

KAERI/TR-2615/2003

액체금속로 다층용접 배관의 잔류응력 실험 및 해석

**Experiment and analysis of residual stress for multipass  
weld pipes in Liquid Metal Reactor**

*KAERI*

2003. 12

한국원자력연구소

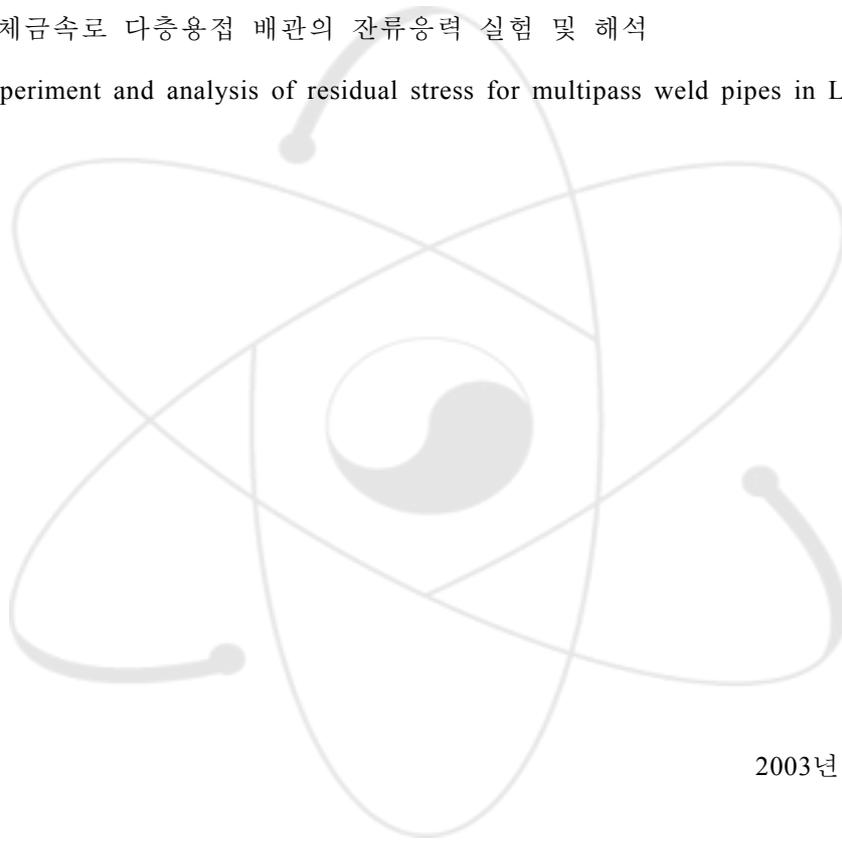
## 제 출 문

한국원자력연구소소장 귀하

본 보고서를 2003년도 “액체금속로 기계설계 기술개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 액체금속로 다층용접 배관의 잔류응력 실험 및 해석

(Experiment and analysis of residual stress for multipass weld pipes in Liquid Metal Reactor)



2003년 12월 2일

과 제 명 : 액체금속로 기계설계기술개발

주 저 자 : 김 석 훈

## 요 약 문

액체금속로에서는 나트륨이 냉각재로 주로 사용되며 고온환경에서 장시간 운전중에 구조재의 용접부에는 제작결함 및 잔류응력의 영향으로 추측되는 문제점들이 발생하였다. 용접 구조물의 설계 및 제작 시에 잔류응력 및 변형의 영향에 대한 평가가 필요하며 이러한 고려에 의해 건전한 용접구조물을 유지할 수 있다. 본 연구에서는 액체금속로의 배관재료인 316L 스테인리스 강으로 다층용접부를 포함하는 2개의 시험 배관을 제작하고 다층용접부에 대한 잔류응력 실험 및 해석을 수행하여 용접 후의 잔류응력분포 특성을 평가하였다. 잔류응력 측정은 하나로에 설치된 고분해능 중성자 분말회절장치(HRPD) 빔포트를 사용하였다. 용접부의 잔류응력이 ANSYS 코드를 사용하여 유한요소법으로 계산되었으며 실험 및 계산결과가 비교되었고 잔류응력의 분포특성이 토의되었다.

## ABSTRACT

Sodium is usually used as a coolant in LMR(Liquid Metal Reactor) and it caused the problems due to the fabrication defects and residual stresses for the welds of the structural material in long time operation under high temperature. It is necessary to evaluate the influence of the residual stress and distortion in the design and fabrication of welded structure and the sound welded structure can be maintained by such consideration. In this study, two test pipes including the multipass weld with the 316 L stainless steel which is the pipe material of LMR were fabricated and the experiment and analysis of the multipass weld were carried out, so the characteristics of the residual stress distribution after welding were estimated. The HRPD(High Resolution Powder Diffractometer) instrumented in HANARO was used for the residual stress measurement. The residual stresses of the weld were calculated by finite element method using ANSYS code and the experimental and calculated results were compared and the characteristics of the distribution for the residual stress were discussed.

## 목 차

제 출 문 .....	i
요 약 문 .....	ii
Abstract .....	iii
목 차 .....	iv
표 목 차 .....	v
그림목차 .....	v
1. 서 론.....	1
2. 용접부 잔류응력 측정기술 및 실험.....	2
2.1 용접부 잔류응력 측정기술.....	2
2.2 용접부 실험방법 및 기술현황.....	3
2.3 중성자 회절에 의한 잔류응력 실험.....	6
2.4 실험결과에 대한 고찰.....	9
3. 액체금속로 배관 용접부의 잔류응력해석 .....	10
3.1 용접 및 경계조건 .....	10
3.2 지배 방정식 .....	10
3.3 해석모델 .....	12
3.4 해석결과.....	13
4. 결론.....	14
참고 문헌 .....	16

## 표 목 차

표 1. Pipe and weld geometries.....	18
표 2. Welding condition .....	18
표 3. Thermal properties of stainless steel 316L.....	19
표 4. Mechanical properties of 316 L stainless steel and weld metal.....	19

## 그림 목 차

그림 1. Main component of KALIMER-150.....	20
그림 2. Schematic of experiment setup used for neutron diffraction studies.....	21
그림 3. Schematic diagram of experimental apparatus .....	22
그림 4. Configuration of small pipe specimen.....	23
그림 5. High Resolution Powder Diffractometer instrumented in HANARO.....	24
그림 6. Configuration of Large pipe specimen fixed in the sample stage.....	25
그림 7. Strain measurement schematic.....	26
그림 8. Distribution of the hoop residual stress on the experimental data(Small pipe).....	27
그림 9. Distribution of the hoop residual stress on the experimental data(Large pipe).....	28
그림 10. Distribution of the axial residual stress on the experimental data(Small pipe).....	29
그림 11. Distribution of the axial residual stress on the experiment data(Large pipe).....	30
그림 12. Configuration of the weld joints and measurement points of the experiment .....	31
그림 13. Finite element model of analysis area.....	32
그림 14. Schematic diagram of multipass weld pipe.....	33
그림 15. Temperature distribution of the weld after each weld pass .....	34
그림 16. Hoop and axial residual stress on outer surface(4 inch dia.).....	35
그림 17. Hoop and axial residual stress on middle surface (4 inch dia.).....	36
그림 18. Hoop and axial residual stress on inner surface(4 inch dia.).....	37
그림 19. Hoop and axial residual stresses through the thickness (4 inch dia.).....	38

그림 20. Hoop and axial residual stress on outer surface(10 inch dia.).....39  
그림 21. Hoop and axial residual stress on middle surface(10 inch dia.).....40  
그림 22. Hoop and axial residual stress on inner surface(10 inch dia.).....41  
그림 23. Hoop and axial residual stresses through the thickness (10 inch dia.).....42



## 1. 서론

액체금속로에서는 나트륨이 냉각재로 사용되기 때문에 장시간 운전중에 구조재료의 용접부에 많은 문제점이 발생하였다. 용접 구조물의 설계 및 제작 시에 잔류응력 및 변형의 영향에 대한 평가가 필요하며 이러한 고려에 의해 건전한 용접구조물을 유지할 수 가 있다. 용접과정은 일반적으로 접합부에서 재료를 용융점 이상으로 상승시키는 이동 용접열원에 의해 수행된다. 용접 후 온도분포는 높은 비선형 성을 갖는다. 가열과정에서 용접부의 균일하지 않은 팽창과 냉각동안의 수축현상은 국부적인 소성변형을 발생시켜 잔류응력 분포를 형성한다. 그러한 용접부에서 잔류응력의 분포는 피로나 파괴에 의한 손상의 해석 시 고려되어야 한다. 액체금속로는 높은 신뢰도를 요구하는 설계 필요조건과 용접특성을 가지고 있다. KALIMER-150의 시스템을 구성하는 주요 구성기기는 그림 1을 참고하면 원자로용기, 중간 열교환기, 증기발생기, 소듐 배관 등이다. 이러한 구성기기의 용접특성은 액체금속로 설계의 필요한 사항이다[1]. 액체금속로의 소듐 압력 경계의 건설을 위해 가장 많이 사용되는 재료는 오스테나이트 스테인리스 강이다. 화학 공정 및 석유 화학 시스템에서 많이 사용되고 있음에도 불구하고 스테인리스 강의 용접부에 대한 고온거동에 이용할 수 있는 자료는 별로 없는 실정이다. 또한 용접구조물의 설계 및 제작 시에 잔류응력 및 변형의 영향에 대한 평가가 필요하며 이러한 고려에 의해 건전한 용접 구조물을 유지할 수 있다.

잔류응력을 측정하는 방법으로서 초음파 탐상법, 천공법, x선 회절법 등이 사용되나 이러한 방법은 특성상 용접부의 표면 잔류응력 측정에 국한되어 적용될 수 밖에 없다. 이에 비해 중성자는 금속내부로 수 cm까지 침투할 수 있기 때문에 이를 이용하는 중성자 회절법은 재료내부의 응력을 측정할 수 있어 새로운 소재의 잔류응력의 측정에 많이 이용된다. 본 연구의 목적은 액체금속로의 배관 다층용접부의 용접과정을 유한요소해석을 수행하여 모사하고 용접 후의 잔류응력 분포를 예측하는 것이다. 잔류응력 측정을 위해 한국 원자력 연구소의 하나로에 설치된 고 분해능 중성자 분말회절장치(HRPD) 빔포트를 사용하였고 중성자 빔의 높은 투과력을 이용하여 용접부 내부의 특정한 위치에 대한 직교성분의 잔류응력 분포를 측정하였다. 용접시편은 소형(ANSI 4 inch schedule 80) 및 대형 다층용접 배관(ANSI 10 inch schedule 40)이 제작되었다. 측정은 normal, transverse and longitudinal 방향의 스트레인 컴포넌트를 측정하기 위해서 각각의 용접 시험편이 배치되고 이동하면서 이들 세 방향에 대한 산란벡터 Q에 의해서 각 방향의 측정 포인

트에 대한 스트레인 및 응력값을 구하였다. 또한 유한요소해석에서 다층용접의 온도 및 응력의 연성해석은 sequential weak coupling analysis를 사용하였다. 각 용접패스의 용착부는 ANSYS Code의 Birth and Death Option을 사용하여 각 패스의 용접직전에 용접영역에 부가되는 것으로 모델링 하였으며 중성자 회절에 의한 실험 및 유한요소해석 결과가 비교 분석되었다.

