



## 중성자 회절법에 의한 316L 스테인리스강 배관 다층용접부의 잔류응력 해석

김 석 훈\* · 이 재 한\*

\*한국원자력연구소

### Analysis of Residual Stresses for the Multipass Welds of 316L Stainless Steel Pipe by Neutron Diffraction Method

Seok Hoon Kim\* and Jae Han Lee\*

\*Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

#### Abstract

Multipass welds of the 316L stainless steel have been widely employed in the pipes of Liquid Metal Reactor. Owing to localized heating and subsequent rapid cooling by the welding process, the residual stress arises in the weld of the pipe. In this study, the residual stresses in the 316L stainless steel pipe welds were calculated by the finite element method using ANSYS code. Also, the residual stresses both on the surface and in the interior of the thickness were measured by HRPD(High Resolution Powder Diffractometer) instrumented in HANARO Reactor. The experimental data and the calculated results were compared and the characteristics of the distribution of the residual stress discussed.

\* Corresponding author : shkim5@kaeri.re.kr

(Received July 29, 2003)

Key Words : Residual stress, 316L Stainless steel, Neutron diffraction, SMAW, HRPD

#### 1. 서 론

용접구조물의 설계 및 제작 시에 잔류응력 및 변형의 영향에 대한 평가는 필요하며 이러한 고려에 의해 건전한 용접구조물을 유지할 수 있다. 용접부 가까이에 존재하는 고인장 잔류응력은 취성파괴, 피로파괴, 응력부식균열 감수성 등을 증가시킬 수 있다. 그리고 압축잔류응력 및 용접변형은 좌굴강도(buckling strength)를 감소시킨다. 더욱 문제가 복잡해지는 것은 잔류응력의 영향의 정도가 그 크기뿐만 아니라 사용재료의 인성(toughness)과도 관련이 있다는 사실이다. 재료가 낮은 인성을 가질 때 잔류응력은 용접부의 파괴강도를 크게 감소시킬 수 있다. 실질적으로 용접구조물의 설계 시 고려해야 하는 것은 용접평판 두께, 용접부설계, 용접조건, 용접절차 등을 변화시켜 잔류응력 및 변형의 영향을 주어진 환경 하에서 최소화시키는 것이다. 이러

한 사항은 제작단계에서 보다는 초기 설계단계에서 수행하는 것이 바람직하다. 용접부의 설계를 수행할 때 용접열로 인한 과도열응력과 잔류응력 및 용접변형이 용접구조물의 사용성능에 미치는 영향에 대하여 평가할 필요가 있다<sup>1,2)</sup>.

현재까지의 액체금속로 구조재료는 주로 오스테나이트계 스테인리스강인 316L이 사용되어 왔다. 액체금속로에서는 나트륨이 냉각재로 사용되기 때문에 장시간 운전 시 구조재료에 많은 문제점이 발생할 수 있다. 대표적인 문제점은 부식에 의한 두께의 감소이며 소듐환경 하에서의 구조재의 표면변화도 크립 피로 등에 많은 영향을 미친다. 특히 용접부의 경우 소듐이 재료표면의 산화막과 같은 보호층을 제거함으로써 재료의 마모가 증가하게 되고 재료 내부의 침탄과 탈탄에 의해 크립 피로와 크립 파괴특성이 큰 영향을 받는다.

