

보수용접에 따른 이종금속 용접부의 잔류응력 해석

이승건^{*,†} · 진태은^{*} · 강성식^{**} · 권동일^{***}

^{*}한국전력기술주)

^{**}한국원자력안전기술원

^{***}서울대학교 재료공학부

Residual Stress Analysis for Repair Welding in Dissimilar Metal Weld

Seung Gun Lee^{*,†}, Tae Eun Jin^{*}, Sung Sik Kang^{**} and Dongil Kwon^{***}

^{*}Korea Power Engineering Company, inc., Yongin 446-713, Korea

^{**}Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon 305-338, Korea

^{***}Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

[†]Corresponding author : gun@kopec.co.kr

(Received November 28, 2008 ; Revised March 11, 2009 ; Accepted July 13, 2009)

Abstract

Alloy 600 and Alloy 82/182 materials have been used widely in PWR plants. But these materials are known to be susceptible to PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking). Recently, there have been several PWSCC events in major components due to repair welding, because repair welding in the dissimilar metal welds during the construction increases residual stress significantly on the inner surface of welds. In this paper, various residual stress analyses for repair welding were performed using FEM to check the effect of repair welding on residual stress distributions in PZR safety/relief nozzle. The results indicate that for inside surface repair welding, high tensile residual stress is developed on the inside surface of the nozzles.

Key Words : Dissimilar metal weld, PWSCC, Crack, Residual stress, Repair welding

1. 서 론

Alloy 82/182와 같은 니켈합금 용접재료는 원자력발전소 내의 가압기(pressurizer) 노즐(nozzle) 등의 저합금강(low alloy steel) 기기와 스테인리스강(stainless steel) 안전단 및 배관을 연결할 때 널리 사용되고 있다. 그러나 최근 미국 Wolf Creek 원전의 가압기 노즐 이종금속 용접부(dissimilar metal weld)에서 균열이 발생하는 등 Alloy 82/182에서 일차수응력부식균열(PWSCC)에 의한 균열 손상이 다수 보고되고 있는 상황이다. 이는 가압기 노즐 제작시 수행된 보수용접으로 인해 높은 인장 잔류응력이 유체와 접하는 노즐 내면에 형성되었기 때문인 것으로 밝혀졌다. 본 논문에서는 유한요소 해석을 통해 가압기 노즐 이종금속 용접부의 초기 잔류응력 상

태를 예측하였고, 보수용접을 고려하였을 경우 잔류응력 분포가 어떻게 변화하는지를 검토하였다. 또한 보수용접으로 인해 형성된 용접 잔류응력이 균열 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 산업계 기술기준에 따라 균열평가를 수행하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 용접과정을 고려한 잔류응력 해석

Fig. 1은 웨스팅하우스형 가압기 안전방출 노즐의 형상 및 부위별 사용 재질을 나타낸 것이다. 가압기 노즐 각 부위별 재질을 살펴보면 노즐은 SA508 Gr.3, Cl.1, 노즐 버터링-안전단의 이종 용접부는 Alloy 82/ 182, 안전단은 SA182 F316, 안전단-배관의 동중 용접부는

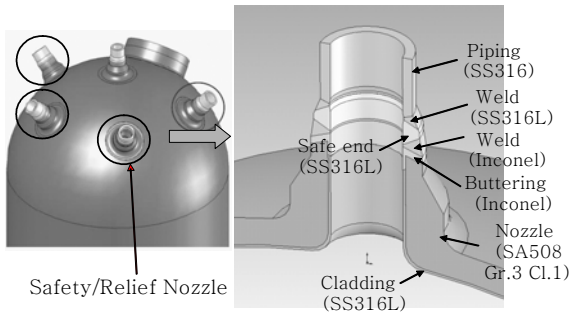


Fig. 1 PZR safety/relief nozzle(Westinghouse type)

