

고리 원전 가압기 PWOL의 용접 방향이 이종금속용접부 잔류응력 분포에 미치는 영향

배홍열*·송태광* 전윤배* 오창영* 김윤재†·이경수 박치용**

Effect of preemptive weld overlay sequence on residual stress distribution for dissimilar metal weld of Kori nuclear power plant pressurizer

H-Y Bae, T-K Song Y-B Chun C-Y Oh Y-J Kim K-S Lee C-Y Park

Key Words: Preemptive Weld Overlay(예방용접 Overlay), Welding Residual Stress(용접잔류응력) Dissimilar Metal Weld(이종금속용접)

Abstract

Weld overlay is one of the residual stress mitigation method which arrest crack. An overlay welded in this manner is termed a preemptive weld overlay(PWOL). PWOL was good for distribution of residual stress of dissimilar metal weld(DMW) by previous research. Because range of overlay welding is wide relatively, residual stress distribution on PWR is affected by welding sequence. In order to examine the effect of welding sequence, PWOL was applied to a specific DMW of KORI nuclear power plant by finite element analysis method. As a result, the welding direction that from nozzle to pipe is better good for residual stress distribution on PWR.

기호설명

PWR	Pressurized Water Reactor (가압수형 경수로)
PWSCC	Primary Water Stress Corrosion Cracking (일차수 응력 부식 균열)
PWOL	Preemptive Weld Overlay (예방용접Overlay)
DMW	Dissimilar Metal Weld (이종금속용접)
SMW	Similar Metal Weld (동종금속용접)
WPS	Welding Procedure Specification (용접절차 시방서)
HAZ	Heat Affected Zone (열영향부)

1. 서론

PWOL은 PWR의 이종금속용접부에서 발생하는 PWSCC를 예방하기 위하여 사용되는 방법 중 하나이다.^[1,2] PWSCC는 재료의 민감도, 인장하중, 수화학 환경 등의 3가지 조건이 만족할 때 발생한다.^[3,4] 따라서 용접으로 인한 잔류응력을 개선함으로써 조절을 통해 PWSCC의 원인이 되는 이종용접부 내면의 발생하는 인장하중을 감소시킬 수 있다. 기존의 연구를 통해 PWOL이 용접부 잔류응력 완화에 효과가 있음을 확인해 보았다.^[1] 본 연구에서는 이러한 PWOL의 용접 방향이 노즐의 용접기인 잔류응력에 끼치는 영향을 알아보았다. 일반적으로 Overlay 용접하는 대상이 대칭형상일 경우 용접기인 잔류응력은 용접방향을 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다. 그런데 본연구의 관심 대상인 고리 원전 가압기의 이종금속 용접부는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 대칭형상이 아니기 때문에 PWOL을 할때 용접 방향이 노즐에

† 김윤재, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 기계공학과

** 한전 전력연구원

발생하는 용접기인 잔류응력에 영향을 끼칠 것이라 예상할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PWOL의 방향성에 대한 효과를 알아보기 위하여 고리원전 가압기 이중금속용접부를 대상으로 유한요소 해석을 통해 PWOL을 구현하여 그 효과를 알아보았다.

2. 형상 및 물성

2.1 형상

본 연구에서 사용한 6인치 안전·방출 노즐의 형상과 재료는 Fig. 1과 같다. Overlay의 형상은 설계코드를 기반으로 설정하였다.^[5,6] 용접부의 두께는 기존의 연구 및 설계코드를 기반으로^[7] 배관의 1/3로 했으며 두께 변화에 따른 잔류응력 분포의 영향을 보기위해 3개의 layer로 나누었다. 용접 Overlay의 길이는 문헌에 근거하여 국부응력 집중을 최소로 하기위하여 배관 끝단에서 $0.75\sqrt{rt_{avg}}$ 까지 설정하였다.

2.2 물성

문헌이나 설계코드, 제작사를 통하여 얻은 재료 물성을 이용하였으며^[8~12] 그 값은 선행 연구에서 제시한 값과 같다.^[1] Alloy 82/182 및 Alloy 52/152 재료물성은 Alloy 600으로 대체하였으며, ER308L의 물성은 TP304로 대체하였다.

