

수압시험 및 운전조건이 가압기 안전노즐의 용접잔류응력에 미치는 영향 평가

이경수[†] · 이성호^{*} · 김완재^{**}

Effects of the Hydrostatic Test and the Operating Condition on Weld Residual Stress at a Safety Nozzle of the Pressurizer

Kyoung Soo Lee[†], Sung Ho Lee^{*} and Wan Jae Kim^{**}

(Received 29 December 2011, Revised 28 January 2012, Accepted 2 February 2012)

ABSTRACT

This paper presents the results of finite element analysis for the effects of hydrostatic test and operating condition on the weld residual stress at dissimilar metal weld of a pressurizer safety nozzle in a nuclear power plant. For the study, the weld residual stress at ambient condition was analyzed using ABAQUS in the first place. After the weld residual stress analysis, the hydrostatic test condition and operating condition was applied to the same model one after another. The weld residual stress was observed to change due to the successive hydrostatic test and operating condition. The axial residual stresses on inner surface of the dissimilar metal weld and HAZ region were decreased by hydrostatic test and operating condition, which gives beneficial effect on preventing primary water stress corrosion cracking.

Key Words : Residual stress(잔류응력), Dissimilar metal weld(이종금속용접), Hydrostatic test(수압시험)

1. 서론

가압경수로형 원자력발전소에서 원자로압력용기, 증기발생기, 가압기 등 주요기기의 재료는 구조용 탄소강으로 제작되고 이들 기기를 연결하는 배관은 탄소강 또는 스테인리스강으로 제작된다. 따라서 탄소강과 스테인리스강을 연결하는 용접부가 발생하게 되는데 이 부위를 용접하는 용접금속으로는 전통적으로 니켈 기저합금인 Alloy82와 Alloy182가 혼합적으로 사용되어 왔다.

최근 이 재료를 사용한 용접부에서 일차수 응력부

식 균열이 발생함에 따라 원인규명을 위한 다양한 연구가 시행되고 있다¹⁻⁵⁾. 기존의 연구는 주로 용접에 의해 형성되는 용접잔류응력의 크기 및 분포현상을 이해하기 위한 해석연구 및 측정연구에 집중되어 있었다. 그러나, 실제 운전 중인 발전소는 용접설치 이후 수압시험이 수행되고 고온, 고압의 환경에서 운전된다. 따라서 균열발생 원인 규명을 위해서는 실제 발전소 운전 환경조건에서의 응력상태 확인이 중요하다. 이에 본 논문에서는 가압경수로형 원전에서 운전온도가 가장 높아서 일차수응력부식균열 발생 가능성이 높은 가압기 안전노즐의 이종용접부를 대상으로 용접 잔류응력을 평가한 후, 이후 수압시험과 운전조건에 의해서 용접부의 응력이 어떻게 변화하는지를 유한요소 해석을 통해 고찰하고자 하였다.

† 책임저자, 회원, 한수원 중앙연구원
E-mail : leekys@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5174 FAX : (042)870-5688

