'2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 배관 다층 용접부의 잔류응력 실험 및 해석
Experiment and analysis on the residual stress for the multipass weld of the pipe in Liquid Metal Reactor

김석훈,이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구덕진동 150

요 약

액체금속로의 배관에서 316L 스텐레스강의 다층용접부는 많이 이용되어진다. 용접과정과 이에따른 빠른 냉각과정에 의한 국부적인 가열에 의해 잔류응력은 용접된 배관의 용접부에서 발생된다. 이번연구에서는 유한요소법을 이용한 스텐레스강 316L 배관에 대한 TIG 용접 동안의 잔류응력을 계산하였다. 또한 표면 및 두께에 대한 잔류응력이 중성자 회절법에 의해 하나로의 고분해능 중성자 분말 회절장치에서 측정되었다. 측정된 시편은 직경 114 mm 로써 ANSI 4inch schedule 80 배관이다. 실험자료와 유한요소법에 의한 계산결과가 비교되고 토의되었다.

Abstract

Multipass welds of the 316L stainless steel have been widely employed in the pipes of Liquid Metal Reactor. Owing to localized heating by the welding process and subsequent rapid cooling, residual stresses arise in the welds of the welded pipes. In this study, we calculated the residual stresses during TIG welding in the 316L stainless steel pipe using finite element method. Also, the surface and through thickness residual stresses were measured by HRPD(High Resolution Powder Diffractometer) in HANARO Reactor. The measured specimen is ANSI pipe of the 114 mm diameter(4inch schedule 80). The experimental data and the calculated results by finite element method were compared and discussed.

1. 서 론

액체금속로는 높은 신뢰도를 요구하는 설계 필요조건과 용접특성을 가지고 있다. 시스템을 구성하는 주요한 구성기기는 원자로 용기, 중간 열 교환기, 증기 발생기, 소듐 배관 등이다. 이러한 구성기기의 용접 특성은 많이 연구되어 왔고 액체 금속로 설계의 필요한 사항이다. 액체 금속로의 소듐 압력 경계의 건설을 위해 가장 많이 사용되는 재료는 오스테나이트 스텐레스 강이다. 화학 공정 및 석유 화학 시스템에서 많이 사용되고 있음에도 불구하고 스텐레스 강의 용접부에 대한 고온거동에 이용할 수 있는 자료는 별로 없는 실정이다. 따라서 용접구조물의 설계 및 제작시에 잔류응력 및 변형의 영향에 대한 평가가 필요하며 이러한 고려에 의해 건전한 용접 구조물을 유지할 수 있다.

용접과정은 일반적으로 접합부에서 재료를 용융점이상으로 상승시키는 이동 용접열원에의해 수행 되어진다. 용접후 온도분포는 높은 비선형을 갖는다. 가열과정의 용접부의 균일하지 않은 팽창과 냉각동안의 수축현상은 국부적인 소성변형을 발생시켜 잔류응력 분포를 형성한다. 그러한 용접부에서 잔류응력의 분포는 피로나 파괴에의한 손상의 해석시 고려되어야 한다. 용접 열흐름의 해석은 용접 아크에의한 열 생성, 대류에의한 열 손실, 경계조건 및 초기조건에 대한 열전도 문제를 포함한다. 용접부는 용접 열원에의해 용융 및 고체화의 물리적인 변화를 발생시키고 금속의 상변태, 과도열응력 및 열 변형의 생성을 경험한다. 용접 아크로부터 용접열원의 모델링은 온도분포, 냉각속도, 용융구역,