## 2. 용접부 잔류응력 측정기술 및 실험

### 2.1 용접부 잔류응력 측정기술

기계적인 구성기기의 구조적 건전성에 관한 잔류응력과 이들의 영향은 많은 관심을 집중시켜왔고 그 중요성이 점점 증가하고 있는 추세이다. 이러한 추세에 따라 잔류응력을 측정하는 방법도 새로운 방법이 개발되어 다양해지고 있다. 이러한 방법들에 대한 특성을 조사하고 원자력 관련 기기에 관한 그 적용성을 검토하여 보았다. diffractometric technique은 구성기기의 응력변화를 알 수 있는 매우 좋은 비파괴 검사 방법이다. X-ray method와 neutron diffraction method는 측정 시의 기술적인 어려움을 극복하기 위한 많은 노력이 기울여지고 있다. X-ray technique은 정확성과 신뢰성의 특성때문에 표면응력 측정의 분야에서 가장 널리 사용되고 있다. 또한 휴대용 장치의 개발은 현장에서 측정을 가능하게 했다. Neutron technique은 X-ray technique보다 더 강력하나 시험에 이용되는 장치가 매우 복잡하다. 왜냐하면 충분한 강도의 중성자 빔원이 크기가 매우크며 가격이 비싼 원자로나 선형가속기에 의해서만 생성되기 때문이다. 이러한 이유 때문에 현재 neutron diffraction technique은 비 상업적인 곳에 사용되며 미래에 있어서도 현장에서의 측정은 가능하지 않을 것이다. ultrasonic technique은 새롭게 개발된 기술로써 현장에서 잔류응력을 측정할 수 있는 잇점이 있다. 이러한 기술은 표면 응력 상태 및 구성기기의 부피에 대한 응력도 측정할 수 있다. 그러나 측정값은 두께에 따른 평균값을 나타낸다. 재료의 이방성과 조직에 대하여 측정 시 잔류응력의 영향을 구별할 수 있는 간단한 방법의 개발을 위해 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러한 재료 특성이 잔류응력에 영향을 미칠 수 있으며 큰 오차가 응력 평가 시에 일어날 수 있다. Electromagnetic technique은 매우 새로운 기술이다. 표면근처의 잔류응력이 다양한 자기적 또는 자

기 탄성적 인자를 측정함으로써 평가된다. 약간의 상업용 장비가 현재 이용되나 상업적 응용 보다는 기본적인 연구에 많이 사용되고 있고 개발의 많은 가능성을 가지고 있다. Drill hole technique은 시험 시에 시험재료의 파괴를 요하지는 않으나 재료에 대한 약간의 기계적인 가공이 필요하다. 이러한 점은 원자력 관련 구성기기의 안전성 때문에 원자력 산업에는 적합하지 않은 기술이다. 그럼에도 불구하고 이러한 방법은 mock-up에 관한 잔류응력을 측정할 수 있는 가장 강력한 방법이다.

현재 액체 금속로의 구성기기에 관해 현장에서 잔류응력을 측정할 수 있는 가장 적당한 방법은 X-ray diffraction technique이다. 그러나 이러한 기술은 현장에서 국부적인 부피에 대한 잔류응력의 측정은 가능하지 않다. 따라서 용접부 두께에 따른 잔류응력의 변화를 알기 위해서는 표면에서의 잔류응력의 값에 기본을 둔 수치 계산이 실행되고 mock-up에 대하여 연구실에서 실험이 수행되어야 한다[2].

## 2.2 용접부 실험방법 및 기술현황

### 2.2.1 X-ray diffraction technique

정확성 및 신뢰성의 특성과 장치가 소형인 장점을 가진 X-ray diffraction technique은 현재 상업적으로 가장 널리 사용되는 표면 잔류응력의 측정기술이다. 특히 액체 금속로 형태의 원자력 플랜트에서 구성기기의 표면 잔류응력을 측정하는데 적합한 특성을 가지고 있다. 한 위치에서 응력 상태를 측정하는데 필요한 시간은 약 15분 정도이고 아주 빠르게 해당 측정 부위에서 자료를 수집할 수 있다. 측정의 정확도도 좋으며 측정시 필요한 영역은  $1\text{ mm}^2$  내외이다. X-ray는 철을 포함하는 재료에서 수십  $\mu\text{m}$  정도의 짧은 투과력을 갖는다. 이러한 특성이 이 기술의 한계이며 표면응력의 측정에는 적합하지만 재료 내부에 존재하는 응력을 측정할 수 없다. 측정되는 물체가 두께를 따라서 응력의 상태가 크게 변화할 정도로 두껍지 않다면 큰 문제는 아니다. 이러한 기술은 현재 빠르게 발전되고 있으며 측정의 정확성 및 빠른 측정방법에 대한 개발이 진행 중 이다.

### 2.2.2 Neutron diffraction technique

X-ray technique은 정확하고 간편한 측정이 가능하나 단지 표면 측정만이 가능하고 재료 내부의 측정이 불가능하다. 이에 비해 중성자 빔은 금속의 수 cm를 투과할 수 있으며 재료의 내부응력을 측정하는 정확한 도구이다. 중성자 회절은 비파괴 방법에 의해 두께에 따른 재료내부의 응력 변화의 측정을 가능하게 만든다. 또한 작은 크기의 시험시편으로도 정확한 측정을 가능하게 만든다. 그러나 이러한 기술에도 몇 가지 결점은 있다. 충분한 강도를 갖는 중성자 빔원은 원자로나 선형가속기에서만 생산될 수 있다. 따라서 현장에서 측정할 수 없으며 측정 및 분석을 위해서는 표본을 실험장치까지 가져와야 한다. 이러한 것이 압력용기와 같은 커다란 원자력 관련 기기에서 이러한 방법을 사용하기가 곤란한 이유이며 측정시간도 길다. Neutron diffraction technique은 정확성과 분석의 좋은 특성과 시편의 두께를 따른 응력 측정을 제공할 수 있다.

이러한 잇점에도 불구하고 실험비용이 많이 들고 실험장치가 매우 커서 이동할 수 없으며 측정시에 오랜시간이 걸리므로 현재 상업용 목적으로는 사용하지 않고 있는 실정이다. 따라서 운전기기류의 측정에는 적합하지가 않으며 용접된 배관이나 중요한 기기의 mock-up 등의 측정에 적합하다. 또한 다른 측정기술 및 수치해석 방법의 결과를 확인할 때 매우 유용하다. 이 기술의 가장 중요한 특징은 내부응력의 측정을 위한 유일한 비파괴 기술이라는 점이다. 휴대할 수 있는 중성자 diffractometer를 만드는 것은 이러한 기술의 개발 측면에서 중요한 일이나 이것은 매우 어려운 일이다. 현재의 기술은 더욱 강한 중성자 빔원을 개발하여 더 좋은 측정의 정확도 및 짧은 측정시간을 얻는 것이 연구개발 동향이다. 현재의 기술 수준은 측정된 변형에 관한 미소응력과 이방성의 영향을 분석하는 단계이다.

### 2.2.3 Ultrasonic technique

Ultrasonic technique은 재료의 표면응력 상태 뿐만 아니라 구성기기의 부피의 응력을 평가할 수 있다. 이러한 방법은 초음파 전파속도에 대한 응력 상태의 영향에 기본을 두고 있다. Ultrasonic technique은 현장에서 장비를 사용하여 응력에 의해 일어나는 초음파 속도의 작은 변화를 정확히 측정할 수 있다. 그러나 특별한 기기에 대한 이 기술의 적용성은 다른요소를 고려하여 결정된다. 절대응력 결정의 첫번째 문제는 재료에서의 격자배열에 의한 속도변화의 특성이다. 재료의 격자배열이나 응

력에 의한 속도변화를 측정하여서 응력을 측정하기 때문에 측정의 큰 오차가 발생할 수 있다. 두번째 문제는 구성기기 자체의 기하학적 형상 및 치수이다. 이것은 어떤 형태의 파형을 이용할 것 인가를 결정한다. 몇가지 예를 들으면 아래와 같다.

- 두께 측정 시에는 만일 양쪽 면에서의 접근이 가능하지 않으면 반사에 대한 뒷벽이 필요하다

- 용접 표면은 초음파를 흐트러 뜨릴수 있거나 coupling을 방해할 수 있다.

- 측정대상의 형태는 특별한 파형의 선택을 필요로 할 수 있다.

사실상 응력의 측정을 위한 ultrasonic technique은 측정이 어려운 부분을 갖고 있으며 현장에서의 모든 기하학적 형상과 상태에 대해 측정이 가능한 것이 아니다. 각 연구주체와 관련하여 세계의 연구소 및 기업에서 연구를 수행하고 있으며 아래와 같은 대표적인 연구기관들이 있다.

- National NTD Center Harwell (영국)

- Battelle, NBS, University of Houston, SWRI (미국)

- IZFP (독일)

#### 2.2.4 Electromagnetic technique

Electromagnetic technique은 내구력 및 잔류응력 분포의 평가를 위한 비파괴 자기장을 이용한 방법이다. 재료 표면 근처의 잔류응력이 측정될 수있고 몇 개의 재료에 대한 측정값이 다양한 자기적 및 자기 탄성적인 요소에 기본을 둔 이러한 기술에 의해 평가될 수 있다. 많은 magnetic technique이 잔류응력 측정을 위해 개발되었으나 그 중 대표적인 검사방법은 magnetic barkhausen technique과 acoustic barkhausen technique이다. magnetic barkhausen technique은 다른 같은 종류의 기술 중에서 좀 더 진보한 기술이며 상업용 장비는 다루기 쉽게 만들어져 있다.

#### 2.2.5 Hole drilling strain gauge technique

Hole drilling technique은 시편에 약간의 구멍을 만들어서 측정을 하게 되는데 구멍의 치수가 너무 작아서 시험 대상기기에 큰 영향을 주지 않는다. 이와같은 방법은 비파괴 검사와 파괴 검사방법을 서로 혼합한 상호 보완적인 기술이다. 현재 이

방법의 응용의 예는 X-ray technique과 같은 회절기술의 급속한 개발에 의해 감소하는 추세이나 연구소에서 시험을 많이 수행하고 있다[3].

## 2.3 중성자 회절에 의한 잔류응력 실험

### 2.3.1 측정원리

비파괴적으로 잔류응력을 측정하기 위한 회절법은 결정들이 X-ray나 중성자에 의해 산란될 때 그 위상이 완전히 일치하여 서로 합쳐져서 강화되어 회절되는 빔의 각도를 측정함으로써 구해지며 여기서 구해진 각도를 Bragg's law를 이용하여 회절된 격자면의 면간거리를 구할 수 있다. 중성자 빔의 높은 투과력을 이용해서 다결정 조직을 갖는 물체 내부에 분포하는 잔류응력을 측정할 수 있는 유일한 기술로서 중성자 회절 측정법이 최근에 원자로나 설치된 나라들에서 응용기술로 연구되어 활용되어 진다. 항공기 부품으로 사용되는 알루미늄 합금에 대해서 미국이 오크릿지 중성자 회절 장치를 이용한 실험이 행하여 졌으며 캐나다의 Chalk River Laboratory의 시설을 이용하여 용접시편 등에 대한 측정이 행하여졌고 일본의 JAERI(Japan Atomic Energy research Institute)에서는 실험시설이 갖추어져 각종재료의 용접시편들에 대해 실험이 행해지고 있다. 다결정 금속조각이 비교적 긴거리에 걸쳐 균일한 스트레인을 갖도록 탄성변형될 때 결정립을 이루고 있는 격자면 간 거리는 응력이 없는 상태의 값에서 부과된 응력에 부합하는 새로운 값으로 바뀐다. 이 새로운 면간거리는 본질적으로 응력에 대해 비슷한 방향을 갖는 면들의 특별한 집합에서는 모든 결정립에서 일정하다. 중성자 회절을 이용한 잔류응력의 측정은 이 결정들의 면간거리를 측정함으로써 측정되어진다. 균일 스트레인을 갖는 회절선에서 회절선의 이동으로 스트레인이 계산될 것이고 스트레인을 알면 기계적으로 측정된 재료의 탄성계수를 이용한 계산이나 이미 알려진 응력에 의해 산출된 스트레인의 측정을 기초로한 보정작업을 통하여 존재하는 응력을 결정할 수 있다. 따라서 중성자 회절은 X-ray 회절과 마찬가지로 비파괴적인 방법에 의해 잔류응력을 측정할 수 있는 유일한 방법으로 사용될 수 있다. 결국 X-ray 회절이나 중성자 회절의 측정은 어떤 다른 방법들과 같이 측정되어지는 것은 스트레인이고 응력을 결정하는 것은 스트레인에 대한 계산이나 보정으로 간접적으로 측정된다. 일반적으로 응력은 텐서량이기 때문에 한

지점의 응력상태를 알기 위해서는 6방향에 대한 응력의 상태를 측정하여야 하지만 주응력의 방향이 결정되었다면 나머지 3방향에 대한 측정으로 특정부위의 응력상태를 구할 수 있다. 주응력의 방향은 잔류응력 측정 실험의 초기설계에서 세방향에 대해서는 결정되기 때문에 나머지 세방향에 대한 측정값들에 의해서 측정 대상물에 분포하는 응력분포를 추출해 낼 수 있다. 중성자 회절법을 이용한 측정은 스트레인을 기준 정보로써 시험편 내부에 존재하는 격자들간의 면간거리와 회절각을 측정함으로써 스트레인이 결정되며 Bragg's law  $2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$  (여기서  $n$ 은 상수이며,  $\lambda$ 은 입사비의 파장,  $d$ 는 격자거리,  $\theta$ 는 특정한 격자면(hkl)에 대한 회절각을 나타낸다)에 의해서 응력을 받은 측정대상물에 회절탐색부피의 격자면(hkl)에서 격자거리  $d$ 를 측정한다. 그리고 측정대상 시편의 응력을 받지 않은 상태의 값들도 또한 구할 수 있을것이다.