* 한수원 중앙연구원

** 한전 전력연구원

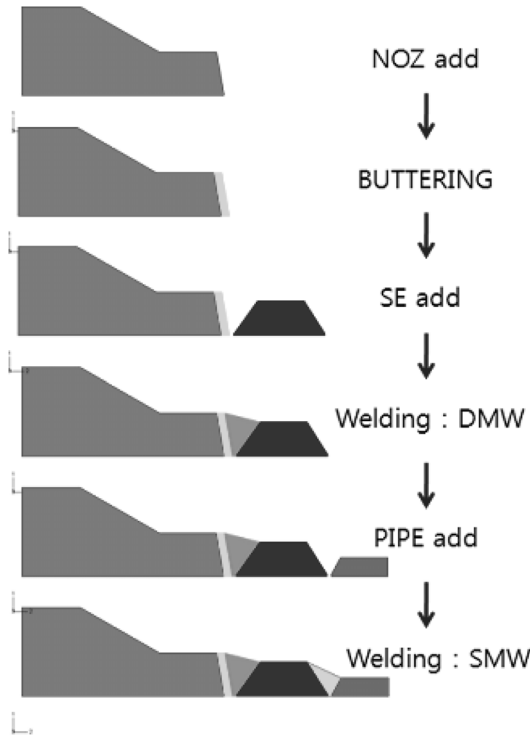


Fig. 5 Welding sequence

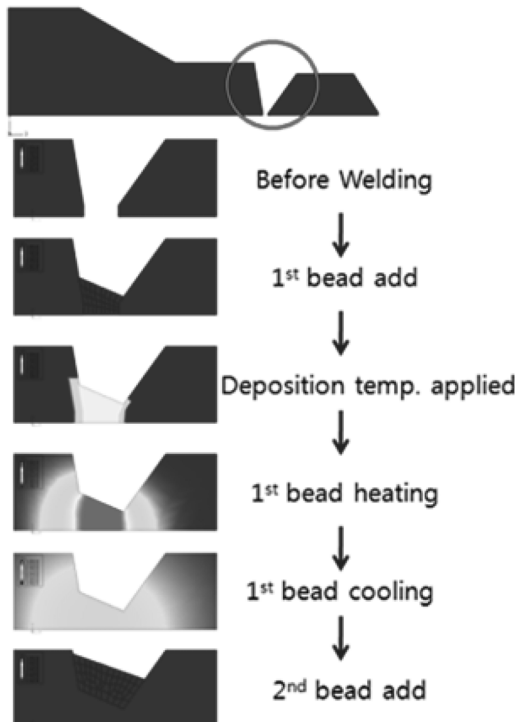


Fig. 6 Simulation of multi-pass welding

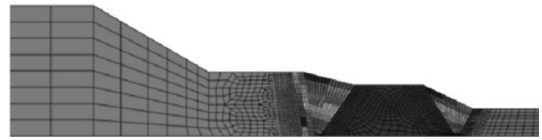


Fig. 7 Overall FE model for analysis

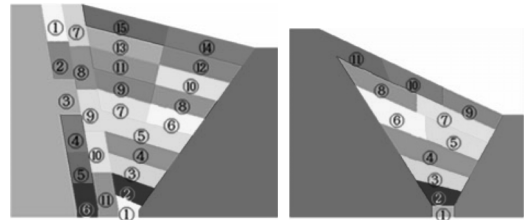


Fig. 8 FE model for welding section

어인 PATRAN, 해석은 ABAQUS를 사용하였다. Fig. 5에 모델링 과정을 나타내었다. 노즐제작공정에 따라서 탄소강 노즐에 버터링을 수행하고 버터링과 스테인리스강 안전단(SE)사이에서 이중용접(DMW)을 수행하며 이후 스테인리스강 안전단과 스테인리스강 배관 사이를 동중용접(SMW)하는 과정을 모사하였다. 버터링 부위는 형상과 재료물성만을 반영하고 버터링 용접해석은 수행하지 않으므로써 후열처리효과를 모사하였다.

Fig. 6은 다중용접을 해석하는 과정을 나타내며 먼저 용접비드를 형성하고 이어서 용접비드에 용접입열 조건에 따른 가열, 냉각을 수행하며 첫 번째 비드에 대한 해석이 완료되면 동일한 과정을 따라 후속 비드에 대한 해석을 수행한다. Fig. 7은 완성된 전체 모델이고, Fig. 8는 용접부를 확대한 것이다. 용접부에 대한 모델링은 실제 용접부의 용접비드수와 형상에 가깝게 수행하였다. 버터링 부위는 11층, 이중용접부는 15층, 동중용접부는 11층의 비드를 적층하였다.

3.2 해석 조건

열해석에는 8절점 축대칭 모델인 DCAX8을, 응력해석에는 CAX8R 모델을 사용하였다. 용접금속의 부착은 ABAQUS의 모델변경(Model Change) 기능을 사용하여 모사하였다. 열해석시 2,000°C의 온도로 용접금속이 용착된 후 용착부위로부터 주변으로 열유속이 가해져 현실적인 용융부 형상이 형성되도록 설정하였고, 노즐 및 안전단 등의 외부 표면을 자연대류 조건(20°C, 10 W/m²C)을 적용하였다. 용접금속이 용착된 후 3,600초가 경과한 후 후속 비드가 용착되도록 하였



