

Overlay 용접을 통한 원전 이종 금속 용접부 잔류응력 완화효과에 대한 연구

A study on the residual stress relieving for dissimilar metal weld under weld overlay

송태광*, 배홍열*, 김윤재*, 이경수**, 박치용**

* 고려대학교

** 한국전력연구원

ABSTRACT In nuclear power plants, residual stress of dissimilar metal weld propagates cracks in the weld metal which is susceptible to stress corrosion cracking. Overlay welding is a process widely used to mitigate residual stress replacing inside tensile stress by compressing stress. The purpose of this paper is to predict the effect of weld overlay by finite element analysis.

1. 서 론

원전 노즐 이종 금속 용접부(Dissimilar Metal Weld)에 사용되는 Inconel 600계열 용접 재료는 응력 부식 균열(Stress Corrosion Cracking)에 민감하며 특히 용접 기인 잔류응력(weld induced residual stress) 및 사용 중 하중(in-service load)에 의한 균열 발생 위험이 크다.⁽¹⁾ 최근 발생한 V.C Summer 원전 이종 금속 용접부 균열 역시 응력 부식 균열에 의한 것이다. 응력 부식 균열을 완화시키는 방법으로는 기계적 응력 완화(Mechanical Stress Improvement), Overlay 용접 및 응력 부식 균열에 둔감한 새로운 재료의 사용이 있다.^(2, 3) 이 중 기계적 응력 완화법은 균열 길이가 배관 두께의 30%이상일 때 적용하기 힘든 단점이 있으며 용접 재료 변경은 기존 배관을 교체해야 하는 경제적인 문제가 있다. Overlay 용접은 배관 내면의 인장 잔류 응력을 압축 잔류 응력으로 낮춰주는 효과가 있는 것으로 알려져 있으며 현재 널리 쓰이고 있다. 원전 기기 신뢰성 향상을 위해서 overlay 용접의 영향을 정확히 예측하는 것은 중요하며, 따라서 본 논문에서는 고리 3 호기 6 안전·방출 노즐을 대상으로 이종 금속 용접부에 발생하는 잔류응력을 예측하고 overlay 용접을 영향을 파악하였다.

2. 해석 대상 및 용접 변수

Fig. 1은 6" 안전 방출 노즐의 구성 및 재료, 치수 등을 나타낸다. Overlay 용접을 제외한 나

머지는 실제 치수 및 재료를 적용했으며 overlay 용접은 문헌 및 설계 코드를 참조하여 치수를 설정하였다.^(1, 2) Overlay 용접 두께 조건은 파이프 모재에 두께 방향 관통균열이 존재한다고 가정할 때 ASME Sec.XI을 만족하도록 설정하였다. ASME Sec. XI에서는 배관의 건전성을 위해 배관 두께의 75% 이상인 균열이 존재해서는 안 된다고 명시되어 있으며, Eq. 1과 같다. 이때, overlay 용접 전 최대 균열 두께는 모재 배관 두께로 설정할 수 있으며(Eq. 2) 따라서 설계 코드를 만족하기 위한 overlay 용접 두께는 모재 배관 두께의 1/3이상이어야 한다. (Eq. 3) 본 연구에서는 배관의 1/2 두께로 설정하였다.

$$crack\ depth / (t_{orig} + t_{WOL}) \leq 0.75 \quad (1)$$

$$t_{orig} / (t_{orig} + t_{WOL}) \leq 0.75 \quad (2)$$

$$t_{WOL} \geq t_{orig} / 3 \quad (3)$$

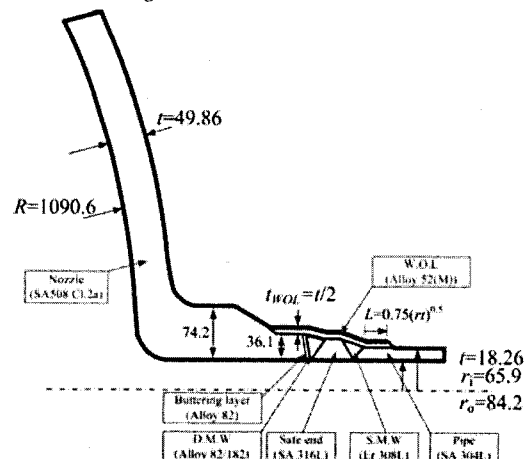


Fig. 1 Schematic illustration of a safety & relief nozzle. Each components and corresponding material is noted.