ER316L, 배관은 SA376 TP316이 사용되었다. 용접부 잔류응력은 열해석(transient thermal analysis)을 수행하여 얻은 시간에 따른 온도결과를 바탕으로 응력해석을 수행하여 계산할 수 있다

용접 잔류응력 해석을 위한 모델링 작업은 상용 유한요소 모델 소프트웨어인 PATRAN²⁾을 사용하였고, 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS³⁾를 이용하여 열 및 응력 해석을 수행하였다 Fig. 2는 용접 잔류응력 해석시 사용한 유한요소 모델로 이종금속 용접부는 11개의 lumped 비드로 동종금속 용접부는 9개의 lumped 비드로 구성되어 있다 해석시에는 8절점 축대칭(8-node axisymmetric element) 요소인 DCAX8 (열해석)과 DAX8R(응력해석)을 사용하였다. 용접비드가 순차적으로 용착되는 실제 용접 과정을 모사하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 Model change 기법을 사용하였다. 이때 해석시간의 단축을 위해 lumped bead 방법을 사용하였다⁴⁾. 용접비드의 적층 순서는 이종금속 용접시에는 노즐에서 안전단(safe end) 방향으로 용접되도록 적층 순서를 정하였고, 동종금속 용접시에는 배관에서 안전단(safe end) 방향으로 용접되도록 하였다 보수적인 결과를 얻을 수 있도록 Isotropic Hardening 구성방정식을 적용하였고 용접시 금속이 용융될 때 발생되

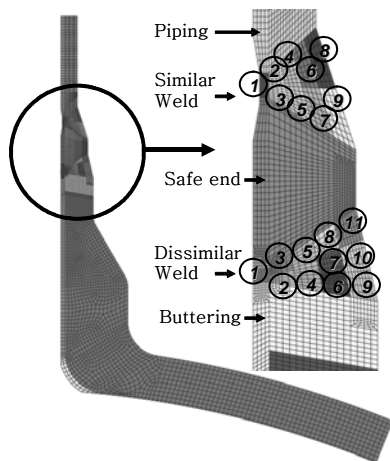


Fig. 2 Axisymmetric finite element model

는 응력풀림(annealing) 현상도 고려하였다 모든 용접시 노즐의 끝단만 반경방향으로 움직일 수 있도록 구속조건을 설정하였고 나머지 부분은 모두 자유 조건으로 구속조건을 설정하였다 해석에 사용된 재료물성치는 ASME Code, Sec. II, Part D에 제시된 온도에 따른 값들을 사용하였다.

보수용접은 이종금속 용접과정이 종료된 후 보수용접에 해당되는 부위의 요소를 제거시킨 후 해당 부위에 신규 비드가 부착되도록 설정하여 수행하였다 이때 Fig. 3과 같이 보수용접 위치를 이종금속 용접부 내면과 외면(3가지 서로 다른 위치)으로 구분하여 용접 잔류응력 해석을 수행하였다 이종금속 용접부 내면 잔류응력 해석의 경우 총 4개 lumped 비드로 구성하였고 이종금속 용접부 외면 잔류응력 해석의 경우에도 총 4개의 lumped 비드로 구성하였다

2.2 용접 잔류응력을 고려한 균열평가

용접으로 인해 발생하는 용접 잔류응력이 PWSCC 균열성장예에 미치는 영향을 확인하기 위해 ASME, Sec. XI, App. A⁵⁾ 및 EPRI MRP 보고서⁶⁾에 제시된 평가방법론을 적용하여 균열평가를 수행하였다 이를 위해서 균열이 없는 이종금속 용접부의 잔류응력 분포로부터 식 (1)과 (2)에 따라 응력확대계수를 계산하였다