Fig. 9 Constraint condition

다. 용접이 수행되는 동안의 구속조건은 Fig. 9와 같다. 노즐 쪽은 축방향 및 반경방향을 완전구속하였고 안전단 쪽은 첫번째 비드 용접시만 축방향으로 구속하고 첫 번째 비드 용접이 끝나면 노즐과 안전단이 연결된 상태이므로 안전단측 구속은 해제하였다. 동종 용접부에도 동일한 조건을 적용하였다. 응력해석은 온도해석결과를 바탕으로 수행하였고 등방경화(isotropic hardening) 구성방정식을 적용하였다. 어닐링 온도는 SA508은 1,501℃, Alloy 82/182는 1,454℃, F316/TP304는 1,460℃를 적용하였다. 용접해석을 수행한 후, 동일한 모델에 수압시험조건과 운전조건을 적용하여 반복해석을 수행하였다. 수압시험과 운전상태의 구속조건으로서 노즐측 끝단은 구속상태를, 배관측 끝단은 End-cap 하중조건을 적용하였다. 정상운전조건 부가시 상온에서 정상운전온도까지 도달하는 시간은 48시간을 적용하였다.

3.3 해석 결과

Fig. 10과 11에 이중용접과 동종용접을 수행한 후의 축응력과 원주응력의 분포를 나타내었다. 이중용접만 수행된 상태에서는 축응력은 두께 내부에 비교적 강한 압축응력이 형성되고 내표면과 외표면 근처에서

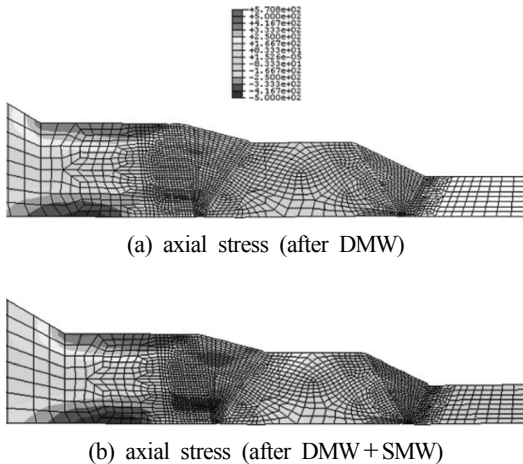


Fig. 10 Axial stress after welding

인장상태를 나타내고, 원주응력은 내표면 근처에서는 압축응력상태이고 외표면으로 갈수록 인장상태가 증

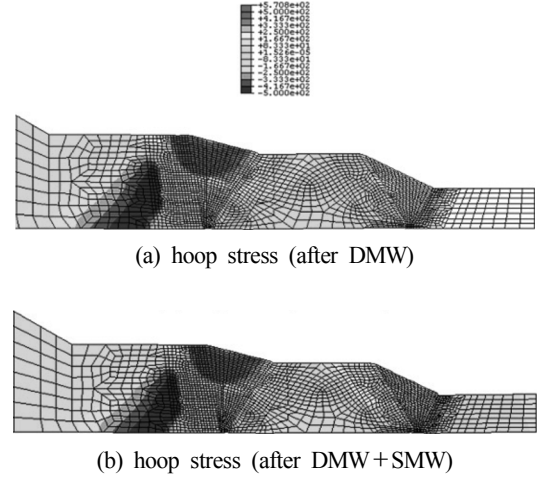


Fig. 11 Hoop stress after welding

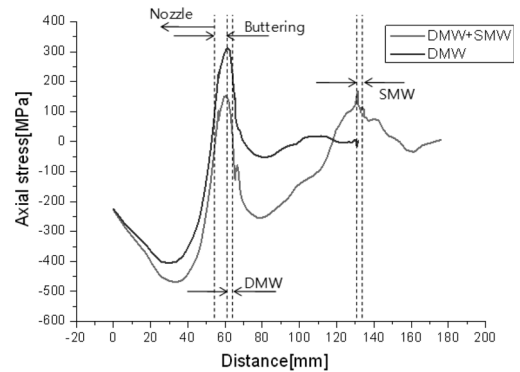


Fig. 12 Axial stress on inner surface after welding

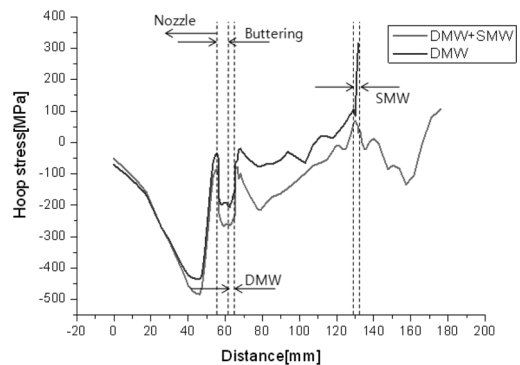


Fig. 13 Hoop stress on inner surface after welding

가하는 경향을 보였다. 동중용접이 수행된 후에는 이중용접부 내표면 근처에서 특히 동중용접위치에 가까운 안전단 모재 및 열영향부에서 더 큰 압축응력이 형성되었다. 즉, 인접한 동중용접에 의해 이중용접부의 응력상태가 변화하는 것을 알 수 있다.

