

소성변형에 의한 배관 용접부의 잔류응력 개선 방법

A Method of Residual Stress Improvement by Plastic Deformation in the Pipe Welding Zone

최상훈(Sang-Hoon Choi)^{1†}, 왕지남(Ji-Nam Wang)²

¹한전KPS주식회사 기술연구원, ²아주대학교 산업공학과

¹Technical Research & Development Institute, KPS, Seongnam, 463-726, Republic of Korea

²Department of Industrial Engineering, Ajou University, Suwon, 443-947, Republic of Korea

(Received June 19, 2013; revision received July 30, 2013)

Abstract The main components, such as a reactor vessel, in commercial nuclear power plants have been welded to pipes with dissimilar metal in which Primary Water Corrosion Cracking (PWSCC) has been occurred. PWSCC has become a worldwide issue recently. This paper addresses the results of experimental and numerical analysis to prevent PWSCC by changing the stress profile that is tensile stress to compressive stress at interesting regions with plastic deformation generated by mechanical pressure. Based on the results of experimental and numerical analysis with a 6 inch pipe and dissimilar metal welded pipes, compressive stress 68~206 Mpa is generated at all locations of inner surface in the heat affected zone.

Key words Residual Stress(잔류응력), Dissimilar Metal Weld(이종금속 용접), Stress Corrosion Cracking(응력부식 균열), Plastic Deformation(소성변형)

† Corresponding author, E-mail: shchoi2@kps.co.kr

기호설명

q	: 입열량 [J/s/mm ²]
E	: 용접효율 [%]
A	: 용접비드면적 [mm ²]
P	: 용접전력 [w]
t	: 용접시간 [Sec.]
L	: 용접길이 [mm]
S	: 용접속도 [mm/s]

1. 서 론

가압경수로형 원전의 경우 증기를 생산하는 NSSS¹⁾ 측의 주요 설비는 원자로용기, 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등으로 구성되어있다. 압력 경계부인 원자로용기의 재료는 중성자 조사 취화에 비교적 강하고 용접성이 좋으며 용접 결함발생률이 낮은 SA508 cl3 저탄소강으로 제작하고 원자로냉각재(1차수)와 접촉하는 내부 표면을 스테인레스강으로 클래딩 용접 하였다. 주요 기기들을 연결하는 주배관의 재료는 제작사에 따라 다르며 크게 두 가지로 분류된다. 강도와 내

식성이 강한 오스테나이트계 스테인레스강을 사용한 웨스팅하우스형과 용접에 의해 크롬탄화물이 발생하지 않고 강도가 우수하며 비용이 상대적으로 저렴한 저탄소강을 사용한 CE형으로 나눌 수 있다. 따라서 CE형은 주요 설비와 주배관의 재료가 동종이어서 배관의 연결부는 동종 용접이 되어있고, 웨스팅하우스형은 이종금속용접이 이루어졌다. 이종금속 용접을 위해 사용하는 용가재는 운전온도에서 저탄소강과 스테인레스강의 상이한 재료 물성치를 완충하고 내식성과 강도가 우수한 Alloy 82/182이며 원자로 헤드와 하부의 소형 관통관, 증기발생기 전열관 등은 모재로써 Alloy 600 재료를 광범위하게 사용했다. 그런데 2000년 10월 미국 원전 V.C. Summer 원자로 A loop 고온관의 이종금속용접부에서 관통결함으로 누설이 발생했으며 B와 C Loop 고온관에서도 결함이 검출되었다. 그 이후 전 세계 원전에서 Alloy 600 재료를 사용한 부위에서 결함으로 인한 누설이 다수 발생하였다. 결함의 원인은 재료적인 문제, 환경적 요소, 인장잔류응력 등 세 가지 요소가 동시에 작용했을 때 발생하는 1차 수응력부식 균열(PWSCC)²⁾로 밝혀졌다. 원전 규제 기관은 원전의

1) NSSS : Nuclear Steam Supply System

2) PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking.

안정성을 확보하기 위하여 EPRI MRP³⁾-139와 ASME Code Case 770을 기준으로 이중금속용접부에 대해 짧은 주기의 가동중검사를 요구하고 PWSCC를 억제하는 예방정비를 수행하도록 유도하고 있다. 국내 원전에서도 증기발생기 배수 배관 용접부 등 PWSCC 결함이 발견된 사례가 있으며 예방조치를 하지 않을 경우 경년 열화로 인해 앞으로 보다 많은 PWSCC가 발생할 것으로 예상된다.

