

중성자회절을 이용한 Fillet용접부위의 잔류응력 측정

The Residual Stress Measurement on T Fillet Welded Specimen by Neutron Diffraction

박만진, 장동영, 등등...

서울산업대학교

서울시 노원구 공릉동

요 약

구조물이나 기계가공물의 제작 시 불균일한 탄-소성변형의 결과로 제작물 내에는 잔류응력이 존재하게 된다. 잔류응력은 공학적인 많은 재료와 부품들에 일상적으로 존재하며 외부에서 가해지는 힘이 없어도 물체 내부에 존재하는 응력이다. 일반적으로 재료내부에 압축잔류응력이 생길 경우 제품의 피로강도를 증가시키며 인장잔류응력은 피로강도를 감소시킨다. 잔류응력의 측정법은 파괴적인 측정법과 X-ray, 중성자 회절을 이용한 비파괴적인 측정법 등이 있다. 본 논문에서는 하나로 원자로의 HRPD의 잔류응력 측정 장치를 이용하여 중성자 회절을 이용하여 Fillet 용접된 시험편의 잔류응력 분포를 측정하였고, 이 용접시험시편의 중성자속을 측정하였다.

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 by using X-ray or neutron diffraction. This paper presented application of neutron diffraction technique to the residual stress measurement using T Fillet welded stainless steel plate and Attenuation of the Neutron Flux in the Sample.

1. 서론

최근 기계나 구조물에 구성되고 있는 공업재료의 약 90%가 강철이며, 그 중 약 80%가 압연재 혹은 주물로 이들의 결합은 거의 용접에 의해 제작되어지고 있다.

이런 용접 구조물은 균질하고 강도가 높으며, 절삭 칩이 적어 재료의 중량을 줄일 수 있고, 이음의 형상이 자유롭고 구조가 간단하며 재료의 두께에 제한이 없다는 이점을 갖지만 또한 재질의 변화, 변형과 수축, 잔류응력, 품질검사의 곤란, 저온시의 취성과파괴 등 여러 가지의 단점도 지니고 있다.

용접에 의하여 용접부의 부근은 온도상승으로 인해 팽창하고 곧 냉각에 의해 수축하게 된다. 이 온도변화는 통상 용접부의 부근에서만 발생하며 국부적인 것이므로 온도 변화에 수반되는 팽창 수축이 자유로이 이루어진다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 용접에 의한 온도 변화의 과정에서 이음의 부근에는 복잡한 구속에 의한 응력변화가 발생하여 냉각 후 응력이 잔류하고 또한 수축이나 굽힘 등의 변형을 일으키게 된다.

용접 작업을 마치고 냉각 후에 잔류하는 응력을 용접잔류응력, 가열과 냉각의 과도 상태에서 생기는 응력을 용접과도응력이라 하는데, 이들을 총칭하여 일반적으로 용접응력이라고 한다. 또한 용접에 의한 수축이나 부재의 굽힘, 비틀림 등을 총칭하여 용접변형이라고 한다.

용접에 의한 잔류응력과 변형의 발생원인은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 용융 금속의 응고시에 있어서 모재의 열팽창
- 용접 열사이클의 과정에 용접부 부근의 모재에 생기는 소성변화
- 용착 금속이 응고하고 나서 실온으로 냉각하는 사이에 일어나는 수축과 소성변화

용접잔류응력은 구조물이나 구조 요소의 파괴강도, 파열강도, 좌굴강도, 진동특성 등에 영향을 주는 중요한 요인이 된다.

잔류응력이 용접부품의 성능에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 되어져 왔고, 이를 성능 개선에 효과적으로 응용하는 많은 방법들이 소개되었다[1,2]. 또한, 부품의 가공성, 변형 등에 대한 잔류응력의 영향을 정량적 또는 정성적으로 해석하는 연구가 지속되고 있다 [1,2,3]. 잔류응력을 측정하는 방법에는 파괴 및 비파괴 방법의 두가지가 있는데 파괴적인 방법으로는 layer removal, hole drilling, Sachs boring-out, Bauer-Heyn 및 sectioning method 등등이 있고, 비파괴적인 방법으로는 X-ray 및 Neutron diffraction, ultrasonic, Barkhausen noise 그리고 magnetic method 등이 있다[2,3,7,8,9].