열영향구역 및 용접부의 강도 를 평가 하는데 중요한 요소이다(1). 현재의 구조물 제작에서 큰 부분의 접합에 다층용접이 사용된다. 1 층 및 2 층용접에 대한 잔류 응력의 예측은 유한요소해석을 사용하여 수행한 바 있다. 유사한 해석이 다층용접 의 각 패스에 적용될 수 있다. 그러나 용접패스의 수만큼 계산시간이 증가 하고 비선형 해석의 해가 잘 수렴하지 않기 때문에 해석의 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 액체 금속로의 배관 다층 용접부의 용접과정을 모사하고 응력해석을 수행하여 용접후의 응력분포를 정확히 예측하는것이다 이러한 해석결과는 잔류응력 문제와 관련된 구조물의 실험결과 와 비교자료로써 사용된다. 본논문에서는 한국원자력연구소의 하나로에 설치된 고분해능 중성자 분말 회절장치(HRPD) 빔포트를 사용하여 중성자 빔의 장점인 높은 투과력을 이용하여 용접부위 내부의 특정한 위치의 직교성분의 잔류응력분포를 측정하였고 유한요소 해석결과와 비교 분석하였다.

2. 잔류응력 실험

2.1 시편형상 및 측정위치

액체금속로 소형배관 다층용접 배관의 실제형상은 그림1과 같다. 외경은114 mm 이고 벽 두께는8.56 mm 이다. 그림2는 배관의 다층용접부 단면의 V자형 groove를 나타내며 용접 접합부의 2차원 형상이다. 용접방법은 TIG 용접이며 용접모재는스텐레스강 316L 이고 용접봉은 스텐레스강 316L- TIG 용접용이며 모재에 비해 높은 항복강도를 나타낸다. 용접모재의 화학조성과 기계적 물성치는 표1과 표2에 나타나 있으며 용접봉의 물성치는 표3에 표시되었다. 용접봉의 물성치는 모재에 비하여 더높은 강도 값을 나타낸다. 그림3은 다층용접배관의 3차원 개념도이며 잔류응력을 측정한 위치에 대한 그림이다.

2.2 실험방법 및 장치

중성자 회절을 이용한 스텐레스 316L의 재질을 갖는 배관 용접 시편의 측정은 한국원자력 연구소 하나로에 설치되어있는 HRPD 빔 포트와 위치 민감형 검출장치를 이용하였다. 중성자 회절을 이용한 측정의 실험 방법은 크게 3가지 측정단계로 나눌 수 있다. 먼저 장비들의 위치와 슬릿의 크기 결정, 중성자 빔의 파장을 구하는 초기 calibration 측정, 두번째 응력을 받지않는 시험편에 대한 격자면 간 거리 d_o의 측정, 이 값은 실제 잔류응력 측정에 있어 기준값이 된다. 마지막으로 용접 시험편을 sample에 고정하고, 각 측정방향에 대한 측정으로 나누어 진다. 이 실험에서 이용된 중성자 빔은 Ni-powder를 이용하여, 각 결정면에 대한 회절각에서의 예비실험을 통해 측정시편에 대한 격자면, 회절각 및 파장을 결정하게된다. 그림4는 diffractometer의 센터축을 결정하기 위해 직경 2mm의 핀을 마운트 시키고 측정하는 장치이다. 그림의 오른 쪽에 위치한 입사빔을 고정시키고 시편의 홀더 아래부분에 있는 X-Y방향의 트랜스레이터와 왼쪽에 있는 디텍터를 조정하여 센터축을 결정하게 된다(2). 용접시편의 측정은 세방향 Normal, Transverse, Longitudinal 방향의 스트레인 컴포넌트를 측정하기 위해 각각의 용접 시험편이 배치되고, 이동하면서 이들 세방향에 대한 산란 벡터 값에 의해 각 방향의 측정 포인트에 대한 스트레인 값이 구해진다. 실험에서 용접시편의 정확한 위치를 고정시키고, 이동하는 지가 중요한 관건이다. 그림 5는 실험장치의 개념도이다.

