

중성자 회절을 이용한 용접부위의 잔류응력 측정

박 만 진* · 장 동 영** · 최 희 동***

*서울대학교 기계항공공학부대학원

**서울산업대 산업정보시스템공학과

***서울대학교 원자핵공학과

Residual Stress Measurement on Welded Specimen by Neutron Diffraction

Man-jin Park*, Dong-young Jang** and Hee-dong Choi***

*Ph. D. Student of Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**Associate Professor of Industrial Information Systems Engineering Department,
Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

***Associate Professor, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract

Residual stress is generated in the structures as a result of irregular elastic-plastic deformation during fabrication processes such as welding, heat treatment, and mechanical processing. There are several factors attributed to the origin of residual stresses, tensile or compressive. The stresses can be determined by destructive ways or nondestructive ways using X-ray or neutron diffraction. Although X-ray diffraction is a well established technique, it is practically limited to near-surface stresses. Neutrons penetrate easily into most materials and neutron diffraction permits non-destructive evaluation of lattice strain within the bulk of large specimens because the radiation is more deeply penetrating for metallic engineering components. This paper presented application of neutron diffraction technique to the residual stress measurement using 20 mm thick welded stainless steel plate(100×100 mm²)

(Received February 3, 2001)

Key Words : Residual stress, Neutron diffraction, Hanaro reactor, HRPD(High Resolution Power Diffraction)

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 광범위하게 이용되고 있는 용접 구조물은 사용 환경 등이 가혹해지고 대형화되어 가고 있어 항상 사고의 위험이 증가하고 있다. 특히 용접 작업 중에 생기는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열 등 다양한 형태의 결함들이 존재하기 쉬우며, 이들 결함으로부터 균열이 진전되어 최종 파단에 이르는 경우가 많다¹⁾. 그리고 원자력 발전소에서 사용되는 피이프나 발전기, 항공기부품 등은 고온·고압의 환경에서 장기간 사용되기 때문에 국부적으로 팽창 및 수축 등의 열 소성변형이 생기고 높은 잔류응력이 용접부위에 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 용접 작업 중에 생기는

용가재의 용융 상태에서 화학반응 및 냉각속도 차이에서 오는 조직 변화 등 많은 변수들에 의해서 용접부재를 취약하게 하고 안전사용이나 안전설계에 어려움을 주고 있다. 안정적인 용접과 용접에 의해 제작되어지는 부품과 구조물 등을 얻기 위해서는 사전에 치밀한 용접 설계를 바탕으로 모재의 열변형, 기계적·물리적 및 화학적 특성의 검토, 용접부위의 변형 및 잔류응력 분포의 측정, 효율적인 용접 방법의 선정, 결함을 최소화할 수 있는 용접 개선 작업 등 일련의 작업 공정들이 요구된다. 이상과 같이 용접부에는 많은 취약조건들이 존재하며 파괴의 주원인이라 할 수 있는 잔류응력에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 용접부 주위의 불균일한 온도분포에 기인하며, 이러한 온도분포에 의해 용접부 부근에서는 복잡한 응력변화가 발생하여 냉각

후에 응력이 잔류하게 되고 또한 용접 변형이 발생하게 된다. 용접에 의한 잔류응력은 용접변형, 저온균열, 취성과괴, 좌굴강도 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 왔으며 이런 잔류응력의 상태는 거시적인 응력(macrostress)과 미시적인 응력(microstress or textural stress)으로 구분할 수 있다. 거시적인 응력은 전체 구조물의 변형과 평형을 이루는 잔류응력을 의미하며, 구조물 전체 크기의 변형과 관계된다. 외부의 힘(기계적, 열적, 화학적)이 재료에 서로 다르게 작용하여 면간거리 d 값이 일정하게 이동하여 회절 실험 시 2θ 값에 변화를 가져오는 것으로 일반적으로 선삭, 열처리, 용접 등의 구조물 가공공정에서 나타나게 되고, 가공물의 응력상태와 밀접한 관계가 있으며, 거시적인 응력 상태에서 이용되어지는 제품은 피로수명에 상당한 영향을 끼치게 된다. 미시적인 응력은 재료의 외부에 힘이 일정하게 작용할 지라도 재료 내부에서의 조직적인 불균질 때문에 야기되는 격자의 뒤틀림에 의해 생기게 되며, 결정의 원자 격자에서의 변형에 관계되는 극 미소의 응력까지 포함하는 결정 응력이라 할 수 있다. 이 응력은 금속입자의 상들 사이에서 다른 열팽창계수 때문에 생기게 되고, 다중상을 가지는 합금이나 복합재료에서 쉽게 생기게 된다^{3,5)}. 잔류응력이 재료의 기계적 성질이나 구조물의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 잔류응력의 분포를 정량적으로 평가하는 방법을 확립하여야 한다. 잔류응력의 분포를 구하는 방법에는 크게 이론적인 해석방법과 실험적 계측 방법이 있으며, 현재 실험적인 방법에 의한 잔류응력의 측정에 이용되고 있는 방법은 약 20가지 방법에 달하고 있으며, 실험적인 방법은 다시 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법을 포함하여 크게 네 가지 방법으로 분류될 수 있다^{1,2)}. 이론적 해석방법은 우선 용접부의 온도분포를 이용하여 열응력을 계산하는 방식으로 많은 연구자들이 이론적인 방법으로 용접부에 존재하는 잔류응력분포를 계산하기 위해 유한요소법(FEA)에 의한 방법을 이용해 왔고, 현재에는 해석기법과 컴퓨터의 발달에 힘입어 해석결과의 정확도가 높아지고 있으며, 해석에 소요되는 시간과 비용이 많이 줄어들고 있지만, 이론적인 방법은 계산과정에서 사용하는 여러 가지 복잡한 온도 의존성 변수들에 의해 계산의 정도가 낮아지고 또한, 해석하고자 하는 구조물의 기하학적인 또는 역학적인 복잡성 때문에도 계산의 정확도가 낮아 질 수 있다. 이러한 정확도를 낮추는 여러 가지 요인 때문에 이론적인 해석방법은 복잡한 실제 구조물에서는 적용되어지지 못하고 있는 실정이다²⁾. 실험적 계측방법으로는 측정 원리 특성상의 분류에 따라 응력 이완 방법(Stress-Relaxation Technique),

