

중성자 회절을 이용한 용접부위의 잔류응력 측정

Residual Stress Measurement on Welded Specimen by Neutron Diffraction

박 만진*, 장 동영*, 변 수현**, 선 광민**, 최 회동**
이 창희***, Vyacheslav T. Em***, 문 명국***, 신 은주***

* 서울산업대 산업공학과

** 서울대 원자핵공학과

*** 원자력연구소 하나로 원자로 중성자 물리실

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 20 mm thick welded stainless steel plate(100×100 mm²)

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 광범위하게 이용되고 있는 용접 구조물은 사용 환경 등이 가혹해지고 대형화되어 가고 있어 항상 사고의 위험이 증가하고 있다. 특히 용접작업 중에 생기는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열 등 다양한 형태의 결함들이 존재하기 쉬우며, 이들 결함으로부터 균열이 진전되어 최종파단에 이르는 경우가 많다. 그리고 원자력 발전소에서 사용되는 파이프나 발전기기는 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. 또한 용접 작업 중에 생기는 용가재의 용융상태에서 화학반응 및 냉각속도 차이에서 오는 조직 변화 등 많은 변수들에 의해서 용접부재를 취약하게 하고 안전사용이나 안전설계에 어려움을 주고 있다. 이상과 같이 용접부에는 많은 취약조건들이 존재하며 파괴의 주원인이 되는 잔류응력에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

잔류응력을 측정하는 방법에는 해석적인 방법과 실험적인 방법에 의해서 측정되어질 수 있다. 해석적인 방법으로는 유한요소법을 이용하여 많은 수의 연구자들이 가공되어진 재료의 기계적 특성, 형상, 치수 및 하중의 조건하에서 해석 대상물에 퍼져있는 잔류응력을 계산하였다. 이러한 복잡한 해석의 절차는 강도와 열과 같은 중요한 요소들을 환경에 맞게 적절히 이용하는데 어렵기 때문에 해석적 적용방법은 매우 제한적이며, 예측된 잔류응력의 값들이 부정확하게 된다. 위와 같은 이유 때문에 실험적인 방법에 의해서 잔류응력이 측정되어지는데, 실험적인 잔류응력의 측정 방법에는 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법이 있다. 파괴적인 방법은 검사될 부위를 잘라내어서 변형된 부위를 측정함으로써 잔류응력을 간접적인 방법으로 측정하는 것으로, 즉 잘라낸 부위의 변형과 반발력의 측정에 의해서 잔류응력이 측정된다. 비파괴적인 실험 방법은 잔류응력이 존재하는 영역내에서 전자기, 광학 등의 다른 물리적인 현상이나 값들을 측정함으로써 잔류응력을 측정할 수 있다. 잔류응력을 측정하는 비파괴적인 실험 방법으로 널리 사용되는 방법을 살펴보면, X-선 회절, 중성자 회절, 전자기장, 초음파 등을 이용한 방법이 이용되고 있다. 그러나, X-선, 전자기장, 초음파 등은 침투력과 침투깊이 때문에 측정하는 재료의 표면 부근의 잔류응력을 측정하는데 빈번히 사용되고 있으나, 용접부위와 같이 열 변형 부위가 깊은 곳까지 관계하는 재료에서는 측정물의 깊은 곳까지 잔류응력의 분포를 측정하려면, 침투력이 강한 중성자 빔 회절을 이용한 측정이 필요하다.

중성자 회절을 이용한 잔류응력측정은 격자들의 스트레인값을 측정함으로써 구해진다. 일반적으로 응력은 텐서량이기 때문에 측정되는 위치에 대해서 여섯 방향에 대한 응력상태값들이 결정되어져야 한다. 그러나 잔류응력 측정 실험의 초기 디자인시 주방향은 결정되기 때문에 나머지 세 방향에 대

한 측정값들에 의해서 측정 대상물에 분포하는 응력 분포를 추출해 낼 수 있다.