잔류응력을 측정하는 방법으로서 초음파 탐상법, 천공법, x선 회절법등이 사용되나 이러한 방법은 특성상 용

접부의 표면 잔류응력 측정에 국한되어 적용될 수 밖에 없었다. 이에 비해 중성자는 금속내부로 수 cm까지 침투할 수 있기 때문에 이를 이용하는 중성자 회절법은 재료 내부의 응력을 측정할 수 있어 새로운 소재의 잔류응력의 측정에 많이 이용된다. 중성자 회절법에 의한 배관 다층용접부의 잔류응력 측정은 국외의 경우 여러 종류의 재료에 대해 수행되었고<sup>3,4)</sup> 국내의 경우 304 스테인리스강 평판에 대해 수행된 바 있다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 액체금속로의 배관재료인 316L 스테인리스강 배관의 다층용접부에 대한 응력해석 및 실험을 수행하여 용접 후의 잔류응력 분포특성을 평가하였다. 이러한 실험 및 해석결과는 잔류응력 문제와 관련된 구조물 평가의 기본자료로 사용된다. 잔류응력 측정을 위해 한국원자력연구소의 하나로에 설치된 고분해능 중성자 분말회절장치(HRPD) 빔포트를 사용하였고 중성자 빔의 장점인 높은 투과력을 이용하여 용접부 내부의 특정한 위치에 대한 직교성분의 3축 잔류응력분포를 측정하였으며 측정결과를 유한요소해석 결과와 비교 분석하였다.

## 2. 잔류응력 실험

### 2.1 시편형상 및 측정위치

실험에 사용된 액체금속로 다층용접 배관의 실제형상은 Fig. 1과 같다. 소형 및 대형의 두 종류의 배관이 실험되었으며 치수를 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 배관의 다층용접부의 단면 2차원 형상 및 잔류응력 측정위치를 나타낸 것이다. 잔류응력의 측정점 수는 각 시편당 18개이었다. 용접방법은 SMAW이며 용접조건

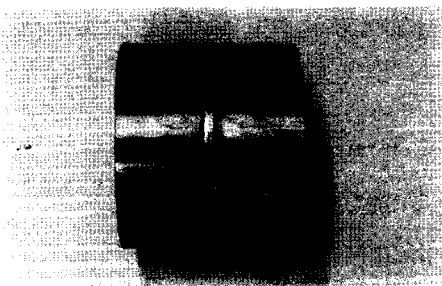


Fig. 1 Welded specimen of 316L stainless steel pipe

Table 1 Pipe and Weld Geometries

Standard	Pipe Weld	D (mm)	t (mm)	No. of Weld Pass
ANSI 4 inch Schedule 80	SMAW	114	8.56	7
ANSI 10 inch Schedule 40	SMAW	273	9.27	8

D= outside diameter, t= nominal pipe thickness

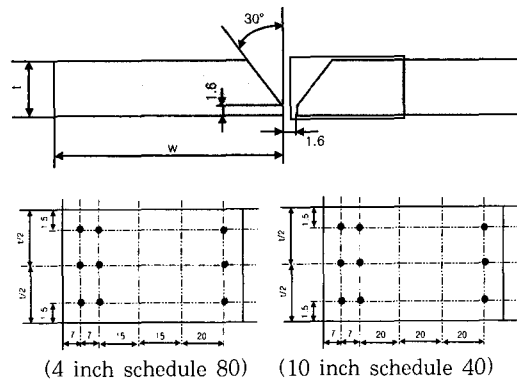


Fig. 2 Configuration of the weld joints and measurement points of the experiment

Table 2 Welding Condition

Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)
120	30	350

은 Table 2에 표시하였다. 모재는 316L 스테인리스강이며 사용된 용접봉은 AWS A5.4의 규격에 따른 E316L-16에 해당하는 국산 용접재료로서 모재에 비해 높은 항복강도를 나타낸다<sup>6)</sup>.

### 2.2 실험방법 및 장치

중성자 회절을 이용한 배관 용접 시편의 잔류응력 측정을 위해 Fig. 3의 HRPD 빔 포트와 위치 민감형 검출장치를 이용하였다. 중성자 회절을 이용한 실험방법은 크게 3가지 측정단계로 나눌 수 있다. 먼저 장비들의 위치와 슬릿의 크기 결정, 중성자 빔의 파장을 구하는 초기 calibration 단계이다. 두번째로 무응력상태의 시험편에 대한 격자면 간 거리  $d_0$ 를 측정하게 되며 이 값은 실제 잔류응력 측정에 있어 기준값이 된다. 마지막으로 용접 시험편을 sample stage에 고정하고 각 측정방향에 대한 회절탐색부피의 격자면 간 거리  $d$ 의 측정으로 나누어진다. 이때 빔 포트를 통하여 조사된 중성자 빔은 Ni-powder를 이용하여 각 결정면에 대한 회절각에서의 예비실험을 통해 측정시험편에 대한 격자면, 회절각 및 파장을 결정하기 위해 사용된다.

