

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.97

이종금속 용접부의 일차수응력부식균열 방지를 위한 예방정비 용접 효과 분석[§]

이승건*[†] · 오창균* · 박흥배* · 진태은*

* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

Analysis of Overlay Weld Effect on Preventing PWSCC in Dissimilar Metal Weld

Seung-Gun Lee*[†], Chang-Kyun Oh*, Heung-Bae Park* and Tae-Eun Jin*

* Power Engineering Research Institute, KOPEC(Korea Power Engineering Company inc.)

(Received August 17, 2009 ; Revised November 12, 2009 ; Accepted November 16, 2009)

Key Words: Dissimilar Metal Weld(이종금속 용접), Residual Stress(잔류응력), PWSCC(일차수응력부식균열), Overlay Weld(오버레이 용접), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 니켈합금 용접재료인 Alloy 82/182 용접부에서의 일차수응력부식균열(PWSCC, Primary Water Stress Corrosion Cracking)은 원자력발전소내 주요 기기의 건전성을 저해시킬 수 있는 요인으로, 용접시 발생하는 인장 잔류응력에 의해 발생할 수 있다. 해외 원자력발전소의 경우 가압기 노즐 등에 적용된 Alloy 82/182 이종금속 용접부에서 PWSCC에 의한 균열이 여러 차례 보고되고 있으며, 이를 예방하기 위한 방법으로 인장 잔류응력을 줄여줄 수 있는 오버레이 용접을 수행하고 있다. 본 논문에서는 PWSCC를 예방하기 위한 목적으로 수행되는 오버레이 용접에 대해 설명하고 오버레이 용접의 효과를 유한요소해석을 통해 확인하였다.

Abstract: PWSCC(Primary Stress Corrosion Cracking) in Alloy 82/182 butt welds is the problem affecting safety and integrity of nuclear power plant. PWSCC can be occurred in the area that is at high magnitude of tensile residual stress, such as Alloy 82/182 dissimilar metal welds in PZR(pressurizer) nozzles. There have been a number of incidents recently at the dissimilar metal welds in overseas nuclear power plants. Overlay weld is the one of the effective methods to decrease tensile residual stress of inside surface, which will result in preventing PWSCC. In this paper, overlay weld conditions on the purpose of preventing PWSCC was explained and the benefit of the overlay weld was confirmed performing finite element analysis.

1. 서 론

해외 원자력발전소에서는 Alloy 82/182가 사용된 이종금속 용접부에서 PWSCC에 의한 균열이 발생하는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾ 2000년 10월 V.C. Summer 원전의 가동중검사시 원자로압력용기 출구노즐에서 원주방향균열이 발견된 이후, 2003년 9월 Tsuruga 2호기의 가압기 방출노즐 이종금속 용접부에서 PWSCC에 의한 누설이 발견되었고, 2005년 봄 D.C. Cook 1호기 및 2005년

가을 Millstone 3호기의 가압기 안전노즐에서도 균열이 발견되었다. 또한 2006년 가을 Wolf Creek 원전의 가압기 밀림노즐 및 안전/방출노즐 이종금속 용접부에서 다수의 원주방향 균열이 발견되었다. 이는 보수용접 등에 의해 발생한 인장 잔류응력과 PWSCC에 민감한 니켈합금 재료가 사용되었기 때문인 것으로 알려졌으며, 이종금속 용접부에 대한 구조적 건전성 측면에서의 문제가 제기되었다.

이에 따라 미국 원자력 산업계에서는 ASME Code Case N-504-3⁽²⁾을 통해 제시된 오버레이 용접을 Fig. 1과 같이 PWSCC에 대한 예방 차원에서 도입하여 기기의 구조적 건전성을 유지하는데 활용하고 있다. 오버레이 용접은 1980년대부터 미국 원전에서 적용되어온 방법으로 응력부식균열에 대한 저

§ 이 논문은 2009년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, gun@kopec.co.kr