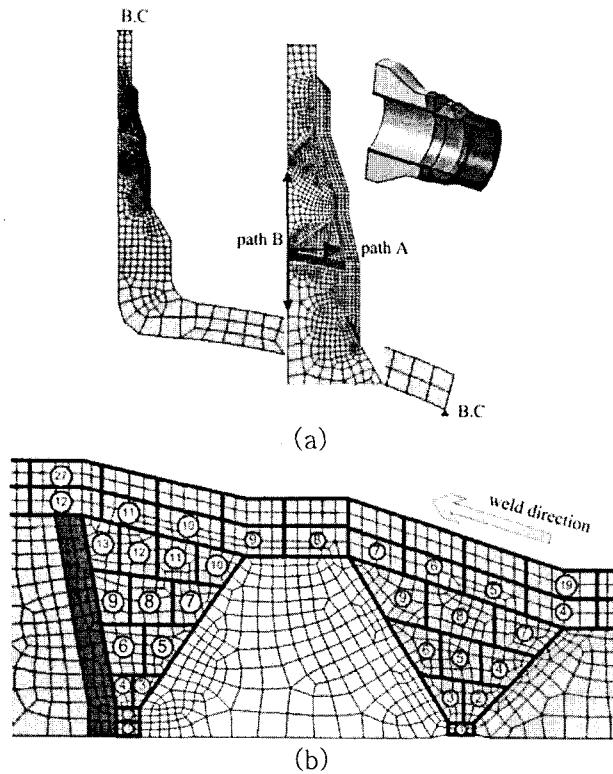
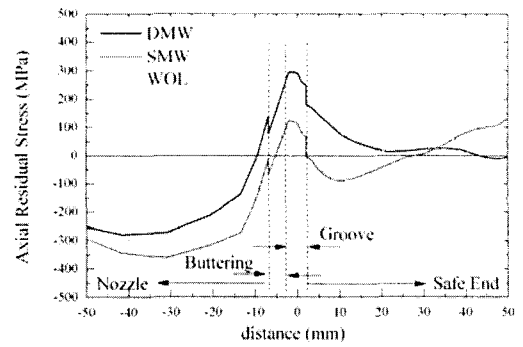


Fig. 2 F.E mesh of Safety & Relief nozzle. (a) Boundary condition and stress index path are noted. (b) A welding sequence for D.M.W, S.M.W and WOL. Number in circle indicates welding sequence.

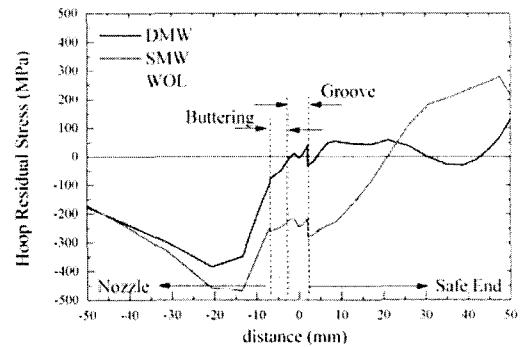
Overlay용접의 축 방향 길이는 용접부에 발생하는 결함에 작용하는 국부 응력 집중이 최소화 될 수 있도록 설정하여야 한다. 배관의 경우, 하중 지점에서 $0.75\sqrt{rt_{orig}}$ 거리만큼 떨어지면 응력 집중 영향이 사라지므로 용접부 toe로부터 양쪽으로 같은 거리를 overlay 용접 길이로 설정할 수 있다. 본 연구에서는 overlay용접 길이를 동접 용접 배관 용접 끝단으로부터 $0.75\sqrt{rt_{orig}}$ 및 노즐까지로 설정하였다. (Fig. 1)^(4, 5, 6)

3. 유한요소 해석

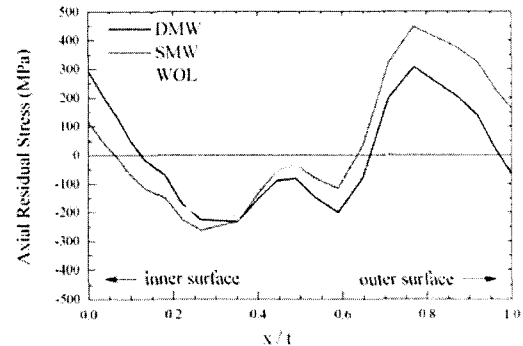
안전·방출 노즐 이중 금속 용접부 잔류응력 예측을 위한 유한요소 해석에서는 ABAQUS를 사용하였다. 용접 과정 모사는 lumped pass 법을 사용하여 노즐/안전단 사이의 이중 금속 용접은 13pass, 안전단/파이프 사이의 동종 금속 용접은 9pass, overlay 용접은 30pass를 적용하였다.⁽⁸⁾ Overlay 용접은 파이프에서 안전단 방향으로 설정하였다.