3. 배관 다층용접부 해석

3.1 용접 및 경계조건

용접 모재의 재료는 ANSI 316L 스텐레스강으로 선정하였다. 용접부의 V 형 groove 는 TIG 용접을 사용하여 접합하였다. 경계조건은 3 차원 용접배관의 단면을 2 차원 축대칭 모델로 모델링 하였으며 우측면으로는 열손실이 없는 단열로 가정하였다. 용접부에 공급되는 열은 초기에는 용융풀 내에서 전도와 대류에 의해 모재에 전달된다. 용접부로의 열유입량의 분포는 용접 용융부로의 균일한 입열을 가정 함으로써 모델링하였다. 또한 용접부의 외부표면으로 자연대류와 복사에 의해 열손실이 발생한다. 복사에의한 열손실은

온도차가 심한 용융풀 주변에서 주로 발생한다. 여기서 사용된 TIG 용접에서는 복사의 효과는 무시되었다. 자연대류에 의한 열손실은 용융풀로부터 먼곳에서 지배적이며 용접부의 냉각속도에 중요한 영향을 끼친다. 따라서 자연대류 열전달 계수는 용접 평판의 윗면 및 아랫면에 대해서 다르게 적용 하였다(3). 그림 6 은 7 층 용접에대한 모델링 형상이며 축 대칭 형상 이므로 좌측의 반만 모델링 하였으며 용접부의 구속조건은 그림 7 에 표시된 바와같이 우측면은 x 방향으로 구속되었고 용접 평판의 하단부는 양 끝단에서 y 방향으로 단순지지 되었다.

3.2 해석모델

다층용접의 온도 및 응력의 연성 해석는 Direct coupled method를 사용하여 응력해석의 결과가 열해석에 직접적으로 미치는 영향을 고려하였다. 해석요소로는 온도와 변위에대한 자유도를 모두 가지고있는 PLANE 13를 사용하였으며 입열부는 보다 세밀하게 모델링 하였다. 또한 각 용접패스의 용접재는 ANSYS Code의 Birth and Death Option을 사용하여 각 패스의 용접직전에 용접영역에 부가되는것으로 모델링 하였다(4). 즉 첫번째 용접패스동안에는 두번째 용접패스를 비 활성화 시키므로써 실제 해석시에는 모델로부터 제거시킨 후에 다시 활성화 시켜 입열량을 부가하고 해석에 적용한다. 실제적 용접시에는 충분한 시간간격이 용접후의 용접부분의 검사 및 냉각을 위하여 용접패스들 사이에 이루어진다. 그러나 모델링시 냉각되는 일정한 시간 간격을 주어 해석에 적용하였다.

재료의 탄소성 거동에서의 구성 방정식은 해석결과의 정확성에 있어서 중요한 요소이다. 항복의 개시를 정의하기 위하여 Von Mises 항복기준이 사용되어 졌고, 소성변형 에서의 유동법칙(flow rule)은 bilinear kinematic hardening 영향을 고려 하였다. 변형율의 계산에서 시간에 의존하는 크립 효과는 용접동안 짧은 순간에 온도가 가해지기 때문에 무시되었다. 재료 거동의 보다 정확한 해석을 위해서는 조합된 kinematic-Isotropic hardening 모델을 사용하였다. Kinematic hardening 모델에서 용융온도 이상에서의 소성계수는 0 으로 가정하였다. 또한 용융온도에서 항복응력은 매우 작아야 하며 상온에서의 항복응력의 0.5% 값을 사용 하였다(5). 7 층용접의 경우에 용입되는 용접재는 4 개의 lumped pass 로 모델링하여 하부에서부터 차례로 용접영역에 부가하였다(6).

4. 해석결과

4.1 잔류응력 분포

그림8 ~ 그림11은 7층용접에 대한 잔류응력 해석 결과를 나타낸다. 그림8은 첫번째 용접후에 종방향 잔류응력의 등응력선을 나타낸다. 용접부 주변의 잔류응력 분포는 첫번째 용접패스가 진행된 용융부 바닥에서 최대값을 나타낸다. 그림9 에서처럼 두번째 패스의 용접후에는 응력의 최대값이 두번째 패스가 진행되는 상부로 이동한다. 그러나 두번째 용접 패스에 의한 첫번째 용접패스후의 잔류응력의 변화는 크지 않은 것으로 나타난다. 두번째 패스는 고인장 잔류응력의 구역의 크기를 증가 시킴을 알 수 가 있다. 각 패스후에 용접부의 종방향 잔류응력 분포는 하부에서 상부로 이동되며 그영역이 증가되어진다. 마지막 용접패스후에 용융부에서 최대 인장응력 값에 도달한다.