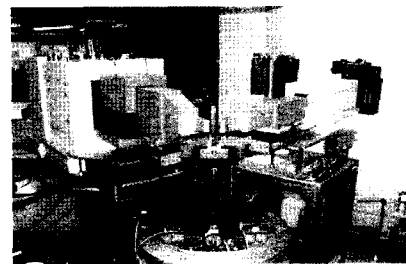


Fig. 3 High Resolution Powder Diffractometer

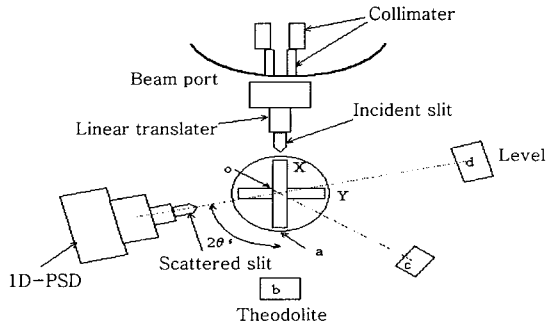


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 4는 실험장치의 개념도이다. 그림의 오른쪽에 위치한 입사빔을 고정시키고 시편의 홀더 아래부분에 있는 X-Y방향의 트랜스레이터와 왼쪽에 있는 디텍터를 조정하여 센터축을 결정하게 된다. 용접시편에 대한 측정은 세 직교좌표 방향 (Normal, Transverse, Longitudinal 방향)의 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 것이 중요한 관건이다<sup>5)</sup>.

### 3. 배관 다층용접부 해석

#### 3.1 용접 및 경계조건

Fig. 5는 다층용접배관의 해석영역에 대한 개념도이다. 3차원 용접배관 단면에 대한 2차원 축대칭 모델을 사용하였으며 좌우대칭을 가정하여 좌측면으로는 열손실이 없는 단열로 가정하였다. 입열조건은 용착금속에 해당하는 요소에 용융점 이상의 균일온도를 온도하중으로 추가하여서 모델링하였다. 또한 자연대류 열전달계수는 배관외면에서  $1.95 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 이고 내면에서는 외면의 1/2값을 적용하였으며 복사에 의한 열손실은 무시하였다<sup>7)</sup>.

Fig. 6은 소형배관에 대한 유한요소모델 형상이다. 용접부의 구속조건은 좌측 대칭면의 x방향 변위와 y 및 z방향 회전이 구속된 평면변형 상태이며 우측 하단부는 y방향으로 단순 지지되었다.

