 제거하면 이전 DMW 용접 공정에서 형성된 잔류응력은 대부분 제거된다는 가정에 입각한 것이다. 마지막 세 번째 방법(방법론 3)에서는 DMW와 SMW 용접을 모두 모사하지 않고 보수용접만을 모사하였다(즉 응력이 없는 상태에서 보수용접만을 모사). 그리고 모든 경우에 대해 보수용접을 포함한 용접 공정 모사가 종료되면 수압 시험 조건과 정상운전 조건에 대한 압력(Table 2 참고)을 작용시켰다.

이상과 같은 보수용접 해석 방법에 미치는 보수용접 깊이의 영향을 고려하기 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 보수용접 깊이로 내면으로부터 배관 두께의 10%, 30% 그리고 80%를 고려하였다. 이때 보수용접부의 폭은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 내면에서의 DMW 폭과 동일하게 가정하였다. 전술한 바와 같이 실제 보수용접부의 정확한 형상을

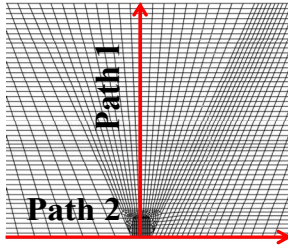


Fig. 4 Stress extraction paths in the DMW

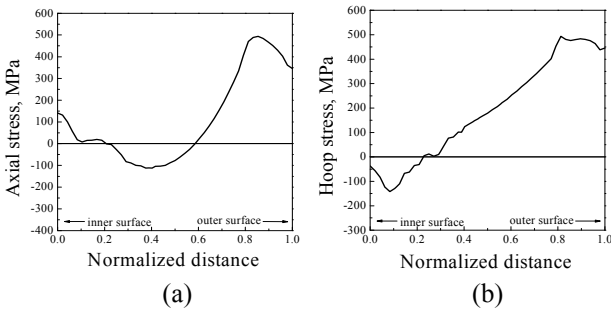


Fig. 5 Stress distributions along the wall thickness without repair welding; (a) axial stress and (b) hoop stress (Path 1)

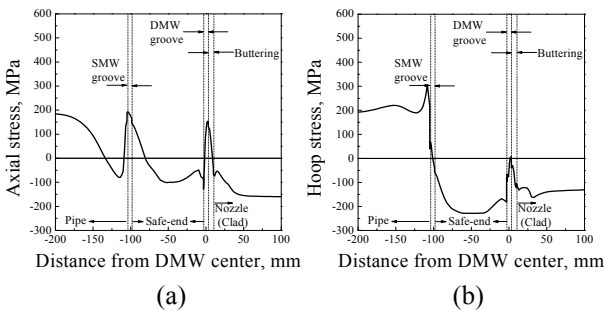


Fig. 6 Stress distributions along the inner surface without repair welding; (a) axial stress and (b) hoop stress (Path 2)

얻기가 어려우며 경우에 따라 형상이 모두 다르다. 본 논문에서는 보수용접 모사 방법에 따른 응력 분포를 평가하는 것이 목적이기에 보수용접부의 폭을 내면에서의 DMW 폭으로 설정하였다.

4. 해석결과

Fig. 4는 유한요소해석 결과로부터 응력 결과를 추출하기 위해 설정한 경로 위치를 제시한 것으로 내면으로부터 배관의 두께 방향으로 DMW 중심(Path 1)과 배관 내면(Path 2)에서 응력 결과를 추출하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 보수용접을 고려하지 않고 DMW, SMW, 수압 시험 그리고 정상운전 하중을 고려한 경우 벽두께 방향과 배관 내면을 따른 응

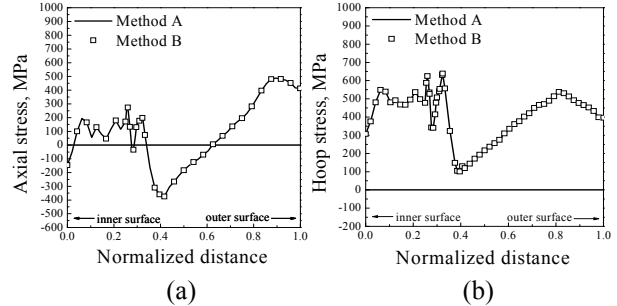


Fig. 7 Stress distributions along the wall thickness depending on bead elimination methods; (a) axial stress and (b) hoop stress

력분포를 나타낸 것이다.⁽¹³⁾ 배관 내면부터 두께방향으로 응력분포는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 축방향 응력의 경우 내면에서 인장응력이 발생하였으나 원주방향 응력의 경우는 내면에서 압축응력이 발생하였다. 그리고 외면으로 갈수록 두 성분 모두 인장응력으로 나타났다. 또한 배관 내면에서의 응력분포는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 축방향 응력과 원주방향 응력 모두 용접부에서의 응력이 용접부 주위의 응력보다 높은 것으로 나타났다.