고온의 냉각재와 접촉하고 있어서 일차수응력부식 발생 가능성이 높은 내표면의 응력상태를 Fig. 12와 13에 나타내었다. Fig. 12는 내표면에서의 축응력이고 Fig. 13은 동일 위치에서의 원주응력이다. Fig. 12에서 이중용접만 수행된 상태에서는 이중용접부에서의 최대인장응력값이 300 MPa이었으나 동중용접이 수행된 후에는 150 MPa로 감소하였다. Fig. 13에서 원주응력은 이중용접부에서 이중용접만 수행된 상태에서는 최대 -200 MPa, 동중용접후에는 -260 MPa의 압축상태를 나타내었다.

Fig. 14 및 15는 용접잔류응력이 형성되어 있는 상태에서 수압시험과 운전조건을 부가한 후의 전 두께에서의 축응력과 원주응력 분포이다. Fig. 14는 수압시험이 종료된 후의 응력분포이고, Fig. 15는 정상운전상태에서의 응력분포이다. 이에 의하면 수압시험 중에는 응력이완현상이 나타나나 수압시험완료 후 감압상태에서는 수압시험 이전과 응력상태에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 운전조건하에서는 노즐 내외면의 전체적인 응력차이가 감소하고 균등해지는 현상이 나타났다. 압력보다는 온도에 의한 응력변화가 지

