

하나로 잔류응력 측정 장치를 이용한 용접된 스테인리스 스틸 304 판재의 잔류응력 측정

Residual Stress Measurements of Welded Stainless Steel 304 Plate Using the HANARO Residual Stress Instrument

문명국, 이창희, V.T. Em

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

금속재의 두께에 따른 응력의 변화를 비파괴적으로 측정하기 위해서는 중성자 회절에 의한 잔류응력의 측정이 유일한 방법이다. 본 논문에서는 중성자회절을 이용한 잔류응력 측정 원리를 기술하였다. 하나로에서 개발된 잔류응력 측정장치를 이용하여 측정된 스테인리스 스틸 304 판재의 용접부위에 대한 잔류응력 측정 결과를 기술하였다.

Abstract

In order to nondestructively measure in-depth residual stress distribution of the metallic materials, it is unique method to use neutron diffraction. In this paper the principles of residual stress measurements by neutron diffraction is described. The residual stress distribution of welded stainless steel 304 plate using the HARARO residual stress instrument is also described.

1. 서 론

공학적으로 사용되는 재료와 부품에는 항상 잔류응력(residual stress)이 존재한다. 잔류응력은 공학적 부품이나 재료의 피로수명(fatigue life), 파손(fracture), 부식(corrosion)에 중요한 영향을 미친다[1]. 잔류응력의 측정과 평가는 고도 산업일수록 더욱 중요하며 특히 원자력 재료, 우주, 항공, 선박 등과 같은 다양한 산업에서 점차 그 활용도가 증가하고 있다[2,3].

잔류응력을 측정하는 방법은 해석적인 방법과 실험적인 방법이 있다. 해석적인 방법은 유한요소법(finite element method, FEM)이 있고, 실험적인 방법은 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법이 있다. 파괴적인 방법은 재료의 손상으로 인하여 재사용이 불가능하기 때문에 공학 및 재료 연구자들은 잔류응력의 존재, 크기, 분포를 가급적 비파괴적인 방법으로 측정하고자 한다. 비파괴적인 방법은 초음파나 자기적 방법과 X-선 또는 중성자 회절을 이용하는 방법이 있다. 초음파나 자기적 방법은 측정 대상물의 평균응력을 측정할 수 있고, X-선 또는 중성자 회절법은 재료의 위치와 깊이에 따른 응력의 변화를 정량적으로 측정할 수 있다. X-선(8 keV)의 투과거리는 철과 같은 금속에서 수십 μm 에 불과하므로 X-선 회절을 이용한 잔류응력 측정은 아주 얇은 표면 층에 제한된다. 중성자는 대부분의 금속에서 X-선에 비하여 약 1,000 배 가까이 더 깊이 투과할 수 있어서

중성자 회절법을 이용하면 재료의 표면뿐만 아니라 내부영역까지 측정할 수 있다.

중성자 회절법을 이용한 잔류응력의 측정은 1980년대 초에 프랑스의 ILL 연구소의 HFR과 같은 높은 중성자 선속을 가진 원자로가 등장함에 따라 본격적으로 시작되었다. 영국[4], 독일[5], 미국[6] 등 세 그룹은 중성자 회절을 이용한 잔류응력 측정방법의 타당성을 각각 독립적으로 입증하였다. 그 이후 중성자 회절법을 이용함으로써 공학 및 재료 연구자들은 재료의 응력 전파와 관련된 기초과학적인 문제를 해결할 수 있게 되었다.

중성자 회절법은 재료의 미시적 변형(microstrain)에 수반되는 브래그 봉우리(Bragg peak)의 위치 이동 또는 분포변화를 측정하는 것이다. 그리고 1~27 mm³ 정도의 작은 탐색부피(gauge volume)에 대하여 잔류응력을 측정하므로 중성자 회절법은 아주 긴 측정시간이 요구될 수 있다. 이 때 브래그 봉우리를 일괄적으로 측정할 수 있는 위치민감형 중성자 검출기를 사용함으로써 잔류응력 측정시간은 대폭 단축될 수 있다. 넓은 각도의 중성자 분포를 빠른 시간에 정밀하게 측정할 수 있는 위치민감형 중성자 검출기는 본 연구진에 의하여 이미 개발되었고[7], 본 연구에서는 이를 이용하여 잔류응력 측정에 실제적으로 적용하였다. 그리고 중성자 회절법에 의한 잔류응력 측정 원리에 대하여 소개하고, 실제 적용의 일환으로 스테인리스 스틸 304 판재의 용접 부위에 대한 잔류응력을 측정하여 평가하였다.

2. 중성자 회절에 의한 잔류응력 측정원리

외부로부터 힘의 부하가 제거되었을 때 탄성체에 남은 “간혀있는” 응력을 잔류응력이라 한다. 잔류응력은 변형을 받은 물체의 전체 단면에 걸쳐 소성 변형량(plastic deformation)이 균일하지 않을 때 생성된다. 물체의 단면에 평형이 유지되면 소성적으로 인장변형을 받은 영역에는 압축응력이, 탄성적 변형을 받은 영역에는 인장응력이 잔류하게 된다.