Fig. 7은 보수용접 깊이가 30%인 경우에 대해 보수용접 시 이전 용접 비드 제거 모사 방법의 영향을 평가한 결과를 나타낸 것으로 DMW 중앙에서 벽두께 방향을 따른 축방향과 원주방향 응력분포를 나타내었다. 그림에서 “Method A”은 용접 비드 제거 시 용접 비드를 한번에 모두 제거한 것을 의미하며, “Method B”는 용접 비드 제거 시 배관 내면에서부터 용접 비드를 순차적으로 제거한 경우를 의미한다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 보수용접 시 용접 비드 제거 방법은 응력 분포 결과에 영향을 미치지 않았다. 따라서 보수용접 공정 모사 시 제거되는 이전 비드는 해석의 효율성을 고려하여 동시에 모두 제거 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 8~Fig. 11은 전체 용접 공정 상에서 보수용접 공정 모사 순서가 용접부 응력 분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 “Method 1”은 전술한 보수용접 모사 “방법론 1”을 의미하며, “Method 2”는 보수용접 모사 “방법론 2” 그리고 “Method 3”은 보수용접 모사 “방법론 3”에 따른 결과를 의미한다. “방법론 1”의 경우는 DMW, 보수용접, SMW 공정 모두를 절차에 따라 모사하였기 때문에 기준값으로 생각할 수 있다.

Fig. 8에 나타난 DMW 중앙부에서 벽두께 방향을 따른 축방향 응력분포의 경우는 3가지 보수용접 모사 방법론이 보수 용접 깊이까지는 유사

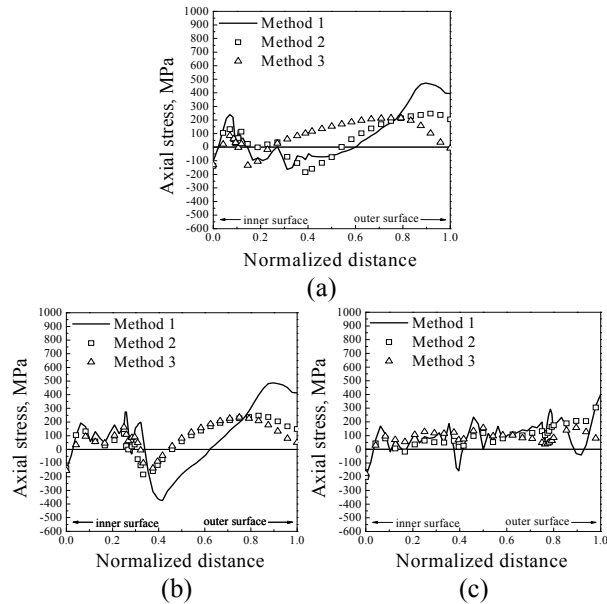


Fig. 8 Axial stress distributions along the wall thickness depending on depth of repair weld; (a) 10%, (b) 30% and (c) 80%

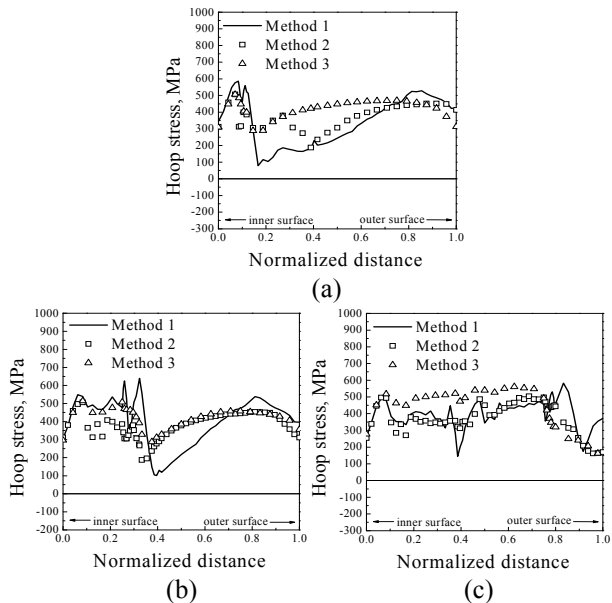


Fig. 9 Hoop stress distributions along the wall thickness depending on depth of repair weld; (a) 10%, (b) 30% and (c) 80%