$$K_I = [(A_0 + p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (1)$$

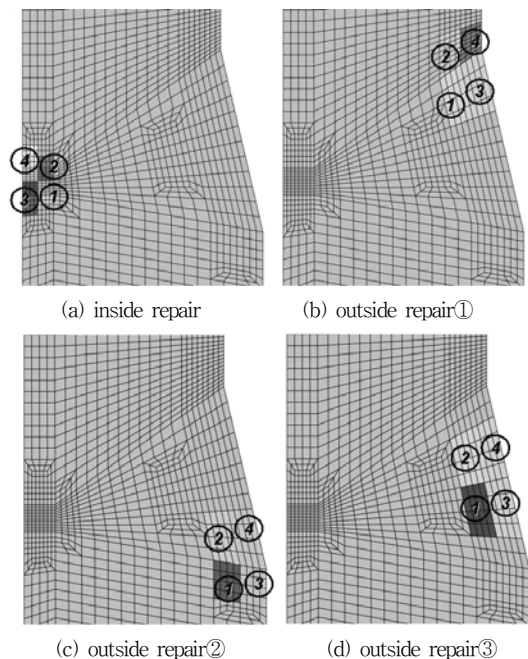


Fig. 3 Repair welding locations in dissimilar metal weld

$$Q = 1 + 4.593 \left(\frac{a}{l}\right)^{1.65} \quad (2)$$

여기서 a 는 균열 깊이, l 은 균열 길이, G_0, G_1, G_2, G_3 은 ASME, Sec. XI, App. A, Table A-3320-1에 제시된 계수이며, A_0, A_1, A_2, A_3 은 균열이 없는 가압기 노즐에 작용하는 응력분포를 Polynomial Fit을 통해 계산된 상수이다.

이때 PWSCC 균열성장 거동을 확인하기 위하여 EPRI MRP 보고서[6]에 제시된 식 (3)을 적용하였다

$$\frac{da}{dt} = 1.5 \times 10^{-12} K^{1.6} \quad (3)$$

균열 평가시 사용된 균열 길이에 대한 균열 깊이의 비인 균열 형상비(a/l)는 균열 크기 증가시에도 1/6으로 일정하게 유지된다고 가정하였다

Fig. 4는 균열을 고려한 유한요소 모델로 균열길이는 두께의 25%, 37%, 50%, 62%, 75%로 설정하였고 용접 잔류응력을 고려하여 균열거동을 평가하는데 사용되었다.

3. 해석 결과

3.1 용접 잔류응력 해석 결과

Fig. 5는 해석결과 데이터를 취득하기 위해 설정한 path 위치를 제시한 것으로 path 1은 이중금속 용접부 내면을 따르는 선이며, path 2는 이중금속 용접부 중앙을 따르는 선이다 Fig. 6과 Fig. 7은 내면 보수용접 전후 path 1 및 path 2에서의 잔류응력 분포 결과를 제시한 것이다.

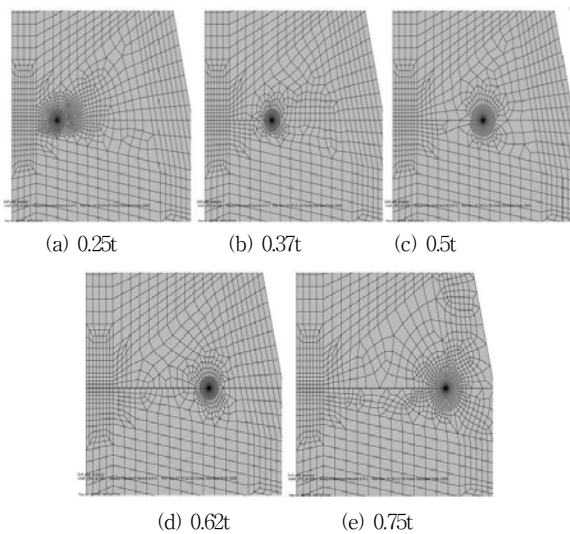


Fig. 4 Finite element model for crack

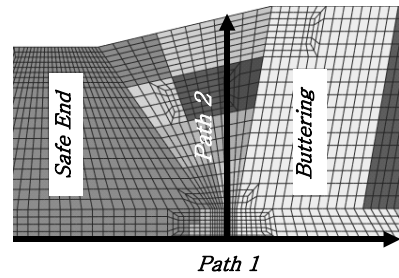


Fig. 5 Data acquisition line (path1, path2)

