

유한요소법을 이용한 용접공정 모사 시 입열 방법에 따른 용접잔류응력의 영향

양준석[†], 박치용*, 이경수*

Weld Residual Stress According to the Ways of Heat Input in the Simulation of Weld Process using Finite Element Analysis

Jun-Seog Yang, Chi-Yong Park and Kyoung-Soo Lee

Key Words: Weld Residual Stress(용접잔류응력), Dissimilar Metal Weld(이종금속용접), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract : This paper is to discuss distribution of welding residual stresses of a ferritic low alloy steel nozzle with dissimilar metal weld using Alloy 82/182. Two dimensional (2D) thermo-mechanical finite element analyses are carried out to simulate multi-pass welding process on the basis of the detailed and fabrication data. On performing the welding analysis generally, the characteristics on the heat input and heat transfer of weld are affected on the weld residual stress analyses. Thermal analyses in the welding heat cycle process is very important process in weld residual stress analyses. Therefore, heat is rapidly input to the weld pass material, using internal volumetric heat generation, at a rate which raises the peak weld metal temperature to 2200°C and the base metal adjacent to the weld to about 1400°C. These are approximately the temperature that the weld metal and surrounding base materials reach during welding. Also, According to the various ways of applying the weld heat source, the predicted residual stress results are compared with measured axial, hoop and radial through-wall profiles in the heat affected zone of test component. Also, those results are compared with those of full 3-dimensional simulation.

1. 서론

최근 들어서 국외 여러 나라의 원자력발전소에서 용접 잔류응력으로 인한 응력부식 균열 사고가 빈번히 발생함에 따라서 원자력발전소 배관을 비롯한 기기 용접부의 건전성 유지는 원전의 안

전 운영과 관련하여 주요 관심 사항 가운데 하나로 인식되고 있다. 특히 2000년 10월 미국 V.C. Summer 발전소의 원자로용기 노즐과 고온관의 연결 용접부에서 발생한 관통균열 사고의 근본 원인이 기기 설치 과정에서 실시된 과도한 용접 보수로 인한 높은 인장 잔류응력이며 이로 인해서 1차수 응력부식균열 (Primary Water Stress Corrosion Cracking : PWSCC)이 발생하였음이 판명되었다. 이와 같은 사유로 원자력발전소 배관 용접부의 PWSCC 발생여부와 관련하여 배관 용접공정에서 발생하는 용접잔류응력은 중요한 사항으로 대두되었다. 용접잔류응력 평가의 경우 최근 들어 유한요소해석을 이용한 해석적 연구들이 국내외적으로 활발히 진행되어 왔다. 2008년

[†] 한전 전력연구원 원자력발전연구소

E-mail : michale@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5658 FAX : (042)865-5604

* 한전 전력연구원 원자력발전연구소

국내의 경우 5개 연구기관이 참여하여 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐 용접부를 대상으로 유한요소 잔류응력 해석 round robin을 두 차례 수행한 바 있다. 본 논문에서는 2008년 유한요소 잔류응력 해석 round robin에서 대상으로 선정된 해석모델에 대해 유한요소법을 이용하여 용접공정 모사 시 용접 입열 방법에 따른 잔류응력을 평가하였다.

2. 용접 잔류응력 해석

2.1 용접공정 해석 절차

본 연구의 해석대상인 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단의 용접부 및 안전단과 배관의 용접부는 Fig. 1에 나타내었다. 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐의 재질은 SA508 C1.2이며, 안전단은 F-316L, 가압기 안전/방출 배관은 TP304 이다. 고리3,4호기 가압기 안전/방출 배관은 안전단에 ER-308L로 현장 용접되었으며, 안전단은 가압기 노즐 제작 시 Alloy 82/182로 공장 용접되었다.