그림 2에서 측정되는 스트레인 값은 입사빔과 회절빔이 교차하는 회절탐색부피의 영역에서 산란벡터  $Q$ 의 방향에 대해 구해지며 회절피크의 정확한 측정과 측정시편의 탄성계수, 측정시편과 같은 재질의 응력을 받지 않은 상태에서 측정되어 지는 시편의 격자거리  $d_0$ 를 비교하여 각 방향에 대한 격자변형을  $\Delta d/d$ 를 구함으로써 시편내부에 존재하게 되는 잔류응력을 측정할 수 있다[4].

### 2.3.2 하나로의 중성자 회절실험

중성자 회절을 이용한 측정은 한국원자력연구소 하나로 원자로에 설치되어있는 HRPD 빔포트와 위치 민감형 검출장치를 이용하였다. 먼저 하나로 원자로를 이용한 잔류응력 측정의 신뢰성을 검증하기위해 국제적 교차 비교측정 협력 프로그램인 VAMAS(The Versailles Project on Advanced Material and Standard) TWA-20에서 실시한 표준시편(알루미늄 ring과 plug)의 표준시험측정 결과를 캐나다의 Chalk River Laboratory와 JAERI에서 실시한 결과값을 비교한 결과 97%이상의 일치된 결과값을 얻었으며 위와 같은 결과로 하나로 원자로의 중성자를 이용한 잔류응력 측정값은 신뢰할 수 있는 정확한 측정장치임이 확인되었다.

그림 3은 실험장치의 개념도이며 그림 4는 소형 배관시편의 형상이다. 그림의 오른쪽에 위치한 입사빔을 고정시키고 시편의 홀더 아래부분에 있는 X-Y방향의 트랜스레이터와 왼쪽에 있는 디텍터를 조정하여 센터축을 결정하게 된다

그림 5는 HRPD 빔 포트와 위치 민감형 검출장치로써 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. 그림 6은 측정을 위해 sample stage에 고정된 대형배관 시험편의 형상이다. 용접시험편의 측정은 그림 7에 도시하고 있는 것과 같이 세방향인 normal, transverse and longitudinal 방향의 스트레인 컴포넌트를 측정하기 위해서 각각의 용접 시험편이 배치되고 이동하면서 이들 세 방향에 대한 산란벡터  $Q$ 에 의해서 각 방향의 측정 포인트에 대한 스트레인 값이 구해진다. 실험에서 용접시험편을 정확한 위치에 포지션하고 이동하는지가 중요하며 중성자를 이용한 실험에서 빔이 회절탐색부피에 적절하게 입사되고 회절을 조절하는 빔 슬릿 간격의 치수와 입사빔과 회절빔 사이의 각도가 중요한 변수였다. 중성자를 흡수하는 두 개의 cadmium sheets slit이 입사빔과 회절빔에 앞에 놓여 스트레인을 측정하는 회절탐색부피를 조정하였다.

응력을 받은 측정대상물이 격자거리  $d'$ 에 대해서 측정 대상물과 같은 재료의 응력을 받지 않은 상태의 격자거리  $d_0$ 가 측정되면 격자변형은 식(1)과 같다.

$$\varepsilon = \frac{d' - d_0}{d_0} \quad (1)$$

이 식에 Bragg's law의 식을 대입해서 정리하면 용접된 시험편과 응력을 받지않은 시험편의 격자거리는 다음의 식(2)와 같다.

$$d' = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta'} \quad (\text{welding sample})$$

$$d_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta_0} \quad (\text{unwelding sample}) \quad (2)$$

위의 식 (2)을 식 (1)에 대입하면 시험편의 변형율은 다음의 식(3)과 같이 격자면간 거리의 값과 회절각의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{d' - d_o}{d_o} = \frac{\sin \theta_o}{\sin \theta'} - 1 \quad (3)$$

이때  $\theta' \approx \theta_o$  ( $\Delta\theta \approx 0$ ) 이면

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \sin(\theta' - \Delta\theta) = \sin \theta' \cdot \cos \Delta\theta - \cos \theta' \cdot \sin \Delta\theta \\ &\approx \sin \theta' - \cos \theta' \cdot \Delta\theta \\ &(\because \Delta\theta \approx 0 \rightarrow \cos \Delta\theta \approx 1, \sin \Delta\theta \approx \Delta\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

이고 strain은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sin \theta_o}{\sin \theta'} - 1 \\ &\approx \frac{(\sin \theta' - \cos \theta' \cdot \Delta\theta)}{\sin \theta'} - 1 = -\cot \theta' \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad (5)$$

각 방향에 대한 strain은 식 (1) 또는 식(5)를 이용하여 구할 수 있으며 각 방향에 대한 strain의 기호는 다음과 같이 정의한다.

Radial direction:  $\varepsilon_{11}$ , Hoop direction:  $\varepsilon_{22}$ , Axial direction:  $\varepsilon_{33}$

위에서 구해진 변형율과 측정시편의 회전탄성계수 값과 포아송 비를 후크의 법칙 (Hook's law)에 적용하면 각 방향에 대한 응력을 아래의 식으로부터 구할 수 있다 [5,6].

$$\text{Radial direction: } \sigma_{11} = \frac{E}{(1 + \nu)} \left[ \varepsilon_{11} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right]$$

$$\text{Hoop direction: } \sigma_{22} = \frac{E}{(1 + \nu)} \left[ \varepsilon_{22} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right]$$

$$\text{Axial direction: } \sigma_{33} = \frac{E}{(1 + \nu)} \left[ \varepsilon_{33} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right]$$

## 2.4 실험결과에 대한 고찰

실험에 사용된 316L 스테인리스 강의 용접부는 항복응력이 overmatch된 용접봉을 사용하였다. 사용된 용접봉은 상온에서 모재의 항복응력에 두배에 가까운 값을 가지고 있다. 소형 및 대형배관의 원주방향 응력에 대한 실험값을 그림 8 및 그림 9에서 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[7]. 측정된 축방향 최대응력은 그림 10 및 그림 11을 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 비교하면 소형배관에서 잔류응력분포가 전체적으로 더 크게 발생하였다[8].

### 3. 액체금속로 배관 용접부의 잔류응력해석

#### 3.1 용접 및 경계조건

그림 12는 배관 다층용접부의 단면 2차원 형상 및 잔류응력 측정위치를 나타낸 것이다. 잔류응력의 측정점 수는 각 시편당 18개이었다. 소형 및 대형의 두 종류의 배관이 실험되었으며 치수를 표 1에 나타내었다. 모재는 316L 스테인리스 강이며 사용된 용접봉은 AWS A5.4의 규격에 따른 E316L-16에 해당하는 국산 용접재료이고 모재에 비해 높은 항복강도를 나타낸다. 용접방법은 SMAW이고 용접속도는 350 mm/min이며 용접조건이 표 2에 나타나있다. 3차원 용접배관 단면에 대한 2차원 축대칭 모델을 사용하였으며 좌우대칭을 가정하여 좌측면으로는 열손실이 없는 단열로 가정하였다. 입열조건은 용작금속에 해당하는 요소에 용융점 이상의 균일온도를 온도하중으로 추가하여서 모델링 하였다. 또한 자연대류 열전달계수는 배관외면에서  $1.95 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 내면에서는 외면의 1/2 값을 적용하였으며 복사의 효과는 무시하였다[9].

그림 13은 소형배관에 대한 유한요소모델 형상이다. 용접부의 구속조건은 좌측 대칭면의 x방향 변위가 구속된 평면변형 상태이며 우측 하단부는 y방향으로 단순 지지되었다 [10].

#### 3.2 지배 방정식

### 3.2.1 열적 모델

용접부의 해석 시에 열적문제에 대한 수학적 모델은 아래의 방정식에 의해 설명된다.

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial X_i} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

초기상태는 다음과 같이 표시되어 진다

$$T(X_i, t=t_o) = T_o(X_i) \quad (7)$$

경계조건에 대해 살펴보면 온도상태, 열흐름 상태 및 대류경계상태가 아래의 (8), (9), (10)의 식으로 나타내어진다.

$$T(X_i, t) = \bar{T}(X_i, t) \quad (8)$$

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = q \quad (9)$$

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = h(T - T_e) \quad (10)$$

여기서  $n_i$ 는 표면에 수직한 방향의 요소(component) 이며  $h$ 는 열전달 계수,  $T_e$ 는 주위온도 이다. 그리고 복사 경계 상태는 (11)식과 같이 표시된다.

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = \sigma \varepsilon f(T^4 - T_e^4) \quad (11)$$

$\sigma$ 는 스테판 볼츠만(Stefan-Boltzman) 상수 이고  $\varepsilon$ 는 방사율,  $f$ 는 형상계수 이다.

### 3.2.2 기계적 모델

재료가 기계적으로 등방성, 열 탄소성 등의 거동을 한다고 가정하면 전 변형율은 아래와 같이 표시된다.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{th} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (13)$$

$\delta_{ij}$  : Kronecker symbol

$\nu$  : 포아송 비

$E$  : 영 계수

$$\varepsilon_{ij}^p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{ij}^p dt \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ij}^{th} = \alpha (T - T_o) \quad (15)$$

여기서  $\alpha$ 는 열 팽창 계수이고  $T_o$ 는 기준온도 이다.

이를 시간  $t+\Delta t$ 에서의 각각의 변형을 증분 항으로 나타내면

$${}_t\varepsilon_{ij} = {}_t\varepsilon_{ij}^e + {}_t\varepsilon_{ij}^p + {}_t\varepsilon_{ij}^{th} + {}_t\varepsilon_{ij}^{e'} \quad (16)$$

$${}_t\varepsilon_{ij}^p = \Delta t \Lambda^{t+\Delta t} \tau' \quad (17)$$

$${}_t\varepsilon_{ij}^{th} = {}^{t+\Delta t}\alpha {}^{t+\Delta t}T - {}^t\alpha {}^tT \quad (18)$$

$${}_t\varepsilon_{ij}^{e'} = \frac{\partial [C^E]^{-1}}{\partial T} \bullet \{ {}^t\tau \} dT \quad (19)$$

여기서  ${}_t\varepsilon_{ij}^e$ ,  ${}_t\varepsilon_{ij}^p$ ,  ${}_t\varepsilon_{ij}^{th}$ 는 각각 탄성, 소성, 열 변형율의 증분항,  ${}_t\varepsilon_{ij}^{e'}$ 는 등가 초기 변형율,  $C^E$ 는 탄성 구성식 텐서,  $\Lambda$ 는 상수 그리고  $\tau'$ 는 deviatoric stress 이다. 열응력에 대하여 가상일의 원리를 도입하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V f_i^b \delta U_i dV + \int_V f_i^s \delta U_i dS \quad (20)$$

여기서  $f_i^b$ ,  $f_i^s$ ,  $\delta U_i$ 는 각각 경계  $S$ 에서의 체력, 표면력 및 변위이다[11,12].