X-ray·Neutron 회절 방법(X-ray·Neutron Diffraction Technique), 응력에 민감한 성질을 이용하는 방법(Technique Using Stress Sensitive Properties), 균열 전파법(Cracking Technique) 등을 들 수 있으며, 이 중에서 X-ray·Neutron 회절 방법은 비파괴적으로 용접부위에 존재하는 잔류응력을 측정할 수 있는 장점이 있지만, 나머지 방법들은 파괴적인 방법을 동원하여야만 측정영역에 존재하는 잔류응력을 측정할 수 있다는 단점을 가지고 있다. X-ray를 이용한 방법은 그 기술이 잘 정립되어 있으며, 표면근방의 잔류응력 분포를 측정하는데 많이 활용되고 있는 측정기술이다^{3,4,5)}. 기계부속품이나 가공품들의 피로수명 측정과 인장 또는 열처리 조건 등을 정확히 산정하기 위해서는 잔류응력의 정보가 필요하고 특히, 복합현상에 의해 발생하는 용접부의 잔류응력은 이론적인 예측보다는 실험 측정이 가장 신뢰할 만한 방법이며 기계나 구조물을 설계할 때 잔류응력을 최소화 할 수 있는 제작조건을 결정하기 위하여 잔류응력의 정확한 측정이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 한국원자력연구소 하나로 원자로에 부착된 고분해능 중성자 분말 회절장치(HRPD) 빔 포트를 사용하여 중성자법의 장점인 높은 투과력을 이용하여 용접부위 내부의 특정한 위치한 존재하는 직교성분의 잔류응력의 분포를 측정하고, 용접부위 내부의 각 부위에 대한 미세조직을 전자현미경을 이용하여 조사하였다.

2. 중성자 회절을 이용한 잔류응력 측정법

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 다결정조직을 갖는 물체 내부에 분포하고 있는 잔류응력을 측정할 수 있는 유일한 기술로서 중성자 회절 측정법이 최근에 원자로가 설치된 나라들에서 응용기술로 연구되어 활용되어진다. 항공기 부품으로 사용되는 알루미늄 합금에 대해서 미국이 오크릿지의 중성자 회절 장치를 이용한 실험이 행하여 졌으며⁶⁾, 캐나다의 Chalk River Laboratory의 시설을 이용하여 용접시편 등에 대한 측정이 행하여졌고, 일본의 Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI)에서는 실험시설의 갖추어져 각종 재질의 용접시편들에 대해 실험이 행하여지고 있다. 다결정 금속 조각이 비교적 긴 거리에 걸쳐 균일한 스트레인(strain)을 갖도록 탄성변형

될 때 결정립을 이루고 있는 격자면의 면간거리는 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 계산 될 것이고, 스트레인을 알면 기계적으로 측정된 재료의 탄성계수를 이용한 계산이나 이미 알려진 응력에 의해 산출된 스트레인의 측정을 기초로 한 보정 작업을 통하여 존재하는 응력을 결정할 수 있다⁶⁻¹²⁾. 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 특정 부위의 응력상태를 구할 수 있다. 주응력의 방향은 잔류응력 측정 실험의 초기 디자인시 세 방향에 대해서는 결정되기 때문에 나머지 세 방향에 대한 측정값들에 의해서 측정 대상물에 분포하는 응력 분포를 추출해 낼 수 있다.