현재 국내 원전에서는 Alloy 600계열 이중금속용접부에서의 PWSCC 발생을 예방하기 위한 방법의 일환으로 가압기 노즐부에 대한 덧씌움용접(Weld Overlay)을 완료하였다. 해외 원전의 경우 맞대기 이중금속용접부에서의 PWSCC를 예방하기 위한 방법으로 덧씌움용접 방법과 기계적가압 방법(MSIP⁴⁾)을 적용하고 있으며, 현재까지 원자로 고온관과 저온관의 경우에는 MSIP 만이 적용되었다. 기계적 가압에 의해 잔류응력을 개선하는 기술은 PWSCC를 유발하는 환경적 요소, 재료적 문제, 잔류응력 중 인장응력을 압축응력으로 변환하여 PWSCC를 예방하고 미소 결함의 성장을 억제하는 기술이다. 본 기술은 Weld Overlay, Weld Inlay 등과 같은 기술에 비해 공정 시간이 짧은 장점을 가지고 있으며, 미국내 원전에서 1986년에 최초 적용 후 다수의 용접부에 적용되고 있는 기술이다.⁽¹⁾

본 연구는 국내에서 최초로 기계적 가압장치를 개발하여 소성변형에 의한 배관 잔류응력 개선기술의 효용성을 실험한 것으로써, 6 inch 배관에 스트레인게이지를 부착한 다음 가압력에 따른 스트레인량을 측정하여 실험을 수행하였다. 실험결과는 해석적 방법으로 평가한 결과와의 비교 분석을 통해 잔류응력 개선효과를 확인하였으며, 이를 근거로 용접 배관 두께 방향의 응력 분포를 예측하였다. 탄소강 배관과 이중금속 용접배관 두 종류의 배관에 대하여 실험한 결과 위치별 차이는 있지만 상, 하, 좌, 우 모든 방향에서 68~206 Mpa의 압축잔류응력이 나타났으며, 해석적 방법에서도 최대 206 Mpa의 압축잔류응력이 두배관 모두에서 도출되었다.

2. 이중금속 용접부 특징

웨스팅하우스형 원전의 이중금속용접부 형상은 Fig. 1과 같이 노즐-버터링-이중금속용접부-안전단-동중금속용접-주배관으로 복잡한 형상을 가지고 있다. 원자로 노즐의 재료인 SA508의 경우 용접을 하면 취성이 커지기 때문에 반드시 후열처리를 수행해야 하지만 안전단과 주배관의 재료인 오스트나이트계 스테인레스

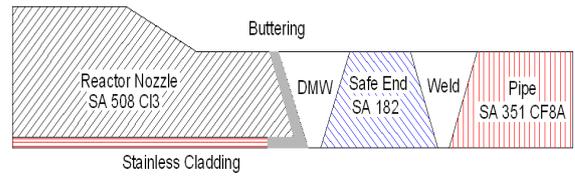


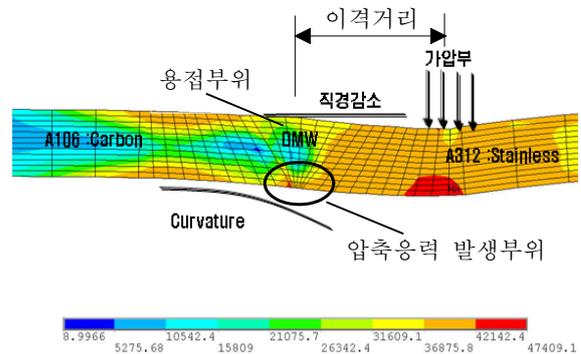
Fig. 1 RV Nozzle dissimilar metal welding.

강은 450℃~850℃ 온도 범위에서 크롬 탄화물(Cr₂₃C₆)이 생성되어 내식성이 좋은 Cr이 석출되면서 내식성을 잃게 되므로 SA508 재료와 같은 조건으로 후열처리를 할 수 없다. 노즐부 저탄소강과 안전단 스테인레스강을 용접 후 열처리 문제를 해결하기 위해 노즐부에 ASME Code Sec XI QW-283에서 요구하는 최소 두께 3/16 인치로 버터링 육성용접을 하고 원자로 압력 용기를 열처리 한다.⁽³⁾ 버터링은 맞대기 용접 시, 용접 입열량으로 인해 열영향이 모재에 미치지 않게 하므로써 열영향부가 노즐부 모재가 아닌 Alloy 600 재료인 버터링 부위가 된다. 안전단을 제작공장에서 Alloy 600 용가재인 ENiCrFe-3, ERNiCr-3 등으로 원자로 노즐과 용접한 후 원자료를 현장에 설치한 다음 주배관과 안전단에 동중용접을 수행하게 된다. 따라서 버터링 용접부는 맞대기 용접으로 인해 많은 인장잔류응력을 가지고 있다.