항성이 높은 용접재료를 이용하여 응력부식균열에 민감한 부위의 표면을 덮어주는 용접방법이다. 오버레이 용접을 수행하게 되면 구조적 강성을 증가시키고 용접부 내면의 잔류응력 상태를 인장에서 압축상태로 변경시켜 응력부식균열에 대한 저항성을 향상시킬 수 있으며, 용접부 영역의 가동중검사 특성을 증대시키는 등의 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 일차수응력부식균열 예방을 위해 적용하고 있는 오버레이 용접에 대한 유효성을 설명하기 위해 해외 기술기준에 제시된 설계요건을 검토하였고, 설계 요건에 따라 유한요소 해석을 수행하여 오버레이 용접이 잔류응력에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 오버레이 용접 설계요건

오버레이 용접의 크기(두께, 길이)는 Code Case N-504-3 및 N-740-1⁽³⁾에 제시된 요건과 ASME Code, Section XI⁽⁴⁾의 결함평가 절차 및 허용기준 (IWB-3640 및 Appendix C)을 적용함으로써 결정된다. 이때 초기 가상 균열은 원주방향으로 360°, 두께방향으로 벽을 관통하는 원주방향 균열이며 배관 또는 노즐에 존재한다고 가정한다. 75%까지 균열깊이를 허용하는 ASME Code, Section XI 요건을 반영하여 오버레이 용접 두께를 결정한다. 노즐 하중이 크지 않을 경우 오버레이 용접의 두께(t_{SWOL})를 다음의 수식에 의해 결정한다.

$$CrackDepth / (t_{origipe} + t_{SWOL}) = 0.75 \quad (1)$$

이때 균열 깊이가 오버레이 용접 전 배관의 벽 두께($t_{origipe}$)와 동일하다고 가정함으로써 오버레이 용접 두께를 다음과 같이 결정한다.

$$t_{origipe} / (t_{origipe} + t_{SWOL}) = 0.75 \quad (2)$$

$$t_{SWOL} = t_{origipe} / 3 \quad (3)$$

상기 식들은 오버레이 용접의 최소요구두께를 결정하는데 사용되며, 실제 오버레이 용접의 두께는 발전소별 하중조건에 따라 더 커질 수 있으나, 최소요구두께 보다 작을 수는 없다. 오버레이 용접 길이는 발견된 균열을 기점으로 양쪽 방향으로 충분한 길이를 갖도록 적용한다.

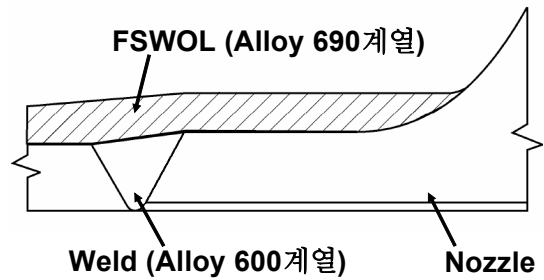


Fig. 1 Overlay weld configuration

이는 오버레이 용접부와 인접 배관 및 노즐 사이에 하중이 적절하게 전달되도록 하기 위해서이다. 축대칭 하중을 받는 배관에서의 국부적인 하중은 작용지점으로부터 축방향으로 $0.75\sqrt{Rt}$ 떨어진 위치에서는 영향이 거의 없는 것으로 알려져 있다(여기서 R 및 t는 배관의 외반경 및 공칭 벽두께를 의미한다). 그러므로 발견된 균열을 기점으로 양쪽방향으로 $0.75\sqrt{Rt}$ 길이만큼 오버레이 용접을 적용한다면 균열에 의해 국부적으로 증가된 응력을 포괄할 것이다. 따라서 오버레이 용접 길이는 균열에 민감한 재료의 양끝으로 $0.75\sqrt{Rt}$ 이상이어야 하며, 결과적으로 전체 오버레이 용접 길이는 $1.5\sqrt{Rt}$ 와 균열에 민감한 재료의 외면 길이를 합한 길이가 된다. 여기서 $0.75\sqrt{Rt}$ 는 Code Case에서 권고하고 있는 사항이며, 해당 오버레이 용접부에 대한 응력해석을 통해 적절한 하중전달 및 응력감소를 입증한다면 보다 짧은 오버레이 길이의 적용도 가능하다고 제시하고 있다.