### 3.3 해석모델

다층용접 배관의 해석영역에 대한 개념도는 그림 14에 나타내었다. 다층용접의 온도 및 응력의 연성해석은 sequential weak coupling analysis를 사용하였다. 해석요소로는 온도와 변위에 대한 자유도를 모두 갖고있는 PLANE 13를 사용하였으며 입열부는 보다 세밀하게 모델링 하였다. 또한 각 용접패스의 용착부는 ANSYS Code의 Birth and Death Option을 사용하여 각 패스의 용접직전에 용접영역에 부가되는 것으로 모델링 하였다. 즉 첫번째 용접패스 동안에는 두번째 용접패스를 비 활성화 시키므로써 실제 해석 시에

는 모델로 부터 제거시킨 후에 다시 활성화시켜 입열량을 부가하고 해석에 적용한다. 또한 용접패스 간에 냉각되는 일정한 시간간격을 주어 해석에 적용하였다. 해석에 사용된 모재와 용접봉의 열 물성치는 표 3에 나타나있고 기계적 물성치는 표 4에 표시하였다. 7층 및 8층용접의 경우에 용입되는 용접재는 4개의 lumped pass로 모델링 하여 하부에서 부터 차례로 용접영역에 부가하였고 재료의 탄소성 거동에서의 구성방정식은 bilinear kinematic hardening 영향을 고려하였다[13,14].

### 3.4 해석결과

#### 3.4.1 온도 및 잔류응력 분포

첫번째 용접패스 후 용융부 주변의 온도분포는 그림 15(1 pass)와 같다. 일정시간 간격 후 용접부의 온도가 충분히 냉각된 후에 나머지 용접패스가 하부에서 상부로 순차적으로 진행되었으며 각 용접패스를 부가한 다음 10초 후의 용접부의 온도분포는 그림 15(2, 3, 4 pass)와 같이 예측된다. 용융부 주변의 온도분포는 유한요소해석 시 열해석모델의 mesh의 형태가 실험시편에 사용된 7개의 패스를 4개로 조합하여 적용하여도 용융부의 온도분포가 매우 부드럽게 변화하는 것을 알 수 있었다. 용접부 주변의 잔류응력 분포의 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 잔류응력 구역의 크기를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 각 패스 후에 용접부의 원주방향 잔류응력 분포는 하부에서 상부로 이동되며 그 영역이 증가된다. 마지막 용접패스 후에 용융부에서 최대 인장응력 값에 도달한다[15].

#### 3.4.2 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 0.075이며 용접부 중심에서부터 x 방향으로의 거리에 따른 배관외면에서의 잔류

응력 분포를 그림 16에 나타내었다. 용접부 중심에서의 측정된 원주방향 잔류응력은 303MPa이고 해석에 의한 값과 잘 일치함을 알 수가 있다. 해석결과에 의하면 용접부 중심선과 HAZ사이의 영역에서 고인장응력이 발생하여 그 구역 내에서 최대 인장응력이 존재하였다. 그 이후에서는 응력이 급격히 감소되며 용접부 중심에서 멀어지면 압축응력이 발생한다. 배관중양면 및 내면에서의 응력분포를 그림 17 및 그림 18에서 살펴보면 두 경우에서 최대 원주응력은 용접부 중심에서 발생하였다. 배관중양면에서 451MPa의 최대 원주응력이 발생하였으며 배관내면에서는 용접부 중심의 원주방향 응력이 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 잔류응력분포는 그림 19에서 보면 축방향 잔류응력은 배관중양면에서 실험결과와 불일치함을 나타내었다.

### 3.4.3 대형배관의 잔류응력 분포

대형배관의 두께 대 직경의 비( $t/d$ )는 0.034 로써 큰 배관직경에 비하여 두께가 작은 형태이다. 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 분포는 그림 20에서 보면 용접부 중심에서 측정된 값은 소형배관에 비해 작은 값을 나타내었으며 해석에 의한 값이 실험값에 비해 크게 계산되었다. 배관중양면 및 내면에서의 원주방향 잔류응력 분포는 그림 21 및 그림 22에서 살펴보면 실험값과 해석값의 결과가 정량적으로는 다소 차이가 있지만 정성적으로 잘 일치하였으며 소형배관의 결과와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 용접중심에서 두께방향에 대한 잔류응력분포는 그림 23과 같으며 해석된 축방향 잔류응력이 배관외면보다 내면에서 더 큰 값을 나타내었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 316L 스테인리스강 다층용접배관의 잔류응력을 중성자 회절법을 사용하

여 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.

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

둘째, 원주방향 및 축방향 최대응력은 배관중양면에서 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.

셋째, 용접부 중심에서 원주방향 잔류응력은 배관외면에서 소형배관이 더 큰 인장응력 값을 가졌으나 배관중양면 및 내면에서는 대형배관이 더 큰 인장응력 값을 나타내었다. 축방향 잔류응력은 대형배관과 비교하여 소형배관에서 전체적으로 더 크게 발생하였다.

사용된 용접봉의 물성치는 상온 항복응력 값만 확보하였으며 온도에 따른 물성치의 변화는 선형으로 가정하여 사용하였다. 따라서 고온 물성치의 적용 및 세밀한 모델링을 통하여 더 좋은 해석결과를 얻을 수 있을 것이다. 재료의 탄소성 거동에서의 구성 방정식은 해석결과의 정확성에 있어서 중요한 요소이다. 항복의 개시를 정의하기 위하여 Von Mises 항복기준이 사용되었고 소성변형에서의 유동법칙(flow rule)은 bilinear kinematic hardening 영향을 고려하였다. 재료거동의 보다 정확한 해석을 위해서는 combined kinematic-Isotropic hardening 모델이나 더 새로운 구성방정식의 개발도 필요한 관건이다. 향후 원자로용기 시편에 대한 잔류응력 평가를 수행할 예정이며 용접부의 3차원 모델링을 통하여 용접부의 start and stop 위치에 대한 잔류응력의 분포도 평가되어야 한다.

## 참고문헌

1. 김석훈, 유봉 등, “액체금속로 구조재의 소듐 누출사고 분석”, KAERI/AR-616/2001 (2001)
2. V. de Angelis, C. Sampietri: State of the art regarding the problem of residual stresses in welds of LMFBR components, EUR 15895 en(1995)
3. M. T. Flaman : Brief investigation of induced drilling stresses in the center-hole method of residual stress measurement, *Experimental mechanics*, **22**(1982)
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
6. V. T. Em 외 6인, “중성자 회절에 의한 잔류응력 측정법 개발”, KAERI/TR-1343/99, (1999)
7. P. Dong and J. Zhang : Residual stresses in strength-mismatched welds and implications on fracture behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, **64**(1999), 485-505
8. 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
9. 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
10. Juan C. Suarez, Lidekazu Murakawa and Yukio Ueda : Effect of welding residual stress on fracture toughness testing, *Trans. JWRI*, **26-1**(1997), 28-35
11. 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
12. 김석훈 외 2인, “액체금속로 다층용접부의 열해석”, *Journal of KNS*, May(2000).
13. C. K. Leung, R. J. Pick : Finite element analysis of multipass welds, *WRC Bulletin* **356**(1990),

11-33

14. 김석훈, 이재한, “액체금속로 배관 다층용접부의 잔류응력 실험 및 해석”, *Journal of KNS*, October(2002).

15. H. Murakawa : Theoretical prediction of residual stress in welded structures, *Welding International*, **11-8**(1997),2-7



### ☒ 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

### ☒ 2. Welding condition

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

☒ 3. Thermal properties of stainless steel 316 L

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

☒ 4. Mechanical properties of 316 L stainless steel and weld metal

T (°C)	E (GPa)	s <sub>y</sub> (MPa) Base	s <sub>y</sub> (MPa) Weld	E <sub>T</sub> (MPa)	ν	α (1/°C)
40	210	230	460	2800	0.26	19x10 <sup>-6</sup>
400	168	139	278	2370	0.32	19x10 <sup>-6</sup>
800	133	80	160	1900	0.25	19x10 <sup>-6</sup>
1200	55	22	22	600	0.24	19x10 <sup>-6</sup>
1390	10	2	2	100	0.24	19x10 <sup>-6</sup>
1600	10	2	2	100	0.24	19x10 <sup>-6</sup>

E= Elastic Modulus, s<sub>y</sub>= Yield Stress, E<sub>T</sub>=Tangent modulus, ν = Poisson's Ratio, α = Linear Thermal Expansion Coefficient

