

이종재료 Butt 용접에 대한 Overlay 용접의 잔류응력해석

김강수[†] · 이호진* · 이봉상* · 정인철** · 변진귀** · 박광수**

Residual Stress Analysis of the Overlay Weld on the Dissimilar Metal Butt Weld

Kang Soo Kim, Ho Jin Lee, Bong Sang Lee, In Chul Jung, Jin Gwi Byeon, Kwang Soo Park

Key Words : dissimilar metal weld, FEM model, PWSCC, residual stress

Abstract

In recent years, the dissimilar metal, Alloy 82/182 welds used to connect stainless steel piping and low alloy steel or carbon steel components in nuclear reactor piping system have experienced cracking due to primary water stress corrosion(PWSCC). It is well known that one reason of the cracking is the residual stress by the weld. But, it is difficult to estimate exactly weld residual stress due to many parameters of welding. In this paper, the analysis of 3 FEM models made by ABAQUS Code is performed to estimate exactly the weld residual stress on the dissimilar metal weld. 3 FEM models are Butt model, Repair model and Overlay model and are the plane-strain 2D model. The thermal analysis and the stress analysis are performed on each model and the residual stresses on each model were calculated and compared respectively. Also, the specimen of Butt model was made and the residual stresses were measured by X-Ray method and Hole Drilling Technique. These results were compared with the FEM result of Butt model.

1. 서론

가압경수로형 원자력발전소의 원자로 및 냉각재 계통에는 기기와 배관 또는 배관과 배관의 연결부에 많은 이종용접부가 존재한다. 구조용 탄소강 SA508 과 스테인리스 강 316L 이 대표작인 사례이다. 이들 이종금속은 Alloy 600 계열의 Alloy 82 또는 Alloy 182 로 용접되어왔다. 최근에 Alloy 82/182 로 용접된 용접부에서 PWSCC 로 인한 균열사례가 보고되고 있으며(1-3) 균열의 주요원인 중의 하나가 용접에 의한 잔류응력으로 잘 알려져 있다. 이 용접잔류응력을 정확히 예측하는 것은 매우 중요한 일이나 용접 시 매우 많은 매개변수로 인해 잔류응력을 정확히 예측하는 일은 어렵

다. 유한요소해석이 세계적으로 많이 연구되고 있는 실정이며 매개변수 연구에 유한요소해석이 많은 장점을 가지고 있다. 이 논문에서는 SA508 판재(330x 330x40 mm)와 SUS316L(330x 330x40 mm)판재를 Alloy 182 로 이종 용접한 맞대기 용접과 용접부에 균열발생 시 용접부분을 제거하고 다시 Alloy 182 로 보수한 보수 용접, 그리고 판재 위에 용접 층을 쌓는 오브레이 용접을 유한요소 해석하여 각 모델의 잔류응력을 계산하여 기술하였다. 또한 맞대기 용접과 보수 용접에 대해서는 실제 시편을 만들어 X-ray 방법과 Hole Drilling 기법으로 잔류응력을 측정하고 유한요소 해석 값과 비교 분석하였다.

2. 해석방법과 결과

ABAQUS/CAE 코드(4)에 의해 3 개의 유한요소 모델이 만들어졌다. 맞대기 용접모델(Butt model), 보수 용접모델(Repair model) 그리고 오브레이 용접모델(Overlay model)이 2 차원 평면변형률

[†] 회원, 한국원자력연구원
E-mail : kskim5@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-4749 FAX : (042)868-8346

* 한국원자력연구원

** 두산중공업(주)

조건으로 만들어지고 각 모델은 열해석과 응력해석이 수행되었다.