중성자 회절법을 이용한 측정은 스트레인을 기준정보로써 시험편 내부에 존재하는 격자들간의 면간거리와 회절각을 측정함으로써 스트레인 값들이 결정되며, Bragg's law $2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$ (여기서 n은 상수이

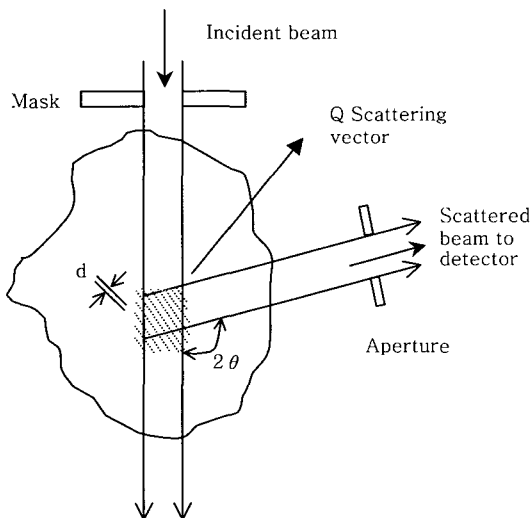


Fig. 1 Schematic of experiment setup used for neutron diffraction studies

며, λ 는 입사빔의 파장, d는 격자거리, θ 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 있을 것이다. Fig. 1에서 측정되는 스트레인 값은 입사빔과 회절빔이 교차하는 회절탐색부피의 영역에서 산란벡터 Q의 방향에 대해 구해지며, 회절피크의 정확한 측정과 측정 시편의 탄성계수, 측정시편과 같은 재료의 응력을 받지 않은 상태에서 측정되어지는 시편의 격자거리(d_0)를 비교하여 각 방향에 대한 격자변형을 $\Delta d/d$ 을 구함으로써 시편내부에 존재하게 되는 잔류응력을 측정할 수 있다.

3. 시편의 준비

용접물에 존재하는 잔류응력을 평가하기 위한 시편을 제작 할 때 실 구조물을 시뮬레이션하기 위해서 시편을 Fig. 2에 보이는 것과 같이 측정시편을 만들었다. 이번 실험에서 측정될 시편은 Stainless steel 304 plates이며 용접된 시편의 크기는 $100 \times 100 \times 20 \text{mm}^3$ 이고, 재료는 Table 1과 Table 2에 표시한 화학조성과 기계적 성질을 가지는 재료를 전류 130~140A, 전압 25~27V의 조건에서 양면 맞대기 다중용접 된 시편에서 용접 후 잔류응력의 분포를 측정하는 실험을 하였다.

Table 1 Chemical composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	1.00	2.00	0.040	0.03	8~10.5	18~20

Table 2 Mechanical properties

Tensile Strength, Ultimate (MPa)	Tensile Strength, Yield (MPa)	Elongation (%)
> 505	> 215	> 70



Fig. 2 Measured welding sample

또한 용접 후 미세 조직의 변화를 측정하기 위해 용접 부위를 절단하여 금속 현미경을 이용하여 각 용접부위의 금속조직을 조사하였다.

Fig. 2는 측정시편이며, Fig. 3은 스트레인 컴포넌트와 측정되는 위치들에 대한 직교 좌표계를 도시하고 있고 여기서 Normal, Transverse, Longitudinal 방향은 측정되는 스트레인의 벡터값이 된다. 측정되는 부위는 용접부위를 기준으로 좌우대칭을 보이고 있으며, 같은 조건 하에서 양면 맞대기 용접되었기 때문에 용접부위 상하로도 대칭을 이룬다고 가정하여 측정될 부위를 선정하였다.

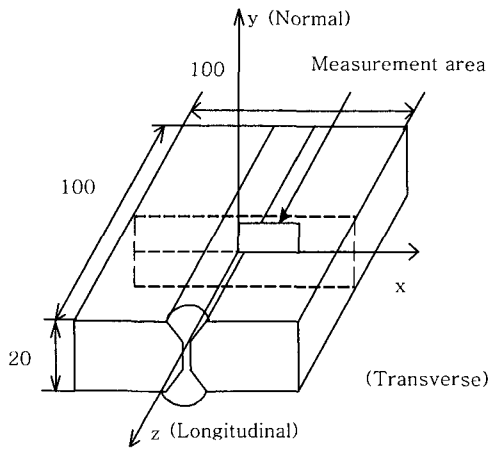


Fig. 3 Schematic view of welded plate

4. 실험

중성자 회절을 이용한 측정은 한국원자력연구소 하나로 원자로(열 출력 24MW급)에 설치되어 있는 HRPD 빔 포트와 위치 민감형 검출장치(PSD)를 이용하였다. 먼저 하나로 원자로를 이용한 잔류응력측정의 신뢰성을 검증하기 위해 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 Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI)에서 실시한 결과값과 비교한 결과 97%이상의 일치된 결과값을 얻었으며⁷⁻¹³⁾, 위와 같은 결과로 하나로 원자로의 중성자를 이용한 잔류응력 측정값은 신뢰할 수 있는 정확한 측정장치임을 확인하였다. 중성자 회절을 이용한 측정의 실험방법은 크게 3가지 측정단계로 나눌 수 있다. 먼저 장비들의 위치와 슬릿의 크기 결정, 중성자빔의 파장을 구하는 초기 Calibration측정, 두 번째 응력을 받지 않은 시험편에 대한 격자면간 거리 d_0 의 측정 이 값은 실제 잔류응력 측정에 있어서 기준값이 된다. 마지막으로

용접시험편을 sample stage에 고정하고, 각 측정방향에 대한 측정으로 나누어진다. 이 실험에서 이용된 중성자 빔은 Ni-powder를 이용하여, 각 결정면에 대한 회절각에서의 예비실험을 통해 측정시편에 대한 격자면(hkl), 회절각 및 파장을 결정하게 된다.