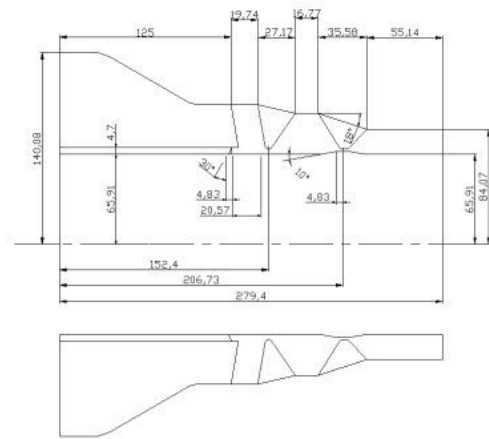


Fig. 1 Kori 3&4 Safety and Relief Nozzle

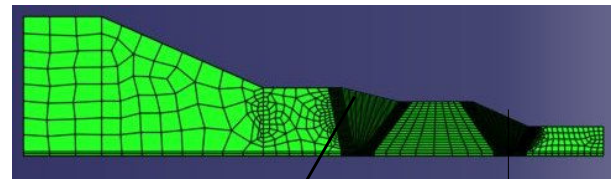
본 연구에서는 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 배관 연결용접부에 대해 2차원 유한요소 해석 모델을 작성하고 가압기 안전/방출 노즐과 안전단에 대해 용접 열전달해석 및 잔류응력해석을 수행한 후 안전단과 가압기 안전/방출 배관에 대해서 용접 열전달 해석 및 잔류응력해석을 수행하였다.

유한요소 열전달 해석의 경우 온도 의존적 열적 물성치 및 용융 비드 초기 온도 조건을 적

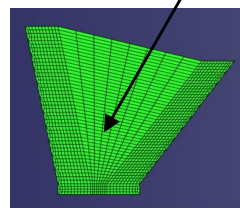
용 각 pass 간 bead 요소 재생, 입열, 냉각의 세 과정을 순차적 거칠 수 있도록 해석 단계를 구분하였다. 유한요소 응력해석의 경우 열전달 해석과 동일한 모델을 사용하였으며 온도 의존적 기계적 물성치, 기하학적인 구속조건 및 열적 시간 이력을 고려하여 용접잔류응력 분포를 예측하였다.

2.2 용접공정 해석 모델 및 방법

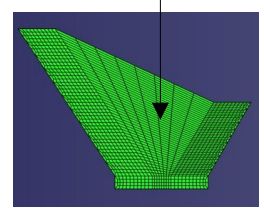
본 연구에서는 용접공정에 따른 비드 생성을 모사하기 위하여 비선형 열해석 및 응력해석 상용코드인 ABAQUS Ver. 6.8-1을 사용하여 용가재(filler metal)에 의한 각 패스별 용접금속생성이 재현될 수 있도록 하였다. 2차원 축대칭 유한요소해석 모델은 Fig. 2에 제시하였다. 열해석 및 응력해석 모두 1차 요소(DCAX4, CAX4)를 적용하였다.



(a) Full Part of Nozzle to Pipe



(a) Alloy 82/182 Weld



(b) ER-308L Weld

Fig. 2 Finite Analysis Model for Welds

고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 배관 연결 용접부에 사용된 유한요소 해석 모델의 경우 노즐과 안전단 사이의 Alloy 82/182 용접부는 12개 pass로, 안전단과 배관 사이의 ER-308L 용접부는 7개 pass로 구현하고, pass들의 열원을 모사하기 위하여 체적 열유속(body heat flux)을 적용하였다. 용접부 열전달해석에 사용된 열적 경계조건으로 용착이 진행됨에 따라 대기와 접하

는 용착금속 및 공작물 표면에서 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 용융비드 초기온도는 용융점 온도 이상인 1800℃를 적용하였다. 입열 시간은 비드별 용접 속도의 역수를 고려하고, 비드별 요소의 최고 온도가 2200℃(4000°F)를 초과하지 않도록 하였다. 냉각 시간은 각 pass 만큼 용접하는데 걸리는 시간을 기본적으로 고려하고 비드별 최대층간온도(maximum interpass temperature)가 90℃(195°F)를 초과하지 않도록 하였다. 유한요소해석 모델이 2차원 축대칭이므로 입열량(heat input)은 단위 시간당 체적당 에너지를 고려하여 계산한 후 용접부 및 모재 경계부 온도 조건에 맞도록 수정하였다.

열전달 해석으로부터 얻어진 열적 시간이력(time history)은 응력해석을 위한 입력자료로 적용되어 배관 용접부의 기계적 해석 모델에 사용되었다. 해석에 사용된 경계조건은 가압기 안전/방출 노즐의 축방향 변위만을 구속하는 대칭경계조건을 사용하였다. 재료의 증분소성이론에 입각한 항복기준과 등방성경화효과를 고려한 탄소성 유한요소해석을 수행하여 용접 pass군의 용착에 따른 과도 열응력 및 냉각 후 잔류응력을 구하였다. 용접 pass의 용가재(filler metal)가 용착되는 동안 이미 용착된 pass에 생성되는 응력의 소둔(annealing) 효과도 고려하였다.