4.2 원주방향 잔류응력(hoop residual stress)

용접 비드의 진행방향에 평행한 방향으로 작용하는 응력이 원주방향응력이며 기호로 σ_z 로 표시된다. 그림12는 4inch schedule 80 배관의 용접부 중심에서부터 x 방향의 거리에 따른 배관 외부표면의 잔류응력의 분포를 나타낸다. 용접부 중앙에서의 측정된 잔류응력의 최대값은 약 320MPa이고 해석에의한 값과 잘 일치함을 알 수가 있다. 실험에 의한 잔류응력 분포의 특성은 용접부의 중앙에서는 고인장 응력을 나타내며 HAZ(Heat Affected Zone)부분의 구역에서 급격히 응력이 감소하며 압축응력이 발생되고 중앙에서 멀어질수록 압축응력은 점차 감소된다.

해석에 의한 결과는 용접부 중앙에서 약 6 mm 정도 떨어진 용융구역에서 최대 인장응력 을 발생시켰다. 이점은 실험에 의한 측정위치와 일치 되지 않는 구역으로써 국부적인 고인장 응력의 발생 가능성이 있는 구역이다. 그림13은 배관의 두께 중심에서 x 방향

의 거리에 따른 잔류응력의 분포를 나타낸다. 실험에의해 측정된 잔류응력값은 450MPa로써 해석에 의한 값과 잘 일치함을 알 수가 있다. 그림14는 배관용접부 내부 표면에서의 잔류응력 분포이다. 최대응력 값이 다소 높게 평가 되었음을 알 수있다. 전반적으로 계산된 원주방향 잔류응력의 분포 형태는 실험에 의해 측정된 잔류응력의 분포값과 유사한 거동을 나타냄을 알 수가 있다. 측정된 최고응력값은 452MPa로써 용접부 비드부분에서 316L 스텐레스강 모재의 항복응력보다 높게 발생하며 이는 사용된 용접봉의 항복강도가 모재에 비해 높은값을 갖는것 때문이다.

4.3 축방향 잔류응력(axial residual stress)

용접 비드의 진행방향에 수직으로 작용하는 응력이 축방향 잔류응력이며 σ_x로 표시된다. 그림15 ~ 그림17은 용접부 중심에서부터 x 방향의 거리에 따른 배관 외부표면의 축방향 잔류응력의 분포를 나타낸다. 실험에의한 축방향 잔류응력은 150MPa의 최대값을 나타내고 해석에 의한 잔류응력은 250MPa 로써 보다 높게 나타난다. 축방향 잔류응력도 배관 표면 보다는 배관내부에서 높게 나타남을 알 수가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. 김석훈, 유봉 등, "액체금속로 용접구조에대한 특성 및 잔류응력의 영향",KAERI/AR-508/98, pp 15~20, 1998.
2. V. T. Em 외 6 인, "중성자 회절에 의한 잔류응력 측정법 개발", KAERI/TR-1343/99, pp 37~51, 1999.
3. 김석훈, 주영상, 유봉, " 액체금속로 다층용접부의 잔류응력해석", Journal of KNS, October , 2000.
4 . ANSYS user's manual for revision 5.5
5. Masahito Mochizuki, Makoto Hayashi and Toshio Hattori, " Residual stress distribution depending on welding sequence in multi-pass welded joints with x-shaped groove", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 122, February , 2000,
6. C. K. Leung, R. J. Pick, " Finite element analysis of multipass welds", WRC bulletine 356,pp 11~33, 1990.