3. 용접 잔류응력 해석

3.1 해석모델 및 해석절차

Fig. 2는 오버레이 용접 잔류응력해석 대상인 국내 가압경수로형 원전 가압기의 6인치 안전/방출 노즐 형상을 나타낸 것이며, Fig. 4는 잔류응력해석을 위해 사용된 유한요소 모델로 동중 용접부와 이중 용접부 위에 오버레이 용접부를 덧씌운 상태이다. 오버레이 용접부는 총 3개 층으로 구성되어 있고 각각의 층은 9개의 lumped 패스로 구성되어 있다. 유한요소 모델은 축대칭 8절점 요소를 사용하였고 총 9,853개의 절점과 3,170개의 요소로 구성되어 있다. 오버레이 용접부는 Alloy 52M, 노즐은 SA508 Gr.3, Cl.1, 버터링-안전단의 이중금속 용접부는 Alloy 82/182, 안

전단은 SA182 F316, 안전단-배관의 동종금속 용접부는 ER316L, 배관은 SA376 TP316, 오버레이 용접부는 Alloy 52M 재질이며, 이들 재료물성치는 Fig. 3과 같이 ASME Code, Sec. II, Part D⁽⁵⁾ 및 재료 공급자가 제공한 값들을 사용하였고 프와송 비는 온도에 무관하게 일정한 값들을 갖도록 설정하였다(F316L, TP316, Alloy 82/182, Alloy 52M 모두 0.27을, SA508 Gr.3, Cl.1은 0.29 사용). 참고로 Alloy 52M의 경우 정확한 물성값을 확보할 수 없어 Alloy 82/182와 동일한 값을 사용하였다. 용접 잔류응력 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS⁽⁶⁾를 사용하였고 용접 열원에 의한 가열 및 냉각을 포함하는 열해석을 수행한 후 온도분포 결과를 이용하여 응력을 구하는 열탄소성 해석을 수행하였다. 이때 용접 비드가 순차적으로 부착되는 현상을 모사하기 위하여 ABAQUS의 Model Change 기법을 적용하였고 용접금속이 부착되는 부위를 제외한 나머지 부위는 자연대류가 일어나는 것으로 가정하였다. 보수적인 결과를 얻기 위하여 Isotropic hardening 조건을 적용하였고 다층 용접 과정시 발생하는 응력 풀림(annealing) 효과도 고려하였다. 용접 잔류응력 도출을 위해 먼저 이종금속 용접 및 동종금속 용접 해석을 수행하여 초기 잔류응력을 결정하였고, 그 다음 오버레이 용접을 수행하였다. 오버레이 용접은 Fig. 4의 오버레이 용접부에 명기한 번호순서대로 배관에서 노즐 방향으로 용접 비드가 순차적으로 부착되도록 설정하였다.

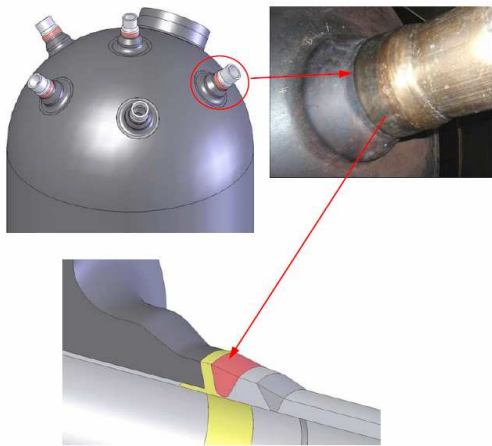
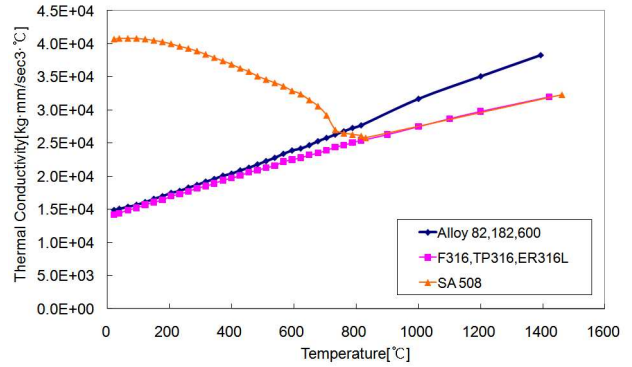
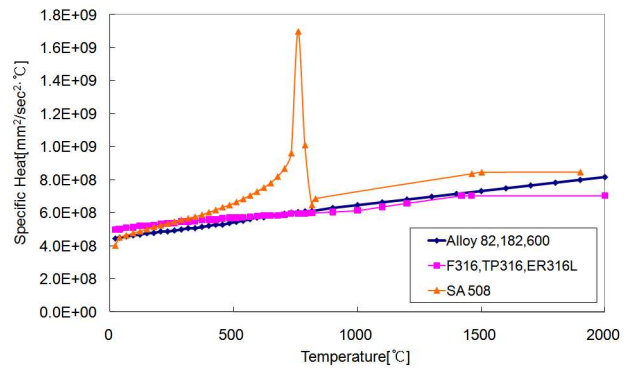