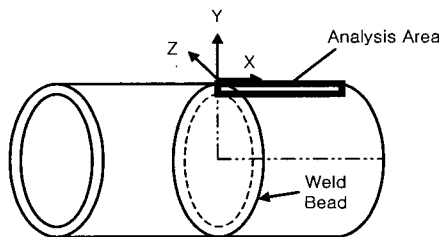


Fig. 5 Schematic diagram of multipass weld pipe

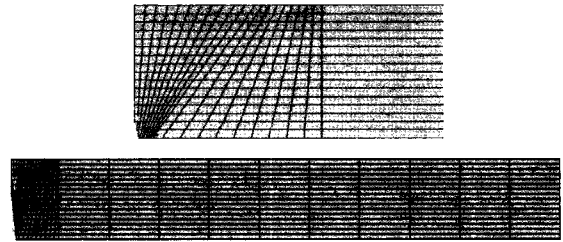


Fig. 6 Finite element model of analysis area

#### 3.2 해석모델

다층용접의 온도 및 응력의 연성해석은 sequential weak coupling analysis를 사용하였다. 해석요소로는 온도와 변위에 대한 자유도를 모두 갖고있는 PLANE 13를 사용하였으며 입열부는 보다 세밀하게 모델링하였다. 또한 각 용접패스의 용착부는 ANSYS Code의 Birth and Death Option을 사용하여 각 패스의 용접직전에 용접영역에 추가되는 것으로 모델링하였다. 즉 첫번째 용접패스 동안에는 두번째 이후의 모든 용접패스를 비 활성화 시키므로써 실제 해석 시에는 모델로부터 제거시킨 후에 다시 해당패스 때에 활성화시켜 입열량을 추가하고 해석에 적용한다. 또한 용접패스 간에 냉각되는 일정한 시간간격을 주어 해석에 적용하였다. 해석에 사용된 모재와 용접봉의 열 물성치는 Table 3에 나타나있고 기계적 물성치는 Table 4에 표시하였다.

재료의 탄소성거동에서의 구성방정식은 해석결과와 정확성에 있어서 중요한 요소이다. 항복의 개시를 정의하기 위하여 Von Mises 항복기준이 사용되었고 소성 변형에서의 유동법칙(flow rule)은 bilinear kinematic hardening 영향을 고려하였다. 변형율의 계산에서 시간에 의존하는 크립효과는 용접동안 짧은 순간에 온도가 가해지기 때문에 무시되었다. 또한 용융온도에서 항복응력은 매우 작아야 하며 상온에서의 항복응력의 0.8% 값을 사용하였다. 7층 및 8층용접의 경우에 용입되는 용접재는 4개의 lumped pass로 모델링하여 하부에서부터 차례로 용접영역에 추가하였다<sup>8)</sup>.

Table 3 Thermal Properties of 316 L Stainless Steel

T(°C)	C <sub>p</sub> (J/kg °C)	k(W/m °C)
40	450	15
400	570	20
800	620	25
1200	700	31
1390	730	33
1600	730	90

C<sub>p</sub>= Specific Heat, k= Thermal Conductivity

**Table 4** Mechanical properties of 316 L stainless steel and weld metal

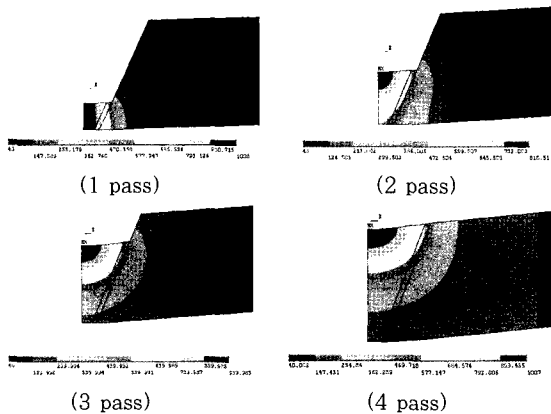
T (°C)	E (GPa)	$s_y$ (MPa) Base	$s_y$ (MPa) Weld	$E_T$ (MPa)	$\nu$	$\alpha$ ( $1/^\circ\text{C}$ )
40	210	230	460	2800	0.26	$19 \times 10^{-6}$
400	168	139	278	2370	0.32	$19 \times 10^{-6}$
800	133	80	160	1900	0.25	$19 \times 10^{-6}$
1200	55	22	22	600	0.24	$19 \times 10^{-6}$
1390	10	2	2	100	0.24	$19 \times 10^{-6}$
1600	10	2	2	100	0.24	$19 \times 10^{-6}$

E=Elastic Modulus,  $s_y$ =Yield Stress,  $E_T$ =Tangent Modulus,  $\nu$ =Poisson's Ratio,  $\alpha$ =Linear Thermal Expansion Coefficient