Fig. 6에서 보듯이 내면에서의 축방향 응력의 경우 이중금속 용접후(보수용접전) 니켈합금 용접부에서 최대 171MPa의 잔류응력이 발생하였으나 내면 보수용접후 461MPa로 잔류응력이 증가하였다 원주방향 응력의 경우 이중금속 용접후(보수용접전) 니켈합금 용접부에서 압축 잔류응력이 발생하였으나 내면 보수용접후 529MPa로 잔류응력이 증가하였다 Fig. 7에서 보듯이 두께 방향으로의 잔류응력 분포의 경우 내면 보수용접으로 인해 축방향 및 원주방향 모두 노즐 내면에서의 잔류응력이 증가하였으며 두께의 약 20% 지점부터 감소하다가 두께의 약 40% 지점을 지나면서 다시 증가하는 경향을 보이고 있다

내면 보수용접후 용접부위(weld) 내면의 잔류응력이

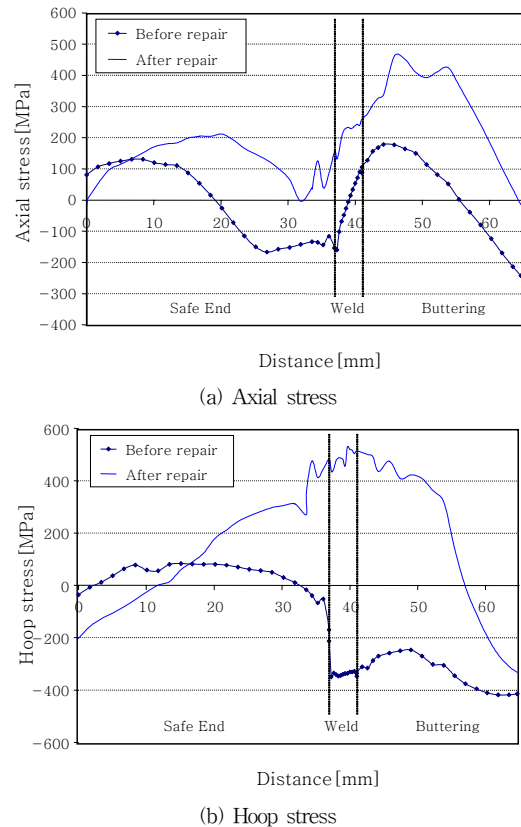
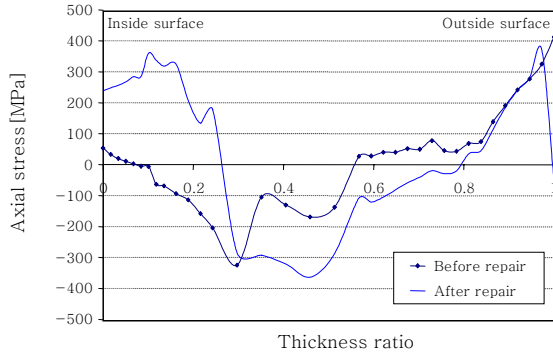
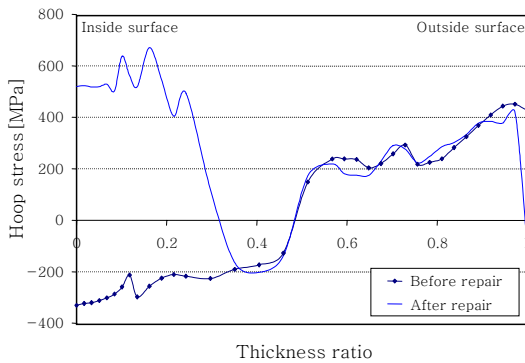