2.3 용접 잔류응력 해석

일반적으로 용접부의 입열량과 열전달 특성은 용접잔류응력에 많은 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에서는 우선적으로 용융비드의 입열 시 과입열(over heating)을 방지하기 위하여 비드별 요소의 최고온도가 2200℃(4000°F)까지 입열하고, 용접부 및 모재의 경계부 온도조건(약 1400℃)을 만족토록 열해석을 수행하였다. 동 방법을 적용하여 입열 시간을 0.3초인 경우와 0.1초인 두가지 경우에 대해서 용접해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단의 용접 후 용접부(51.8 ~ 53.8mm)에서 수축이 발생하는데, 노즐 축 길이방향 구속 조건만으로 인해서 내면 용접부에서 축방향 응력은 버터링과 노즐 경계부에서 최대 인장잔류응력(352MPa)이 발생하며, 이 지점에서 약 25mm 떨어진 노즐 측에서 최대 압축잔류응력(396MPa)이 발생한다. 원주방향 응력의 경우 용접 중심부에서 안전단 쪽으

로는 인장, 압축 및 인장 잔류응력이 발생하였으며, 노즐 및 버터링쪽으로는 모두 압축잔류응력이 발생하였다(Fig. 3 ~ Fig. 4 참조).

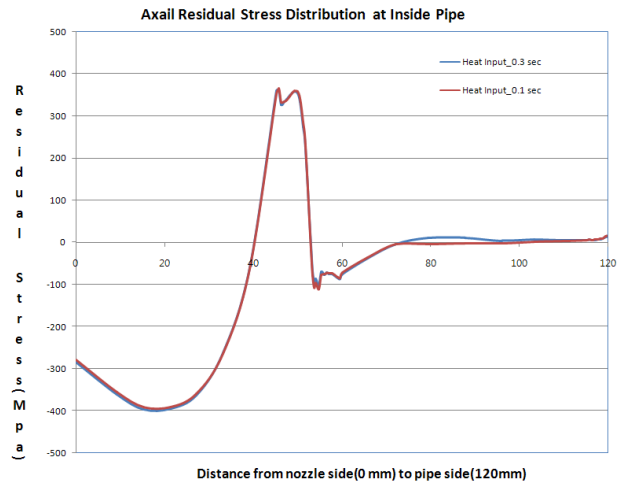


Fig. 3 Axial Residual Stress Distribution

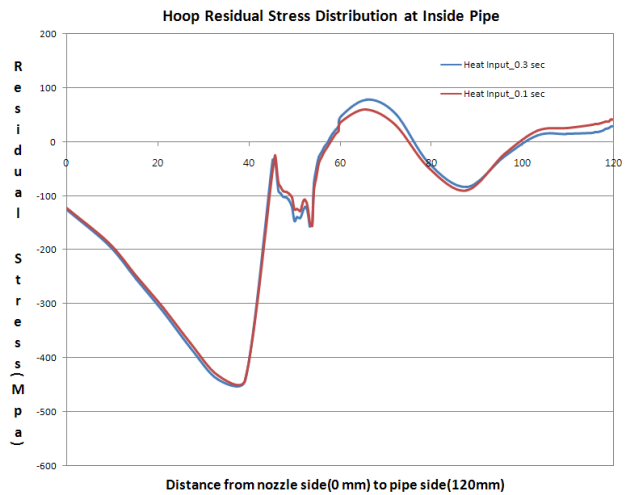


Fig. 4 Hoop Residual Stress Distribution

고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단 용접 후 수행된 안전단과 배관 용접으로 인한 노즐과 안전단의 내면에서의 축방향 최대 인장 응력은 0.3초 입열한 경우 206MPa, 0.1초 입열의 경우 238MPa로 인장응력의 값이 최대 42% 정도 감소하였다. 원주방향 최대 압축응력의 경우는 약 67% 정도 증가하였다(Fig. 5 ~ Fig. 6 참조).