표1 스텐레스 316L강의 화학조성

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.02	0.43	1.59	0.03	0.005	11.1	16.6	2.296

표2 스텐레스 316L강의 물성치

Ultimate tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation(%)
524	275	51

표3 스텐레스 316L-TIG 용접봉의 물성치

Ultimate tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation(%)
570	460	39

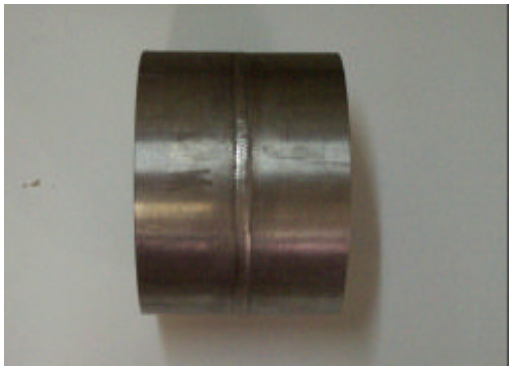

그림 1 316L stainless steel 배관의 용접시편 형상

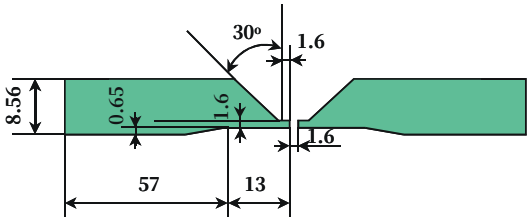

그림 2 용접 접합부의 2 차원 형상