Fig. 6 Residual stress distributions after inside repair welding(path1)



(a) Axial stress

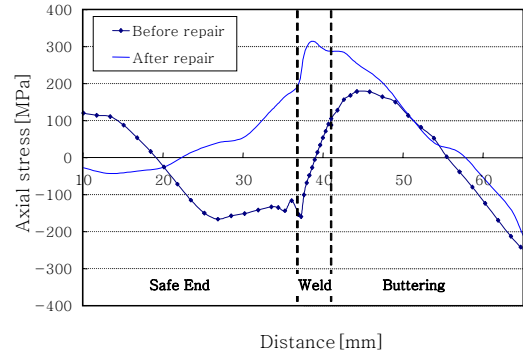


(b) Hoop stress

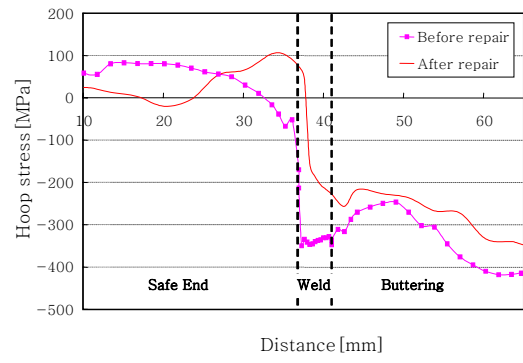
Fig. 7 Residual stress distributions after inside repair welding(path2)

증가하는 이유는 보수용접으로 인해 굽힘하중에 저항하는 인장방향의 반력이 내면에 작용하기 때문이다 두께 방향으로 내면부 잔류응력이 두께의 약 20% 지점까지 크게 나타나는 이유는 보수용접 영역이 전체 두께의 20%정도에 해당되기 때문이며 외면으로 갈수록 보수용접에 의한 영향이 없어지므로 보수용접 이전의 잔류응력 상태와 동일한 거동을 보이고 있다

Fig. 8~Fig. 10은 외면 보수용접후 잔류응력 결과를 제시한 것으로, 외면 보수용접 ①의 경우 니켈합금 용접부에서 최대 축방향 응력은 192 MPa에서 304 MPa로 증가하였고, 최대 원주방향 응력은 -317MPa에서 55MPa로 증가하였다. 이는 외면 보수용접시에도 굽힘하중에 저항하는 인장방향의 반력을 용접부(weld) 내면에 형성시키기 때문이다. 외면 보수용접 ②도 ①과 유사한 경향을 보이고 있으며 외면 보수용접 ③도 증가되는 정도만 작을 뿐 변화되는 경향은 외면 보수용접 ①, ②의 결과와 동일한 경향을 보이고 있다 또한 그림에서 보듯이 외면 보수용접은 내면 보수용접에 비해 보수용접을 통해 증가되는 잔류응력 정도가 작음을 확인할 수 있다.

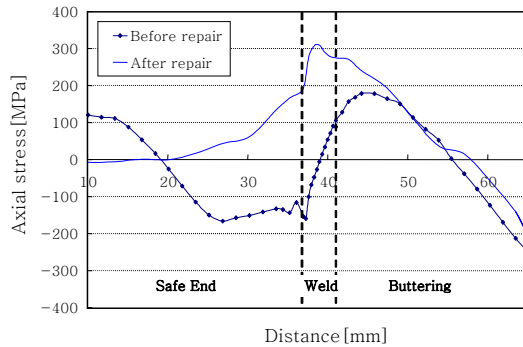


(a) Axial stress

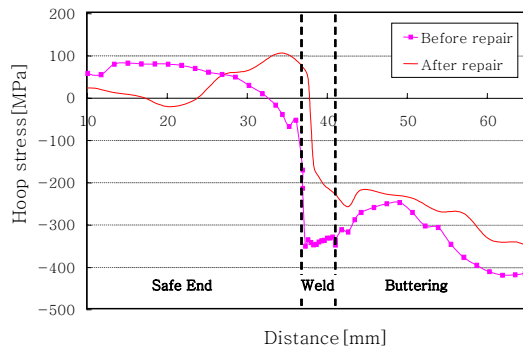


(b) Hoop stress

Fig. 8 Residual stress distributions after outside repair① welding(path1)