본 연구에서는 잔류응력을 측정하는 비파괴적인 측정방법 중에 중성자회절을 이용하여 Fillet 용접된 시편내부의 잔류응력의 분포를 측정하였다. 일반적으로 많이 이용되는 비파괴적인 잔류응력의 측정법들 중에 X-ray 응력측정법은 재료 표면근방의 국소 잔류응력을 비파괴적으로 측정할 수 밖에 없는 단점을 가지고 있는 반면에 충분한 강도의 중성자속을 이용한 중성자 회절법은 투과율이 좋아 재료 내부 수 cm 깊이까지의 거시적 잔류응

력분포를 측정할 수 있는 정밀한 비파괴적인 방법이다.

2. 중성자회절에 의한 잔류응력의 측정

금속재료에 내부응력이 생기면 각 결정안에서는 격자면의 간격이 늘어나거나 줄게 된다. 이 내부 격자응력의 측정원리는 X-ray 또는 중성자산란에 의해 결정립에서 이 응력이 일으키는 격자 변형률을 측정하는데 있다. 중성자 빔의 특정한 파장 λ 의 단색화된 빔이 Fig. 1.에 보이는 것처럼 다결정 재료의 시료에서 회절된다고 하면, 회절각은 Miller지수 hkl 을 갖는 격자면들의 간격 d_{hkl} 과 Brage의 법칙

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

에 따라 관련된다.

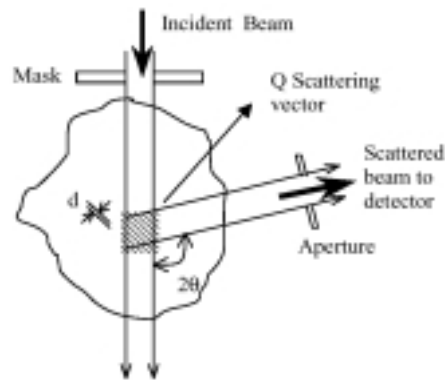


Fig 1. Principles of neutron diffraction strain measurement.

내부응력에 기인한 특정한 격자면 간격의 상대적 변화는 다음의 식에서 알 수 있듯이

$$\Delta d = d - d_0 \quad (2)$$

여기서, d = 부과된 응력에 대한 격자 면간거리
 d_0 = 응력을 받지 않은 상태의 격자 면간거리

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (3)$$

ϵ = strain(변형율)

$$\varepsilon = \frac{d' - d_o}{d_o} = \frac{\frac{\lambda}{2 \sin \theta'} - \frac{\lambda}{2 \sin \theta_o}}{\frac{\lambda}{2 \sin \theta_o}} = \frac{\sin \theta_o}{\sin \theta'} - 1 \quad (4)$$

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

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

$$(\because \Delta\theta \approx 0 \Rightarrow \cos \Delta\theta \sim 1, \sin \Delta\theta \sim \Delta\theta)$$

이고, strain은 다음과 같이 회절각에 대해서 정리된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sin \theta_o}{\sin \theta'} - 1 \\ &\approx \frac{1}{\sin \theta'} (\sin \theta' - \cos \theta' \cdot \Delta\theta) - 1 \\ &= -\cot \theta' \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 1에서 나타내고 있는 것과 같이 Bragg 반사는 반사 격자평면의 법선이 입사 중성자빔과 산란중성자빔이 만드는 각의 2등분선 방향에서 있어난다. 따라서 시료 안에서 측정된 변형률은 산란벡터의 Q의 방향과 같고, Q에 수직인 결정면을 갖는 방향의 모든 결정립들에 대한 것이다. 일반적으로 용접물 내부의 일정한 위치에서 기준을 잡은 좌표축 xyz에 대한 각 방향의 변형률텐서는 ε 는 산란벡터 Q에 대하여 용접물 시료의 위치를 변화시키면서 측정할 수 있다. 즉, 측정 Fillet 용접물의 위치 방향의 결정에 따라 결정된다. 따라서 변형률텐서 ε 를 결정하려면 적어도 6가지 서로 다른 방향의 변형률을 측정할 필요가 있게 되지만 주응력 방향에 대한 고정으로 인해서 용접물 내부에 존재하는 잔류응력의 측정은 재료의 Young 율과 Poisson 비를 사용하여 다음의 식에 대입하여 측정할 수 있을 것이다.

$$\begin{aligned} - \text{Normal direction} & : \sigma_{11} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\varepsilon_{11} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right] \\ - \text{Transverse direction} & : \sigma_{22} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\varepsilon_{22} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right] \\ - \text{Axial direction} & : \sigma_{33} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\varepsilon_{33} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

용접물에 존재하는 잔류응력을 평가하기 위한 시편을 제작 할 때 잔류응력이 실구조물

에 존재하는 잔류응력만큼 존재시키기 위해서는 시편이 어느 정도 이상의 크기가 되어야 한다.