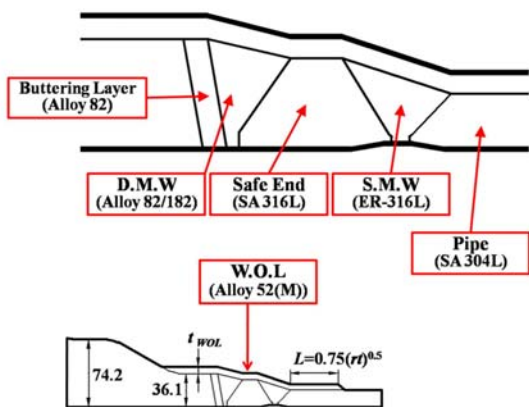


Fig. 1 Schematic illustration of a safety & relief nozzle.

3. 유한 요소해석

해석은 ABAQUS 6.7을 이용하였으며 해석 모델은 Fig 2와 같다. 1차 요소를 사용하였으며 Body flux를 통하여 입열을 구현하였다. 입열량은 동종 금속 용접 시 WPS에 명시된 조건을 기본으로 Bricstad 등이 제시한 용융선으로 부터의 2~3mm 지점을 HAZ로 정의하여 구현하였다. 또한 Annealing effect를 고려하였고 Bauehinger's effect를 고려하여 nonlinear kinematic hardening model을 사용하였다. 실제 형상과의 비교를 위해 실제 제작과정과 같이 이중용접부(DMW), 동종용접부(SMW)를 모두 구현하였으며 이중용접부, 동종용접부, 정수압 실험, Overlay 용접의 순서로 해석을 구현하였다. 본 연구의 주된 관심사는 Overlay 용접 방향에 따른 효과이기 때문에 Overlay 전까지 단계의 해석은 따로 거론하지 않도록 하겠다. 본 연구는 Overlay 용접 방향이 변수가 되며 Fig 3에서와 같다.