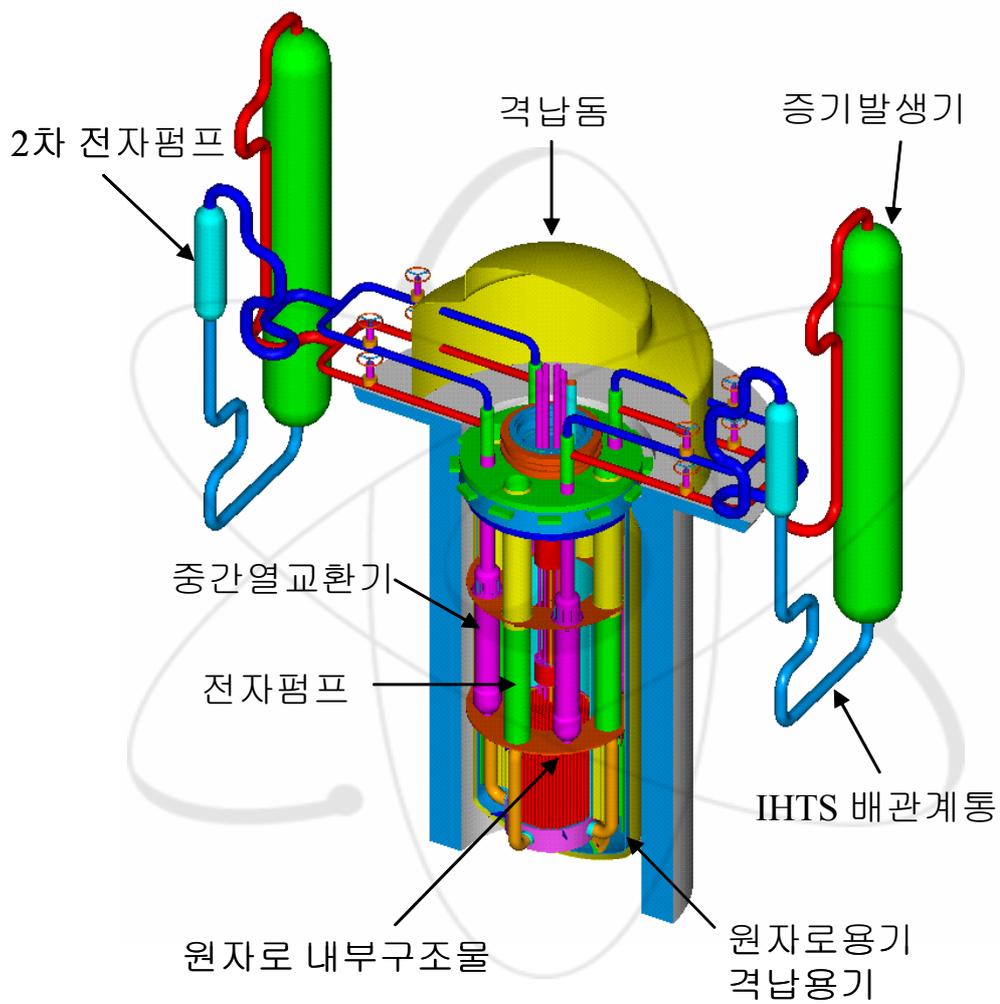


그림 1. Main component of KALIMER-150

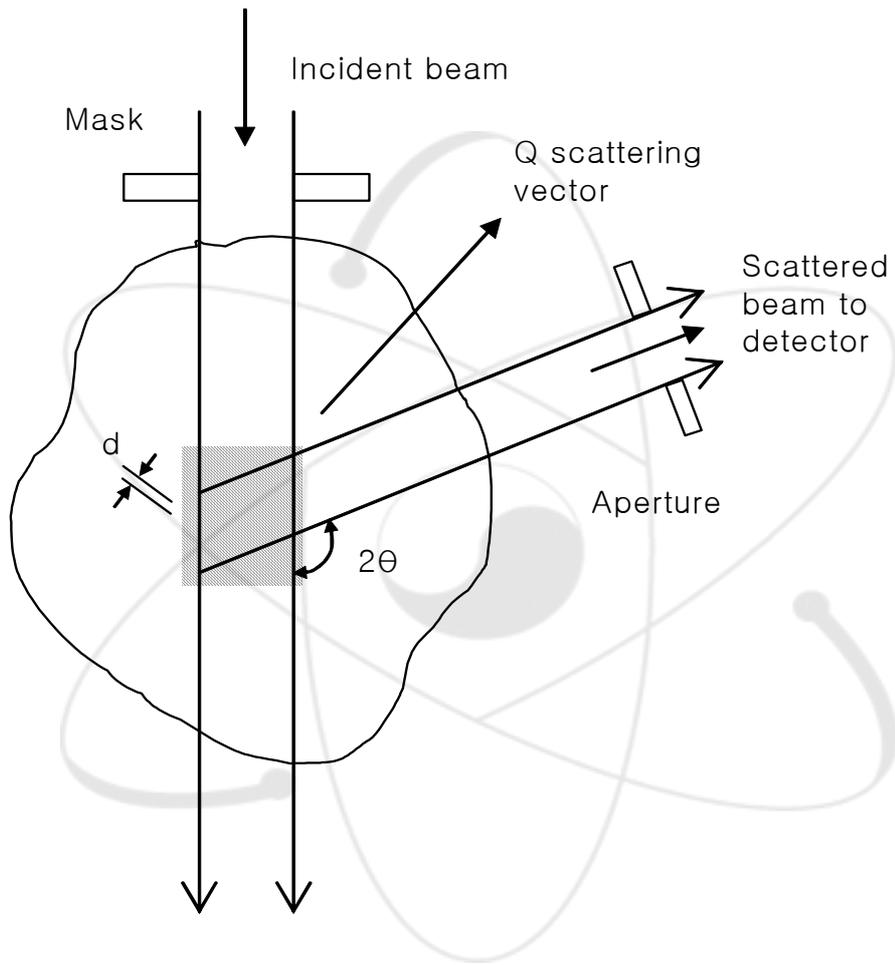


그림 2. Schematic of experiment setup used for neutron diffraction studies

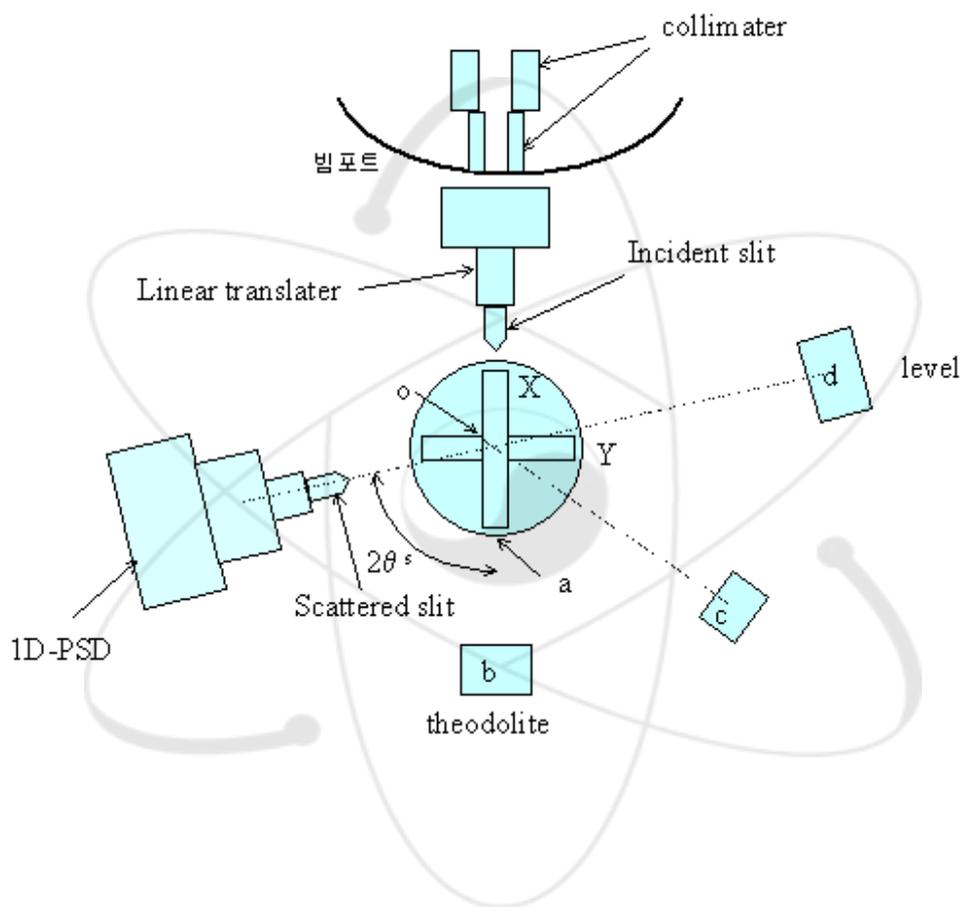


그림 3. Schematic diagram of experimental apparatus



그림 4. Configuration of small pipe specimen



그림 5. High Resolution Powder Diffractometer instrumented in HANARO

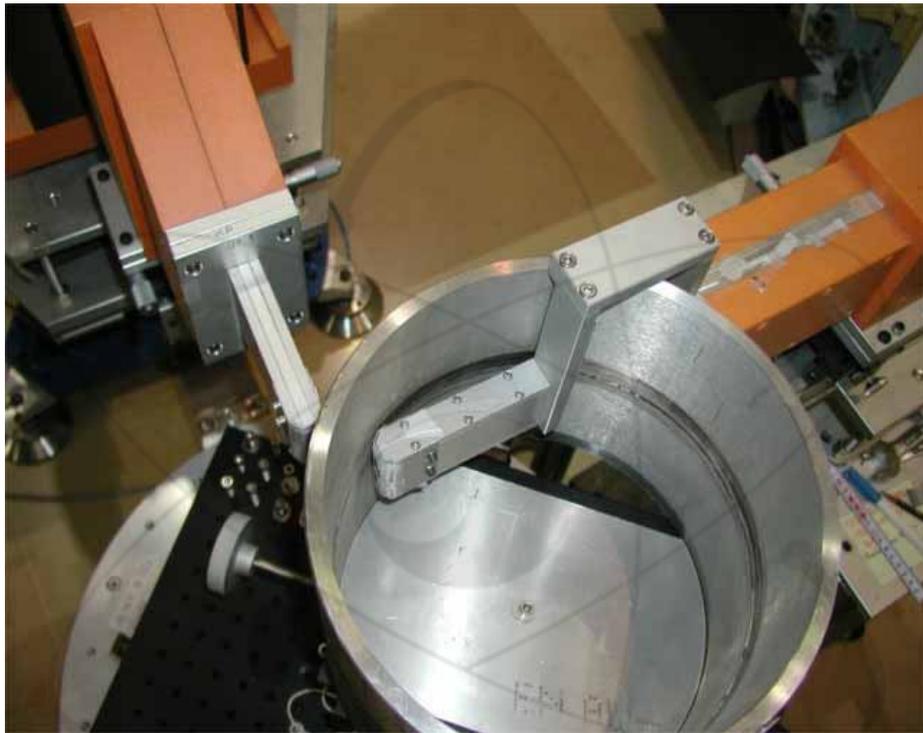


그림 6. Configuration of Large pipe specimen fixed in the sample stage

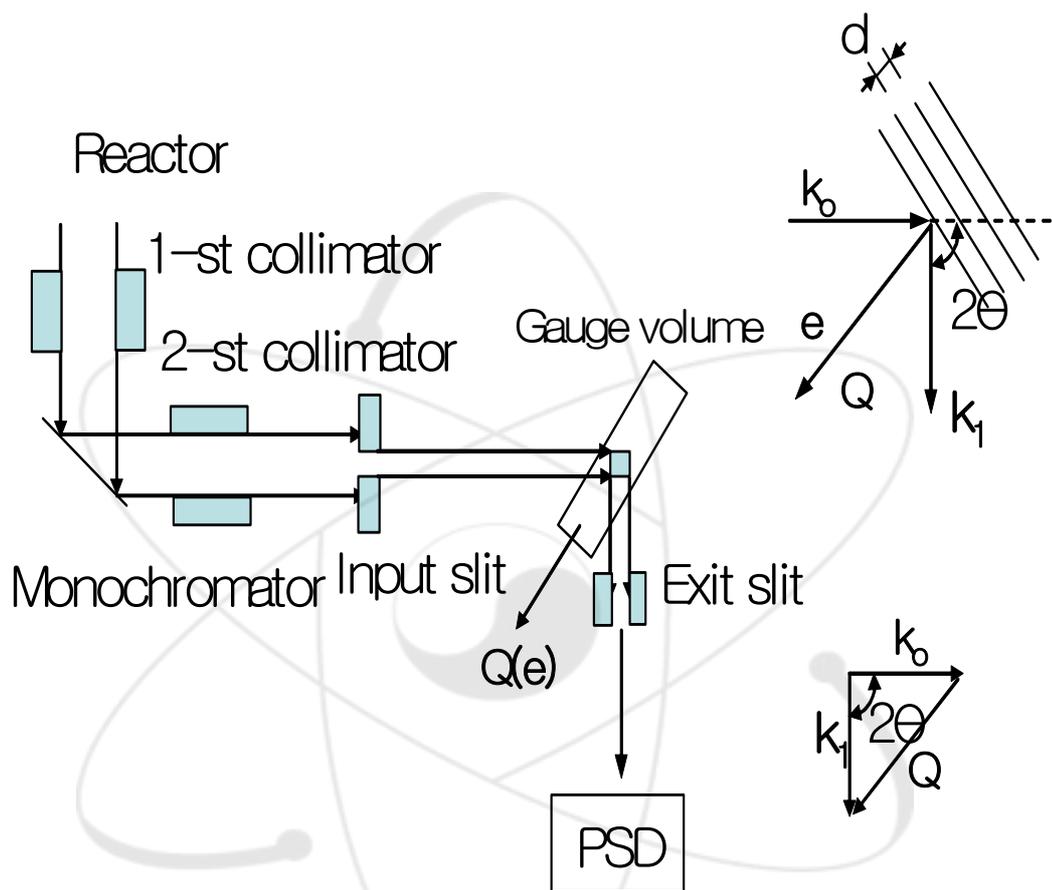


그림 7. Strain measurement schematic

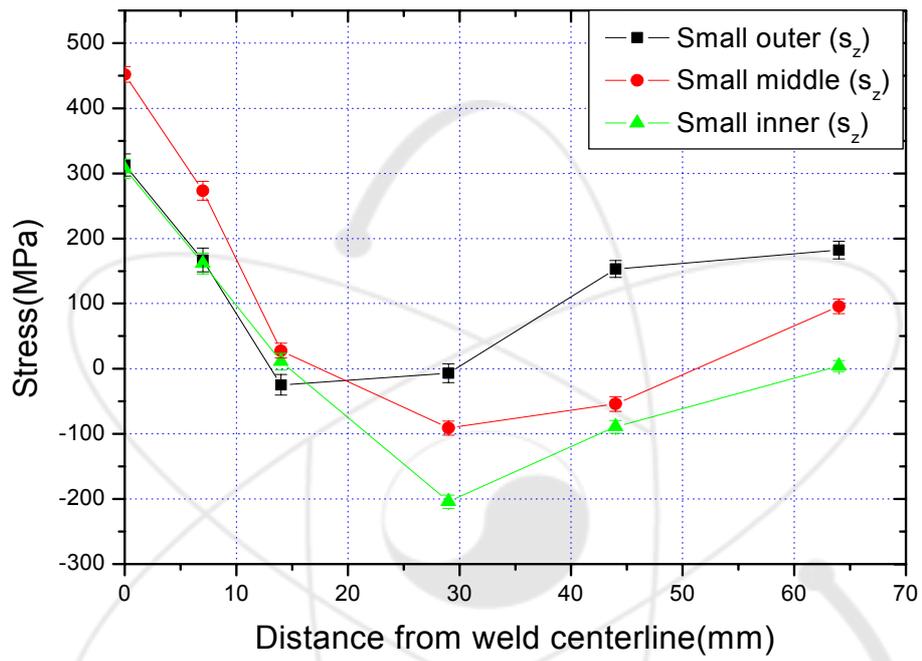


그림 8. Distribution of the hoop residual stress on the experimental data(Small pipe)