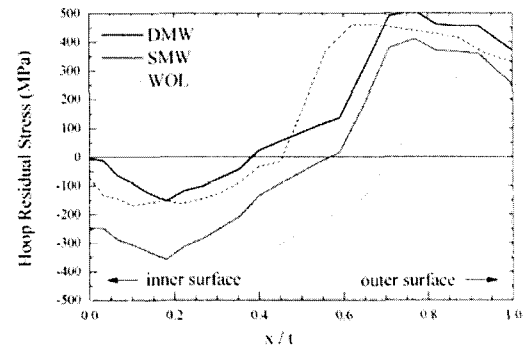
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Axial and hoop residual stress distribution along the path A and path B for each welding procedure. Refer Fig. 2 for path.

Fig. 3은 각 용접이 끝난 직후 이중 금속 용접부 노즐 내면 및 두께 방향으로의 잔류응력 분포 결과를 나타낸다.

노즐 내면 잔류응력의 경우, Overlay 용접 전에는 축 방향 인장 잔류 응력 및 원주 방향 압축 응력이 존재한다. 그러나 overlay 용접을 통해 잔류 응력은 압축 방향으로 줄어들며 축 방향으로는 50MPa 정도의 낮은 압축응력이, 원주 방향으로는 400MPa 정도의 압축응력이 발생하게 된다. (7, 9)

두께 방향 잔류 응력 분포 역시 Overlay 용접을 통해 전체적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 이중 금속 용접 배관을 대상으로 용접 기인 잔류응력 및 overlay 용접이 잔류응력에 미치는 효과를 예측하기 위한 유한요소 해석을 수행하였다. 잔류응력 해석은 열/탄소성 해석을 통해 수행하였으며 이중 금속 용접부 및 동축 금속 용접부 용접 변수는 WPS를 바탕으로 설정하였으며 overlay용접의 두께 및 길이 조건은 코드를 통해 설정하였다. 용접부 잔류응력 해석 및 overlay 용접이 잔류응력에 미치는 영향에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

1) Overlay용접을 수행하기 전 노즐 내면 이중 금속 용접부에는 축 방향 인장 잔류응력 및 원주 방향 압축 잔류응력이 발생하며 따라서 응력 부식 균열로 인한 내면 원주방향 표면균열이 발생할 위험이 크다.

2) Overlay 용접을 통해 이중 금속 용접부에서의 축 방향 잔류응력은 100~200MPa정도 낮아지며 이로 인해 배관의 건전성이 향상될 수 있다.

3) Overlay용접은 용접 방향 및 용접 두께, 길이 등에 의해 잔류응력에 미치는 영향이 달라질 수 있으므로 향후 변수 해석을 통해 잔류응력을 완화시키는 최적 조건을 찾을 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. Material Reliability Program: Technical Basis for Preemptive weld overlays for Alloy 82/182 butt welds in PWRs (MRP-169), 2007
2. Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair of Class 1, 2,

- and 3 Items? ASME Code Case N-740, Section 11
3. Lee, S.H., Kim, J.S., Jin, T.E : 기계적 응력이완 방법에 의한 원전 기기 용접부의 잔류응력 재분포, KWS, Vol. 22-2, 2004
4. Timoshenko, S. : Advanced Theory and problems, Strength of Materials, 1956, Part 2
5. Fujimori, H., Hayashi, E. : Guideline of weld overlay repair method for primary piping of Japanese boiling water reactors, Proc. ASME-PVP2006, 2006
6. Iwanmatsu, F., Yanagida, N. : Effect of weld overlay repair on residual stress and crack propagation in a welding pipe, Proc. ASME-PVP2007, 2007
7. Courtin, S., Gilles, P. : Detailed simulation of an overlay repair on a 14? dissimilar material weld, Proc. ASME-PVP2006, 2006
8. Dong, P. et al. : Residual stress analysis of a multi-pass girth weld, ASME-PVP2006, 2006
9. Song, T.K., Kim, Y.J. : Sensitivity analysis of finite element method for estimation residual stress of dissimilar metal weld, Proc. KSME-2007-1533, 2007