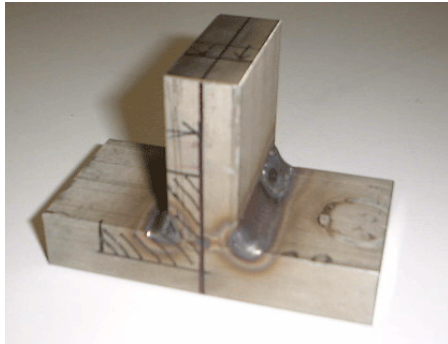


Fig. 2 Measured welding sample

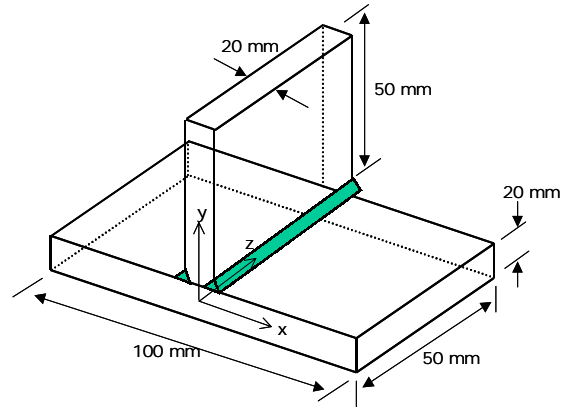


Fig. 3 Measured welding sample co-ordinate system

실험에서 선정된 시편은 Stainless steel 304 plates이며, 전류 120 A 전압 220 V의 조건에서 Tic-arc welding machine에 의해 Fillet 용접 된 시편에서 용접 후 잔류응력의 분포를 측정하는 실험을 하였다. Fig 2.는 용접된 시편의 그림을 나타내며, Fig 3.은 스트레인 컴포넌트와 측정되는 위치들에 대한 Cartesian co-ordinate system을 도시하고 있다.

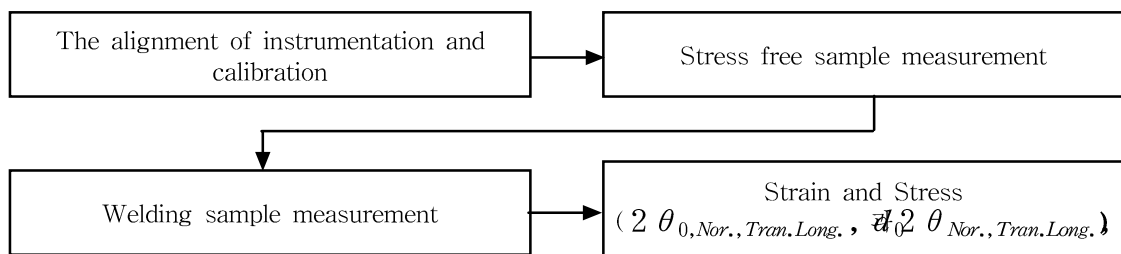


Fig. 4 Measurement procedure

Fig. 3에 도시하고 있는 것과 같이 세 방향인 Normal(y축), Transverse(x축) and Longitudinal(Axial, z축) 방향의 스트레인 컴포넌트를 측정하기 위해서 각각의 용접 시편이 고정·배치되고, 이동하면서 이들 세 방향에 일치하는 산란 벡터 Q에 의해서 각 방향의 측정 포인트에 대한 스트레인 값이 구해진다. Fig. 4는 측정절차이고, 실험에서 용접시편을 정확한 위치에 포지션하고, 이동하는지가 중요하며, 중성자를 이용한 실험에서 공간적인 분해능은 빔이 회절 탐색 부피에 적절하게 입사되고 회절을 조절하는 빔 슬릿의 간격의 치수와 입사빔과 회절빔 사이의 각도가 중요한 변수였다. 중성자를 흡수하는 두 개의 cadmium sheets slit 이 입사빔과 회절빔에 놓여 스트레인을 측정하는 회절 탐