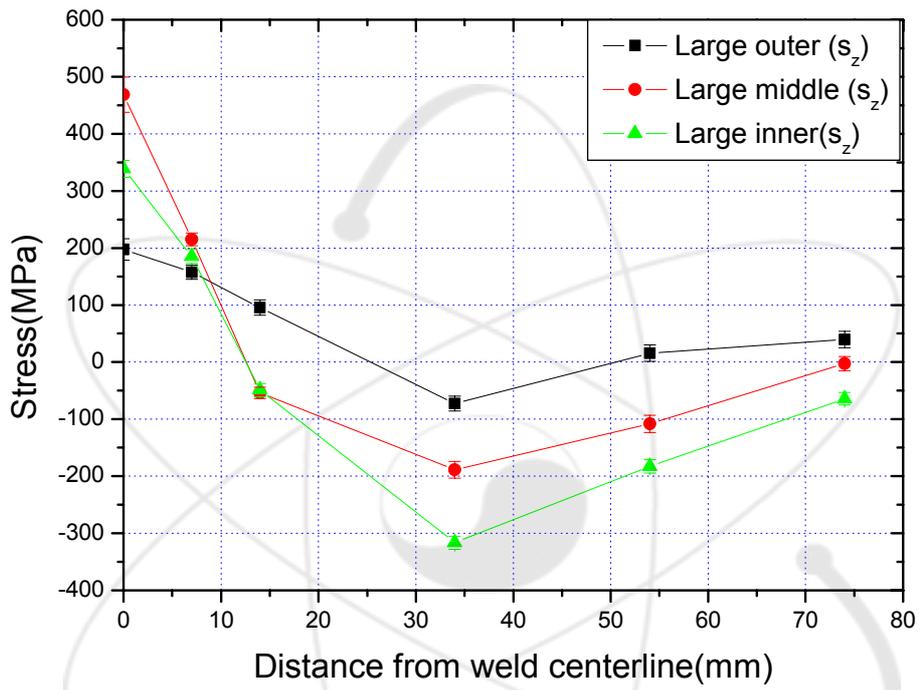


그림 9. Distribution of the hoop residual stress on the experimental data(Large pipe)

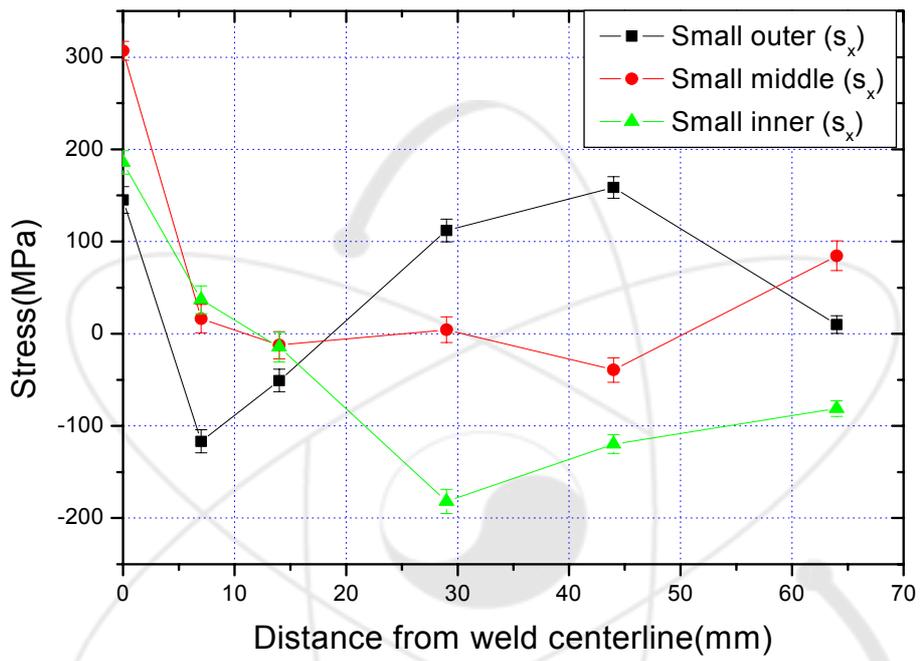


그림 10. Distribution of the axial residual stress on the experimental data(Small pipe)

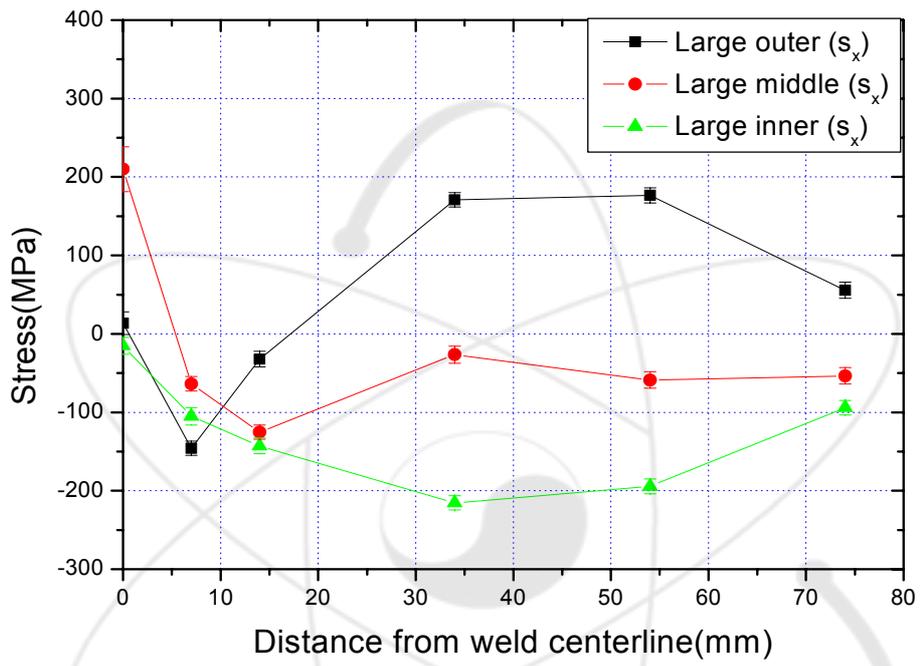
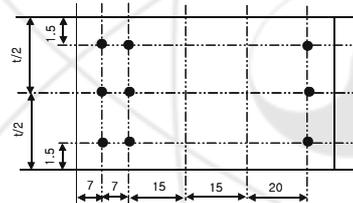
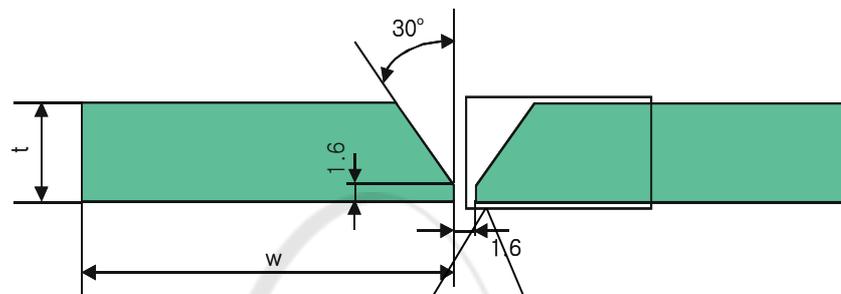
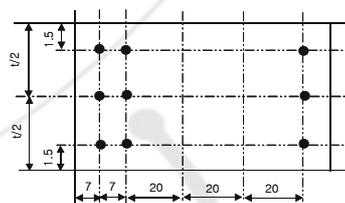


그림 11. Distribution of the axial residual stress on the experiment data(Large pipe)



(4 inch schedule 80)



(10 inch schedule 40)