물체가 평형상태에 있을 때, 모든 잔류응력계의 합력은 0이다. 응력이 평형을 이루는 유효거리에 따라 잔류응력은 세 가지 종류로 구별된다[1]. 거시적 잔류응력(macroscopic residual stress)이라 부르는 제1종 잔류응력은 적어도 다수의 결정립(grain)에 걸치는 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 크기의 유효거리를 갖는다. 기계적 가공이나 열처리에서 생성되는 잔류응력은 모두 거시적 잔류응력이다. 측정방법으로는 파괴적인 방법인 구멍 뚫기 방법(hole drilling), 트레패닝법(trepanning)과 같이 시편의 일부를 절제하고 응력이 풀린 나머지 부분에 뒤따르는 변형률을 측정하는 기계적인 조사방법이 있고, 비파괴적인 방법으로는 X-선 회절, 중성자 회절, 초음파 측정법, 자기적 측정법이 있다.

구조적 미시응력(structural micro stress)이라고 부르는 제2종 잔류응력은 재료의 서로 다른 상(phase)들의 기계적성질의 차이 또는 개개 결정립간의 항복이방성으로 인해 생성된다. 제2종 잔류응력의 유효거리는 하나의 결정립 크기인 수 μm 이다. 제2종 잔류응력의 역할은 잘 이해되고 있지 않으나, 균열생성과 응력부식균열의 이해에 중요한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 1종과 2종 잔류응력은 그 효과가 가법적이기 때문에 1종과 2종 잔류응력의 역할과 측정을 분리하기는 어렵다.

제3종 잔류응력은 유효거리가 $\sim 1000 \text{ \AA}$ 까지이고 소성거동의 특징을 이해하는데 필요하다. 예를 들어 work hardening은 주로 각 전위(dislocation) 또는 전위 퇴적(dislocation pile-up)을 둘러싼 응력장을 통한 전위들간의 상호작용에 기인한다. 3종 잔류응력은 이러한 부류의 극히 미시적인 응력장이다. 공업부품의 설계 또는 유지에 이러한 효과를 고려하는 것은 현재까지는 능력 밖의 일이며, 실제적 응용을 위한 비파괴적 측정법은 아직 개발되지 않았다.

금속재료에 내부 응력이 생기면 각 결정 안에서 격자면의 간격은 늘어나거나 줄어들거나 한다. 중성자 회절에 의해 격자면의 간격의 변화를 측정함으로써 격자 변형률(lattice strain)을 측정할 수 있다. 그림 1은 중성자 회절에 의한 격자 변형률의 측정방법에 대한 개요를 보여준다. 원자로에서는 여러 파장을 가진 중성자가 함께 방출되는데, 단색화 장치(monochromator)를 이용하여

단일 파장을 가진 중성자를 선택할 수 있다. 특정한 파장(λ)으로 단색화된 중성자빔은 다결정 재료에서 일련의 원뿔과 같이 회절된다. 이러한 원뿔을 Debye-Sherrer cone이라 한다. Bragg의 법칙에 따라 Debye-Sherrer cone들의 산란각(2θ)과 결정의 Miller 지수(hkl)를 갖는 격자 면들의 간격(d_{hkl})은 다음 식과 같은 관계로 주어진다.

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin(\theta) \quad (1)$$

내부 응력에 기인한 특정한 격자면 간격의 상대적 변화는 식 (1)에서 알 수 있듯이 다음과 같다.

$$\Delta d/d = -\cot(\theta)(\Delta\theta) \quad (2)$$

식 (2)에 나타난 바와 같이 격자 변형률($\Delta d/d$)은 측정하는 산란각 변위($\Delta 2\theta$)로부터 결정되는 것이다. 식 (2)는 원자로에서 방출되는 중성자처럼 고정 파장의 중성자원을 사용할 때 적합하다. 또 다른 방법은 산란각(회절각)을 고정하고 일련의 연속파장을 갖는 펄스 중성자 빔을 사용하는 측정방법(Time of Flight Method)이다. 이 경우 격자 변형률은

$$e = \Delta\lambda/\lambda = \Delta t/t \quad (3)$$

로 주어지며, 여기서 t 는 질량 m 의 중성자가 경로 L 을 지나는 시간($L\lambda m/h$, h : Planck 상수)이다. 이 비행시간 측정방법은 한 가지 배치로 많은 회절 피크를 측정할 수 있는 장점이 있다.