색 부피를 조정하였고, 상대적으로 스트레인 gradient 가 적은 Normal, Transverse 방향에 대해서는 입사빔과 회절빔의 높이가 24 mm이고 폭이 2 mm로 하여 측정하였고, 그러나 상대적으로 큰 스트레인 gradient를 가지는 Longitudinal(Axial) 방향의 측정에 대해서는 높이가 4 mm이고 폭이 2 mm로 감소시켜 측정하였다. 용접 시편내의 스트레인 프로파일은 시편을 측정 위치에 맞게 이동하면서 측정을 하였다. 회절 peak는 Stainless steel 304 시편의 격자면 (220), 회절각 $2\theta_{220} \approx 92.66^\circ$ 에서 측정하였다. 그리고 본 실험에서 사용될 무응력격자변형값이 d_0 의 측정은 용접 전 용접물과 같은 시편의 모서리부를 절단하여 측정된 값을 strain을 구하기 위한 기준값으로 정하였다.

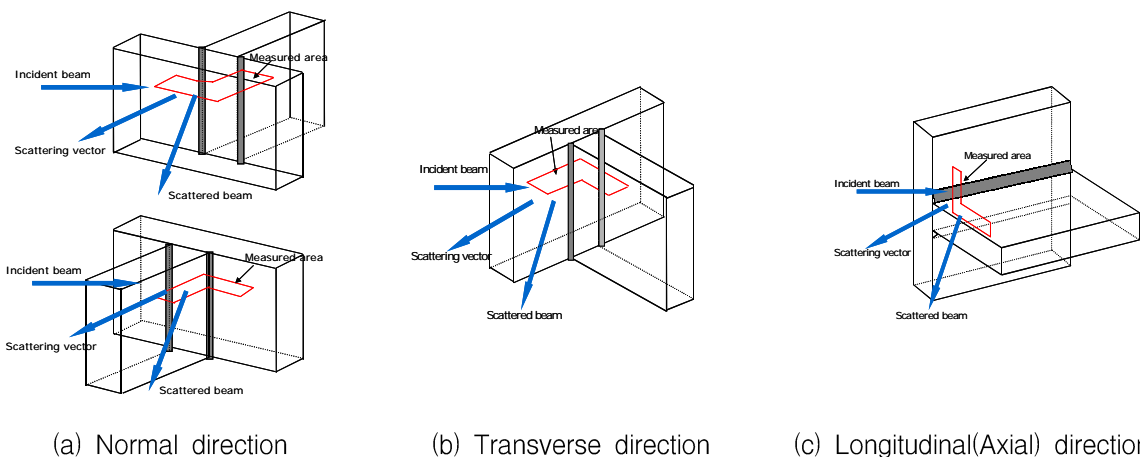


Fig. 5 Measurement of each direction component

Fig. 5는 각 측정 방향에 대한 용접시편의 위치에 관해서 그림으로 설명하고 있으며, Normal 방향에 대해서는 빔의 path 길이에 따른 측정방향을 변경하여 측정하였기 때문에 측정방향을 완전히 반대로 하여 측정하게 되었다. 측정부위로 삼은 용접시편의 위치는 빔 path를 정하기에 상당히 까다로운 위치였기 때문에 측정부위별로 측정시간의 차가 심하게 변하였다. 측정된 데이터의 peak 센터, 폭과 강도는 least squares fittings a Gaussian line shape에 의해서 계산되어졌으며, Normal 방향의 스트레인 성분을 측정하기 위해 측정위치의 범위는 $0 \leq x \leq 30$ mm, $0 \leq y \leq 30$ mm 사이에서 측정되었고 같은 방법으로 Transverse 방향에 대해서는 시편을 산란벡터방향에 맞게 다시 고정하고 측정범위는 Normal 방향의 측정범위와 같다. Longitudinal(Axial) 방향에 대해서는 $0 \leq X \leq 30$ mm, $0 \leq Y \leq 30$ mm의 위치에서 측정되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