#### 4. 실험 및 해석결과

##### 4.1 온도 및 잔류응력 분포

첫번째 용접패스 후 용융부 주변의 온도분포는 Fig. 7(1 pass)과 같다. 일정시간 간격 후 용접부의 온도가 충분히 냉각된 후에 나머지 용접패스가 하부에서 상부로 순차적으로 진행되었으며 각 용접패스를 부가한 다음 10초 후의 용접부의 온도분포는 Fig. 7(2, 3, 4 pass)과 같이 예측된다. 용융부 주변의 온도분포는 유한요소해석 시 열해석모델의 mesh의 형태가 실험시편에 사용된 7개의 패스를 4개로 조합하여 적용하여도 용융부의 온도분포가 매우 부드럽게 변화함을 알 수 있었다<sup>9)</sup>. 용접부 주변의 잔류응력분포의 시간에 따른 특성은 첫번째 용접패스가 진행된 용융부 바닥에서 최대값을 나타내었다. 두번째 패스의 용접 후에는 응력의 최대값이 두번째 패스가 진행되는 상부로 이동한다. 그러나 두번째 용접패스에 의한 첫번째 용접패스 후의 잔류응력의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 두번째 패스는 고인장 잔류응력의 구역의 크기를 증가시

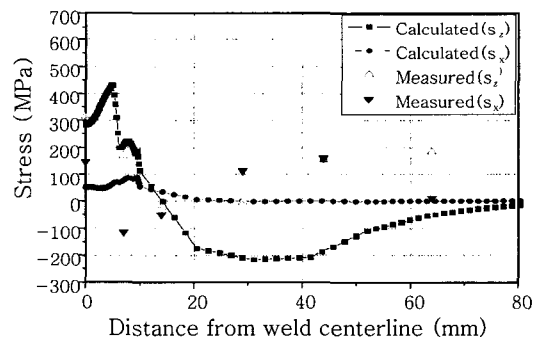


**Fig. 7** Temperature distribution of the weld after each weld pass

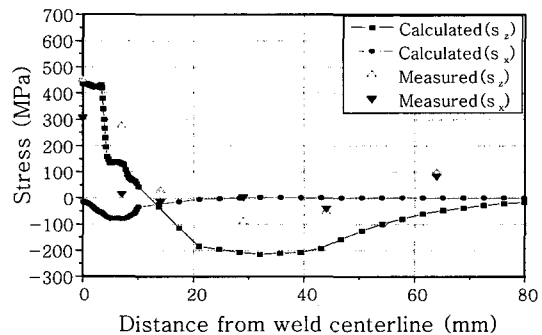
키는 것을 알 수 있었다. 각 패스 후에 용접부의 원주 방향 잔류응력 분포는 하부에서 상부로 이동되며 그 영역이 증가된다. 마지막 용접패스 후에 용융부에서 최대인장응력 값에 도달한다.

##### 4.2 소형배관의 잔류응력 분포

용접비드의 진행방향에 평행한 방향으로 작용하는 응력이 원주방향 응력으로서  $s_z$  로 축방향 응력은  $s_x$ 로 각각 표시하였다. 소형배관(4inch schedule 80)의 두께 대 직경의 비( $t/d$ )는 0.075 이며 용접부 중심에서부터  $x$  방향으로의 거리에 따른 배관외면에서의 잔류응력 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 용접부 중심에서 측정된 원주방향 잔류응력은 303MPa이고 해석에 의한 값과 잘 일치함을 알 수가 있다. 해석결과에 의하면 용접부 중심선과 HAZ사이의 영역에서 고인장응력이 발생하여 그 구역 내에서 최대인장응력이 존재하였다. 그 이후에서는 응력이 급격히 감소되며 용접부 중심에서 멀어지면 압축응력이 발생한다. 배관중앙면 및 내면에서의 응력분포를 Fig. 9 및 Fig. 10에서 살펴보면 두 경우에서 최대원주응력은 용접부 중심에서 발생하였다. 배관중앙면에서 451MPa의 최대원주응력이 발생하였으며 배관내면에서는 용접부 중심의 원주방향 응력이



**Fig. 8** Hoop and axial residual stresses on outer surface (4 inch dia.)



**Fig. 9** Hoop and axial residual stresses on middle surface (4 inch dia.)

가장 작게 측정되었다.