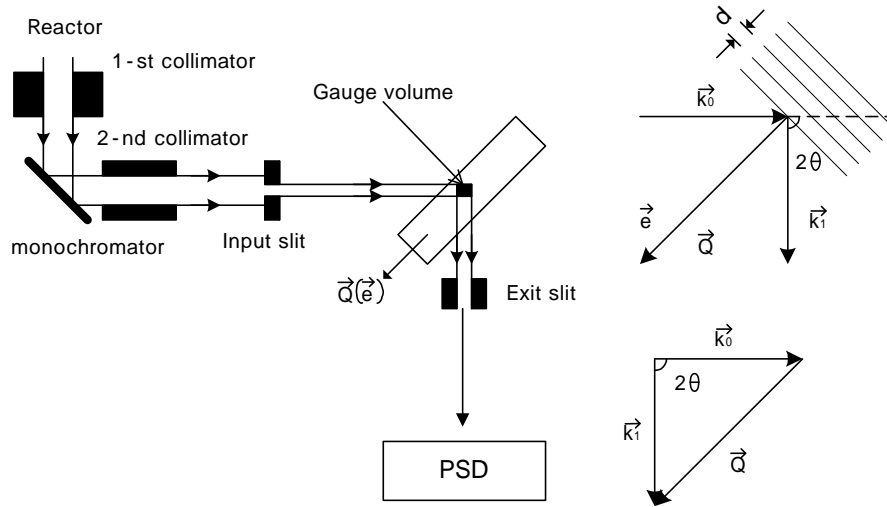


그림 1. 중성자 회절법에 의한 격자 변형률 측정 개요도

그림 1에서 보는 바와 같이 반사 격자 평면의 법선(산란 벡터 \mathbf{Q} 의 방향)은 입사 중성자빔(\mathbf{k}_0)과 산란 중성자빔(\mathbf{k}_1)이 만드는 각의 2등분선 방향이다. 그러므로 시편 내에서 측정된 변형률의 방향은 산란 벡터 \mathbf{Q} 의 방향과 같고, \mathbf{Q} 에 수직인 결정면을 갖는 모든 결정립들에 대한 것이다.

잔류응력 측정대상은 여러 가지 방위를 가진 다결정체(polycrystalline)이고, 다결정의 거시적 응력-변형 상태는 개개 결정이 갖는 탄성평균과 같기 때문에 특정한 방향의 변형률만을 측정하여 응력을 계산할 때는 재료를 구성하는 결정립의 탄성 비등방성, 결정립 경계에서 응력-변형에 관한 경계조건, 결정립 방위분포(집합조직) 등에 관한 이론적인 고려 또는 가정이 필요하다.

일반적으로 시편 내부의 일정한 점에서 시편의 좌표축 O_{xyz} 에 관한 변형률 텐서(ϵ)는 \mathbf{Q} 에 대

하여 시편의 방위를 변화시켜 결정할 수 있다. 시편 좌표축에 대한 \mathbf{Q} 의 방향여현이 (lmn) 이라고 하면 이 방향의 변형률은

$$e(lmn) = l^2 \varepsilon_{xx} + m^2 \varepsilon_{yy} + n^2 \varepsilon_{zz} + 2lm \varepsilon_{xy} + 2mn \varepsilon_{yz} + 2nl \varepsilon_{zx} \quad (4)$$

로 주어진다. 따라서 변형률 텐서를 결정하려면 적어도 6 가지 서로 다른 방향의 변형률 $e(lmn)$ 를 측정할 필요가 있다. 이렇게 한 좌표계에 대한 ε 의 성분이 결정되면 대칭 텐서 ε 의 대각화로 주축 변형률(principal strain) ε^D 를 구할 수 있다. 주축 응력 텐서 σ 는 재료의 Young 율(E)과 Poisson 비(ν)를 사용하여 다음 식과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & & \\ & \sigma_y & \\ & & \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^D & & \\ & \varepsilon_y^D & \\ & & \varepsilon_z^D \end{pmatrix} + \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} (\varepsilon_x^D + \varepsilon_y^D + \varepsilon_z^D) \quad (5)$$

대부분의 재료는 비등방적이다. 중성자는 특정한 방위를 갖는 결정립으로부터 회절되기 때문에 등방적이고 균일한 재료라는 가정하에서 기계적으로 결정된 탄성상수를 사용하는 것은 적합하지 않을 수 있다. 이 경우는 주어진 재료에 기지의 탄성변형을 가하여 행한 중성자 회절의 보정 실험에서 얻은 유효 중성자 Young 율과 Poisson 비를 사용한다.

회절 방법에 의한 변형률의 측정은 단일축 방향의 응력을 받게 한 후 다결정시편 내에서 일정한 방위를 가진 결정립들의 평균적 변형반응을 측정한다. 그러므로 평균응력을 구하기 위해서는 구성 결정립들의 비등방성과 입계에서 응력-변형률의 경계조건을 고려해야 한다. 이 복잡한 이론적 문제를 해결하는 데 보통 3가지 근사적 모델을 사용한다. Reuss 근사는 입계에서 응력이 일정하다고 가정하고, Voigt 근사는 변형이 일정하다고 가정하며, 이들보다 더 현실적인 Kroener 근사는 입계에서 응력과 변형이 모두 연속적이라고 가정하여 다결정의 평균탄성계수를 정한다.

특히 집합조직을 갖는 재료의 거시적 응력을 계산하려면 집합조직과 응력텐서 또는 변형률의 상호의존성을 고려해야 하며 원리적으로 변형률텐서를 결정립 방위분포함수(crystallite orientation distribution function)에 의해 전방위공간에 걸쳐 평균해야 한다. 이것은 실험적으로 시편방위의 함수로써 회절 봉우리의 적분강도(integral peak intensity), 즉 극점도(pole figure)를 측정할 뿐만 아니라, 피크의 변위를 함께 측정하는 일이 필요하다.