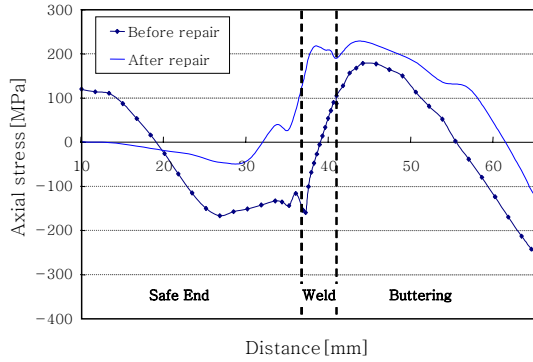


(a) Axial stress

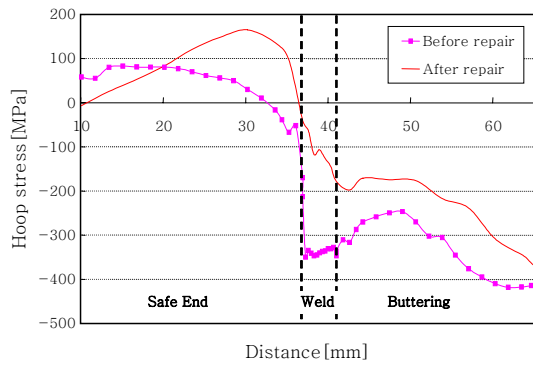


(b) Hoop stress

Fig. 9 Residual stress distributions after outside repair② welding(path1)



(a) Axial stress



(b) Hoop stress

Fig. 10 Residual stress distributions after outside repair
③ welding(path1)

3.2 잔류응력을 고려한 균열평가 결과

Fig. 11은 내면 보수용접 전 후의 path 2에 따른 축방향 잔류응력 분포를 이용하여 ASME, Sec. XI, App. A에 제시된 방법론 및 균열을 고려한 유한요소해석을 통해 응력확대계수를 계산한 결과이다 PWSCC 균열성장 정도를 설명하는 식 (3)에 따르면 PWSCC 균열은 응력확대계수가 양의 값을 가질 때 성장할 수 있다 따라서 PWSCC 균열 성장 관점에서 볼 때 응력확대계수가 음의 값을 갖는 영역은 균열이 성장할 수 없으므로 양의 응력확대계수를 갖는 내면(inside surface) z영역만이 관심 대상이 된다 Fig. 11에서, 양의 응력확대계수를 갖는 내면 영역에서 두 가지 방법에 따라 도출된 결과를 비교해 보면 양의 값을 갖는 범위만 다를 뿐 그 경향은 유사하다고 할 수 있다

ASME, Sec. XI에 따른 결과의 경우 내면 보수용접으로 인해 두께의 30%까지 양의 응력확대계수를 가지므로 이 지점까지 균열이 성장할 수 있으나 균열을 고려한 유한요소해석 결과의 경우 보수용접을 통해 균열이 두께의 40%까지만 성장할 수 있는 것으로 확인되었다

Fig. 12는 내면 보수용접후 이중금속 용접부 중앙에 원주방향 균열이 존재하는 경우의 응력분포를 나타낸

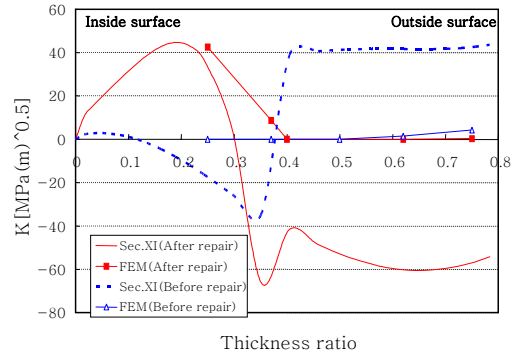


Fig. 11 Stress intensity factor changes at the deepest point of circumferential crack