축방향 잔류응력은 배관외면, 중앙면 및 내면에서 원주방향 잔류응력에 비해 용접부에서는 작은 인장응력을 나타냈으나 HAZ를 벗어나 모재에서는 더 큰 응력값을 나타내었다. 용접중심에서 두께방향에 대한 잔류응력분포를 Fig. 11에서 보면 축방향 잔류응력은 배관중앙면에서 실험결과와 불일치함을 나타내었다.

### 4.3 대형배관의 잔류응력 분포

대형배관의 두께 대 직경의 비( $t/d$ )는 0.034 로써 큰 배관직경에 비하여 두께가 얇으며 작은 압력과 큰 열하중이 가해질 때 배관 내외면의 온도차를 감소시켜 열응력을 작게하는 특성을 가지고 있다. 용접부 중심에서부터  $x$  방향의 거리에 따른 대형배관(10 inch schedule 40) 외면의 원주방향 잔류응력 분포를 Fig. 12에서 보면 용접부 중심에서 측정된 값은 소형배관에 비해 작은 값을 나타내었으며 해석에 의한 값이 실험값에 비해 크게 계산되었다. 배관중앙면 및 내면에서의 원주방향 잔류응력 분포를 Fig. 13 및 Fig. 14에서 살펴보면 실험값과 해석값 사이에 정량적으로 다소 차이가 있지만 정성적으로 잘 일치하였으며 소형배관의 결과와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 용접중심에서 두께방향에 대

한 잔류응력분포는 Fig. 15와 같으며 해석된 축방향 잔류응력이 배관외면보다 내면에서 더 큰 값을 나타내었다<sup>10)</sup>.

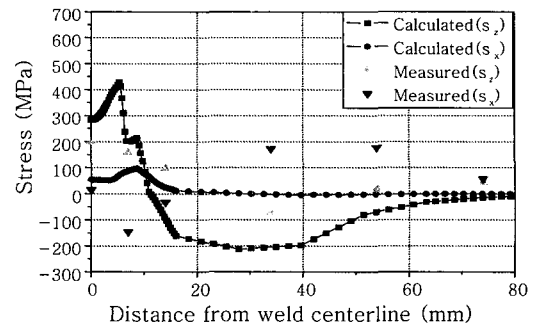


Fig. 12 Hoop and axial residual stresses on outer surface(10 inch dia.)

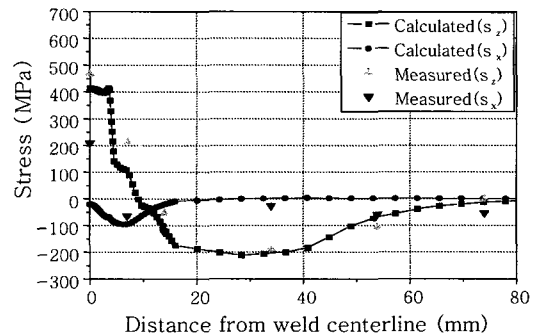


Fig. 13 Hoop and axial residual stresses on middle surface(10 inch dia.)

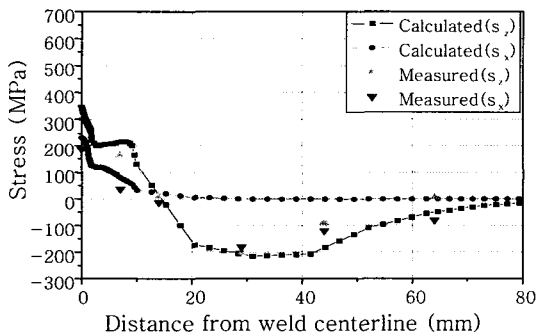


Fig. 10 Hoop and axial residual stresses on inner surface (4 inch dia.)

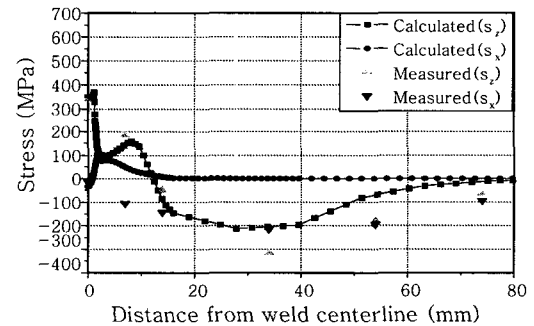


Fig. 14 Hoop and axial residual stresses on inner surface(10 inch dia.)