내부 응력으로 인한 변형률은 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 정도이므로 이것을 측정하려면 아주 좋은 장치분해능이 요구된다. 원자로에 설치된 회절장치에서 이러한 조건은 첫째 높은 중성자빔의 집속, 둘째 Bragg 각의 측정에 있어 각 분해능의 향상을 위한 특별한 환경이다. 파장이 일정한 회절장치에서는 장치 분해능($\Delta d/d_R$)이 회절각(θ)의 정밀도($\Delta \theta^R$)와 파장의 정밀도($\Delta \lambda$)의 두 합으로 볼 수 있다. 파장의 정밀도는 단색화 빔의 분산각($\Delta \theta_M$)에 기인하고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{\Delta d}{d} \right]_R^2 = [\cot \theta_M \cdot \Delta \theta_M]_R^2 + [\cot \theta \cdot \Delta \theta^R]^2 \quad (6)$$

위의 식 (6)으로부터 분해능을 높이기 위해서는 단색화 장치의 Bragg 각(θ_M)과 산란 중성자의 Bragg 각(θ)를 모두 90° 로 만들거나 팍물림 조준기(tight collimator)를 사용하여 $\Delta \theta_M$ 과 $\Delta \theta^R$ 을 작게 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

시편의 탐색부피(gauge volume)는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 입사 중성자와 산란 중성자빔의 단면으로 둘러싸인 부피로 정의되며 입사 및 산란빔의 경로에 놓인 슬릿 slit)으로 조정된다. 특히 회절각 2θ 가 90° 가 되는 경우에는 시편의 탐색 부피를 정의하는데 유리하고, Debye-Sherrer cone sphere의 자오선 지역이므로 검출기의 입사창이 크면 클수록 산란 중성자의 측정 효율을 증가시킬 수 있다.

3. 스테인리스 스틸 304 판재의 잔류응력 측정

본 연구는 제작한 검출기와 차폐체로 구성된 잔류응력 측정장치의 성능을 평가하고 실제적인 잔류응력의 측정을 위하여 크기가 50 mm(w)×100 mm(h)×20 mm(t)인 두개의 스테인리스 스틸 304 판재를 티그-아크(tig-arc) 용접기를 이용하여 양면 맞대기 다층 용접을 하였다[8]. 티그-아크 용접기의 용접조건은 120 A, 220 V이었다. 그림 2는 티그-아크 용접된 스테인리스 스틸 304 판재를 보여주며, 그림 3은 스테인리스 스틸 304 판재의 용접부의 모양을 보여준다.

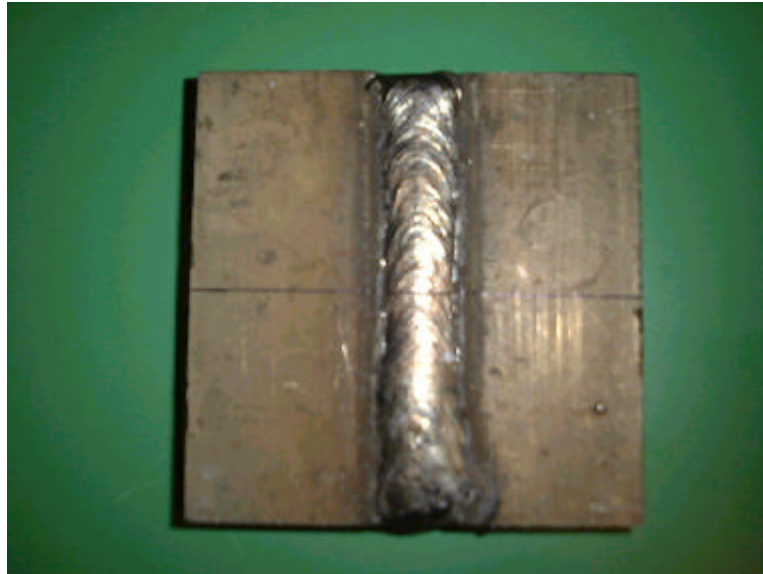


그림 2. 티그-아크 용접된 스테인리스 스틸 304 판재의 모습

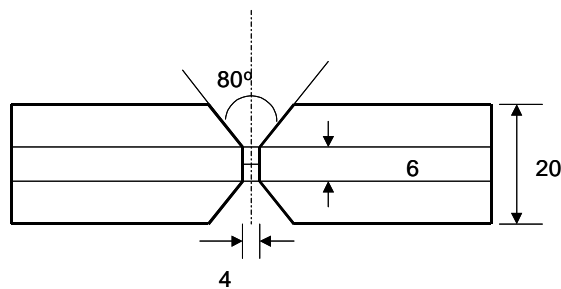


그림 3. 스테인리스 스틸 304 판재의 용접된 부위의 모양

그림 4는 변형률 성분과 설정된 좌표를 보여준다. 그림에서 보여주는 바와 같이 수직방향(normal), 가로방향(transverse), 세로방향(longitudinal) 등의 세 방향의 변형률 성분을 측정한다. 이와 같은 실험에서는 용접 시편의 탐색부피를 정확하고 정밀하게 설정하는 것과 이동시키는 것이 중요하다. 그리고 중성자 빔이 회절 탐색 부피에 적절하게 입사되도록 하는 빔 슬릿의 간격, 입사빔과 회절빔 사이의 각도는 중요한 변수이다. 회절 탐색부피는 카드뮴 슬릿을 이용하여 조절하였다. 변형률 증감이 상대적으로 적은 수직방향, 가로방향에 대해서는 입사빔과 회절빔의 높이를 20 mm로 하여 측정하였고, 세로방향에서는 4 mm로 줄여서 측정하였다. 입사 슬릿과 회절 슬

릿의 폭은 모두 2 mm로 하였다. 회절 봉우리는 스테인리스 스틸 304 판재의 (220) 면($2\theta \approx 92.7^\circ$)에서 측정하였다.