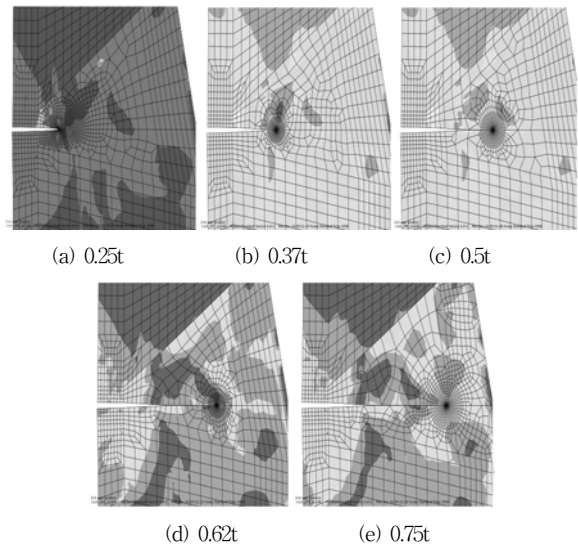


Fig. 12 Residual stress distributions with crack opening

것이다. Fig. 12에서 보듯이 균열깊이가 증가할수록 기준 용접 잔류응력이 재분포 되고 있으며 두께의 37%에 해당되는 균열깊이에서는 균열 면이 서로 맞닿지 않으나 이 보다 더 큰 균열깊이에서는 균열 면이 서로 맞닿는 거동을 보이고 있다

일반적으로 ASME Sec.XI에 따른 균열평가가 보수적인 결과를 도출한다고 알려져 있으나 본 연구에서는 균열을 고려한 유한요소해석을 통해 더욱 보수적인 결과를 도출할 수 있음을 확인할 수 있었다 따라서 더욱 정확한 균열평가 결과를 도출하기 위해서는 균열성장시 발생하는 잔류응력의 재분포 현상을 고려할 수 있는 방법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다

4. 결 론

본 논문에서는 이중금속 용접부가 포함된 가압기 안전/방출 노즐에 대하여 보수용접이 잔류응력에 미치는

영향을 평가하기 위해 유한요소 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보수용접전 축방향 잔류응력은 Alloy 82/182가 사용된 이중금속 용접부 및 버터링 부위에서 인장상태를 보이고 있으나, 원주방향 잔류응력은 이중금속 용접부 및 버터링 부위에서 압축상태를 보이고 있다
- 2) 보수용접은 축방향 및 원주방향 잔류응력을 증가시키는 경향을 보이고 있다 특히 이중금속 용접부 내면의 보수용접은 축방향 및 원주방향 응력을 증가시켰다
- 3) 내면 보수용접후 ASME Sec.XI에 따라 응력확대계수를 계산한 결과 두께의 30%까지 균열이 성장할 수 있으나, 균열을 모델링한 후 유한요소 해석을 통해

응력확대계수를 계산한 결과 두께의 40%까지 균열이 성장할 수 있는 것으로 확인되었다

참 고 문 헌

1. EPRI : EPRI PWSCC of Alloy 600 2007 International Conference & Exhibition, 2007
2. MSC : PATRAN, Ver. 2007, (2007)
3. HKS : ABAQUS, Ver. 6.8, 2008
4. Dong, P. et al. : Residual Stress Analysis of a Multi-pass Girth Weld, ASME PVP, 373 (1988), 421-431
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI: Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, 2001
6. EPRI, Material Reliability Program(MRP-115) : Crack Growth Rates for Evaluating PWSCC of Alloy 82, 182 and 132 Welds, 2004