그림 12. Configuration of the weld joints and measurement points of the experiment

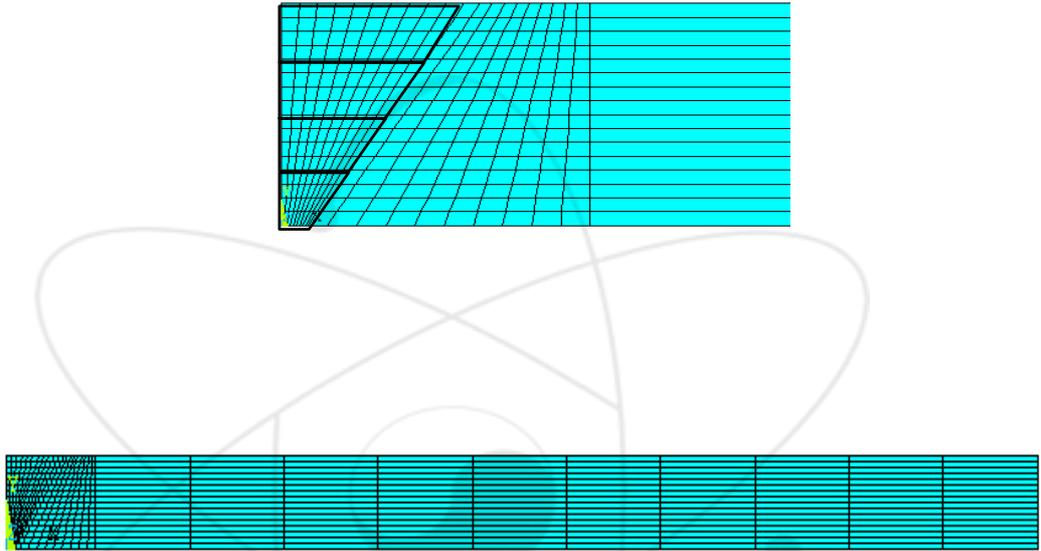


그림 13. Finite element model of analysis area

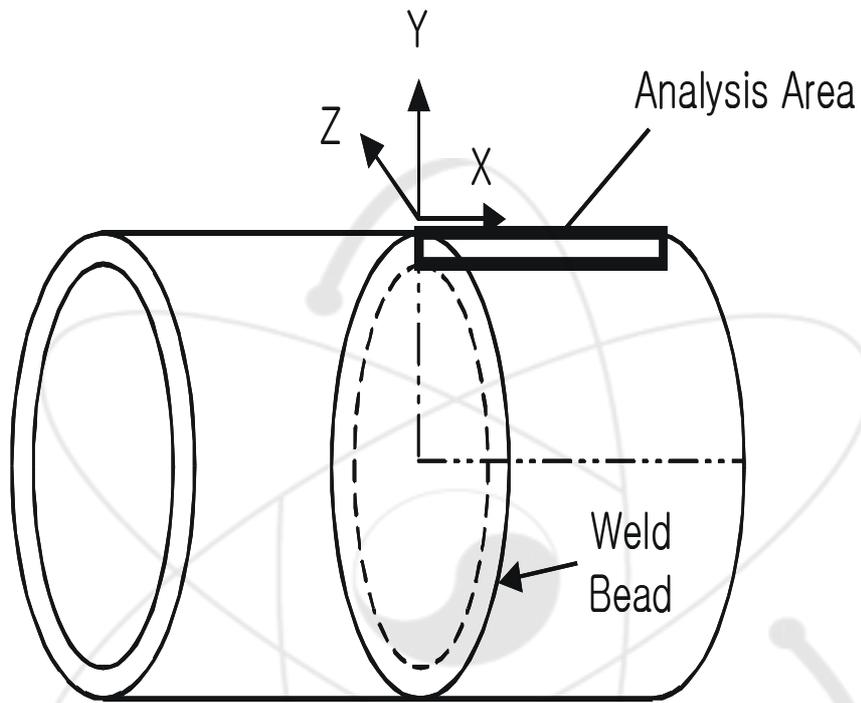


그림 14. Schematic diagram of multipass weld pipe

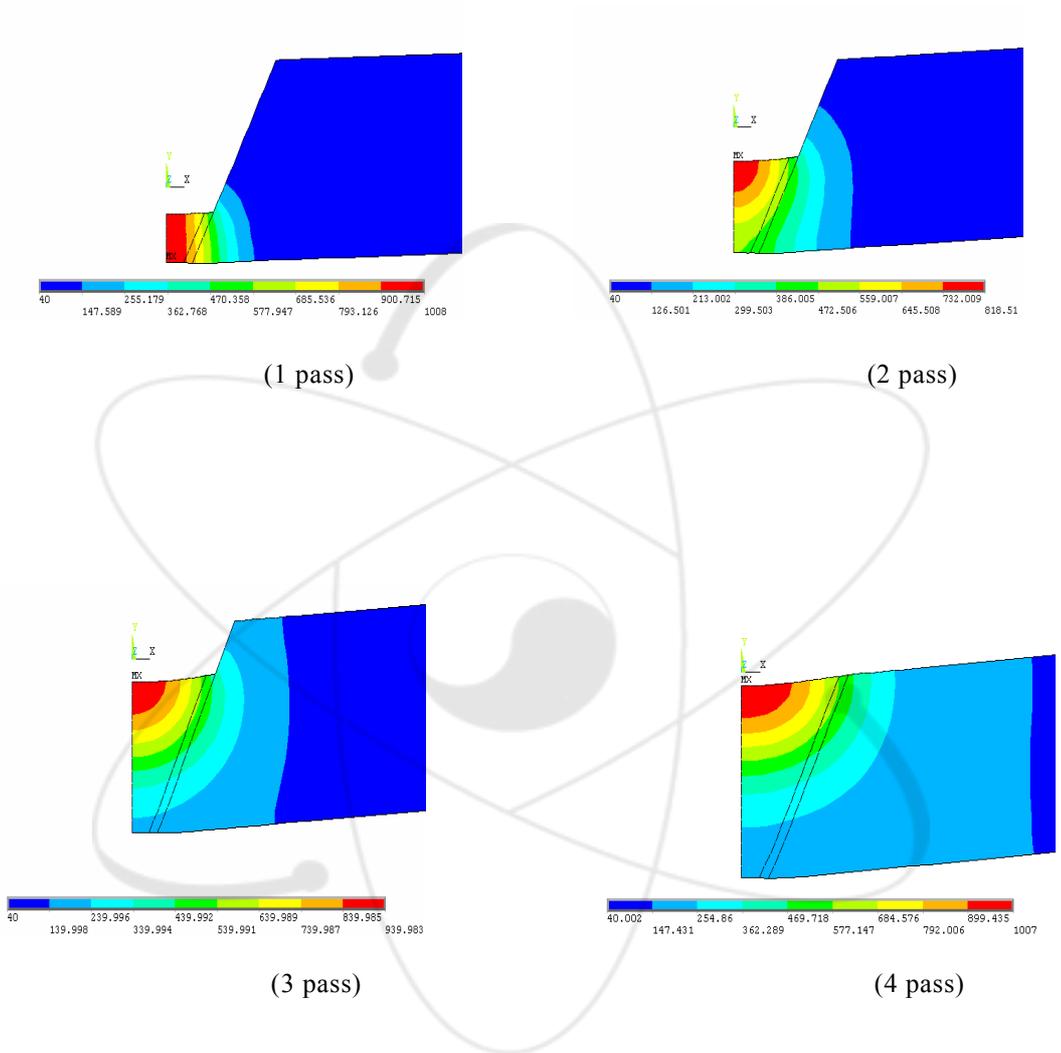


그림 15. Temperature distribution of the weld after each weld pass

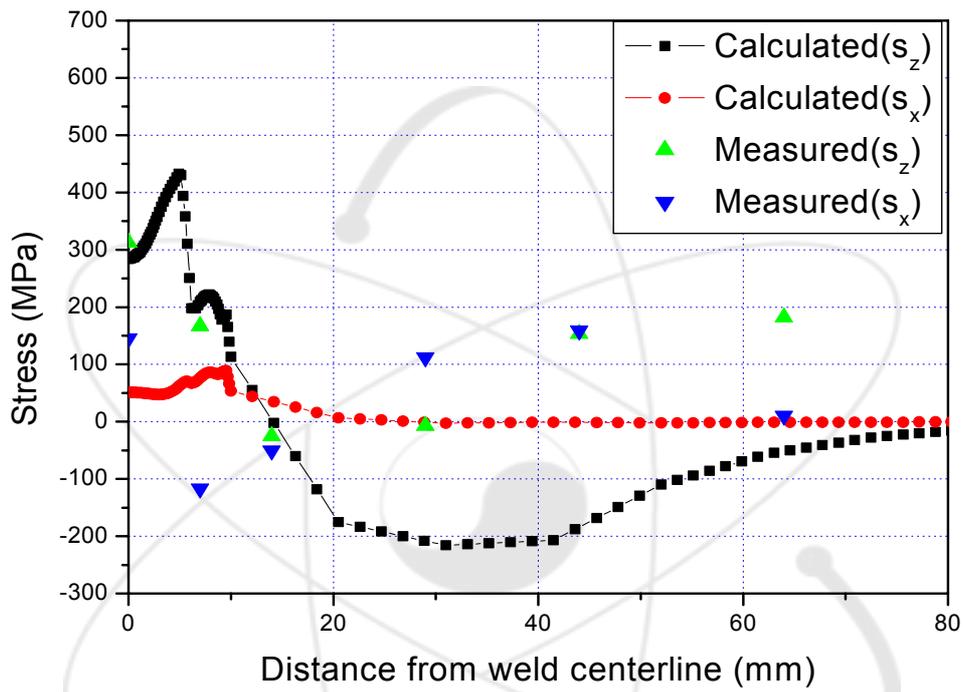


그림 16. Hoop and axial residual stress on outer surface(4 inch dia.)

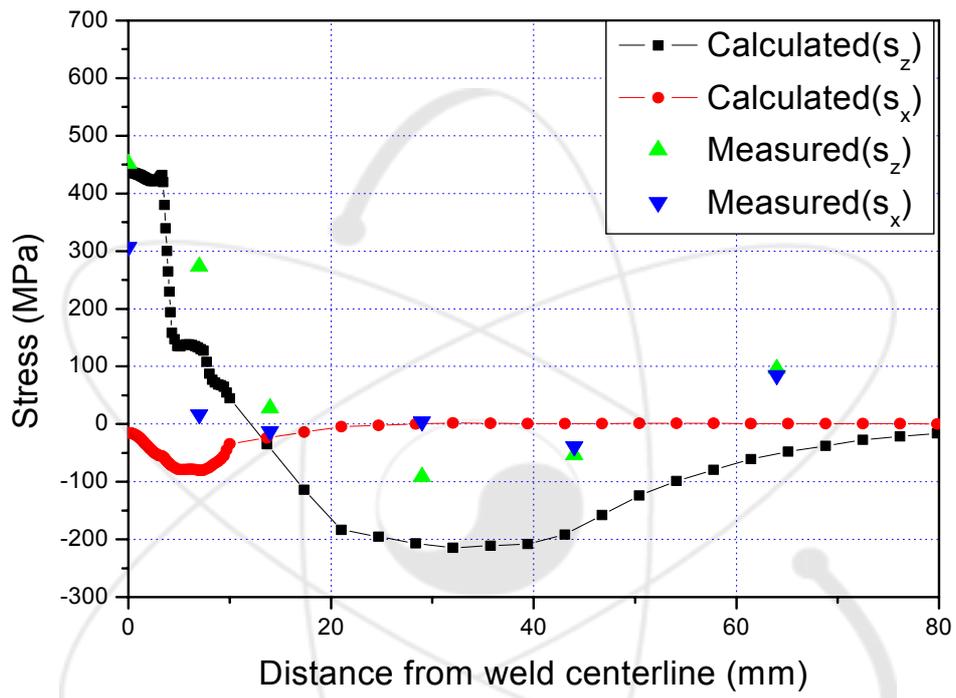


그림 17. Hoop and axial residual stress on middle surface (4 inch dia.)

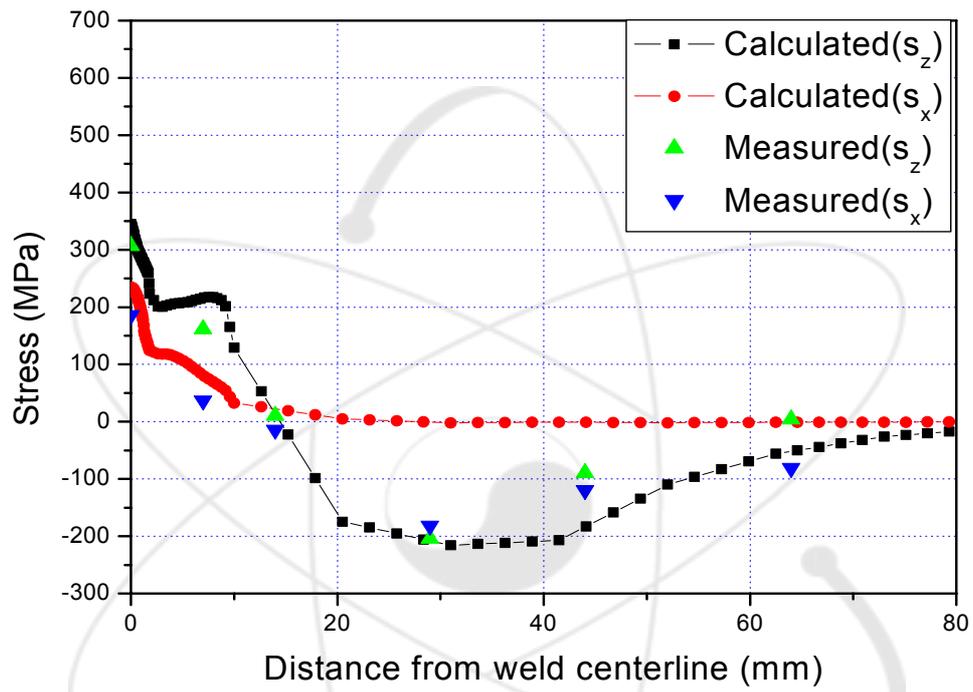


그림 18. Hoop and axial residual stress on inner surface(4 inch dia.)

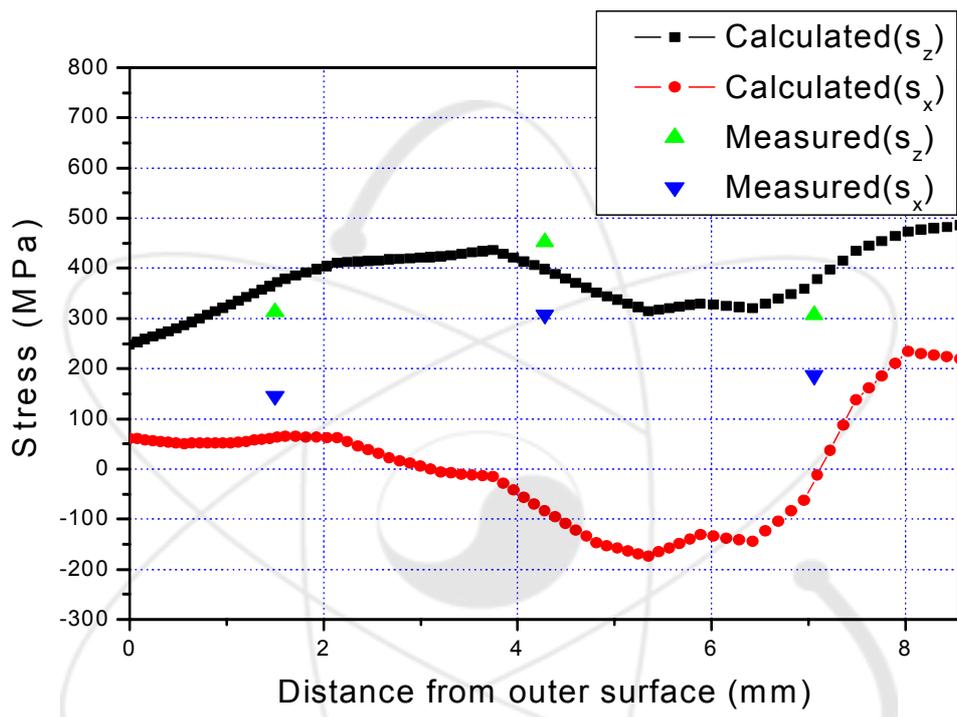


그림 19. Hoop and axial residual stresses through the thickness (4 inch dia.)