한 응력 분포를 나타내었다. 그러나 해당 보수 용접 깊이 이후에는 DMW와 SMW를 모사하지 않고 보수용접만을 모사한 경우(“방법론 3”)가 보수적인 결과를 제시하였다. 또한 보수용접 깊이가 깊은 경우에도 “방법론 2”는 기준 “방법론 1”과 전체 영역에서 유사한 응력 분포를 제시하였다. 이는 DMW 용접 후 보수용접을 수행하면 이전 DMW에 의해 발생한 응력이 보수용접을 위한 용

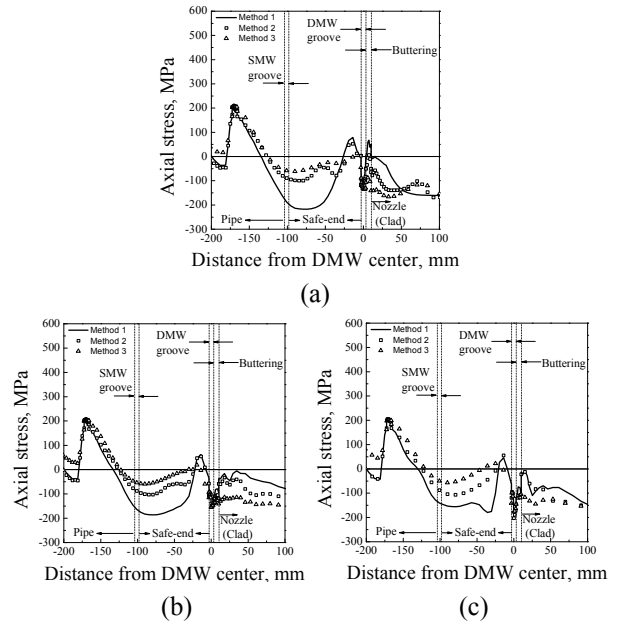


Fig. 10 Axial stress distributions along inner surface depending on depth of repair weld; (a) 10%, (b) 30% and (c) 80%

접 비드 제거 시 모두 소산되기 때문에 DMW 공정 모사 여부와 관계없이 응력 결과가 유사한 것으로 판단된다. 그러나 “방법론 3”은 모두 다른 방법에 비해 보수적인 결과를 나타내었다. 따라서 원자로 배관 맞대기 용접부의 보수용접을 모사하는 경우 DMW는 모사하지 않고 보수용접과 SMW만 모사하여도 비교적 정확한 응력 분포를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 만약 DMW와 SMW를 모두 모사하지 않고 보수용접만 모사하면(정확한 보수 용접 이력이 없는 경우 등) 보수적인 응력 분포를 얻을 수 있으며 따라서 PWSCC로 인한 균열 성장 거동도 보수적으로 평가될 것으로 생각된다. 또한 보수용접 깊이가 증가하면 내면 근처에서 인장 응력이 발생하는 영역이 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 보수용접에 의해 축방향 용접잔류응력의 경우는 인장 거동을 보이게 된다. 그러나 Fig. 8의 경우는 압축 거동으로 나타났는데 이는 본 논문의 결과는 전술한 바와 같이 수압 시험과 정상운전 하중을 같이 고려했기 때문으로, 보수용접에 의해 생성된 인장 용접잔류응력이 기계적 압력에 의해 재분배 되어 최종 DMW 내면에서의 응력 상태는 인장이 아닌 압축 응력으로 나타났다.

Fig. 9는 보수용접 깊이에 따른 DMW 중앙에서 두께방향 원주응력 분포를 나타낸 것이다. 원주방향 응력성분의 경우도 DMW를 모사하지 않은 “방법론 2”는 전체 용접 공정을 모사한 “방법론

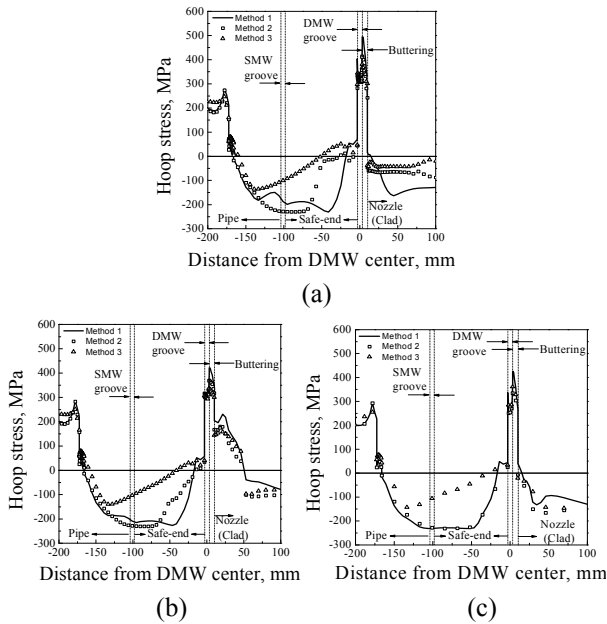


Fig. 11 Hoop stress distributions along inner surface depending on depth of repair weld; (a) 10%, (b) 30% and (c) 80%