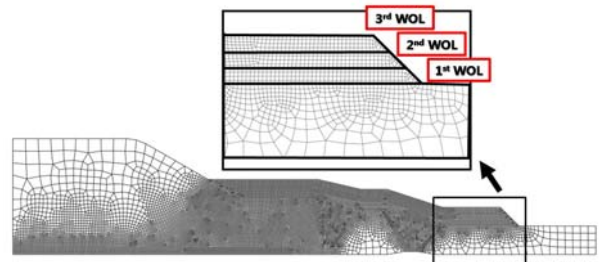


Fig. 2 Schematic illustration of FE model

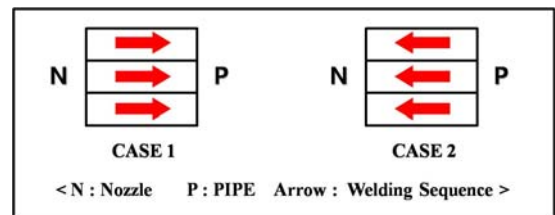


Fig. 3 Case of Welding Sequence

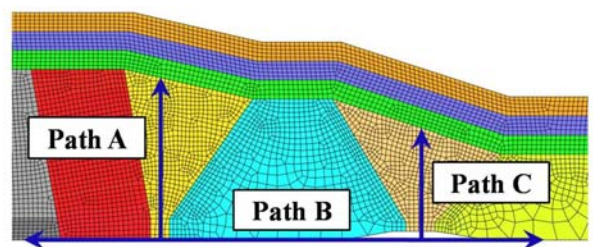
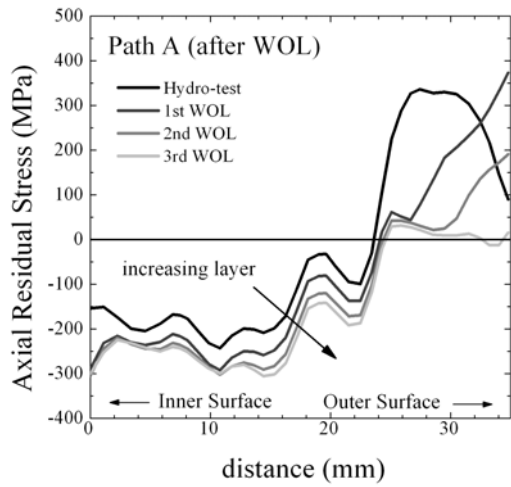
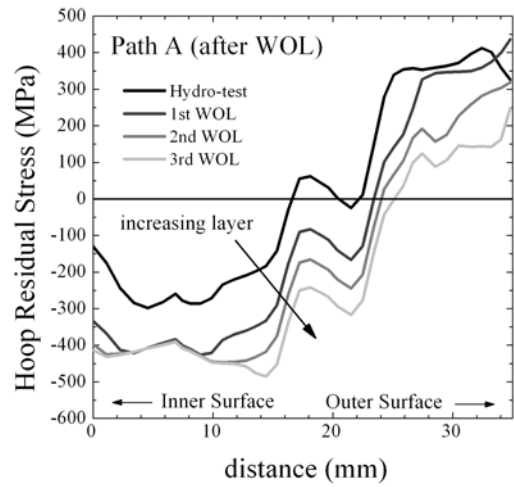


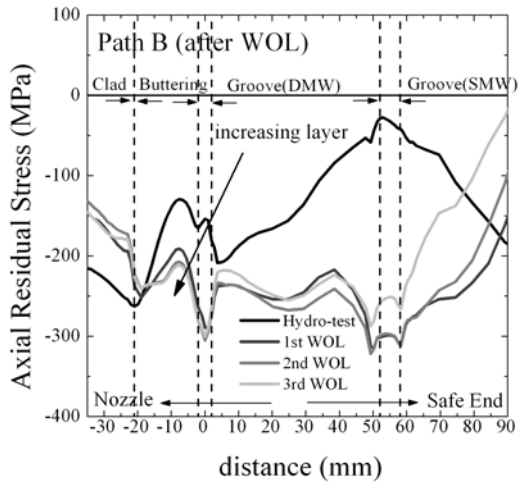
Fig. 4 Three paths for indexing residual stress of interest



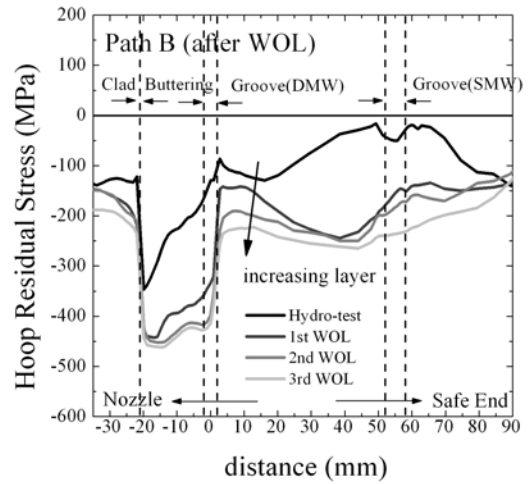
(a)



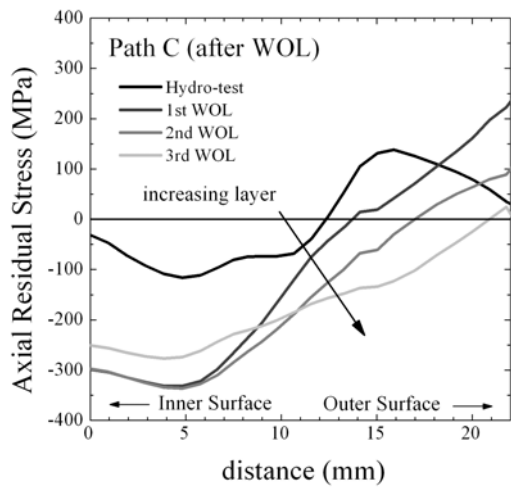
(a)