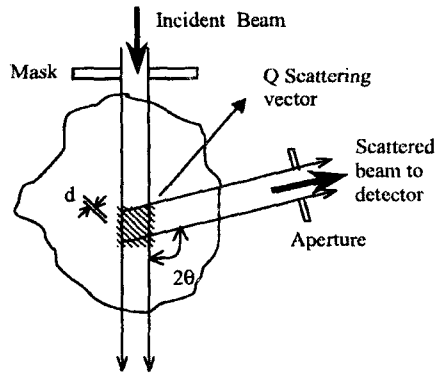


Fig 1. Principles of neutron diffraction strain measurement.

중성자 회절 측정은 스트레인을 기준정보로써 격자들간의 거리를 구함으로써 스트레인 값들이 결정되며, Bragg's law $2d\sin\theta = n\lambda$ 에 의해서 응력을 받은 측정대상물 회절탐색부피의 격자면(hkl)에서 격자거리(d)를 측정한다. 여기서 n은 상수이며, λ 는 입사빔의 파장, d는 격자거리, θ 는 특정한 격자면(hkl)에 대한 회절각을 나타낸다. Fig 1.에서 측정되는 스트레인 값은 입사빔과 회절빔이 교차하는 영역에서 산란벡터 Q의 방향에서 구해진다.

2. Neutron Diffraction Experiments and Results in Stainless Steel Welded Sample

2.1 Stainless Steel Welded Sample

용접물에 존재하는 잔류응력을 평가하기 위한 시편을 제작 할 때 잔류응력이 실구조물에 존재하는 잔류응력만큼 존재시키기 위해서는 시편이 어느 정도 이상의 크기가 되어야 한다.

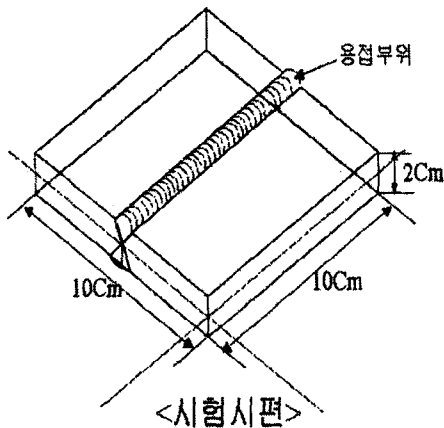


Fig 2. Welded plate

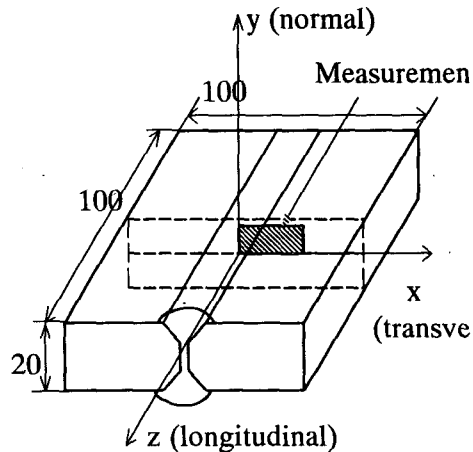


Fig 3. Schematic view of welded plate

이번 실험에서 선정된 시편은 Stainless steel 304 plates이며 용접된 시편의 크기는 $20 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ 이고, 전류 120 A 전압 220 V의 조건에서 Tic-arc welding machine에 의해 양면 맞대기 다층 용접 된 시편에서 용접 후 초기 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.

2.2 Neutron Diffraction Experiments and Results

응력을 받은 측정대상물의 격자거리 d에 대해서 측정 대상물과 같은 재료의 응력을 받지 않은 상

태의 격자거리 d_0 가 측정되면 격자 스트레인은 $\epsilon = (d-d_0)/d_0$ 이다. 이 식에 Bragg's law의 식을 대입해서 정리하면 다음과 같이 표현될 수 있고 $\epsilon = -\cot \theta \Delta \theta$, 여기에서 $\Delta \theta$ 는 회절 실험에서 측정되어지는 Bragg angle 의 차이이다.