Fig. 4의 그림은 diffractometer의 센터축을 결정하기 위해 직경 2mm의 핀을 마운트시키고 측정하는 그림이다. 그림에서 오른쪽에 위치한 입사빔을 고정하고 시편의 홀더 아래부분에 있는 X-Y방향의 트랜스레이터와 왼쪽에 있는 디텍터를 조정하여 센터축을 결정하게 된다.

Table 3은 Ni-powder의 각 회절면에 대한 회절각을 보여주고 있다. 결정의 격자면(220), 회절각 92.6°의 위치에서 계산된 파장 $\lambda = 1.8340 \text{ \AA}$ (1st collimator 20')을 측정시편인 Stainless steel 304 시편에 적용하여 용접부위 각 측정면 방향에 대한 격자면(220), 회절각 $2\theta_{220} \approx 92.6^\circ$ 에서 용접부위의 격자면간거리를 측정하여 변형률 값을 측정하게 되며 회절각 92.6°의 위치는 측정 격자면의 회절 탐색부피의 면적이 최대가 되는 곳이 된다.

다음으로 본 실험에서 스트레인을 구하기 위한 참조값이 되는 무응력 상태의 d_0 값의 측정은 용접 전 시편을 이용하여 각 방향에 대한 측정에 의해서 구해진다.

Table 4는 응력을 받지 않은 용접시편의 재질과 같은 plate(100×50×20 mm³)의 중앙 부위에서 측정

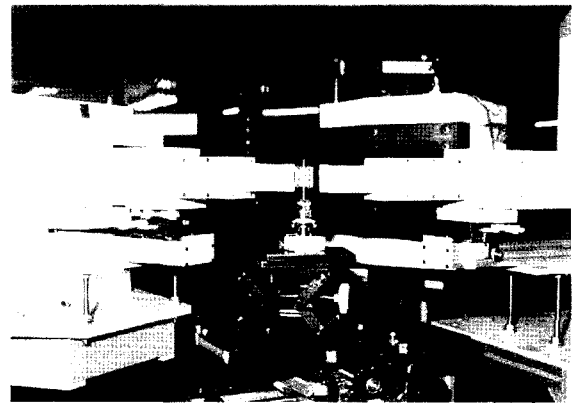


Fig. 4 Experimental set-up for alignment of input and detector slit

Table 3 Ni-powder diffraction peak

diffraction plane	$h^2+k^2+l^2$	2θ
d111	3	53.6
d002	4	62.8
d220	8	92.6

Table 4 Unwelded sample of scattering angle and lattice spacing

Channel				Angle(degree)		Scattering Angle ($2\theta_0$)	Lattice spacing (d_0)
Peak Center	Error	Width	Area	Peak Center	Error		
354.9	0.18	20.30	4601.63	5.678	0.003	92.488	1.26957

Normal direction d_0

Channel				Angle(degree)		Scattering Angle ($2\theta_0$)	Lattice spacing (d_0)
Peak Center	Error	Width	Area	Peak Center	Error		
354.6	0.22	20.08	3057.28	5.674	0.003	92.484	1.26961

Transverse direction d_0

Channel				Angle(degree)		Scattering Angle ($2\theta_0$)	Lattice spacing (d_0)
Peak Center	Error	Width	Area	Peak Center	Error		
354.5	0.41	20.99	3093.58	5.672	0.007	92.482	1.26963

Axial direction d_0

되어진 격자면간거리 d_0 와 회절각 $2\theta_0$ 을 측정하여 계산한 결과값이다. 위의 결과값에서 Peak center값은 detector에서 카운트된 중성자량이며, 앞의 실험에서 구해진 채널당의 각도값을 이용해서 카운트된 채널의 값을 각도를 환산하기 위해 Bragg's law에 대입하여 격자면간거리 값과 회절각을 구할 수 있다.

마지막으로 용접시편의 측정은 Fig. 5에 도시하고 있는 것과 같이 세 방향인 Normal, Transverse and Longitudinal 방향의 스트레인 컴포넌트를 측정하기 위해서 각각의 용접 시험편이 배치되고, 이동하면서 이들 세 방향에 대한 산란 벡터 Q 에 의해서 각 방향의 측정 포인트에 대한 스트레인 값이 구해진다. 실험에서 용접시편을 정확한 위치에 포지션하고, 이동하는지가 중요하며, 중성자를 이용한 실험에서 빔이 회절 탐색

부피에 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 회절 탐색 부피를 조정하였고, 상대적으로 스트레인 gradient가 적은 Normal, Transverse 방향에 대해서는 입사빔과 회절빔의 거리가 20mm정도 떨어져 측정하였고, 그러나 상대적으로 큰 스트레인 gradient를 가지는 Longitudinal(Axial) 방향의 측정에 대해서는 4mm로 감소시켜 측정하였다. 용접 시험편내의 스트레인 분포는 시험을 측정 위치에 맞게 이동시키면서 측정하게 된다.