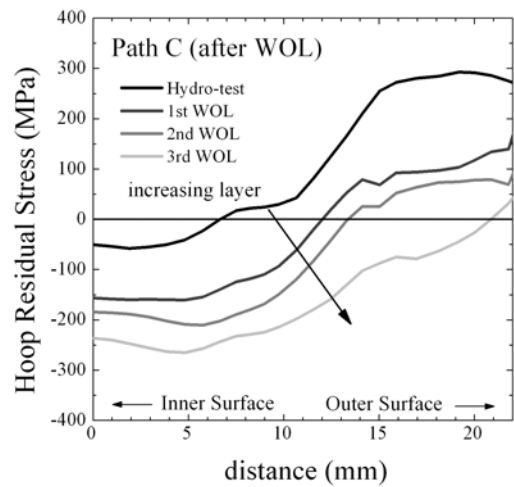
(b)



(b)



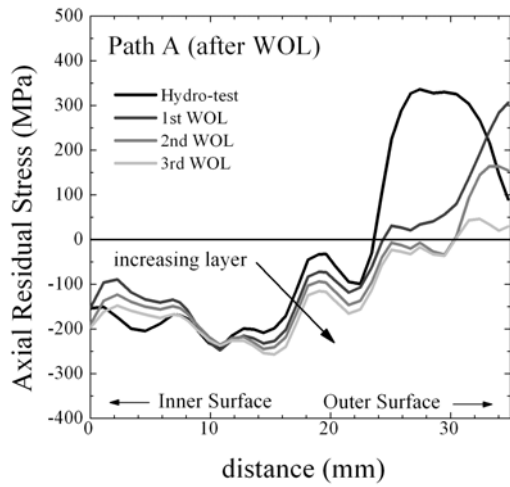
(c)



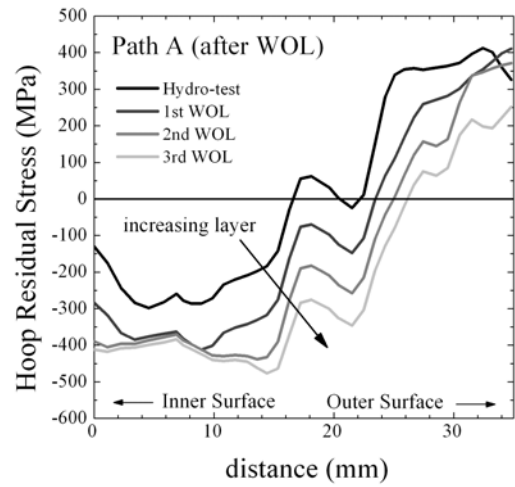
(c)

Fig. 5 Axial Residual Stress distribution along the (a) path A, (b) path B and (c) path C after Case 1 Weld Overlay

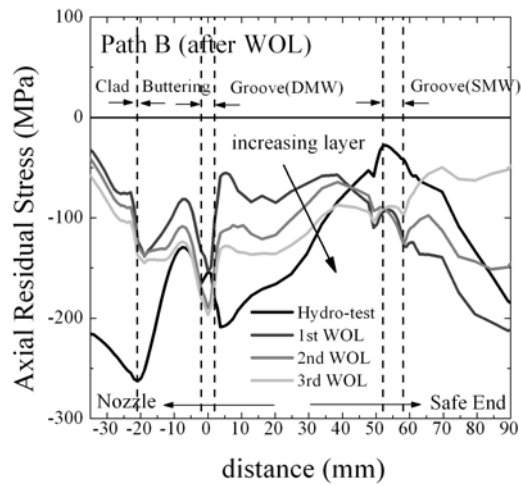
Fig. 6 Hoop Residual Stress distribution along the (a) path A, (b) path B and (c) path C after Case 1 Weld Overlay



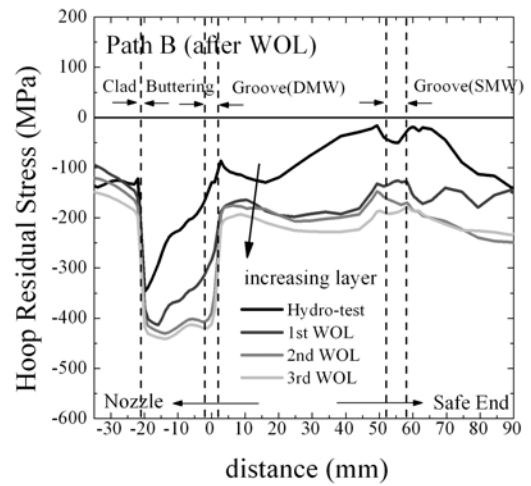
(a)