3. 배관 소성변형 실험

3.1 소성변형에 의한 잔류응력 개선 개념

1차수와 접촉하는 이중금속용접부와 열영향부의 내면에 존재하는 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 변환시키는 것이 소성변형에 의한 잔류응력 개선 기술의 목적이다. 이를 위해 용접부에서 일정거리를 이격하여 기계적으로 가압하고 소성변형을 시키면 Fig. 2와 같이 배관 직경이 감소하게 된다. 이로 인해 배관 축방



* Distance : Distance from the center of welding zone to the center of pressure zone.

Fig. 2 Principle of mechanical pressurization.

3) MRP : Material Reliability Program.

4) MSIP : Mechanical Stress Improvement Process.

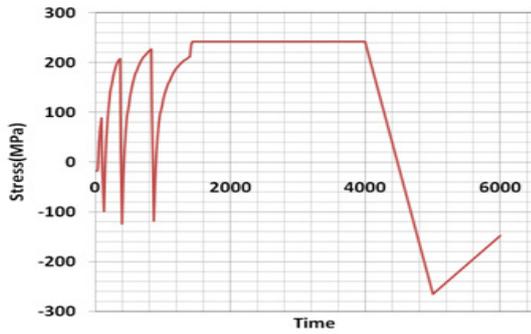


Fig. 3 Stress at thermal effect zone.

향으로 곡률반경이 발생되고 배관용접부(DMW) 내면에는 압축응력, 외면에는 인장응력이 발생하게 된다. Fig. 3의 그래프는 열영향부 노드에서 시간별 축방향 응력을 보여준다. 4개층으로 맞대기 용접을 하면 인장, 압축이 반복적으로 발생하다가 용접완료 후 상온상태에서 227 Mpa의 큰 인장잔류응력이 발생된다. 기계적 가압장치를 통해 가압하면 -275 Mpa 응력이 발생하고 가압력을 제거했을 때 최종적으로 -115 Mpa 압축응력이 발생함을 알 수 있다.

3.2 소성변형 실험 방법

배관 소성변형을 위한 기계적 가압장치를 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 개발하였고, 시스템은 유압 발생부, 기계적 가압 장치, 제어시스템, DAQ(Data Acquisition) 시스템으로 구성된다. 상하부에 설치된 압축링이 배관을 가압하고 가압력과 변위량이 실시간으로 모니터링 되도록 하였다. 실험은 A106 GrB 6inch Sch120의 탄소강 배관에 대하여, 그리고 A106 GrB와 A312 TP304 배관을 309L 용가재로 맞대기 용접한 배관 등 두 종류에 대하여 수행하였으며, 방법은 배관시편에 90도 간격으로 스트레인게이지 4개를 부착한 후 기계적 가압장치에 장착하여 가압하고 배관 내부의 축방향과 원주방향의 스트레인량을 실시간으로 측정하였다.

소성변형에 영향을 미치는 인자는 가압력과 가압폭, 스트레인게이지 부착점(용접부)과 가압부까지의 이격거리 등이며, 이 3가지 인자들을 다양하게 적용함으로써 배관 내부에 최대의 압축응력이 발생할 수 있는 최적 변수를 찾았다.

3.3 탄소강 배관 실험 결과

Fig. 6은 탄소강 배관 가압부에서 소성변형이 발생되어 배관의 축방향으로 곡률이 생성됨으로써 발생하는 소성 스트레인을 보여준다. 가압력 400 kN에서 배

관의 모든 위치에 압축잔류응력이 발생했으며, 500 kN에서는 보다 더 큰 206 Mpa의 압축응력이 발생되었다.

3.4 용접 배관 실험 결과

Fig. 7은 탄소강과 스테인레스강 배관을 309L 용가재로 용접한 배관 시편에 기계적 가압장치를 적용한 것으로써 가압부 중앙으로부터 38 mm 이격된 부위의 소성 스트레인을 보여준다. 부위별 스트레인량 차이는



Fig. 4 Mechanical pressure apparatus.