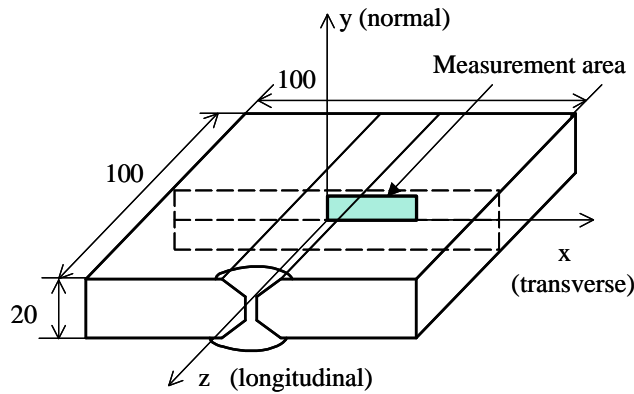


그림 4. 스테인리스 스틸 304 판재의 변형률 성분과 좌표 설정

3-1. TDC 채널 교정과 면간거리의 결정

중성자 검출기의 데이터 획득 장치인 TDC에서 읽어 들이는 값은 TDC의 채널 값이기 때문에 1 채널이 어느 정도의 2θ 값에 해당하는 것을 알아야 한다. TDC의 채널 교정을 위하여 니켈 분말의 (220) 면($2\theta \approx 95.4^\circ$)을 측정하였다. 그림 5는 검출기 위치를 0.4° 씩 이동시키면서 측정된 피크의 중심을 기록한 것이다. 그 결과 1 채널은 회절각도(2θ)로 약 $0.01615 \pm 0.00020^\circ$ 에 해당하는 것을 알 수 있었다.

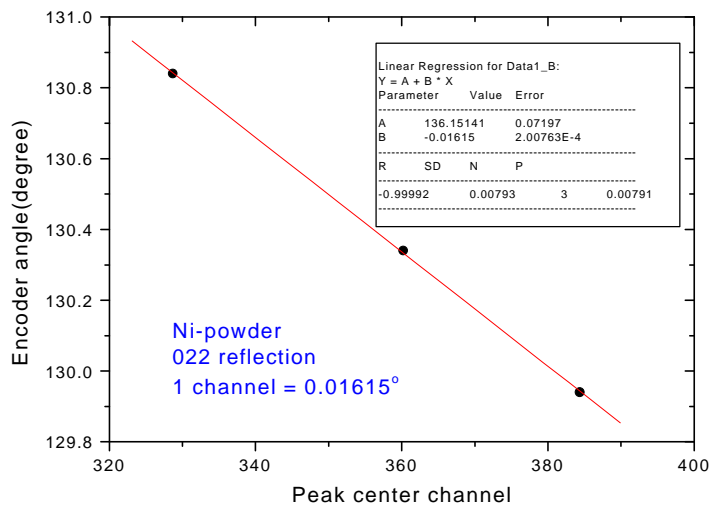


그림 5. 검출기 이동에 따른 니켈 분말의 (220)면 회절상 중심의 이동

회절법에 의한 변형률 측정에서 가장 많은 오차를 수반할 수 있는 것이 잔류응력이 존재하지 않는 재료의 정확한 $2\theta_0$ 즉, 면간거리(d_0)의 결정이다. 본 연구에서는 용접하지 않는 시편의 (220) 중성자 회절상의 중심을 구함으로써 면간거리를 결정하였다. 그림 6은 스테인리스 스틸 304 판재의 면간거리를 측정하기 위하여 하나로 원자로 ST2 수평공에 설치된 시편과 검출 장치를 보

여준다.

그림 7은 탐색부피의 위치가 (X=6, Y=0)인 지점에서 측정된 스테인리스 스틸 304 판재의 (220)면의 회절상을 보여준다. 이 때 회절 봉우리의 중심은 약 354.7 채널이었고, 그 오차는 약 0.08 채널이었다. 이 때 회절상의 폭은 약 0.32° 이었고, 회절상의 peak/background 비율은 약 30 정도였다. 여러 위치에서 측정한 결과 면간거리 d_0 는 TDC의 354.6 채널에 해당됨을 알 수 있었다. 이 때 측정 오차는 약 0.2 채널($27 \mu\text{ strain}$) 이하였다.



그림 6. 스테인리스 스틸 304 판재의 격자상수 측정을 위하여 설치된 시편

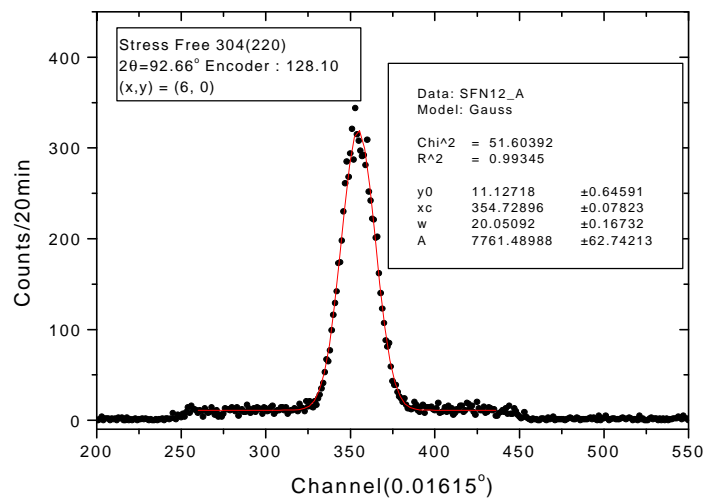


그림 7. 스테인리스 스틸 304 판재의 (220) 면의 중성자 회절상

3-2. 변형률과 잔류응력의 측정

수직방향(normal)의 변형률은 그림 8에 도시한 바와 같이 용접된 부위의 절단면을 따라 깊이 및 위치에 따라 측정하였다. 각 위치 당 측정시간은 5 분이였다.