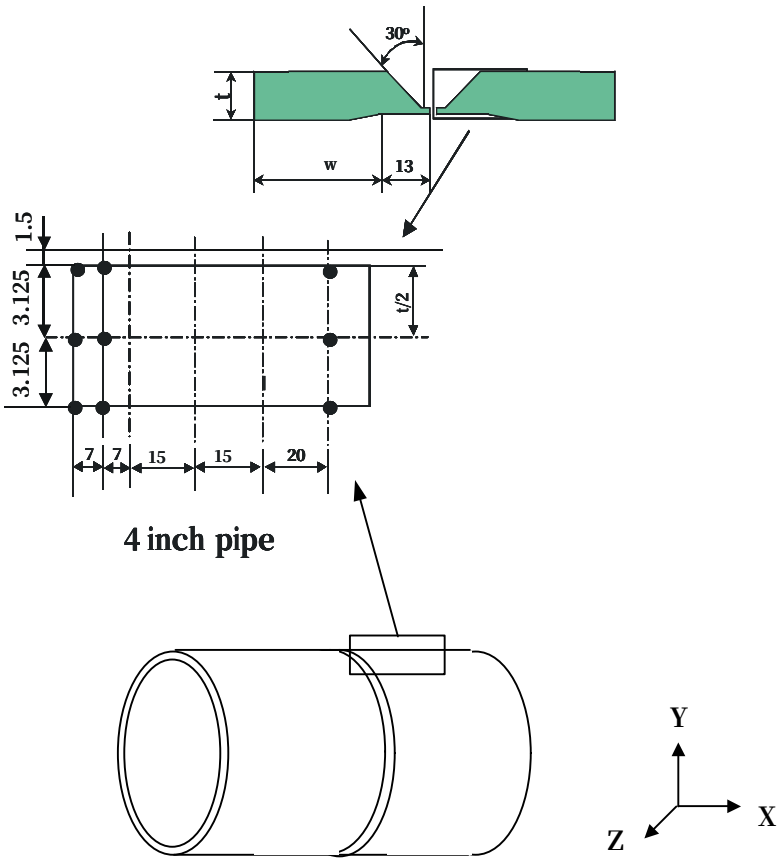

그림 3 다층용접배관의 3 차원 개념도 및 잔류응력을 측정위치

그림 4 잔류응력 측정 실험장치 set-up

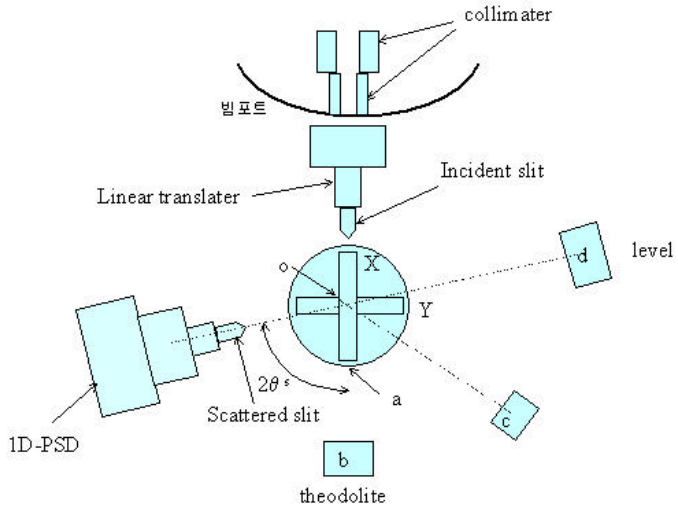

그림 5 잔류응력 측정장치의 개념도

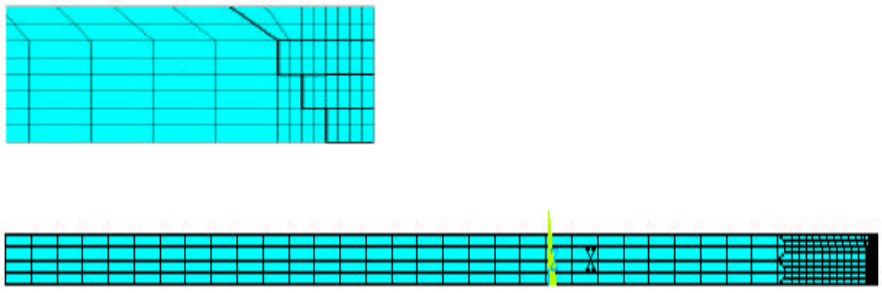

그림 6 7 층용접에 대한 해석 모델

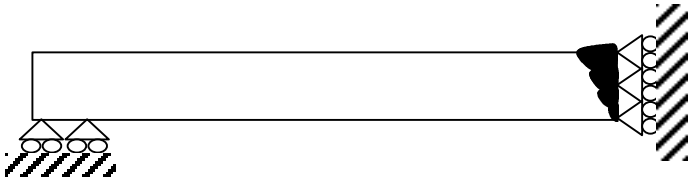

그림 7 7 층 용접에 대한 경계조건

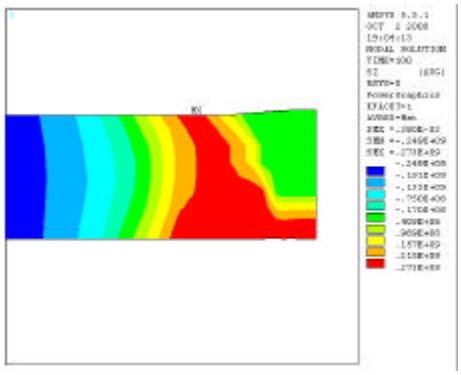

그림8 1pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

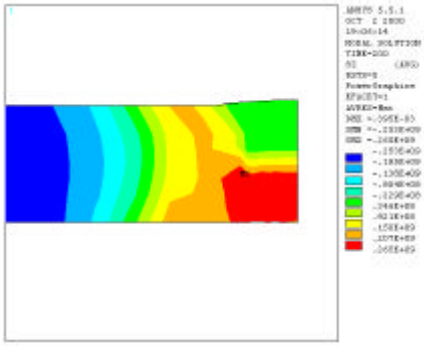

그림9 2pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