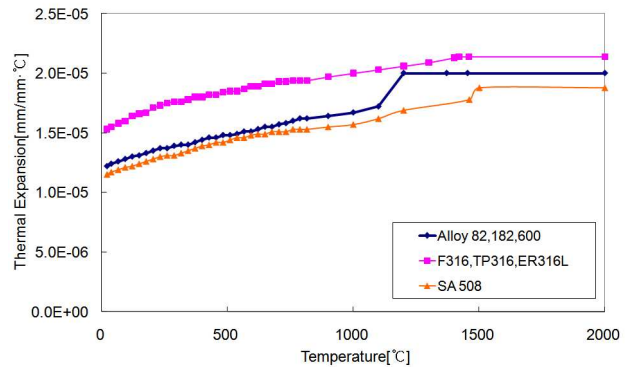
Fig. 2 Configuration for PZR Safety/Relief nozzle



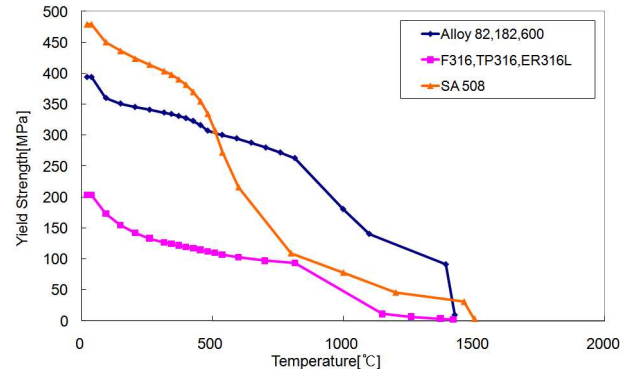
(a) Thermal conductivity



(b) Specific heat



(c) Coefficient of thermal expansion



(d) Yield strength

Fig. 3 Typical thermal and mechanical material properties with temperature

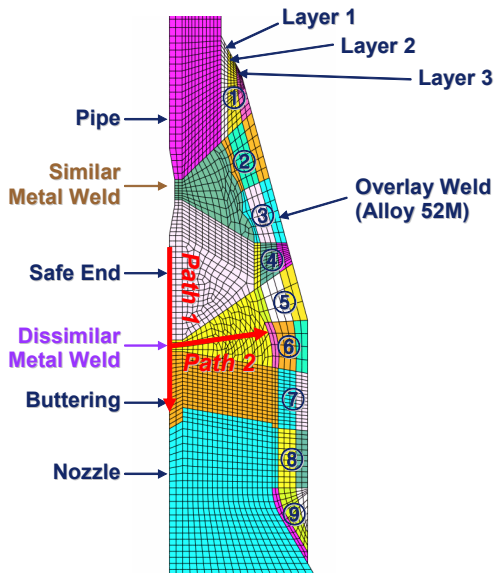


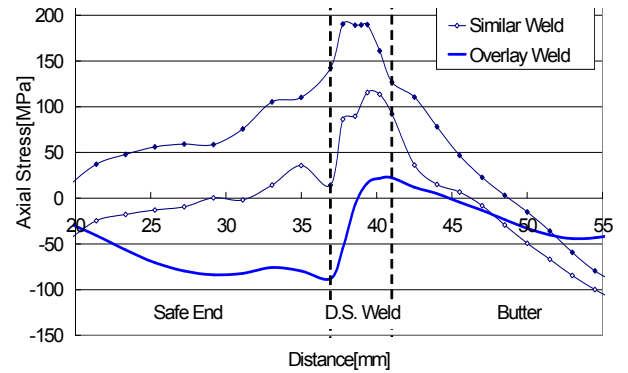
Fig. 4 FEM model for overlay weld

3.2 잔류응력 해석 결과

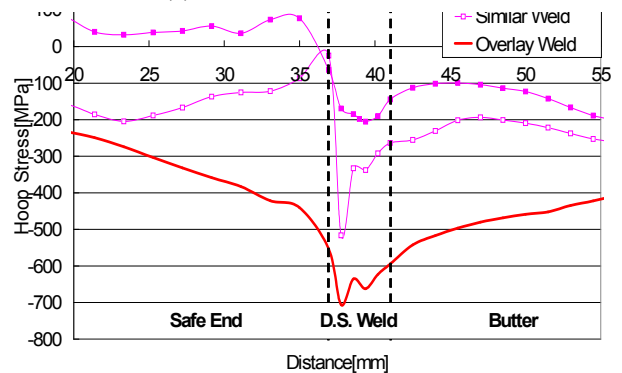
Fig. 5는 오버레이 용접 후 노즐 내면을 따르는 Path1에서의 잔류응력 분포 결과를 제시한 것이고, Fig. 6은 이중금속 용접부 중심선을 따르는 Path 2에서의 잔류응력 분포 결과를 제시한 것이다. Fig. 5에서 보듯이 이중금속 용접부 내면 Path1에서의 축방향 잔류응력은 이중금속 용접 후 최대 189MPa의 응력이 형성되었고, 동종금속 용접을 수행한 후에는 115MPa로 감소하였고, 오버레이 용접 후에는 21MPa로 감소하였다. 원주방향 응력의 경우에도 축방향 응력과 마찬가지로 동종금속 및 오버레이 용접을 수행함으로써 기존의 잔류응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

동종금속 용접을 수행하게 되면 용접부 수축에 따라 이중금속 용접부에 굽힘하중이 발생하여 내면에는 압축이, 외면에는 인장이 발생하여 잔류응력이 감소하게 되며, 배관 외면에 오버레이 용접을 수행하게 되면 오버레이 용접부가 팽창했다 수축되어 배관 내면에는 압축응력이 형성되어 기존의 잔류응력을 감소시킨다.

Fig. 6에서 보듯이 이중금속 용접부 중심선을 따르는 Path2에서의 축방향 잔류응력은 오버레이 용접을 수행함으로써 오버레이 용접 전보다 잔류응력이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 원주방향 응력의 경우에도 축방향 응력과 유사하게 오버레이 용접을 통해 감소하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