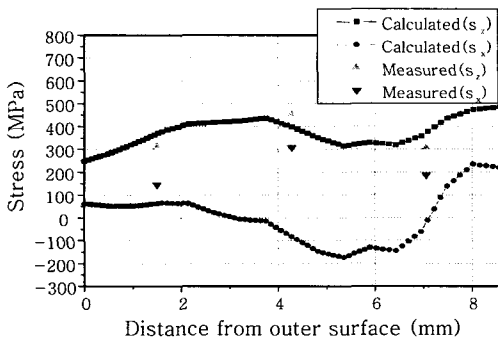


Fig. 11 Hoop and axial residual stresses through the thickness (4 inch dia.)

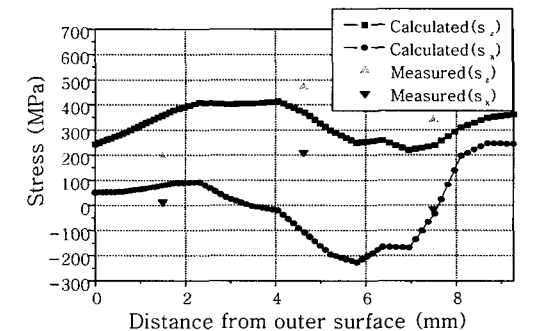


Fig. 15 Hoop and axial residual stresses through the thickness (10 inch dia.)

4.4 실험 결과에 대한 고찰

실험에 사용된 316L 스테인리스강의 용접부는 항복응력이 overmatch된 용접봉을 사용하였다. 사용된 용접봉은 상온에서 모재의 항복응력에 두배에 가까운 값을 가지고 있다. 소형 및 대형배관의 원주방향 응력에 대한 실험값을 Fig. 16에서 보면 최대응력은 용접부 중심에서 두가지 시편에 대해 약 450MPa의 잔류응력이 발생하였다. 이러한 값은 사용된 용접봉의 항복응력과 비슷하며 원주방향 최대응력은 사용된 용접봉의 항복응력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 측정된 축방향 최대응력은 Fig. 17을 참고하면 소형배관에서는 306MPa이고 대형배관에서는 210MPa로써 원주방향 최대응력에 비해 훨씬 작은 값을 나타내었다.

배관 내외면의 잔류응력분포를 비교하면 용접부 중심에서 원주방향 잔류응력은 대형배관에서 내면이 큰 값을 가졌으나 소형배관에서는 외면이 약간 더 큰 잔류응력 값을 나타내었다. 또한 대형 및 소형배관에 대한 축방향 잔류응력을 Fig. 17에서 비교하면 소형배관에서 잔류응력분포가 전체적으로 더 크게 발생하였다<sup>11,12)</sup>.