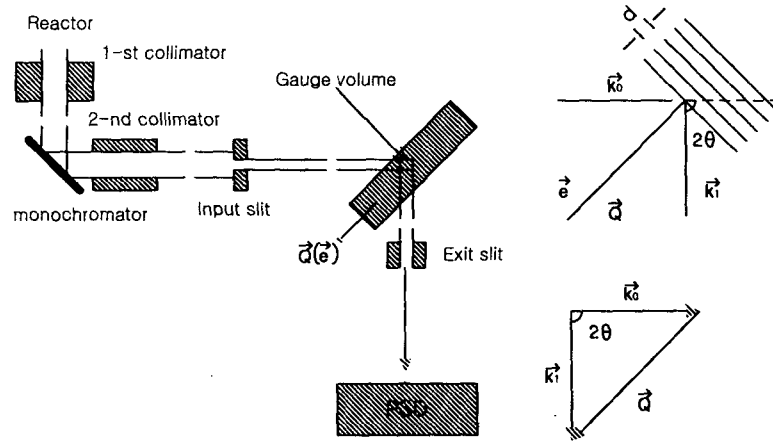


Fig 4. Strain measurement schematic

Fig 3. 과 4.에 도시하고 있는 것과 같이 세 방향인 Normal, Transverse and Longitudinal(Axial) 방향의 스트레인 컴포넌트를 측정하기 위해서 각각의 용접 시험편이 고정·배치되고, 이동하면서 이들 세 방향에 일치하는 산란 벡터 Q 에 의해서 각 방향의 측정 포인트에 대한 스트레인 값이 구해진다. 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 탐색 부피를 조정하였고, 상대적으로 스트레인 gradient 가 적은 Normal, Transverse 방향에 대해서는 입사빔과 회절빔의 높이가 20 mm로 하여 측정하였고, 그러나 상대적으로 큰 스트레인 gradient를 가지는 Longitudinal(Axial) 방향의 측정에 대해서는 4 mm로 감소시켜 측정하였다. 용접 시편내의 스트레인 프로파일은 시편을 측정 위치에 맞게 이동하면서 측정을 하였다. 회절 peak는 Stainless steel 304 시편의 격자면 (220), 회절각 $2\theta_{220} \approx 95^\circ$ 에서 스캔되었다.

측정된 데이터의 peak 센터, 폭과 강도는 Microcal Origin 6.0의 least squares fittings a Gaussian line shape에 의해서 계산되어졌다. Normal, Transverse 방향의 측정위치는 2 mm 간격으로 $-4 \leq X \leq 30$ mm, $0 \leq Y \leq 8$ mm 사이에서 측정되었고, Longitudinal(Axial) 방향에 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. 응력을 받지 않은 같은 재질의 plate $20 \times 50 \times 100$ mm³에서 면간 격자거리 d_0 와 회절각 $2\theta_0$ 을 측정하였고 용접 시편의 측정에서 얻은 값과, Stainless steel 304L for reflection (220)에서 Elastic diffraction constants $E=211$ GPa and $\nu=0.265$ 값으로 용접 시편내에 분포하는 잔류응력을 측정하였다.

3. 결 론

V자형 양면 맞대기 용접된 시편의 초기 잔류응력 분포를 살펴보면 Normal 방향에 대해서는 용접 부위의 센터를 기준으로 강한 압축잔류응력을 보이고 있으며, 깊이방향에 대해서는 시편의 표면근방으로 도달할수록 센터보다 적은 압축잔류응력이 분포되었다. 그리고 Transverse 방향에 대해서는 Normal 방향에 대한 응력 분포와 길이방향으로는 비슷하게 분포되었지만 깊이 방향에 대해서는 잔류응력의 분포는 차이가 심하게 나타났다. 마지막으로 Longitudinal(Axial)방향에 대한 잔류응력의 분포를 보면 센터 부위에 대해서는 인장 잔류응력의 분포를 보이고 있고, 용접 시편의 표면으로 나

을 수록 압축잔류응력의 분포를 보이고 있다.