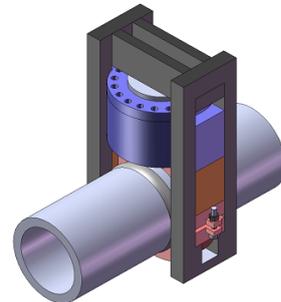


Fig. 5 Assembly of pressure apparatus and pipe.

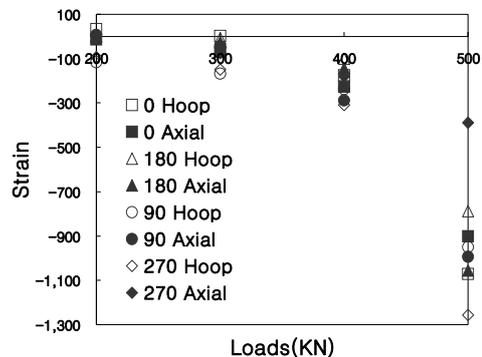


Fig. 6 Stress of carbon steel according to pressure force.

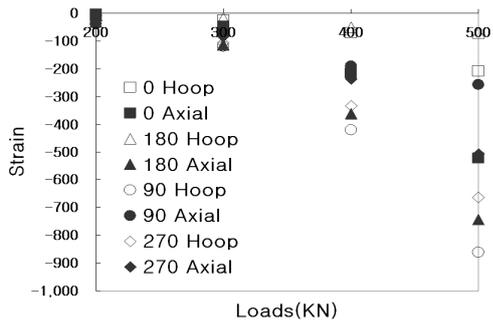


Fig. 7 Stress of dissimilar metal welding according to pressure force.

있지만 모든 부위에서 68~172 Mpa 정도의 압축잔류응력이 발생되었다.

4. 유한요소 해석

4.1 경계조건

유한요소 해석은 상용 코드인 ANSYS APDL 13으로 수행하였다.⁽⁴⁾ 기계적 가압장치의 하중 조건을 해석 시에 반영하기 위해 3D 모델과 8개 노드와 3개의 자유도, 1차 형상함수를 갖는 Solid 185 요소를 사용하였다. 용접잔류응력 해석은 2D-Axisymmetric 조건으로 해석을 수행하였으며, 열해석시에는 Plane 55, 구조해석시에는 Plane 42 요소를 사용하였다. 두 요소는 모두 4개의 노드와 1차 형상함수를 갖는다. 열원 모델은 아래 식과 같이 시간에 따라 열속(Heat Flux, q)이 변하도록 부여하였다. 여기서 E는 효율, A는 비드 면적, P는 용접전력, t는 용접시간, L은 용접길이, S는 용접속도이다. 이 모델을 이용하여 EPRI MRP-317에서 제시한 용접변수 데이터와의 비교를 통해서 열해석 모델의 적용성을 검증하였다.⁽²⁾

$$Body\ Heat\ Flux = \sqrt{\frac{3}{\pi}} \times \frac{EP}{A} e^{\frac{3t^2}{L^2}}$$

4.2 탄소강 배관 해석 결과

탄소강에 기계적 시험장치를 적용한 경우와 동일한 조건으로 해석한 결과로써 Fig. 8과 같이 배관 내면에서의 응력분포를 보여주고 있다. 배관 상·하부의 응력과 좌·우측의 응력분포가 다르게 나타났으며, 상·하부에서는 최대 206 Mpa, 좌·우측에서는 최대 137 Mpa 정도의 압축응력이 발생하였다. 가압부 중앙에서의 이격거리 29.21~48.26 mm에서는 모든 위치에서 압축잔류응력이 발생하였다.