2.1 맞대기 용접모델(Butt model)

SA508 강 판재의 groove 에 buttering(Alloy 182) 을 실시하고 후열처리를 수행한 후 용접 filler 인 Alloy 182 를 사용하여 스테인리스강 316L 과 맞대기 용접을 하였다. 이중용접된 두 판재는 ABAQUS/CAE 를 사용하여 모델링하고 평면변형률(plane strain)조건으로 2 차원 해석을 수행하였다. 전산계산은 uncoupled 해석을 하였고 용접 비드 적층을 모사하기 위해 rebirth 기법을 사용하였다. 용접 비드 적층은 lumping 기법으로 10 개의 pass 로 구분하여 해석하였다. 강제대류는 일어나지 않는다고 가정하여 자연대류만을 고려하여 수행하였다. 모델링은 그림 1 에 보여지며 7140 개의 요소 와 7409 개의 절점으로 구성된다.

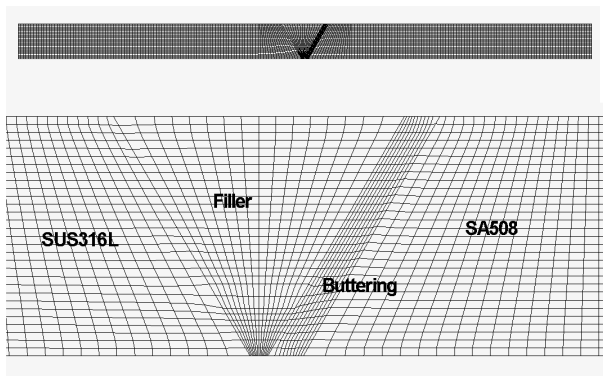


Fig. 1 2D FEM model of Butt weld

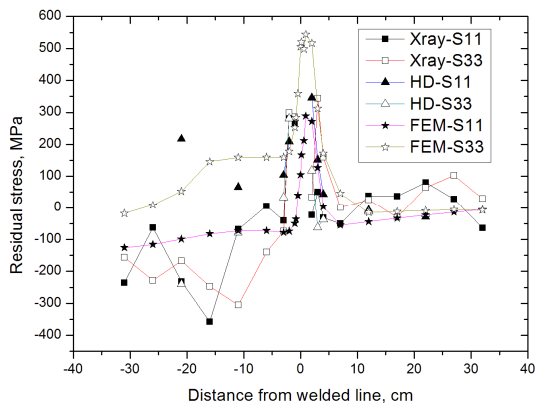


Fig. 2 FEM results of Butt weld

그림 2 에 유한요소해석 결과와 실제 시편을 만들어 X-ray 방법과 Hole Drilling 기법으로 측정 한 값을 나타내었다. 그림에서 보듯이, 용접부에서 는 유한요소해석결과 값과 측정치가 잘 일치하는

경향을 보이고 SA508 판재에서는 측정치가 약간 높은 값으로 나타난다. SUS316L 판재 쪽의 S11 값 (σ_x : 용접방향의 수직방향의 응력)은 유한요소 해석 값과 측정치가 잘 일치하려는 경향이 보이나 S33 값(σ_z : 용접방향의 응력)은 유한요소 값이 훨씬 높게 나타났다. 측정치와 비교할 때 전반적으로 유한요소 해석 값이 신뢰할만하다고 할 수 있다.

2.2 보수 용접모델(Repair model)

맞대기 용접 후, 판재 아랫면에 균열이 발생할 경우 균열 부분을 제거하고 다시 용접금속 Alloy 182 로 보수 용접된다. 보수 용접의 유한요소 모델 은 그림 3 과 같다. 2 차원 평면변형률 조건으로 모델링 되었으며 요소 10648 개가 사용되었다. 용접 비드의 유한요소 모사는 맞대기 용접에서 10 Pass, 그리고 보수 용접에서 8 Pass 로 하여 총 18 Pass 로 수행되었다.