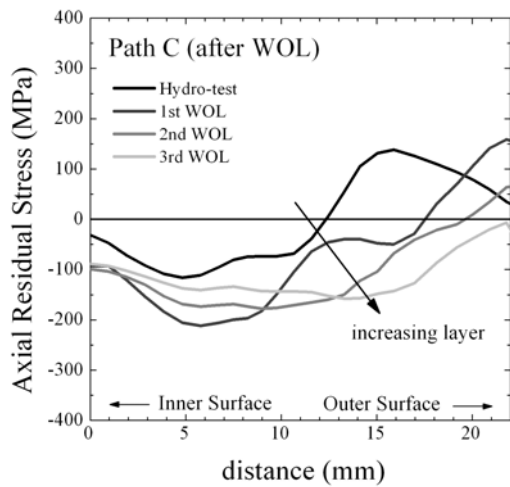
(a)



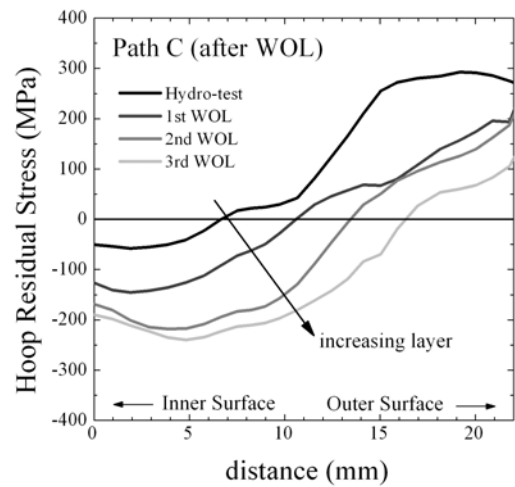
(b)



(b)



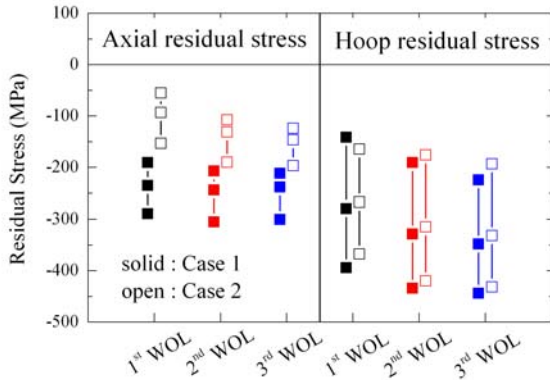
(c)



(c)

Fig. 7 Axial Residual Stress distribution along the (a) path A, (b) path B and (c) path C after Case 2 Weld Overlay

Fig. 8 Hoop Residual Stress distribution along the (a) path A, (b) path B and (c) path C after Case 2 Weld Overlay