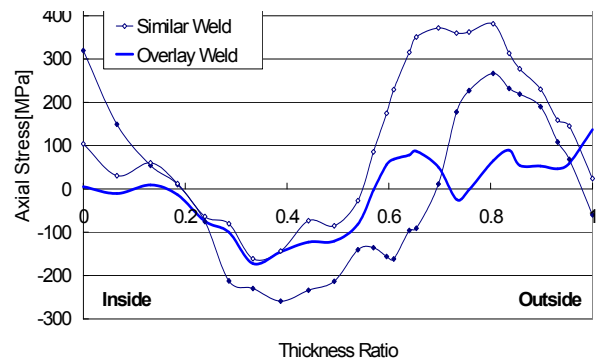


(a) Axial Residual Stress

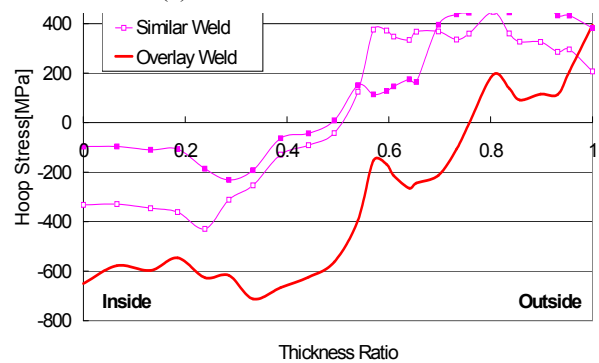


(b) Hoop Residual stress

Fig. 5 Residual stress distribution along Path1

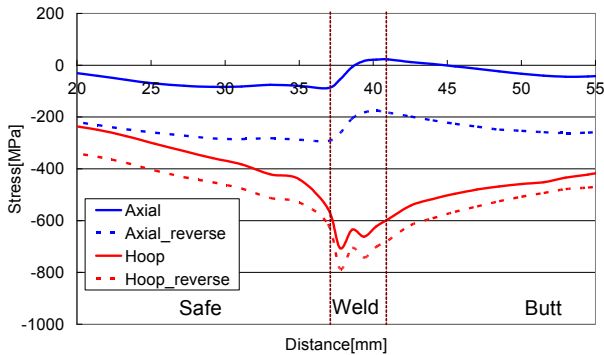


(a) Axial Residual stress

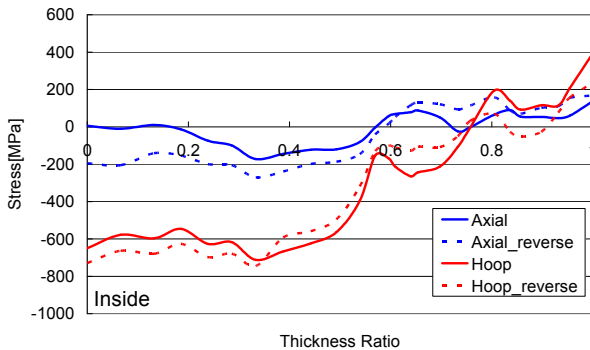


(b) Hoop Residual stress

Fig. 6 Residual stress distribution along Path2



(a) Residual stress distribution along Path1



(b) Residual stress distribution along Path2

Fig. 7 The effect of overlay welding direction on residual stress

3.2 오버레이 용접 방향의 영향

오버레이 용접시 용접 방향에 따른 영향을 확인하기 위하여 용접 방향을 변화시키면서 잔류응력 해석을 수행하였다. 용접 방향은 ① 배관에서 노즐 방향으로의 용접과 ② 노즐에서 배관 방향으로의 용접의 역순서(reverse)로 가정하였다. Fig. 7은 이종 용접부 내면(Path1) 및 두께(Path2) 방향으로의 잔류응력 분포 결과를 제시한 것으로 노즐에서 배관 방향으로 용접하는 것이 축방향 및 원주방향 잔류응력 모두 큰 폭으로 저하되므로 PWSCC 방지 측면에서는 노즐에서 배관 방향으로 용접하는 것이 더 유리한 것으로 도출되었다.

4. 결론

본 논문에서는 Alloy 82/182가 사용된 이종금속 용접부에서의 PWSCC 예방을 위해 적용하고 있는 오버레이 용접에 대한 유효성을 확인하기 위하여 6인치 가압기 안전/방출 노즐을 대상으로

유한요소해석을 수행하였다. 평가결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 오버레이 용접 해석을 위해 ASME Code Case N-740-1 등의 오버레이 용접 관련 해외 기술기준을 검토하여, 오버레이 용접 두께($t/3$) 및 길이($1.5\sqrt{Rt}$ + 민감 재료의 외면 길이)를 도출하였다.