측정된 데이터의 peak 센터, 폭과 강도는 least squares fittings a Gaussian line shape에 의해서 계산되어졌으며, Normal 방향의 스트레인 성분을 측정하기 위해 측정위치는 범위는 $-4 \leq x \leq 30$ mm, $0 \leq y \leq 8$ mm 사이에서 측정되었고 같은 방법으로 Transverse 방향에 대해서는 시험을 산란벡터방향에 맞게 다시 고정하고 측정범위는 Normal 방향의 측정범위와 같다. Longitudinal방향에 대해서는 $-4 \leq X \leq 30$ mm, $Y=0$ and $Y=6$ mm의 위치에서 측정되었다. Normal, Transverse 방향의 스트레인 측정 시간은 측정되는 각 포인트당 5분과 10분으로 하였으며, Longitudinal(Axial) 방향에 대해서는 측정되는 위치에 따라 2시간 내지 3시간으로 측정하였다.

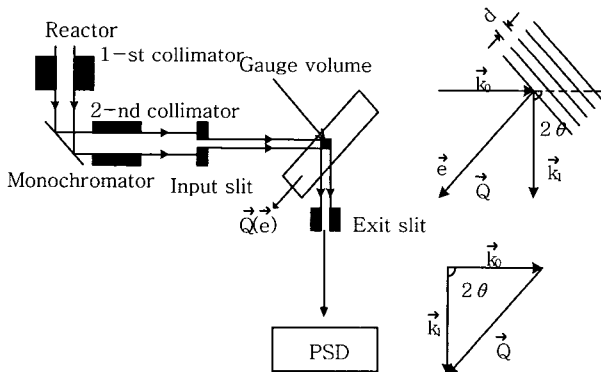


Fig. 5 Strain measurement schematic

5. 실험결과 및 고찰

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

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

이 식에 Bragg's law의 식을 대입해서 정리하면 용접된 시편과 응력을 받지 않은 시편의 격자거리는 다음의 식(2)와 같다.

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

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

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

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1 \quad (3)$$

위에서 구해진 변형율과 측정시편의 회절탄성계수값과 포아송비를 후크의 법칙(Hooke's law)에 적용하면 각 지점에 분포하는 응력을 측정할 수 있다. Table 5는 Kröner의 실험에 의해서 구해진 Stainless steel 304 시편 각 회절면에 대한 탄성계수와 포아송비의 값을 보여주고 있다. 용접부의 물성이 모재와는 다른 화학성분을 가지고 있기 때문에 Lattice Spacing도 다르므로 용접부위 자체의 잔류응력을 계산할 때는 별도의 Lattice Spacing측정이 필요하다. Krawitz와 Winholtz의 실험14에서 보여준 것 같이 정밀한 측정을 통해 계산된 d_0 를 이용하여 잔류 응력을 계산하여야 하지만 본 논문에서는 용접부위 내부에 존재하는 잔류응력을 중성

Table 5 Diffraction elastic constants and poisson's ratio for 304L stainless steel

h	k	l	E(GPa)	ν
1	1	1	242	0.230
0	0	2	152	0.330
2	2	0	211	0.265
1	1	3	184	0.294
2	2	2	242	0.230

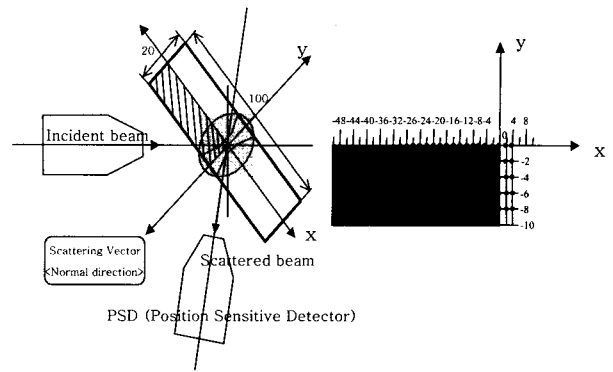


Fig. 6 Welding sample with actual geometry of the neutron beams(Normal direction)

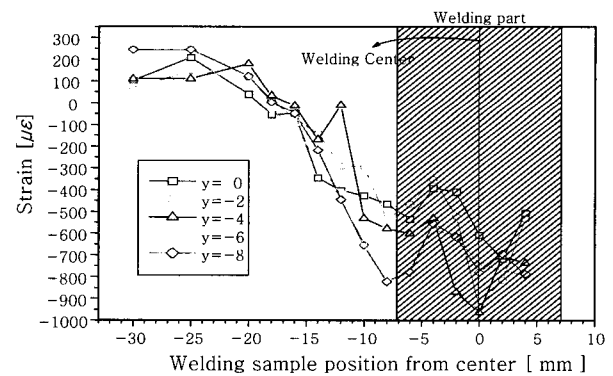


Fig. 7 Measured normal strains

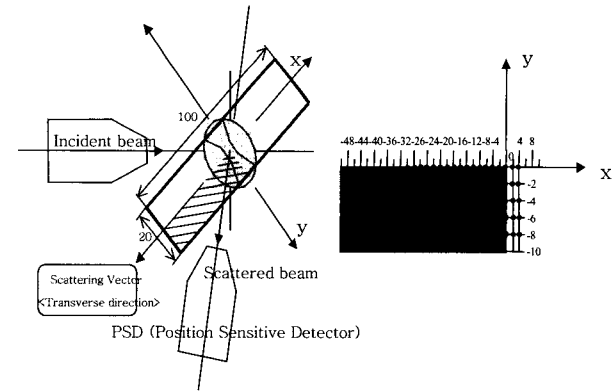


Fig. 8 Welding sample with actual geometry of the neutron beams(Transverse direction)