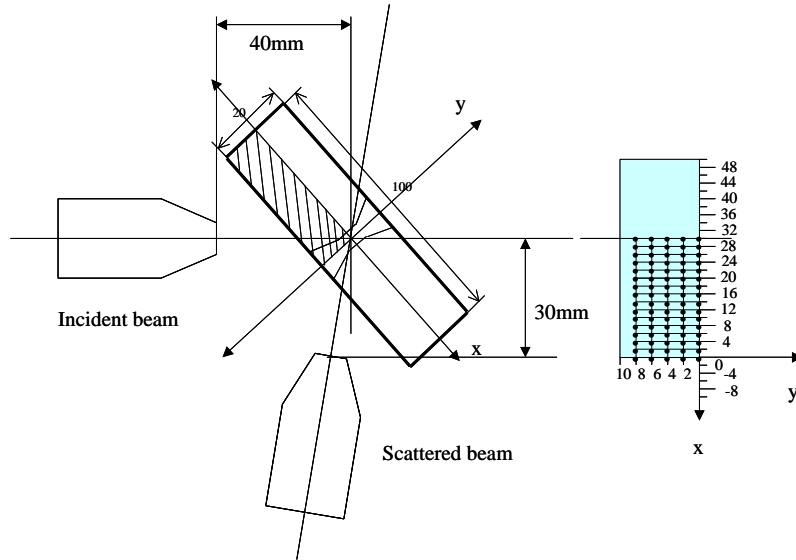


그림 8. 수직방향의 변형률 측정 위치

그림 9는 각각의 위치에서 측정된 변형률을 보여준다. 그 결과 용접 부위의 중심을 기준으로 강한 압축 변형이 존재함을 알 수 있었다.

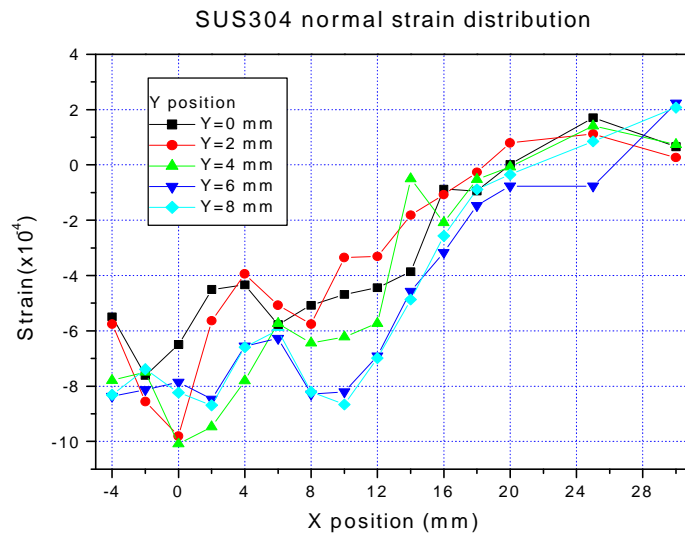


그림 9. 수직방향의 변형률 분포

가로방향(transverse)의 변형률은 그림 10에 도시한 바와 같이 용접된 부위의 단면을 따라 깊이 및 위치에 따라 측정하였다. 이 때 각 위치 당 측정시간은 10 분이였다.

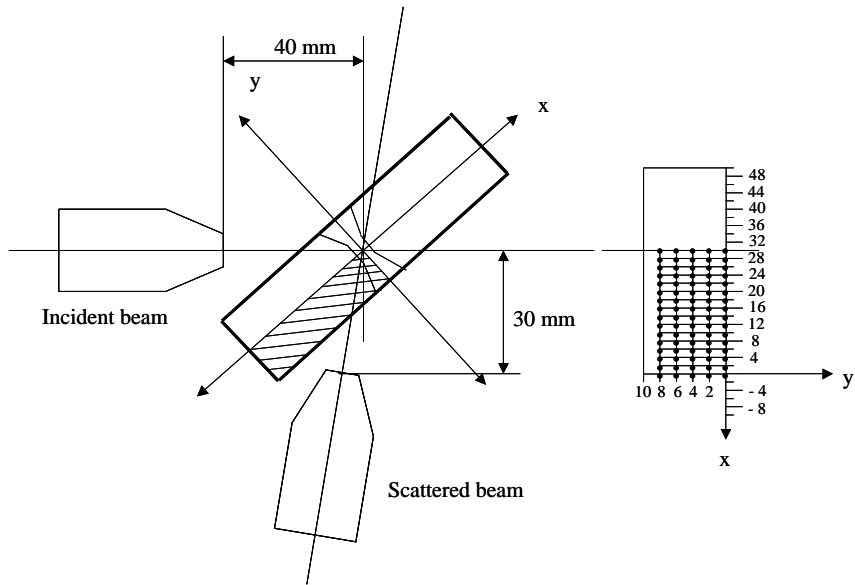


그림 9. 가로방향의 변형률 측정 위치

그림 10은 각각의 위치에서 측정된 가로방향의 변형률 분포를 보여준다. 그 결과 용접 부위의 중심을 기준으로 강한 압축 변형이 존재함을 알 수 있었고, 용접부의 깊이에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있었다.