4.3 용접배관 해석 결과

탄소강과 스테인레스강 배관을 용접한 시편에 기계적 가압장치를 적용한 조건과 동일한 조건으로 해석하였으며 응력분포는 Fig 9와 같다. 소성변형을 하기 전 맞대기 용접 후에는 배관 내부표면(Fig. 9(a))과 두께 방향(Fig. 9(b))응력분포에서는 내부에 인장 응력이 발생하며 외부로 갈수록 인장응력이 감소되는 것을 볼 수 있다. 그러나 기계적 가압장치를 적용한 후에는 배관 내부에 압축응력이 발생하였으며, 배관 두께의 15% 이내까지 압축응력이 발생하였다. 특히 Fig. 9(b)에서

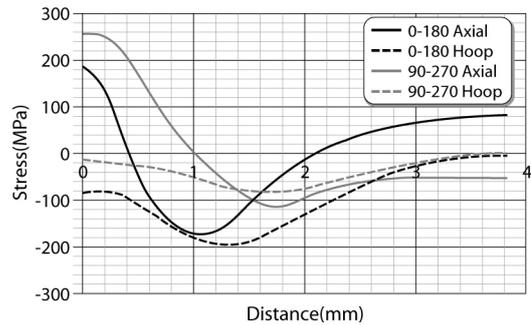
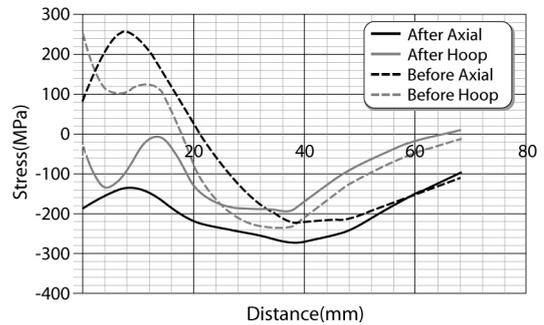
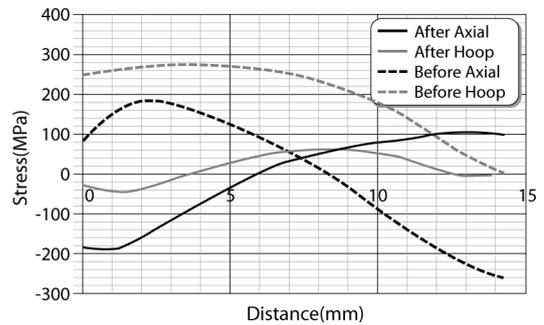


Fig. 8 Stress at inner surface of carbon steel pipe.



(a) Stress at inner surface of pipe.



(b) Stress at thickness direction.

Fig. 9 Stress of dissimilar metal welding.

보는 바와 같이 축방향의 경우는 약 206 Mpa의 높은 압축응력이 배관 내부에 발생하여 기계적 가압장치 적용 전후의 뚜렷한 압력 변화 현상을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구는 맞대기 용접시 발생하는 배관 내부에서의 인장잔류응력을 압축응력으로 변환하기 위한 방법 중에 하나인 기계적 가압에 의한 배관 소성변형 방법의 효용성을 실험적 방법으로 확인하였다. 실험은 기계적 가압장치를 개발하고 최적의 가압변수를 찾아 수행하였다. 6 inch의 탄소강 배관과 이중금속 용접배관 두 종류의 배관에서 위치별 차이는 있지만 배관의 상, 하, 좌, 우 모든 방향에서 68~206 Mpa의 압축잔류응력이 나타났으며, 해석적 방법을 이용한 평가에서도 최대 200 Mpa의 압축잔류응력이 두 배관 모두에서 도출되었다. 가압조건에 따라 다르지만 배관 두께의 15% 이상까지 압축응력이 발생함으로써 배관 내부에 존재하는 미소 결함의 성장을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

국내 원전은 2010년 초반부터 증기발생기 배수 노즐을 시작으로 원자로 벤트라인, 원자로 헤드 관통관,

증기발생기 전열관 등 Alloy 600 재료와 관련된 결함이 지속적으로 발견되고 있고 향후 증가될 것으로 예상된다. 운전 이력이 국내보다 10년 정도 많은 미국과 일본 원전의 손상 양상을 유사하게 따라가고 있는 것으로 볼 때, 이중금속용접부의 정비기술을 확보하는 것은 매우 중요하고 시급한 일이라고 판단된다. 따라서 본 연구가 배관 소성변형에 의한 이중금속 용접부의 잔류응력을 개선하는 정비 시스템을 구축하는데 크게 기여할 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Findlaan, S., 2004, MRP : Mechanical Stress Improvement Process Implementation and Performance Experience for PWR Application, EPRI, pp. 5-1.
2. Crooker, P., 2011, MRP : Welding Residual Stress Dissimilar Metal Butt-Weld Finite Element Modeling Handbook, EPRI, pp. 4-2.
3. ASME Code Sec. XI QW-283, 2010.
4. ANSYS 13.0 Tutorial.