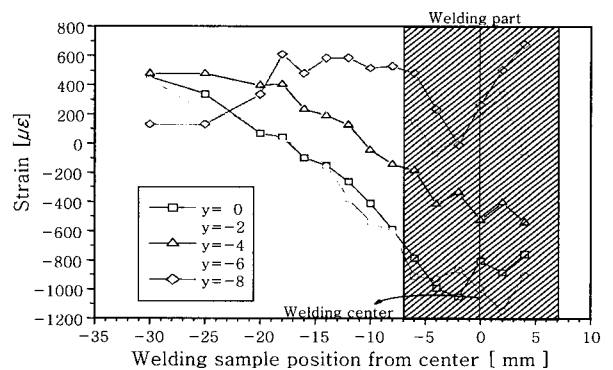


Fig. 9 Measured transverse strains

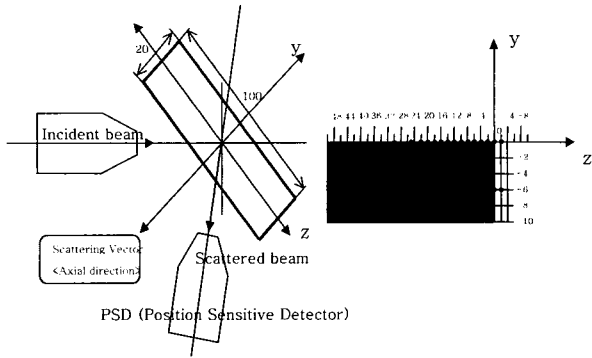


Fig. 10 Welding sample with actual geometry of the neutron beams(Longitudinal direction)

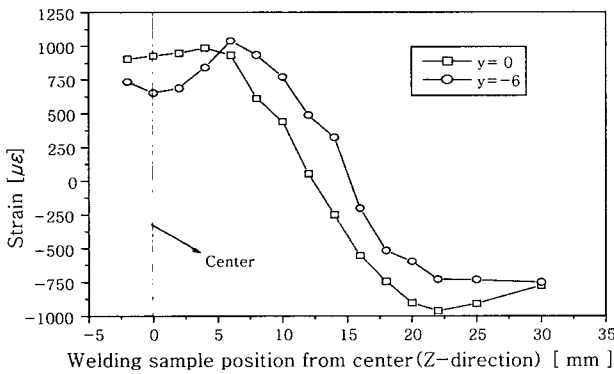


Fig. 11 Measured longitudinal strains

자 회절법을 이용하여 측정하는 방법의 타당성을 검토하는 것이 중요한 부분임으로 시편 여러 부분의 d_0 측정하여 그 평균치를 이용하여 계산하였다.

아래의 그림은 각 방향에 대한 실제 측정위치와 측정 위치에 대한 스트레인 분포를 나타내고 있다. 측정영역은 Fig. 3의 그림에서 나온 영역이며, 다음의 그림은 그 영역의 단면부위를 나타낸 그림이다.

위에서 구한 세 방향에 대한 변형율의 값을 3축 방향의 응력을 구하는 식(4)에 대입하면 용접부위 내부에 존재하는 각 방향에 대한 잔류응력의 값을 구할 수 있다.

- Normal direction :

$$\sigma_{11} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{11} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \right]$$

- Transverse direction :

$$\sigma_{22} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{22} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \right]$$

- Longitudinal(Axial) direction :

$$\sigma_{33} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{33} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \right] \quad (4)$$

6. 결 론

용접부위에 대한 미세조직의 형상은 다음의 그림에서

각각 나타나고 있다. 먼저 첫 번째 형상은 용접부 단면을 나타내고 있으며, 선명한 부분과 어두운 부분을 구분할 수 있는데 여기서 밝은 부분이 용가재가 침입하여 용접이 된 부분이고, 어두운 부분이 모재부분이다. 그리고 나머지에 나와 있는 형상은 용접부, 경계부, 모재부 각각을 보이고 있으며, 오스테나이트 스테인레스 강 조직이 용접으로 인한 복잡한 열변형 과정을 거친 후 고상화 된 상태이다. 열영향부 근방에서 오스테나이트 조직이 마텐사이트계 조직으로 변화되는 경계의 구분을 확인할 수 있었다.