(2) 오버레이 용접 후 이종금속 용접부 내면(Path1) 및 중심선(Path2)에서의 축방향 잔류응력은 오버레이 용접전보다 크게 감소하였다. 또한 원주방향 응력도 축방향 응력과 마찬가지로 오버레이 용접을 수행함으로써 크게 감소하였다.

(3) 오버레이 용접 방향에 따른 잔류응력 저하 정도를 검토한 결과 노즐에서 배관 방향으로 용접하는 것이 축방향 및 원주방향 잔류응력 모두 감소되는 정도가 크므로 PWSCC 방지 측면에서는 노즐에서 배관 방향으로 용접하는 것이 더 유리한 것으로 도출되었다.

(4) 본 해석은 실제 용접조건에 따라 수행되지 않아 도출된 결과와 실제 잔류응력 간에 차이가 있을 수 있으나, 본 해석결과를 통해 오버레이 용접이 기존 잔류응력을 감소시키므로 이종금속 용접부 내면에서의 PWSCC 발생 가능성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) EPRI, 2005, "Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs(MRP-169)."
- (2) ASME Code Case N-504-3, "Alternative Rules for Repair of Classes 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping, Section XI, Division 1."
- (3) ASME Code Case N-740-1, "Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2, and 3 items, Section XI, Division 1."
- (4) ASME Code, Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," 2007 Edition.
- (5) ASME Code, Section II, "Materials," Part D-Properties, 2001 Edition.
- (6) SIMULIA, 2008, ABAQUS, Version 6.8.