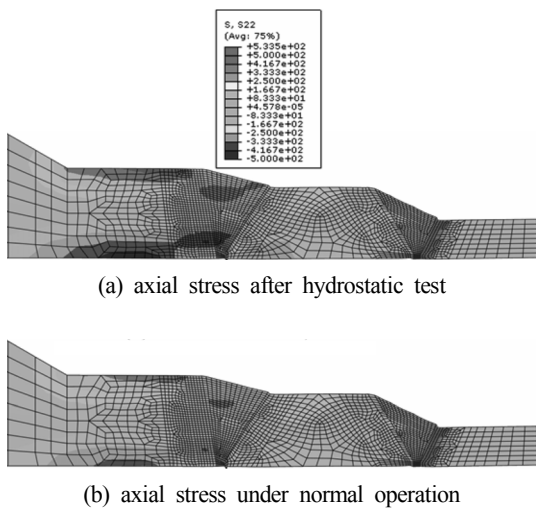


Fig. 14 Axial stress after hydrostatic test and at normal operation

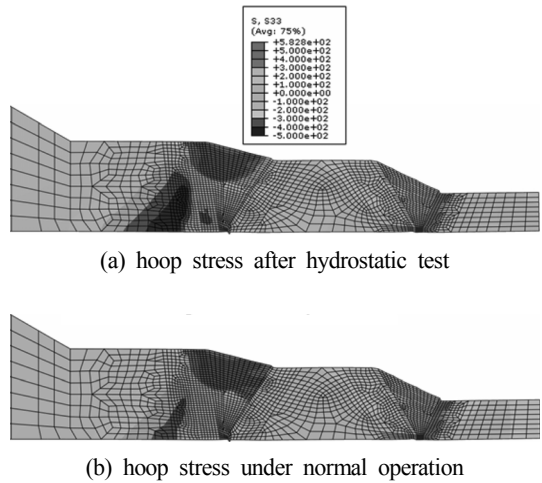


Fig. 15 Hoop stress after hydrostatic test and at normal operation

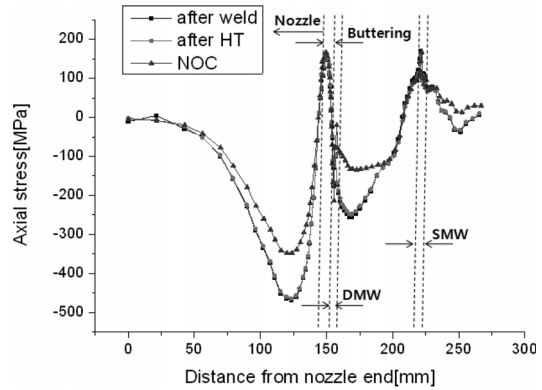


Fig. 16 Axial stress change on the inner surface

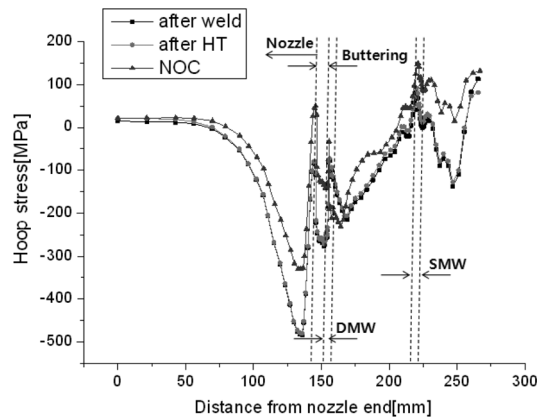


Fig. 17 Hoop stress change on the inner surface

배적인 것으로 판단된다.

균열발생가능성이 높은 내표면에서의 응력상태를 용접후, 수압시험(HT)후, 정상운전 조건(NOC)의 각 상태를 함께 나타내면 Fig. 16 및 17과 같다. Fig. 16은 노즐 내표면에서의 축응력 분포이고, Fig. 17은 원주응력 분포이다. Fig. 16에 의하면 이중용접부 주변 내표면에서는 수압시험 및 정상운전조건에 의한 축방향 응력변화는 미미하였다. 용접잔류응력이 거의 그대로 유지되는 현상을 보였으며 정상운전 중 최대인장응력은 166 MPa이었다. Fig. 17에 의하면 이중용접부 주변 내표면에서의 원주응력은 수압시험에 의해서는 큰 변화를 나타내지 않았고 운전조건에서 다소 압축상태가 완화되는 현상을 나타내었다. 정상운전 중 최대원주응력은 버터링경계부위에서 50 MPa로서 축방향응력보다 작은 값을 나타내었다.

4. 결론

가압기 안전노즐 용접부에 대한 잔류응력해석 결과 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 이중용접만 수행된 상태에서 용접부의 축방향응력은 두께내부에는 비교적 강한 압축응력이 형성되고 내표면과 외표면 근처에서 인장상태를 나타낸다.
2. 인접한 동중용접에 의해서 이중용접부 내표면의 인장응력이 크게 감소한다.
3. 수압시험 동안에는 인장응력이 다소 감소하나 감압 후에는 수압시험 이전과 큰 변화를 나타내지 않는다.
4. 상온에서 정상출력 운전조건으로의 가열에 의해 가압기 안전노즐 전 두께에 걸쳐 응력이 균등한 방향으로 재분포된다.

5. 정상운전조건에서 용접부 내표면에서 축방향 인장응력이 원주응력에 비해 크기 때문에 축균열보다는 원주균열 발생가능성이 더 높다.

6. 내부 보수용접 등 인장잔류응력 상승요인이 없다면 정상운전 중 용접부 내면의 응력값은 균열을 발생시키에는 충분하지 않은 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Lee, K. S., Park, C. Y., Kim, H. D., Kim, J. S., Park, J. H., 2007, "Preliminary Evaluation of Primary Water Stress Corrosion Cracking Initiation Potential on Small Penetration Nozzle Welds by Residual Stress Analysis", *Trans. of the KPVP*, Vol. 3, No. 2, pp. 101-108K.
2. Lee, K. S., Park, C. Y., Kim, T. R., Kim, M. W., Park, J. H., "Characteristics of Weld Residual Stress in Butt Welding between SA508 and Type 316L Plates", *KPVP 2008 Proceedings*, pp. 261-262.
3. Lee, K. S., Kim, W. J., Lee, J. K., Park, C. Y., Yang, J. S. Kim, T. R., Park, J. H., 2009, "Finite Element Analysis and Measurement for Residual Stress of Dissimilar Metal Weld in Pressurizer Safety Nozzle Mockup", *Journal of JMST*, Vol. 23, pp. 1-8.
4. O'Regan P., 2004, "Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds", EPRI.
5. Dong P., et al, 1998, "Residual Stress Analysis of a Multi-pass Girth Weld", *ASME PVP*, Vol. 373, pp. 421-431.
6. Prager M., "MPC Material Property Database for ASME Div. II Rewrite", 2001-2003.