1"과 유사한 결과를 나타내었으나 보수용접만을 모사한 “방법론 3”은 전반적으로 보수적인 결과를 나타내었다. 따라서 만약 보수용접부에 대한 정확한 용접 이력이 없는 경우 “방법론 3”을 이용하면 보수적인 평가가 가능할 것으로 생각된다. 그러나 “방법론 3”의 경우는 해당 보수용접 깊이까지 거의 일정한 응력값을 나타내어 보수적이긴 하지만 상세한 응력 분포를 모사하기는 어려운 것으로 생각된다. 또한 축방향 응력의 경우와는 반대로 Fig. 5(b)의 보수용접이 수행되지 않은 경우의 결과와 비교하면 보수용접에 의해 DMW 내면에서의 원주 방향 응력은 압축에서 인장으로 크게 증가하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 3가지 보수용접 모사 방법론에 따른 배관 내면에서의 축방향과 원주방향 응력 분포를 나타낸 것이다. 배관 내면에서의 축방향 응력의 경우 앞의 결과와 같이 DMW 근처에서는 3가지 방법론이 유사한 결과를 나타내었으나 전체적으로 “방법론 3”은 개별 용접 공정에 의한 내면 응력 분포 변화를 모사할 수 없기에 결과가 가장 크게 다른 것으로 나타났다. 그러나 “방법론 2”는 내면에서의 응력 분포도 전체 공정을 모두 모사한 “방법론 1”과 유사한 것으로 나타났다. 그리고 “방법론 1”과 “방법론 2”의 차이는 보수용접 깊이가 증가할수록 감소하였다. 이와 같은 경향은 Fig. 11에 나타낸 내면을 따른 원주방향 응력의 경우도 유사하였다.

5. 결론

본 논문에서는 보수용접 모사 방법에 따른 원자로 배관 이중금속 맞대기 용접부의 응력 분포 특성을 평가하였다. 특히 보수용접 공정을 위한 이진 비드 제거 방법, 용접 공정 상의 보수용접 공정 모사 기법 등이 DMW에서의 응력 분포에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 보수용접 깊이에 따른 영향을 검토하기 위해 두께의 10%, 30% 그리고 80%의 3가지 경우를 보수용접 깊이로 고려하였다. 본 논문에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 보수용접부 비드를 한번에 모두 제거하는 경우와 배관 내면부터 순차적으로 제거하는 경우의 응력 분포가 일치하였다.
- (2) 따라서 효율적인 해석을 위해서는 보수용접부 비드를 한번에 모두 제거해도 무방한 것으로 나타났다.
- (3) 보수용접 만을 고려한 “방법론 3”이 나머지 방법론에 비해 보수적인 결과를 나타내었다. 따라서 용접 이력이 없는 경우 보수적 평가를 위해 적용될 수 있을 것으로 생각된다.
- (4) “방법론 1”과 “방법론 2”의 응력분포 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서 DMW 공정은 모사하지 않아도 비교적 유사한 응력 분포를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) EPRI, Materials Reliability Program, 2004, “Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106),” EPRI report.
- (2) 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.
- (3) Kim, J.S., Lee, S.G., Park, H.B., Jin, T.E. and Kang, S.S., 2009, “Investigation on 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.
- (4) Lee, S.G., Jin, T.E., Kang, S.S., Kwon, D.I., 2009, “Residual Stress Analysis for Repair Welding in Dissimilar Metal Weld,” *Journal of KWJS*, Vol. 27, pp. 376~381
- (5) 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 PVP*

- Conference, PVP2007-26636.
- (6) "ABAQUS/Standard User's Manual," ABAQUS Version 6.11-1, Dassault Systemes Corp.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Lee, H.S., Huh, N.S., Lee, S.G., Park, H.B. and Lee, S.H. 2013, "Crack Growth Analysis due to PWSCC in Dissimilar Metal Butt Weld for Reactor Piping Considering Hydrostatic and Normal Operating Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, pp. 47~54.