잔류 응력이 생성됨에 따라 물질의 내부 구조에 변화가 발생한다. 이러한 변화는 측정에 의해서 결정면의 흐트러짐 등으로 측정된다. 이러한 결정면의 흐트러짐은 투과하여 결정면에서 Bragg 산란되어 나오는 중성자의 계수율을 측정함으로써 어느 정도 예측해 볼 수 있다. Fig. 6은 시료의 용접 부위 및 비용접 부위에서 중성자 빔의 투과깊이에 따라 PSD 검출기에 검출된 중성자 면적을 나타내었다. 측정의 타당성을 검증하기 위하여

$$A = A_0 \epsilon B \exp(-\mu t)$$

을 이용하여 중성자 감쇠 계수를 구할 수 있다. 여기서, A 는 계측기에 검출된 중성자 피크 면적이고, A_0 는 시편에 입사한 중성자의 개수, ϵ 은 계측기의 중성자 검출 효율, B 는 Bragg 산란에 의해 시편의 gauge volume에 입사한 중성자가 계측기를 향할 확률, μ 는 중성자 감쇠 계수, t 는 시편내에서의 중성자의 path length이다. Monochromator로부터 회절된 단일 에너지의 중성자를 사용하므로 계측효율을 일정하다고 가정하고, 입사 중성자속의 변화를 무시하고, Bragg 산란에 의해 시편에 입사한 중성자가 계측기를 향할 확률을 고려할 때 계측 중성자 피크 면적과 계측기로의 입사 중성자 개수의 비로부터 중성자 감쇠 계수를 구할 수 있다. Fig. 6은 각각 잔류응력이 존재하지 않는(무시할 정도인) 시편과 용접에 의해 잔류 응력이 생성된 시편을 사용하여 시편내에서의 중성자 path length 변화에 따라 측정된 중성자 피크 면적이다. 이를 이용하여 중성자 감쇠계수를 측정에 의해 구해 보면, 비용접 부위에서의 결과를 1차식으로 fitting하면 기울기 -0.483 를 얻는다. 이는 중성자 감쇠계수로서 환산하면 1.116 cm^{-1} 에 해당하는 값으로 중성자 감쇠 계수와 2%정도의 차이로서 비교적 잘 일치하였다. 이에 비해 용접 부위에서의 결과는 자료간의 퍼짐이 매우 심하게 나타났다. 이는 용접으로 인한 시편 내 격자의 흐트러짐이 중성자빔의 Bragg 산란에 영향을 주었기 때문으로 생각되어진다. 격자의 흐트러짐은 계측된 중성자 계수율로부터 어느 정도 유추해 볼 수 있다.

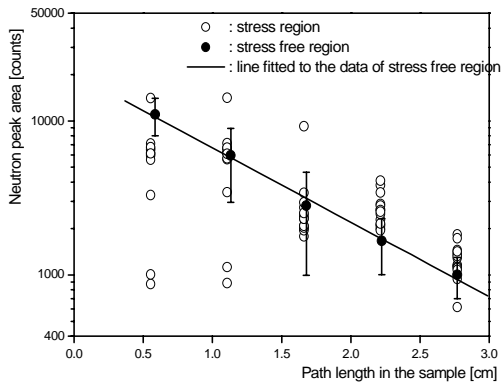


Fig. 6 Measured neutron peak area for the stainless steel sample according to the path length in the sample.

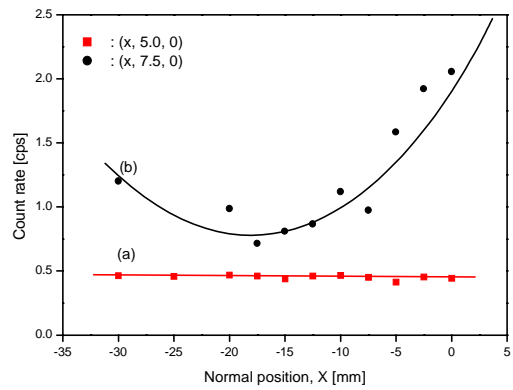


Fig. 7 Measured neutron peak count rate for the stainless steel sample according to the normal position of the gauge volume.