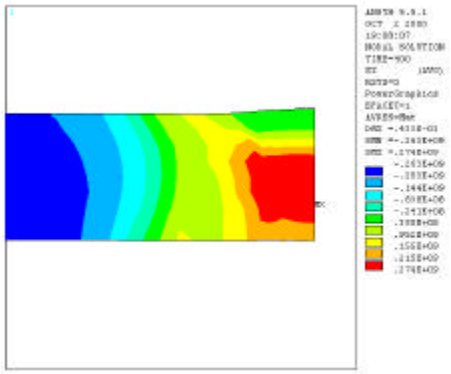

그림10 3pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

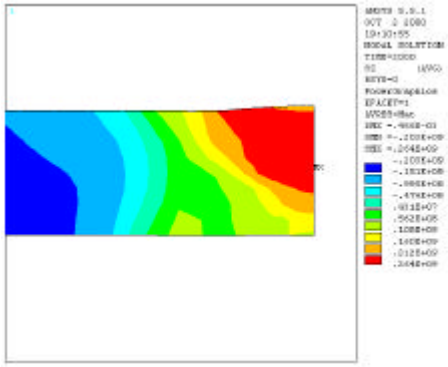

그림11 4pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

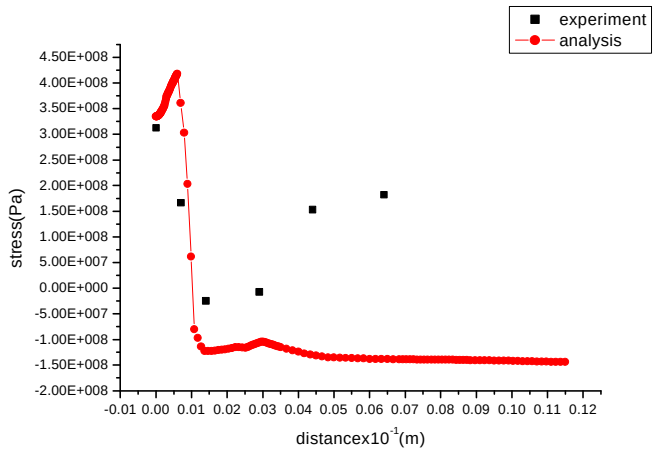

그림12 용접중심선에서 x방향 거리에 대한 원주방향 잔류응력(외부표면)

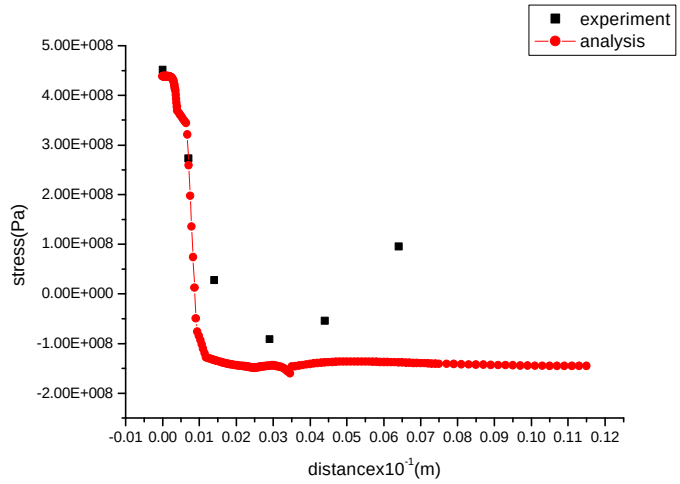

그림13 용접중심선에서 x방향 거리에 대한 원주방향 잔류응력(중앙부)

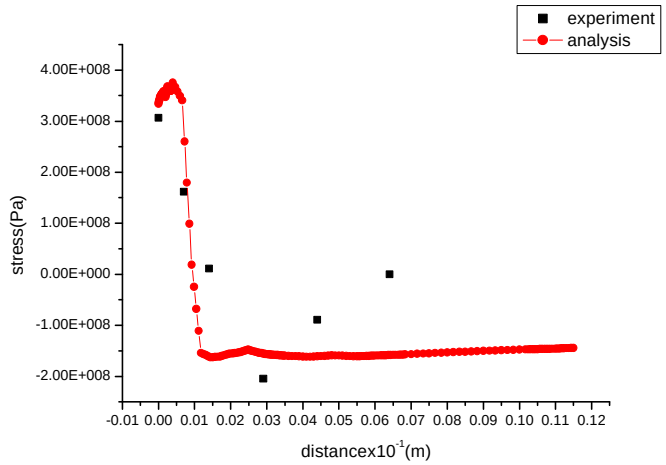

그림14 용접중심선에서 x방향 거리에 대한 원주방향 잔류응력(내부표면)