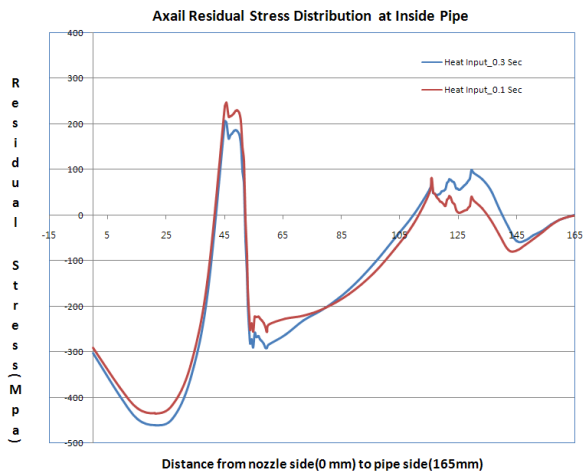


Fig. 5. Axial Residual Stress Distribution

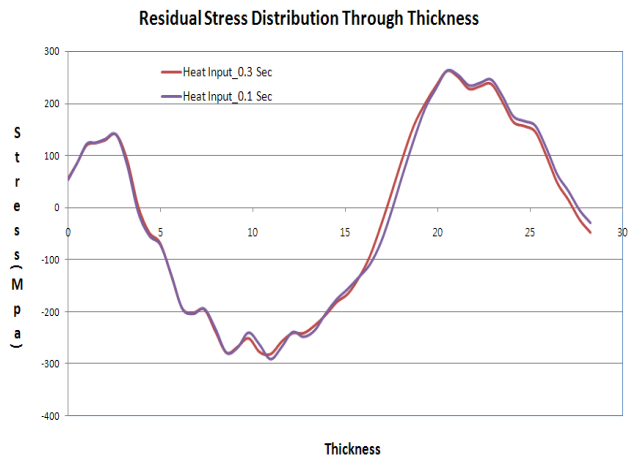


Fig. 7. Axial Residual Stress Distribution

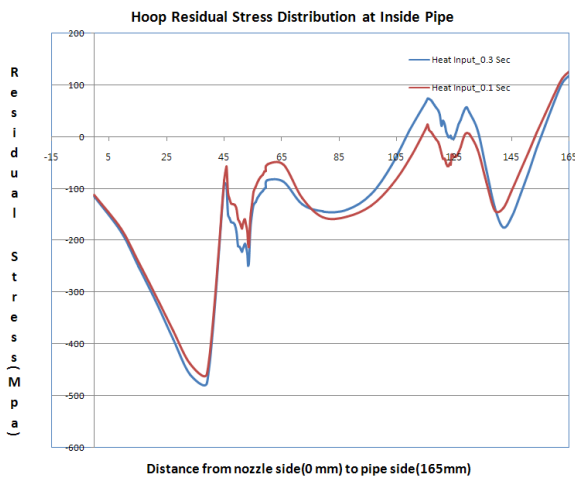


Fig. 6. Hoop Residual Stress Distribution

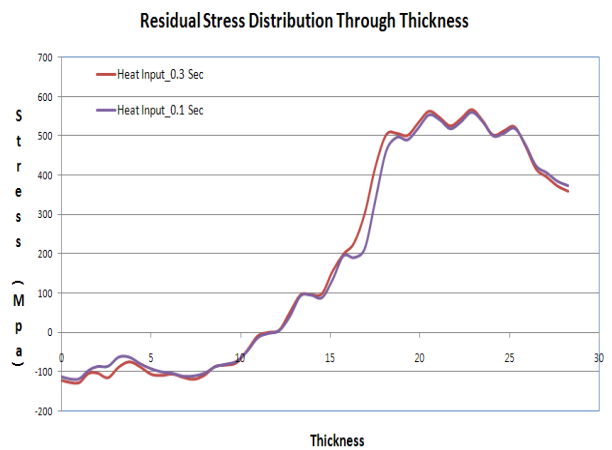


Fig. 8. Hoop Residual Stress Distribution

고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단의 용접 후 용접부 중심선에서 두께 방향을 따른 축방향 잔류응력의 경우 내면과 외면 근처에서는 인장 잔류응력이 발생하였으며 두께의 중심 영역에서는 압축잔류응력이 발생하였다. 그리고 원주방향 잔류응력의 경우에는 내면 근처에서는 압축 잔류응력을 외면에서는 인장잔류응력을 나타내었으며, 두께의 중심영역에서는 압축잔류응력에서 인장잔류응력으로 변화를 보여주었다 (Fig. 7 ~ Fig. 8 참조).

고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단 용접 후 수행된 안전단과 배관 용접으로 인한 용접부 중심선에서 두께 방향을 따른 축방향 잔류응력의 경우 내면에서는 압축잔류응력을 외면에서는 인장잔류응력을 발생하였으며 두께의 중심영역에서는 압축잔류응력에서 인장잔류응력으로의 변화를 보여주었다. 원주방향 잔류응력의 경우 내면근처에서는 압축잔류응력을 외면에서는 인장잔류응력을 나타내었다. (Fig. 9 ~ Fig. 10 참조).