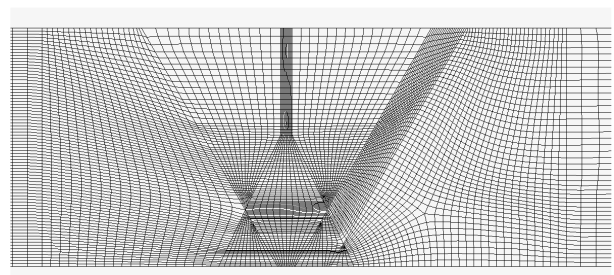


Fig.3 2D FEM model of Repair weld

그림 4 에서 보수용접의 잔류응력 분포와 맞대기 용접의 잔류응력분포를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 보수용접으로 잔류응력이 전반적으로 높아짐을 알 수 있다. 그러므로 아래쪽의 잔류응력을 낮추는 방안으로 판재 위쪽에 오브레이(Overlay) 용접이 필요함을 알 수 있다.

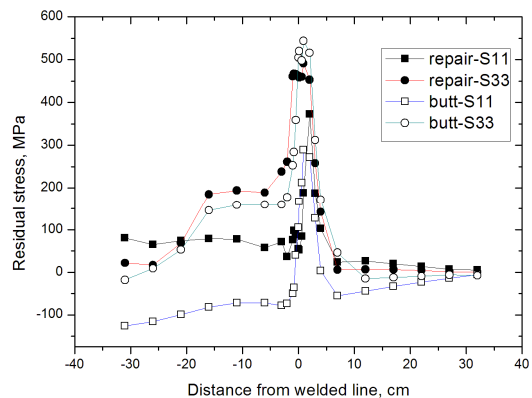


Fig. 4 FEM results of Repair weld

2.3 오브레이 용접모델(Overlay model)

판재 윗면에 용접금속 Alloy 182 로 3 층의 오브레이 용접을 하였다. 한 층의 오브레이 용접이 수행될 때마다 잔류응력이 계산되었다. 오브레이 용접의 유한요소 모델은 그림 5 와 같으며 요소 11835 개, 절점 12119 개가 사용되었다. 용접 비드의 유한요소 모사는 맞대기 용접에서 10 Pass, 보수용접에서 8 Pass, 그리고 오브레이 용접에서 3 pass 로하여 총 21 Pass 로 수행되었다.

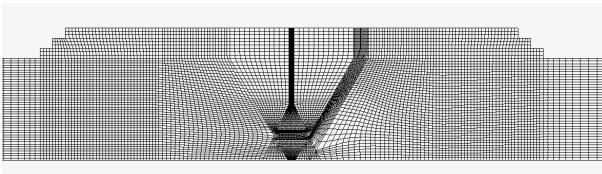


Fig. 5 2D FEM model of Overlay weld

그림 6 에서 보듯이 오브레이 용접으로 인해 S11 응력이 전반적으로 낮아졌다. 용접 부위에서는 보수용접으로 375MPa 잔류응력이 오브레이 용접으로 인해 75MPa 까지 낮아졌으며 오브레이 한층 보다 두 층, 세 층의 경우가 더 응력이 낮아졌다

그림 7 에서 보듯이 S33 응력은 오브레이 용접으로 인해 전반적으로 응력이 높아졌다. 보수용접으로 375MPa 잔류응력이 오브레이 용접으로 인해 525MPa 까지 높아졌으며 오브레이 한층 보다 두 층, 세 층이 더 응력이 높아졌다. 용접부위에서의 잔류응력은 S11 과 S33 의 벡터 합이므로 결론적으로 오브레이 용접은 보수용접으로 높아진 응력을 낮게 한다고 말할 수 있으며 PWSCC 관점에서 오브레이 용접은 잇점이 있다.

그림 8 에서 보듯이 맞대기 용접과 보수 용접은 두께방향으로 S11 의 값이 인장과 압축을 반복하나 오브레이 용접으로 인해 잔류응력은 0 MPa 에 수렴하는 경향을 보인다. 이것 또한 PWSCC 관점에서 오브레이 용접은 잇점이 있다.