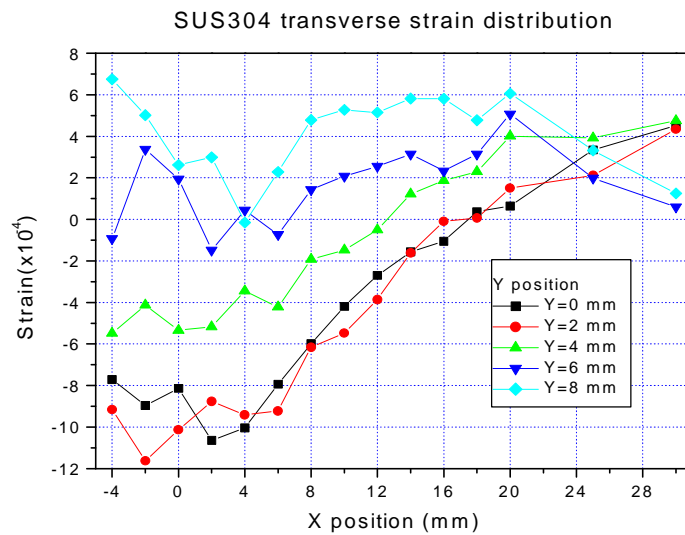


그림 10. 가로방향의 변형률 분포

세로방향(longitudinal)의 변형률은 그림 11에 도시한 바와 같이 깊이 용접된 부위의 단면을 따라 깊이 및 위치에 따라 측정하였다. 입사빔과 회절빔의 높이를 4 mm로 측정하였기 때문에 각 위치 당 2 시간 또는 3 시간 동안 측정하였다.

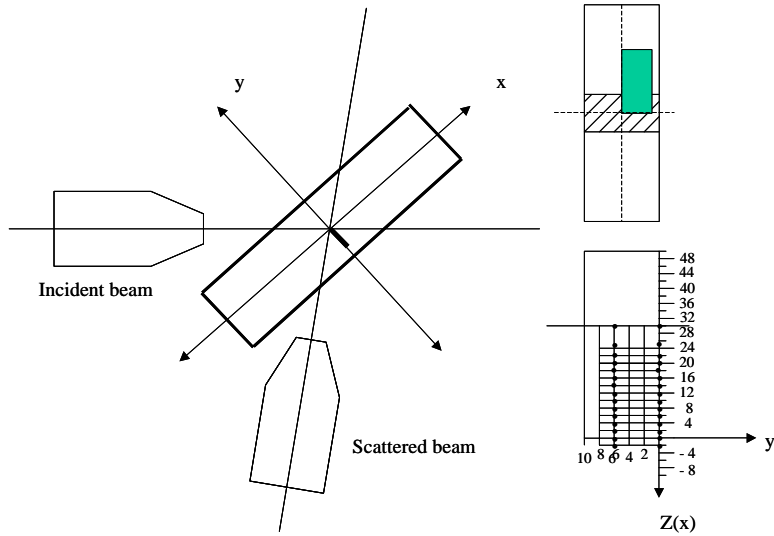


그림 11. 세로방향의 변형률 측정 위치

그림 12는 각각의 위치에서 측정된 세로방향의 변형률을 보여준다. 그 결과 용접 부위의 중심에서는 인장 변형이 생성되었음을 알 수 있었고, 바깥쪽으로 나갈수록 압축 변형이 존재함을 알 수 있었다.

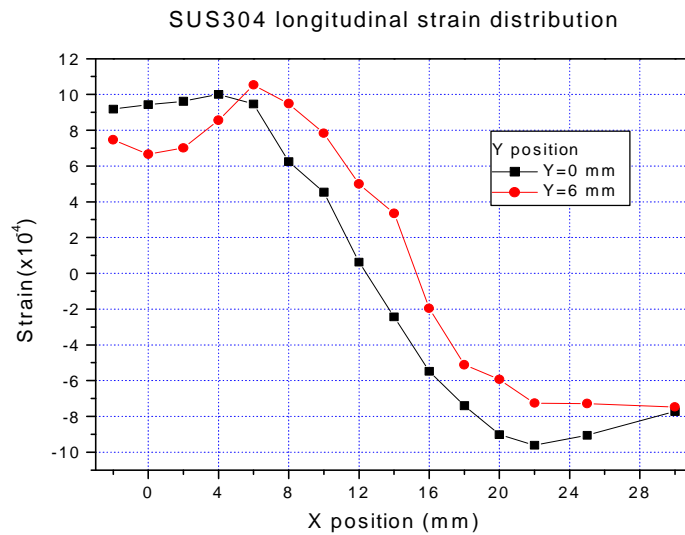
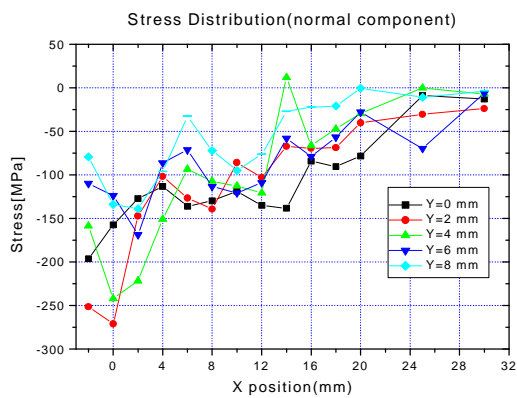