V자형 양면 맞대기 용접된 시편의 초기 잔류응력 분포를 살펴보면 Normal 방향과 Transverse방향에 대해서는 용접부위 주위에 압축잔류응력의 분포를 보이고 있으며, Longitudinal방향에서는 용접부의 중앙에서는 인장응력을 보이다가 표면근방으로 접근할수록 압축잔류응력의 경향을 보이고 있었다. 각 방향에 대한 잔류응력의 분포를 자세히 살펴보면, 중립면의 위치에서 각 높이에 따른 Normal 방향의 잔류응력 분포는 용접부의 센터위치에서부터 용접부위에서 멀어지는 용접부의 모서리부분으로 갈수록 압축잔류응력값이 줄어들고 있으며, 30mm근방에서 0에 가까운 값을 보이고 있다. 압축잔류응력의 값이 최대가 되는 곳은 용접부의 중앙부위에서 표면 아래로 8mm 아래에 위치한 곳으로 약 270Mpa의 압축잔류응력을 측정할 수 있었다. d XZTransverse방향에 대한 잔류응력의 분포도 또한 용접부위 근방에서 압축잔류응력의 분포를 보이고 있으

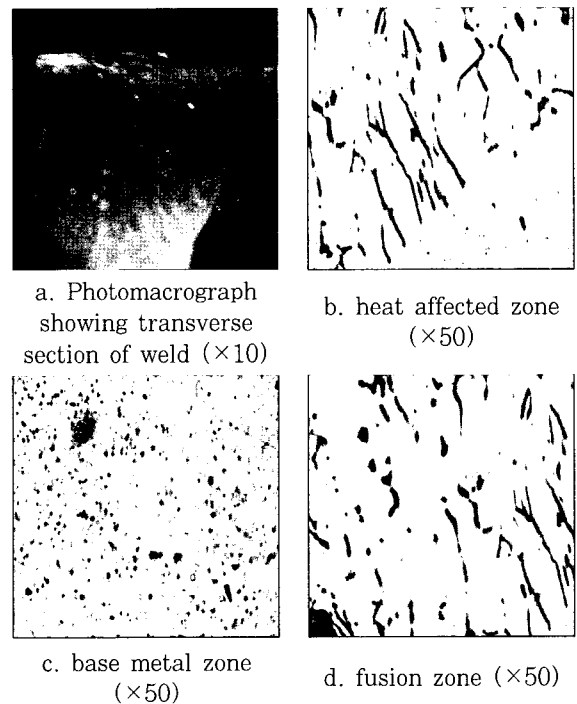


Fig. 12 Typical microstructures each zone

나, 깊이방향에 대한 응력의 분포에서는 Normal 방향의 분포와는 약간의 차이를 보이고 있다. 용접부의 중앙부 위에서는 강한 압축잔류응력의 분포를 보이고 있으나 깊이방향으로 표면에 가까울수록 압축잔류응력은 감소하게 되어 표면에서 4mm아래에 위치한 곳에서는 인장 잔류응력의 분포를 가지고 있다. 용접부 깊이에 따른 Longitudinal 방향의 잔류응력은 Normal, Transverse 의 방향과는 반대로 용접부위에서는 인장잔류응력을 보이고 있으나, 용접부위에서 멀어질수록 압축잔류응력을 보이고 있었다. 전체적인 용접부위의 잔류응력분포에서는 용접시 발생하는 용접부의 크기와 용접방향에 대한 평행조건에 영향을 받고 있다. 용접부의 잔류응력의 정밀한 계산을 위해서는 용접부는 모재와는 다른 화학성분을 가지고 있기 때문 Krawitz와 Winholtz의 실험 14에서와 같이 세밀한 측정을 통해 do의 값을 구하여 잔류 응력을 계산하여야 한다. 불연속성이 접합면에 존재할 때 열적 기계적 하중에 의해 응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 제조공정이나 사용 중에 미세 구조 결함으로 발전하여 강도와 파손 성질에 상당한 영향을 미치고 제품의 신뢰성을 떨어뜨린다. 중성자를 이용한 스테인레스 강 용접부위에 대한 잔류응력 측정 실