5. 결 론

본 연구에서는 316L 스테인리스강 다층용접배관의

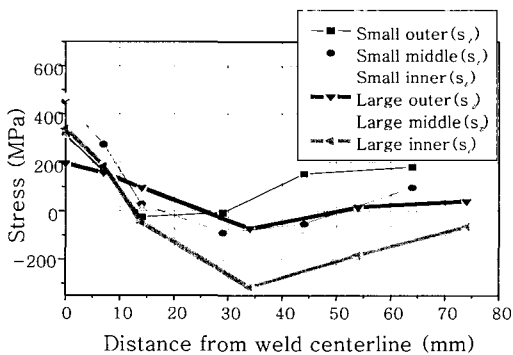


Fig. 16 Distribution of the hoop residual stresses from the experimental data

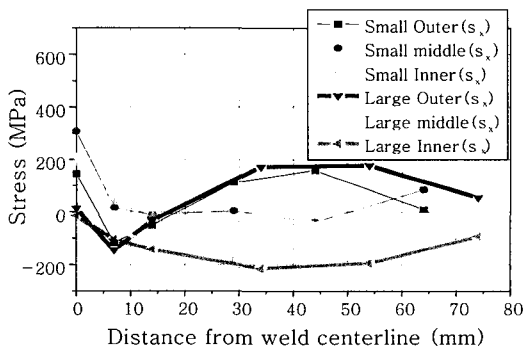


Fig. 17 Distribution of the axial residual stresses from the experimental data

잔류응력을 중성자 회절법을 사용하여 측정하였다. 소형(t/d=0.075) 및 대형배관 시편(t/d=0.034)에 대하여 각 18개의 위치에 대한 표면 및 두께에 따른 잔류응력이 측정되었다. 측정결과는 유한요소해석에 의한 해석결과와 비교 분석되었으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 원주방향 잔류응력의 해석결과는 배관외면에서는 HAZ부근에서 최대 인장응력이 발생하였고 배관중앙면 및 내면에서는 용접부중심에서 최대응력이 발생하였다. 원주방향 잔류응력 해석결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하며 축방향 잔류응력은 다소 작게 평가되었다.

2) 원주방향 및 축방향 최대응력은 배관중앙면에서 발생하였으며 두가지의 시편에 대하여 최대 원주방향 응력값은 약 450MPa로써 사용된 용접봉의 항복응력에 가까운 값을 발생시켰다. 따라서 원주방향 최대응력은 사용된 용접봉의 항복응력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 반면 축방향 최대응력은 소형 및 대형배관에서 306MPa과 210MPa로써 원주방향 최대응력에 비해 훨씬 작은 값을 나타내었다.

3) 용접부 중심에서 원주방향 잔류응력은 배관외면에서 소형배관이 더 큰 인장응력 값을 가졌으나 배관중앙면 및 내면에서는 대형배관이 더 큰 인장응력 값을 나타내었다. 축방향 잔류응력은 대형배관과 비교하여 소형배관에서 전체적으로 더 크게 발생하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Juan C. Suarez, Lidekazu Murakawa and Yukio Ueda : Effect of welding residual stress on fracture toughness testing, *Trans. JWRI*, **26-1**(1997), 28-35
2. T. Chapman, H. Offer, W. Sanders and G. Rusack : Reduced stress welding process for nuclear plant piping, *Nuclear Engineering and Design*, **170**(1997), 81-88
3. R.A. Owen, R. V. Preston, P. J. Withers, H. R. Shercliff and P. J. Webster : Neutron and synchrotron measurements of residual strain in TIG welded aluminium alloy 2024, *Material Science and Engineering*, **A346**(2003), 159-167
4. G. A. Webster and R. C. Wimpory : Non-destructive measurement of residual stress by neutron diffraction, *Material Processing Technology*, **117**(2001), 395-399
5. Man-jin Park, Dong-young Jang and Hee-dong Choi :

- Residual stress measurement on welded specimen by neutron diffraction, *Journal of KWS*, **20-2**(2002), 168-176(in Korean)
6. P. Dong and J. Zhang : Residual stresses in strength-mismatched welds and implications on fracture behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, **64**(1999), 485-505
  7. H. Murakawa : Theoretical prediction of residual stress in welded structures, *Welding International*, **11-8** (1997), 2-7
  8. C. K. Leung, R. J. Pick : Finite element analysis of multipass welds, *WRC Bulletin* **356**(1990), 11-33
  9. J. B. Roelens, F. Maltrud and J. Lu : Determination of residual stresses in submerged arc multi-pass welds by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements, *Welding in the world*, **33-3**(1994), 36-43
  10. Tso-Liang Teng and Peng-Hsiang Chang : A study of residual stresses in multi-pass girth-butt welded pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **74**(1997), 59-70
  11. B. Brickstad, B. L. Josefson : A parametric study of residual stress in multi-pass butt-welded stainless steel pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **75**(1998), 11-25
  12. F. Faure and R. H. Leggatt : Residual stresses in austenitic stainless steel primary coolant pipes and welds of pressurized water reactors, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **65**(1996), 265-275