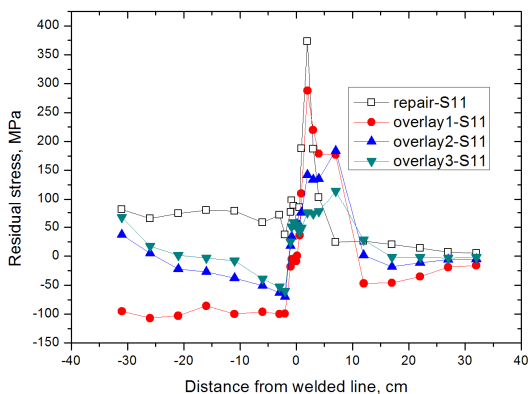


Fig. 6 FEM results of Overlay weld (S11)

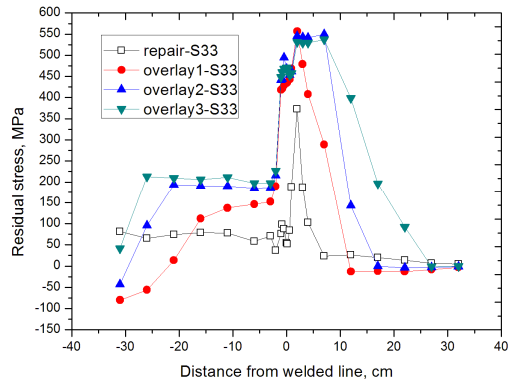


Fig. 7 FEM results of Overlay weld (S33)

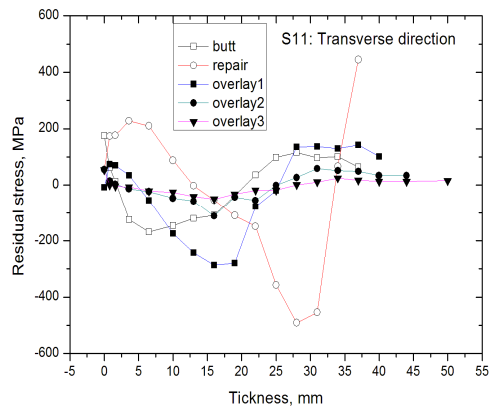


Fig. 8 FEM results of Overlay weld (S11 through thickness)

3. 결론

맞대기 용접에서, 유한요소해석 결과와 실제 시편을 만들어 X-ray 방법과 Hole Drilling 기법으로 측정된 값을 비교하였다. 측정치와 비교할 때 전반적으로 유한요소 해석 값이 일치하는 경향을 보이므로 유한요소해석 값이 신뢰할 만하다고 할 수 있다.

보수 용접의 잔류응력 분포와 맞대기 용접의 잔류응력분포를 비교한 결과 보수 용접으로 인한 잔류응력이 전반적으로 높아짐을 알 수 있다. 그러므로 아래쪽의 잔류응력을 낮추는 방안으로 판재 위쪽에 오브레이 용접이 필요함을 알 수 있다.

오브레이 용접은 보수용접으로 높아진 응력을 낮게 한다고 말할 수 있으며 PWSCC 관점에서 오브레이 용접은 잇점이 있다고 말할 수 있다. 맞대기 용접과 보수 용접은 판재의 두께방향으로 인장과 압축을 반복하나 오브레이 용접으로 인해 잔

류응력은 0 MPa 에 수렴하는 경향을 보인다. 이것 또한 PWSCC 관점에서 오브레이 용접은 잇점이 있다고 말 할 수 있다.

후 기

본 논문은 두산중공업의 R&D 프로그램에 의해 지원되었음

참고문헌

- (1) King, C. P., June 2003, “PWSCC of Alloy 600 Type Materials in Non-Steam Generator Tubing Applications-Survey Report Through Tune 2002”, *EPRI*
- (2) Brust, F. W., Zhang J. And Dong P. August 1997, “Pipe and Pressure Vessel Cracking: the role of weld induced residual stress and creep damage during repair” *SMIRT 14*
- (3) Dong, P. and Brust, F. W., August 2000, “Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium and Review and Beyond” *Journal of Pressure Vessel Technology*.
- (4) ABAQUS, 2004. Standard User’s Manual, version 6.4. ABAQUS Inc., Pawtucket, RI, USA.