Fig. 7은 중성자 빔의 gauge volume을 axial 위치를 각각 $y = 5 \text{ mm}$ 와 $y = 7.5 \text{ mm}$ 로 고정하고 normal 방향으로 변화시키면서 측정된 PSD에서의 중성자 피크 계수율로 나타내었다. 각각의 경우는 시편 내에서의 중성자속 감쇠가 동일하도록 path length를 일정하게 유지하였다. 용접 부위에서 비교적 멀리 떨어져 있는 (a)의 경우에는 normal 방향에 따른 계수율의 변화가 무시할 정도였다.

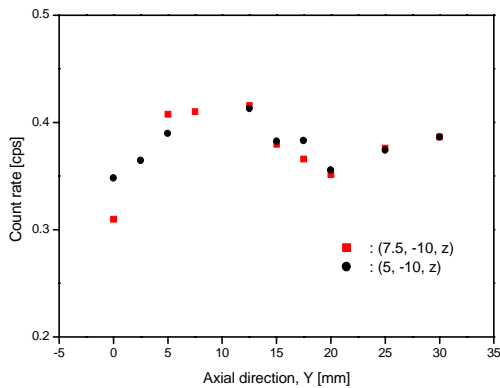


Fig. 8 Measured neutron peak count rate for the stainless steel sample according to the axial position of the gauge volume.

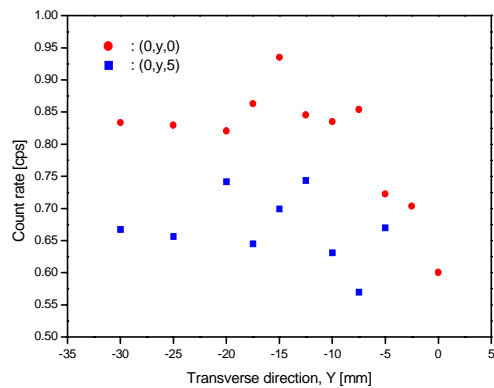
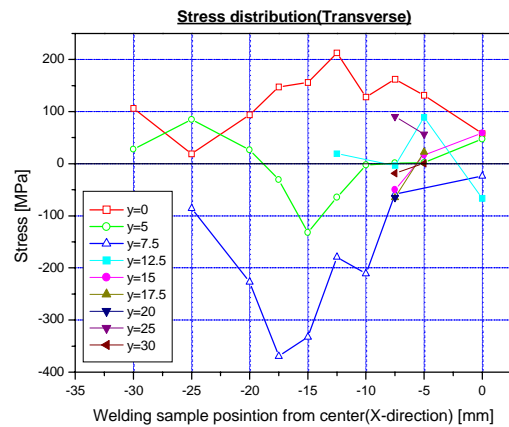
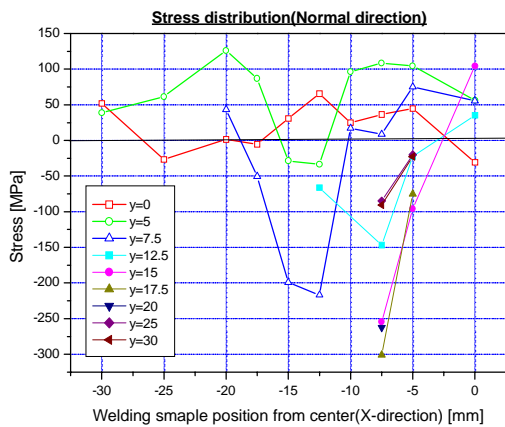


Fig. 9 Measured neutron peak count rate for the stainless steel sample according to the transverse position of the gauge volume.

이는 Bragg 산란면의 흐트러짐의 변화가 적었음을 의미한다. 반면 용접부위에 가까운 (b)의 경우는 용접부위에 해당하는 $-10 \sim -15 \text{ mm}$ 부근에서 계수율이 대폭 감소함을 볼 수가 있는데 이는 Bragg 산란면의 흐트러짐에 의해 산란면에서 중성자들의 첫 산란이 중성자 피크 계수율이 줄어드는 방향으로 기여했음을 의미한다. Fig. 8은 중성자 빔의