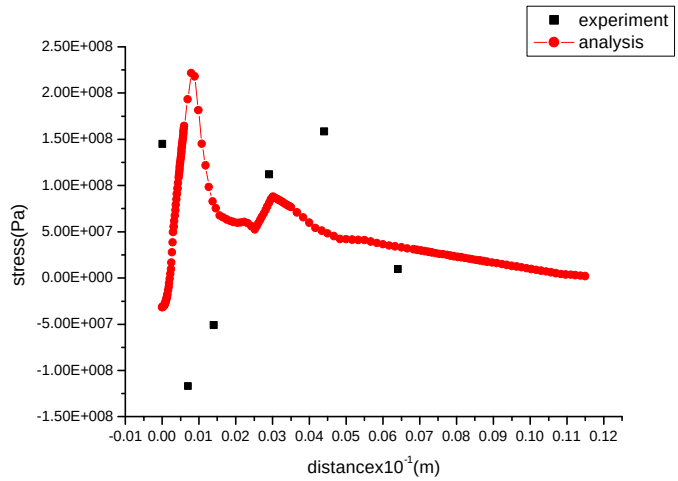

그림15 용접중심선에서 x방향 거리에 대한 축방향 잔류응력(외부표면)

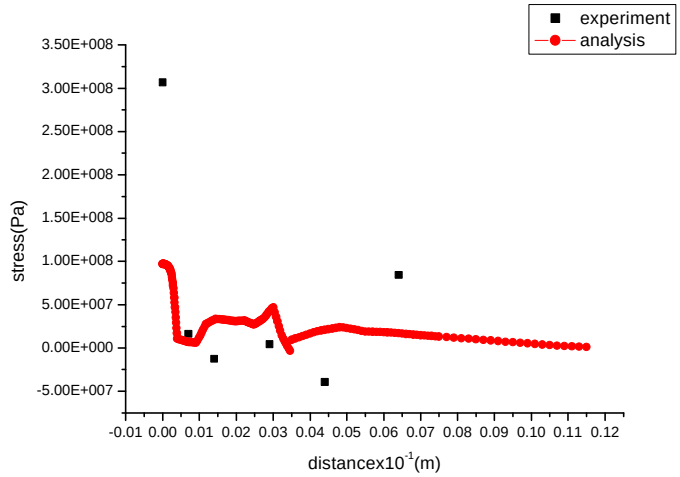

그림16 용접중심선에서 x방향 거리에 대한 축방향 잔류응력(중앙부)

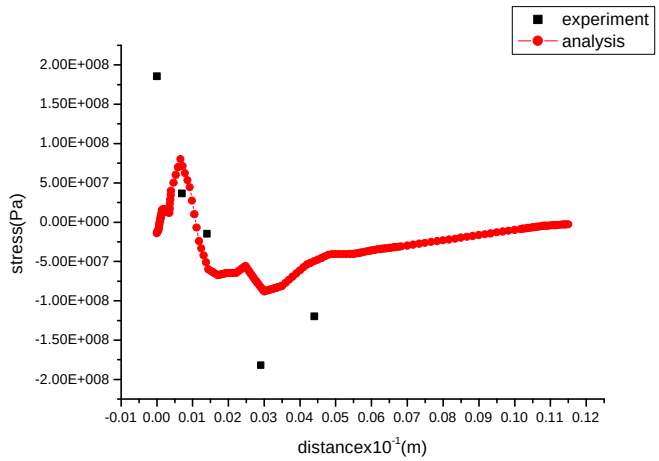

그림17 용접중심선에서 x방향 거리에 대한 축방향 잔류응력(내부표면)