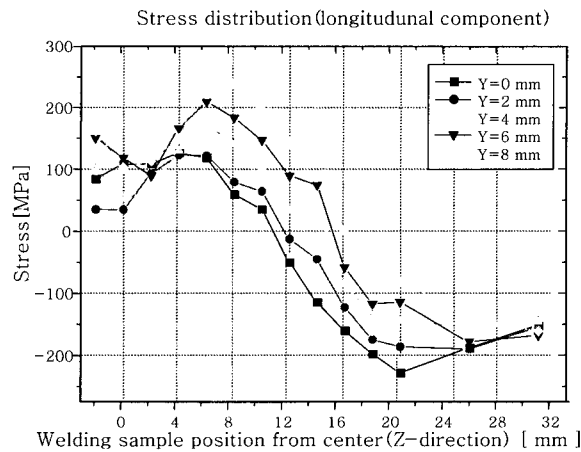


Fig. 13 The stress distribution in welded SUS304 plate

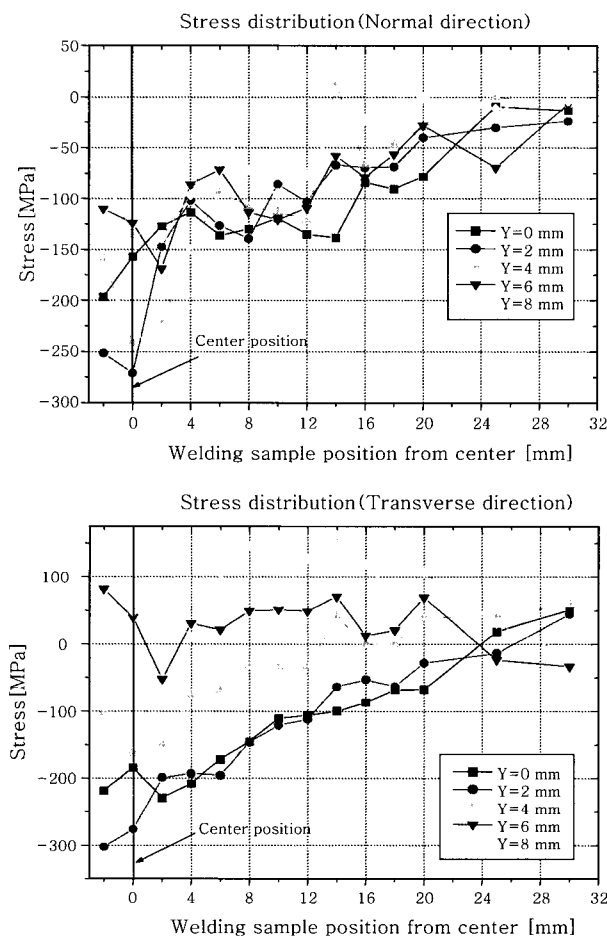
험은 용접시 발생하는 재료내부의 잔류응력 분포를 측정할 수 있는 유일한 방법이라고 생각되며, 특정한 위치에서 잔류응력을 비파괴적인 실험을 통해서 측정하고 그 분포를 알 수 있다. 용접부 내부에 존재하는 잔류응력의 분포는 용접시 발생하는 각 변형부의 상이한 온도 분포와 다층용접시 각각의 패스에 따른 열변형의 온도 분포 때문에 발생한다. Fig. 13은 중성자 회절을 이용하여 계산된 세 방향의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 아직 국내에서는 중성자 빔의 산업적 이용이 미미한 상태이지만 이와 같은 산업적 분야에 적용된다면 보다 많은 연구와 활용이 이루어 질 것이다.

후 기

본 연구는 한국 과학기술평가원의 1999-2000원자력 기초과제 지원을 받아 수행되었다. 실험에 장비와 연구 인력에 도움을 준 한국원자력연구소에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y.B.Lee and C.S.Chung : Residual Stress Redistribution and Fatigue Behavior in Weldment, Journal of KWS, 15-3 (1997), 20-28(in Korean)
2. Koichi Masubuchi, : Analysis of Welded Structures, Oxford : New York: Pergamon Press, 1980.
3. B.H.Han and S.J.Choi : Residual Stress and Fatigue by X-ray Diffraction Method, Journal of the Korean Institute of Metal, 18-3 (1984), 225-231(in Korean)
4. B.H.Han and W.K.Park : A Study of X-ray Residual Stress Measurements on Textured Steel, Journal of the Korean Institute of Metal, 22-9 (1984), 768-773 (in Korean)
5. Paul S. Prevey, : X-ray Diffraction Residual Stress Techniques, Metals Handbook, Metals Park, OH: American Society for Metals, 1986, 380~392



6. R.P. Martukanitz, P.R. Howell, E.A. Payzant, S. Spooner, and C.R. Hubbard. : Neutron Diffraction Study of Welds of Aerospace Aluminum Alloys, in Nondestructive Evaluation and Materials Properties III [P.K.Liaw, O.Buck, R.J.Arsenault, and R.E.Green, Jr., eds.], TMS, Warrendale, PA, 89-95 (1996)
7. G.A. Webster : VAMAS Neutron Diffraction Measurements of Residual stress in A Shrink-Fit Ring and Plug, VAMAS Report No. 38 , 1(2000), 3-9
- 8.. P. J. Webster, G. Mills, X. D. Wang, W. P. Kang, T. M. Holden : Neutron Strain Scanning of a Small Welded Austenitic Stainless Steel Plate, Journal of Strain Analysis, 1994
9. J. H. Root, T. M. Holden. J. Schröder, C. R. Hubbard, S. Spooner, T. A. Dodson, S. A. David : Residual Stress Mapping in Multipass ferritic steel weld, Material Science and Technology, **Vol. 9** (1993, Sep), 754-759
10. T. M. Holden, J. H. Root and V. Fidleria, : Application of Neutron Diffraction To Engineering Problems, Materials Science Forum **Vols. 27/28** (1988) 359~370
11. Ismail C. Noyan, Jerome B. Cohen, : Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation, New York.
12. Aaron D. Krawitz, : Residual Stress Analysis with Neutrons, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **Vol. 166**, 281~292
13. C.H.Lee, Vyacheslav T. Em, E.J.Shin, H.S.Shim, B.S.Seong, H.J.Kim and Thomas H. Holden : Development of Neutron Diffraction Measurement of Residual Stresses, KAERI, Jun., 1999(in Korean)
14. A.D. Krawitz, R.A. Winholtz, : Use of Position-Dependent Stress-Free Standards for Diffraction Stress Measurements, Mat. Sci. Engr. A195 (1994), 123-130.