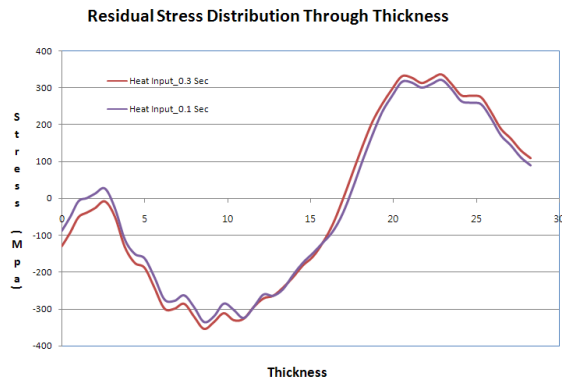


Fig. 9 Axial Residual Stress Distribution

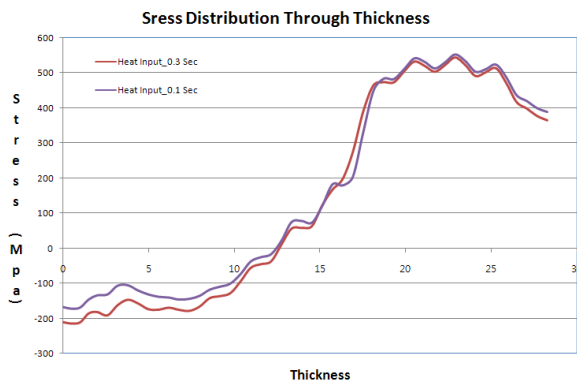


Fig. 10. Hoop Residual Stress Distribution

3. 결론

본 연구에서는 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단 용접부 그리고 안전단과 배관 용접부를 대상으로 유한요소해석법을 이용하여 비드별 요소 최고온도를 2200℃까지 입열하고, 용접부 및 모재의 경계부 온도조건이 약 1400℃를 유지토록 하면서 용접 비드별 입열시간 0.1초인 경우와 0.3초인 두가지 경우에 대해서 용접 열해석 및 잔류응력해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단 용접 후 내면 용접부에서 축방향 응력 및 잔류응력의 분포는 입열시간 0.1초인 경우와 0.3초

인 경우 거의 동일 또는 유사한 결과를 얻었으나 안전단과 배관 용접 후 내면 용접부에서의 축방향 최대응력은 최대 42%정도 감소하였으며, 0.3초 입열의 경우가 0.1초 입열의 경우보다 약 17%정도 크게 감소하였다.

(2) 고리3,4호기 가압기 안전/방출 노즐과 안전단 용접 후 용접부 중심에서 두께 방향을 따른 축방향 응력은 내면과 외면 근처에서 높은 인장응력을 나타내었으나, 안전단과 배관 용접 후 축방향 응력은 내면에서 약 130%정도 감소된 압축응력을 나타내었으며, 외면 근처에서의 인장응력의 값은 크게 변동이 없었다. 0.3초 입열의 경우가 0.1초 입열의 경우보다 내면에서의 인장응력 값은 최대 47% 크게 감소하였다.

참고문헌

- (1) USNRC Information Notice 00-17, Supplement 2, "Crack in Weld Area of Reactor Coolant System Hot Leg Piping at Virgil C. Summer", Feb. 28, 01, USNRC
- (2) Shim Yong-rae, Sept, 1993, "The development of Heat Input Model for weld residual stress analysis," Journal of KWS, Vol. 11, No. 3.
- (3) M.R. Goldthorpe and P.J. Bouchard, 2000, "Finite Element Analysis of Multi-Pass elding Residual Stresses Using Mixed Hardening Material Properties," EPD/GEN/REP/0511/99, British Energy Generation Ltd., U.K.
- (4) B. Brickstad and B.L. Josefson, 1998, "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 11~25.
- (5) C.D. Elcoate, R.J. Dennis, P.J. Bouchard and M.C. Smith, 2005, "Three Dimensional Multi-Pass Repair Weld Simulations," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, pp. 244~257.
- (6) EPRI, 2007, "Materials Reliability Program: Advanced FEA Evaluation of Growth of

Postulated Circumferential PWSCC Flaws in
Pressurizer Nozzle Dissimilar Metal Welds,”
MRP-216, Rev. 1.

(7) ABAQUS/Standard User's Manual for
ABAQUS Standard Version 6.7, HIBBITT,
KARLSSON & SORENSEN, Inc., 2004.