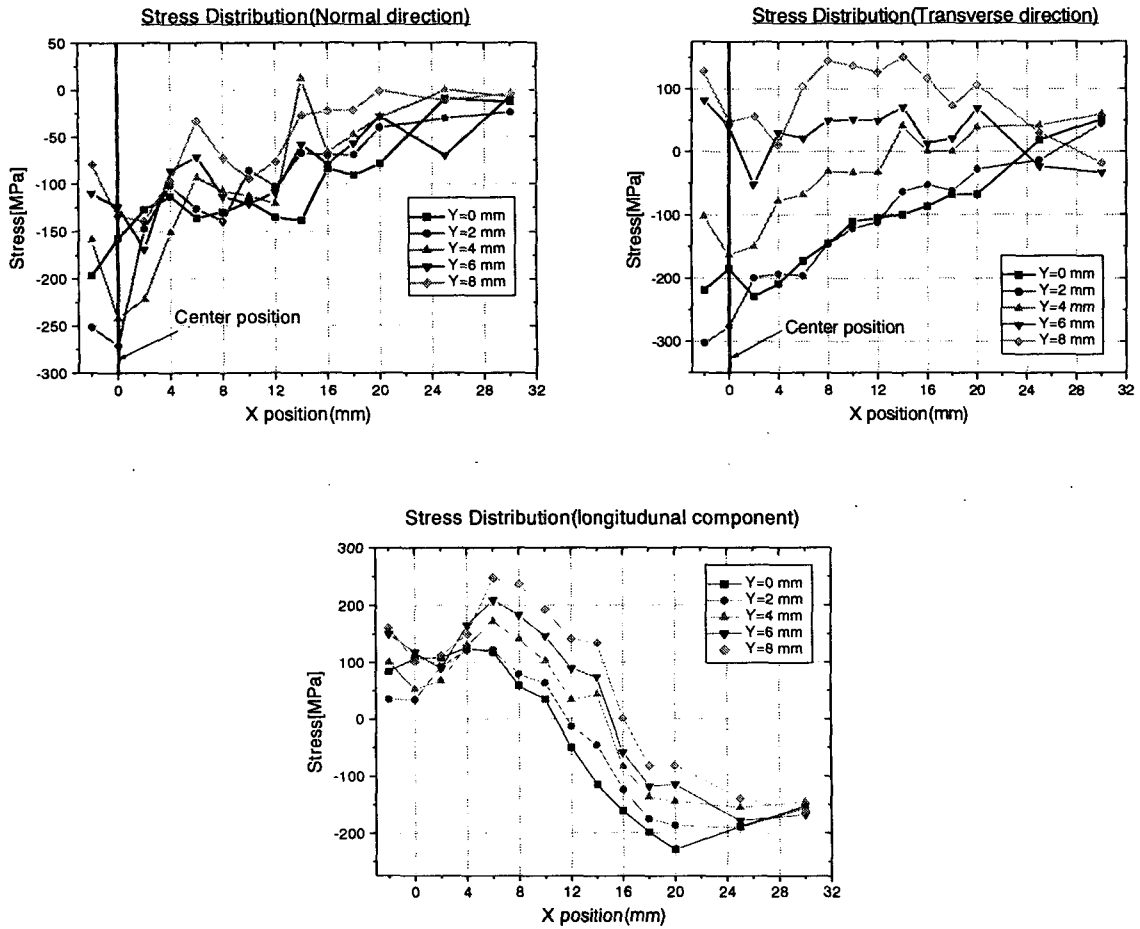


그림 5. The stress distribution in welded SUS304 plate

후 기

본 연구는 한국 과학기술평가원의 1999' 원자력 기초과제 지원을 받아 수행 되었다. 실험에 장비와 연구인력에 도움을 준 한국원자력연구소에 감사드립니다.

참고문헌

1. G.A. Webster : VAMAS Neutron Diffraction Measurements of Residual stress in A Shrink-Fit Ring and Plug, VAMAS Report No. 38 , 1(2000), pp3-9
2. 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
3. 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), pp754-759
4. 이용복, 정진성 : 용접재의 잔류응력 재분포와 피로거동, 대한용접학회지, 15-3(1997), pp20-28
5. 이창희, Vyacheslav T. Em, 신은주, 심해섭, 성백석, 김현준, Tmomas. M. Holden. : 증성자 회절에 의한 잔류응력 측정법 개발, 한국원자력연구소 보고서