그림 12. 세로방향의 변형률 분포

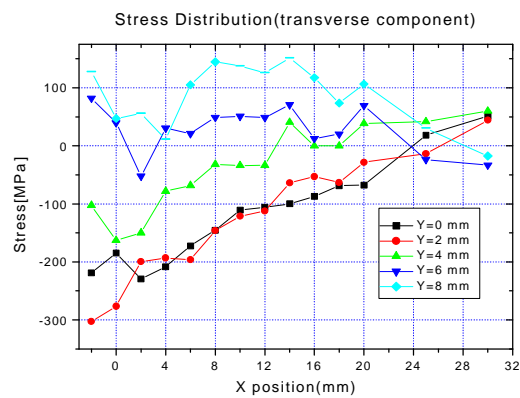
잔류 응력은 변형률을 측정하고 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다. 여기서 E는 탄성계수 (Elastic diffraction constant)이며 ν 는 포와송비(Poisson ratio)이다. SUS304의 (220) 반사면에서는 E는 211 GPa이고, ν 는 0.265이다[9].

그림 13은 스테인리스 스틸 304 판재의 용접부위에서 형성된 수직방향, 가로방향, 세로방향의 잔류응력의 분포를 보여준다. 수직방향으로는 용접 중심부를 기준으로 강한 압축잔류응력이 분포하였고, 용접시편의 표면으로 도달할수록 용접중심보다 작은 압축잔류응력이 분포하였다. 그리고 용접중심에서 20 mm 정도 떨어지면 용접으로 인한 잔류응력이 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

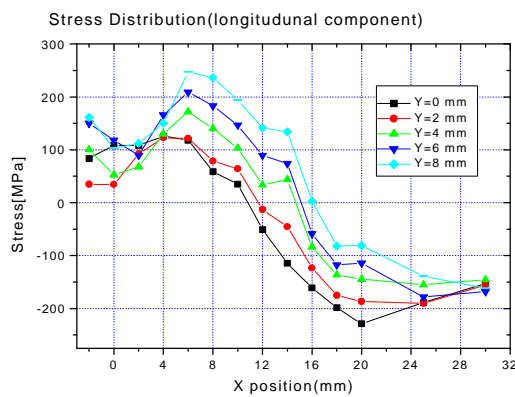
가로방향으로는 용접부의 중심에서는 강한 압축잔류응력이 분포하였고, 표면으로 나올수록 인장잔류응력이 분포하였다. 세로방향으로는 용접중심 위치인 0 mm 지점과 6 mm 지점을 측정하였으나, 내삽으로써 2, 4, 8 mm 위치에서의 변형률을 계산하였다. 길이방향에 대한 잔류응력의 분포는 용접중심 부위에 대해서는 인장잔류응력의 분포를 보였고, 용접부의 중심에서 멀어질수록 압축잔류응력이 분포하였다.



(a) 수직방향(normal direction)



(b) 가로방향(transverse direction)



(c) 세로방향(longitudinal direction)

그림 13. 스테인리스 스틸 304 판재의 위치에 따른 잔류응력 분포

4. 결 론

본 연구에서는 중성자 회절을 이용한 물질의 잔류응력 측정 방법을 기술하였다. 두께 20 mm 인 스테인리스 스틸 304 판재의 용접부위에서 형성된 수직방향, 가로방향, 세로방향의 잔류응력을 $\pm 30 \mu\text{strain}$ 정도의 정밀한 오차 범위로 측정하였다. 그 결과 용접부위에 형성된 압축잔류응력 분포와 인장잔류응력 분포를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 잔류응력 장치는 잔류응력 측정 뿐만 아니라 물질내에 소량 함유되어 있는 미소 성분들의 정량적 분석에 이용할 수 있고, 분말회절법에 의한 결정 구조의 상변이를 실시간 조사하는데도 이용할 수 있으리라 기대한다.

참고 문헌

1. E. Macherauch and V. Hauk, "Residual Stress in Science and Technology", DGM Informationsgesellschaft, 3(1987).
2. 신상현, 김정일, 한국박용기계학회지, **21(5)**, 463(1997).
3. 김석훈 외, KAERI/AR-508/98 (1998).
4. A. Allen, C. Anreani, M.T. Hutchings, C.G. Windsor, NTD International, 249, Oct(1981).
5. L. Pintschovius, V. Jung, E. Macherauch, E. Schafer and O. Voehringer, "Residual Stress and Stress Relaxation", edited by E. Kula and V. Weiss, Residual Stress and Stress Relaxation, Plenum, New York, 467(1982).
6. A.D. Krawitz, J.E.Brune, M.J. Schmank, "Residual Stress and Stress Relaxation", edited by E. Kula and V. Weiss, Plenum, New York, 467(1982).
7. 문명국, 강희동, 홍광표, 이창희, A. Gabriel, 새물리 **40(6)**, 554(2000).
8. 시편제공자 : 서울산업대 산업공학과 장동영.
9. M.H. Ledbtter, Mat. Sci. and Eng., **29**, 255(1978).