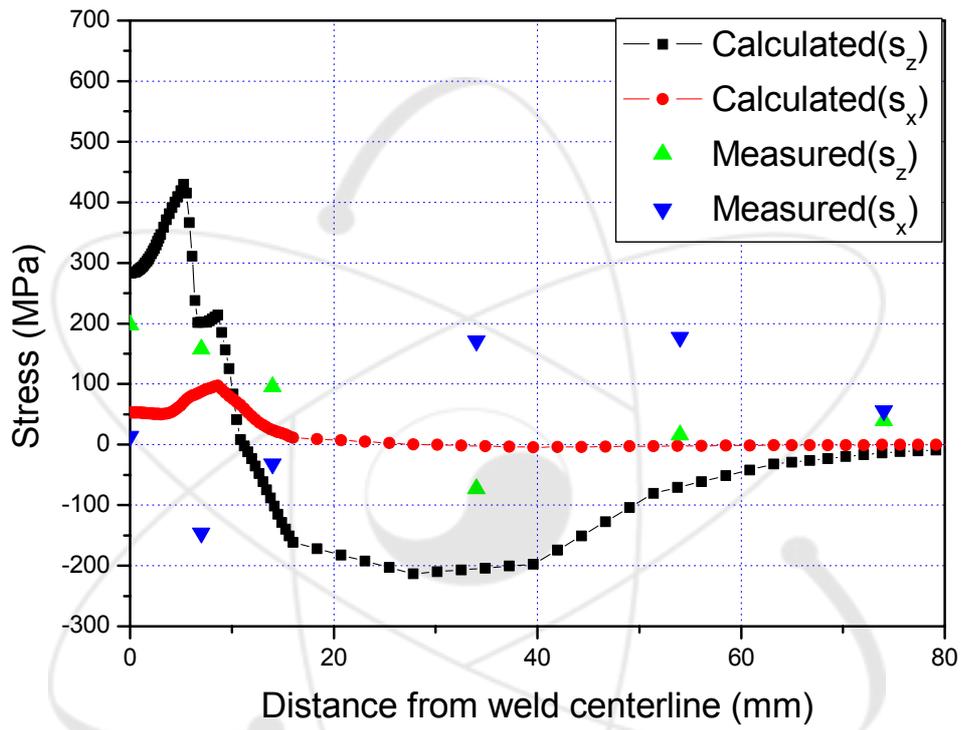


그림 20. Hoop and axial residual stress on outer surface(10 inch dia.)

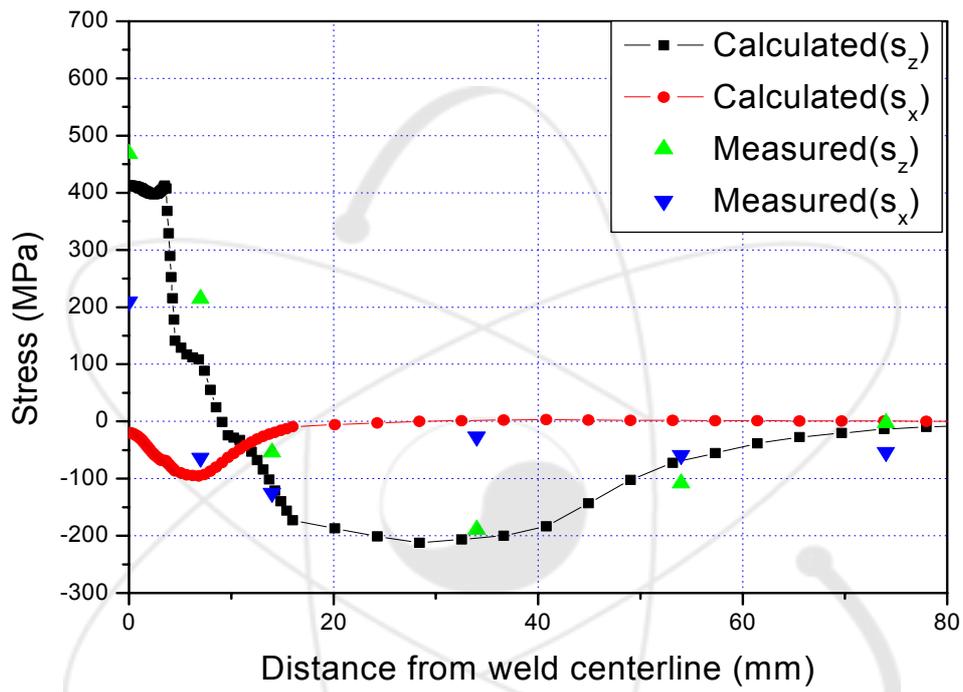


그림 21. Hoop and axial residual stress on middle surface(10 inch dia.)

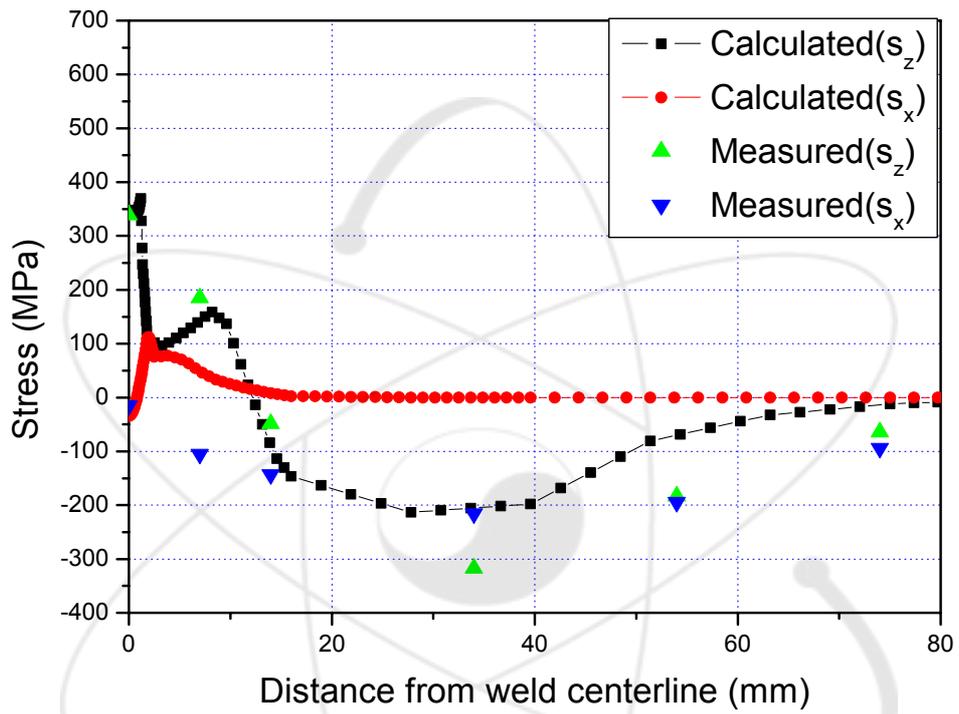


그림 22. Hoop and axial residual stress on inner surface(10 inch dia.)

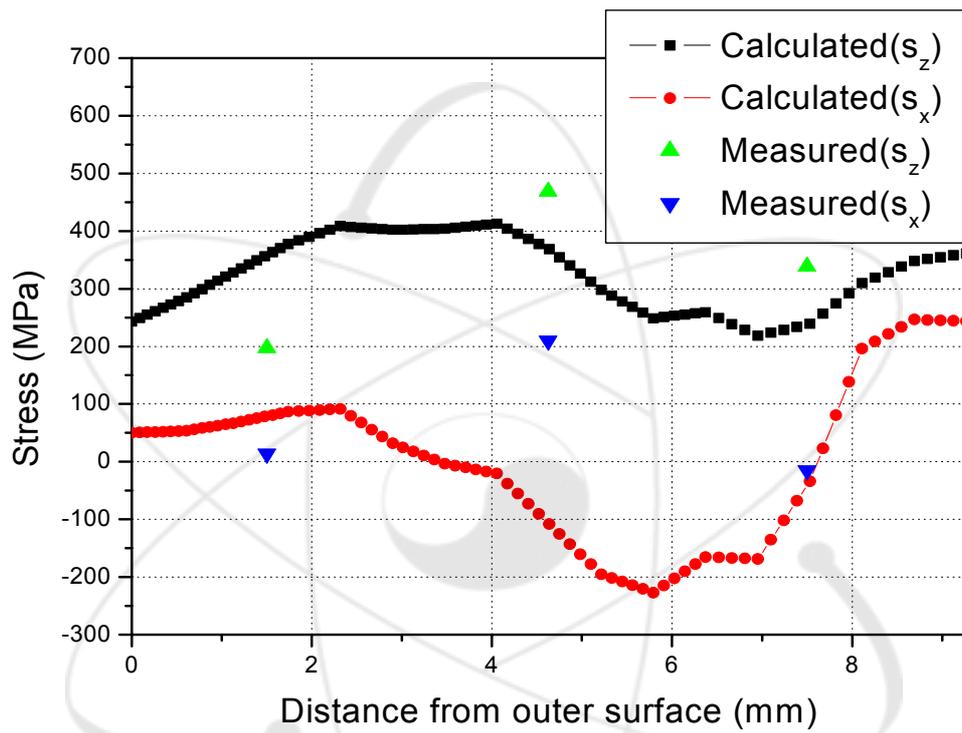


그림 23. Hoop and axial residual stresses through the thickness (10 inch dia.)

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제 코드		
KAERI/TR-2615/2003					
제목/부제	액체금속로 다층용접 배관의 잔류응력 실험 및 해석				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김석훈 /액금로 기계설계기술개발				
연구자 및 부서명					
출판지	한국, 대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2003. 12
페이지	44 p.	도표	있음(V), 없음( )	크기	A4
참고사항					
비밀여부	공개(V), 대외비( ), _ 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관		계약번호			
초록 (15-20줄 내외)	<p>대표적인 잔류응력을 측정하는 방법으로서 초음파 탐상법, 천공법, x선 회절법 등이 사용되나 이러한 방법은 용접부의 표면만 측정할 수 있는 한계를 갖는다. 이에 비해 중성자는 재료내부로 수 cm까지 침투할 수 있기 때문에 재료 내부의 응력을 측정할 수 있어 새로운 소재의 잔류응력의 평가에 많이 이용된다. 중성자 회절법에 의한 배관 다층용접부의 잔류응력 측정은 국외의 경우 여러 종류의 재료에 대해 수행되었고 국내의 경우 304 스테인리스강 평판에 대해 수행된 바 있다. 본 연구에서는 액체금속로의 배관재료인 316L 스테인리스강 배관의 다층용접부에 대한 실험 및 해석을 수행하여 용접 후의 잔류응력분포 특성을 평가하였다. 잔류응력 측정은 하나로에 설치된 고분해능 중성자 분말회절장치(HRPD) 빔포트를 사용하였다. 용접부의 잔류응력이 ANSYS 코드를 사용하여 유한요소법으로 계산되었으며 실험 및 계산결과가 비교되었고 잔류응력의 분포특성이 토의되었다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	중성자회절법, 다층용접부, 잔류응력, 316L 스테인리스강 배관, 실험 및 해석				

<b>BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET</b>					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2615/2003					
Title/ Subtitle	Experiment and analysis of residual stress for multipass weld pipes in Liquid Metal reactor				
Project Manager and Department		Seok-Hoon Kim / KALIMER Mechanical Structure Design Development			
Researcher and Department (or Main Author)					
Publication Place	Taejon, Korea	Publisher	KAERI	Publication Date	2003. 12
Page	44p.	Fig.& Tab.	Yes( V ), No ( )	Size	A4
Note					
Classified	Open( V ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)					
<p>The ultrasonic diffraction technique, holl drilling technique and X-ray diffraction technique are used as the representative measurement method of residual stress but these methods have a limit to measure the residual stress on the surface of the weld. Comparing to that, neutron is able to penetrate a few centimeters on the inside of the material so that it can be widely applied to evaluate the residual stress of the new material for measuring the inside stress of materials. The measurement studies of the residual stress for the multipass weld pipe were carried out by the neutron diffraction technique in the various materials abroad and the measurement of 304 stainless steel plate was carried out at home. In this study, the experiment and analysis of the multipass weld for 316 L stainless steel pipes which is the pipe material of LMR were carried out and the characteristics of the residual stress distribution after welding were estimated. The HRPD(High Resolution Powder Diffractometer) instrumented in HANARO was used for the residual stress measurement. The residual stresses of the weld were calculated by finite element method using ANSYS code and the experimental and calculated results were compared and the characteristics of the distribution for the residual stress discussed.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Neutron diffraction technique, multipass weld, residual stress, 316 L stainless steel pipes, the experiment and analysis			