4. 결과 및 토의

Overlay 용접에 의한 노즐의 잔류응력 분포는 이중금속용접부와 동종금속용접부의 두께방향과 노즐 내면에서 축 방향 및 원주방향의 응력을 산출하였으며 응력산출은 Fig. 4를 따른다. 4가지 Overlay 용접방향에 따라 결과를 추출하였으며 Fig. 5에서 Fig. 8은 각각의 용접방향이 같은 Case 1 과 Case 2의 결과이다. 기존의 연구에서 밝힌 바와 같이 Overlay 용접을 함으로써 관심부위인 이중금속 용접부 내면의 잔류응력은 떨어지는 것을 볼 수 있다. 용접 방향에 따른 잔류응력의 분포는 노즐에서 배관 방향으로 용접하는 것(Case 1)이 좋다는 것을 알 수 있다. 노즐에서 배관방향으로 용접할 경우(Case 1) PWSCC가 발생하기 쉬운 내면 용접 부위를 기준으로 축 방향 잔류응력이 Path A 에서 대략 100MPa, Path C에서는 150MPa 정도 더 떨어짐을 볼 수 있다. 원주 방향의 잔류응력은 Path A에서는 차이가 없었으며 Path C 에서는 대략 50MPa 정도 더 떨어짐을 볼 수 있다. Path B의 경우 관심부위를 이중용접부 중심에서 10mm 범위로 하여 비교하였다. Fig. 9 는 노즐 내면에서의 Case 1과 Case 2의 축 방향과 원주방향 잔류응력을 비교한 것이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 Path B의 축 방향 잔류응력은 Case 1 이 Case 2에 비해 100~150MPa 가량 더 낮은 것을 볼 수 있다. 원주방향의 잔류응력은 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 동종 용접부의 경우 축 방향과 원주방향 잔류응력 모두 감소하는 효과가 나타났지만 본 연구에서는 이중용접부를 다루기 때문에 자세한 언급은 하지 않도록 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 고리 원전 가압기 안전·방출 노즐의 이중용접부에 발생하는 PWSCC를 예방하기 위해 PWOL을 실시할 때 PWOL의 용접 방향이 노즐 내부의 잔류응력 분포에 끼치는 영향을 유한요소 해석을 이용하여 살펴보았다. 열/탄소성 해석으로 잔류응력을 산출하였으며 형상과 변수, 재료 물성은 제작 설계도와 설계코드, WPS에 기인하였다. Overlay 용접 방향에 따른 잔류응력 분포에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 고리 원전 가압기 안전·방출 노즐은 용접부를 중심으로 대칭 형상이 아니기 때문에 Overlay 용접을 할 경우 용접방향이 노즐 내부의 잔류응력 분포에 영향을 끼친다.
- 2) 배관에서 노즐방향으로 용접하는 것에 비하여 노즐에서 배관방향으로 용접을 할 때 이중용접부 내부의 잔류응력을 더 낮추는 효과가 있다. 축 방향 잔류응력은 Case 1의 경우가 Case 2에 비해 각 Path 모두 대략 100~150MPa 정도 낮아졌으나 원주 방향의 잔류응력은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) T-K Song, H-Y Bae, Y-B Chun, C-Y Oh, Y-J Kim, K-S Lee, C-Y Park, 2008, "Effect of preemptive weld overlay on residual stress mitigation for dissimilar metal weld of nuclear power plant pressurizer," *Trans. of the KSME*
- (2) Riccardella, P. C., Pitcairn, D. R., Giannuzzi, A. J., Gerber, T. L., 1988, "Weld overlay repairs from conception to long-term qualification", *Int.J.Pres.Ves.&Piping*, Vol.34, pp.59-82
- (3) Fox, M., 1979, "An overview of intergranular corrosion cracking in BWRs", *Journal of Materials in Energy System*, 1:3
- (4) Okimura, K., Konno, T., Narita, M., Ohta, T., Toyoda, M., 2008, Reliability of water jet peening as residual stress improvement method for alloy 600 PWSCC mitigation", *Proceedings of the 16th international conference on nuclear*

engineering, ICONE16-48375

- (5) Material Reliability Program : Technical Basis for Preemptive weld overlays for Alloy 82/182 butt welds in PWRs (MRP-169), 2007
- (6) Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair of Class 1,2 and 3 Item", *ASME Code Case N-740*, Section II
- (7) Timoshenko, S., 1956, *Strength of Materials : Part II - Advanced Theory and Problems*, D. Van Nostrand
- (8) Dong, P., 2001, "Residual stress analyses of a multi pass girth weld : 3D-special shell versus axisymmetric models", *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol.123, pp.207-213
- (9) Brickstad, B., Josefson, B. L., 1998, "A parametric study of residual stresses in multi pass butt welded stainless steel pipes", *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol.75, pp.11-25
- (10) Elocate, C. D., Dennis, R. J., Bouchard, P. J., Smith, M. C., 2005, "Three dimensional multi-pass repair weld simulations", *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol.82, pp.244-257
- (11) ASME, 2004, *Materials-Part D : Properties, AMSE Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec.II
- (12) Special Metals Corporation, 2007, *Inconel 600 & 690 information*, www.specialmetals.com