gauge volume의 normal 위치를 각각 $x = 5\text{mm}$ 와 $x = 7.5\text{ mm}$ 에 고정시키고, axial 방향으로 변화시키면서 측정한 중성자 피크 계수율이다. 두 경우 모두 용접 부위에서 크게 벗어나지 못한 영역이었으므로 용접 부위에 해당하는 $z = 10\text{ mm}$ 근처에서 계수율이 다소 증가하는 경향을 보였다. Fig. 9는 중성자 빔의 gauge volume을 transverse 방향으로 변화시키면서 측정한 계수율이다. 각각의 경우에 있어서 용접부위에 해당하는 $y = -10\text{ mm}$ 근처에서 약간의 계수율 증가가 보인다. 이와 같이 잔류 응력이 형성됨에 따라 잔류 응력이 생성된 각 위치에 따라 중성자 피크의 계수율이 변화함을 통하여 시편의 gauge volume에 입사한 중성자가 Bragg 산란에 의해 계측기를 향할 확률 B가 변하고 있음을 알 수 있었다. 본 실험에서 측정된 각 방향(Normal, Transverse, Axial)별 용접부위 근방이 잔류응력의 분포를 살펴보면 용접부의 열영향부에서 멀리 떨어진 부위에서는 거의 0에 가깝거나 약간의 인장응력을 보이고 있었으며, 열영향부위 근처에서는 강한 압축잔류 응력을 나타내고 있었다. 향후 아래의 측정값에 대하여 유한요소법을 이용한 측정값들과 비교할 예정이며, 용접부위 근방의 조직들을 금속현미경으로 조사하여 용접조건에 대한 용접부위의 조직을 조사할 계획이다.



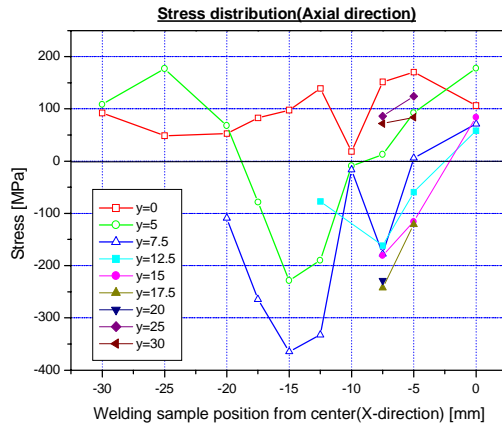


Fig. 4.56 The stress distribution in welded SUS304 T fillet welding

4. 후 기

본 연구는 한국 과학기술평가원의 2000'원자력 기초과제 지원을 받아 수행되었다. 실험에 장비와 연구인력에 도움을 준 한국원자력연구소에 감사 드립니다.

5. 참고문헌

- [1] 박영철, 오세욱, 허선철, 조용배, 1994, "Si3/SUS304 접합재의 잔류응력 및 강도평가", 대한기계학회논문 제 18권 제 1호, pp. 101~112
- [2] 신상현, 김정일, 1997, "잔류응력의 응용", 대한범용기계학회지, 제 21권 제 5호, pp. 463~468
- [3] 김철, 석창성, 양원호, 2000, "구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정시 구멍 편심의 영향", 대한기계학회논문집 A권, 제 24권 제 8호, pp. 2059~2064
- [4] 한봉희, 최성조, 1980, "X선회절방법에 의한 잔류응력과 피로에 관한 연구", 대한금속학회지, 제 18권, 제 3호, pp. 225~231
- [5] V. T. Em, 신은주, 심해섭, 성백석, 이창희, 김현준, "중성자 회절에 의한 잔류응력 측정법 개발", 한국원자력연구소 기술보고서, 1996
- [6] 박만진, 2001, "중성자 회절을 이용한 stainless steel 용접부위의 잔류응력 측정", 서울산업대 석사학위논문,

- [7] M. J. Park, D. J. Jang, H. D. Choi, 2001 "Residual Stress Measurement on Welded Stainless Steel Specimen by Neutron Diffraction", International Journal of KWS, Vol. 1, No. 1, May
- [8] Koichi Masubuchi, 1980, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press,
- [9] Michael T. Hutchings, Aaron D. Karwitz, 1991, "Measurement of Residual and Applied Stress Using Neutron Diffraction", NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences-Vol.216,
- [10] D. A. Witte, A. D. Krawitz, R. A. Winholtz, R. R. Berliner, M. Popovici, 1998 "An Instrument for Stress Measurement using Neutron Diffraction", J. Neutron Research, Vol. 6, pp. 217~232