중성자법에 의한 잔류응력 측정법

우 완 측^{*,†} · 김 동 규^{*} · 안 규 백^{**}^{*}한국원자력연구원 중성자과학연구부^{**}포스코기술연구원 접합연구그룹

Residual stress measurements using neutron diffraction

Wanchuck Woo^{*,†}, Dong-Kyu Kim^{*} and Gyu-Baek An^{**}^{*}Neutron Science Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea^{**}Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 790-300, Korea[†]Corresponding author : chuckwoo@kaeri.re.kr

(Received January 28, 2015 ; Accepted February 24, 2015)

Abstract

Residual stresses are inherently introduced into the engineering components during manufacturing including rolling, forging, bending and welding processes. Excessive residual stresses are known to be detrimental to the proper integrity and performance of components. Neutron diffraction has become a well-established technique for the determination of residual stresses in welds. The deep penetration capability of neutrons into most metallic materials makes neutron diffraction a powerful tool for the residual stress measurements through the thickness of the weld specimen. Furthermore, the unique volume-averaged bulk characteristic of the scattering beam and mapping capability in three dimensions is suitable for the engineering purpose. In this presentation, the neutron diffraction measurements of the residual stresses will be introduced and measurement results will be highlighted in thick weld plates.

Key Words : Residual stress, Neutron diffraction, Welds

1. 서 론

잔류응력은 외부에서 힘이 가해지지 않은 상태에서 재료 자체적으로 보유한 응력의 불균일한 분포로 정의된다^{1,2)}. 이러한 잔류응력은 다양한 산업공정에서 필요한 각종 열, 탄소성 가공 중에 필연적으로 재료에 발생하여 부품의 내구성과 안전성에 큰 영향을 미친다^{3,4)}. 특히 용접부의 경우 균열 발생과 갑작스런 파단이 잔류응력과 외부응력이 함께 결합되어 발생시키는 것으로 알려져 있다^{5,6)}. 최근 다양한 잔류응력 측정법이 국내외에서 개발되고 이를 이용한 활발한 연구가 이루어지고 있다^{7,8)}. 예를 들면, 파괴법에 기초한 표면굴곡 측정법 (contour method)과 딥홀드릴링법 (deep hole drilling), 비파괴법에 기초한 방사광 x-ray (synchrotron x-ray diffraction) 및 중성자 회절법 (neutron diffraction) 법

등이 주목 받고 있다. 그 가운데 중성자 회절을 이용한 잔류응력 측정법을 소개하고 원자력연구원 하나로의 잔류응력 측정장치 (RSI, residual stress instrument)를 이용한 용접부의 잔류응력 측정 예를 제시하고자 한다(Fig. 1 참조)^{9,10)}.

2. 중성자 회절법

2.1 잔류응력 측정원리

일반적인 중성자 회절법을 이용한 잔류응력 측정의 기본 원리는 다음과 같다. 원자로 내부에서우라늄과 같은 중성자 발생 물질이 핵분열을 일으키며 발생하는 다양한 파장의 중성자원을 단결정인 단색기 (monochromator)를 이용하여 일정한 파장 (λ)을 가진 중성자 (neutron)만 선택하여 빔 가이드로 이동시킨다. 이러한 단파장

Fig. 1 Residual Stress Instrument, RSI at research reactor HANARO in Korea Atomic Energy Research Institute)

Fig. 2 Schematic of the neutron residual stress instrument

빔은 그 크기를 결정하는 mm 폭의 빔 슬릿 (incident slit)을 통과하게 된다 (Fig. 2 참조). 이때 재료의 내부에 침투된 중성자는 원자핵으로 부터 산란되며 이때 중성자는 임의의 회절각 (2θ)에 따라 일정한 격자면 (hkl) 입자(grains)로 부터 Bragg's law ($\lambda = 2d \sin \theta$)에 따라 회절하여 입자의 면간 거리 (interplanar distance, d-spacing, d)에 따라 peak의 위치가 결정 된다 (Fig. 3 참조).

2.2 잔류응력 계산 방법

회절 peak의 위치 변화에 따른 응력 계산법은

1) 중성자가 회절된 (hkl) 격자면의 면간거리 (d)를 고유한 변형 게이지 (strain gauge) 값으로 가정하여 이로부터 기준 면간거리 (d_0 , 잔류응력이 없는 stress-free 상태) 값으로부터 변형 값 (strain, ϵ)을 계산한

Fig. 3 An example of diffraction peak, residual stresses were calculated based on diffraction peaks between stressed and stress-free states

다 (식 1 사용, Fig. 3 참조).

즉, 회절 peak 위치 변화로 변형을 계산한다 (θ : diffraction angle with stress, θ_0 : without stress), 2) 잔류 응력 (residual stress, σ)은 Hooke's law를 이용하여 계산하여 3축 주응력 (principal stress)을 결정한다 (식 2 사용)⁹⁾.

$$\epsilon = (d - d_0) / d_0 = -\cot(\theta)(\theta - \theta_0) \quad (1)$$

(d : 측정된 면간거리, d_0 : 응력 없는 상태의 면간거리, θ : 측정된 회절 peak 중심각도, θ_0 : 응력 없는 상태의 peak 중심각도)

$$\sigma_i = \frac{E_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} \left[\epsilon_{ii} + \frac{\nu_{hkl}}{1 - 2\nu_{hkl}} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \right] \quad (2)$$

(σ : 잔류응력, E_{hkl} : (hkl)면의 회절 탄성계수, ν_{hkl} : (hkl)면의 Poisson 비, ϵ : strain 변형, $i = x, y, \text{ or } z$, 시험편의 3축 직각 응력방향)

3. 용접부 잔류응력 측정 예¹¹⁾

3.1 실험 방법

사용된 시험편은 230 mm (길이), 300 mm (폭), 70 mm (두께) 크기의 탄소량 0.05%의 TMCP 대입 열용 강재 (선급용 EH40-TMCP) 이다 (Fig. 4 참조). 일반적으로 570 MPa 이상의 항복강도, 610 MPa 이상의 인장강도, 21 %이상의 연신율을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 플럭스 코어드 아크 용접법 (Flux-cored arc welding, FCAW)을 이용하여

Fig. 4 70 mm thick weld specimen, (a) dimension and measurement location, (b) standard sample, (c) dimension of the standard sample

Fig. 5 Macroscopic structure of thick welds, (a) low heat-input multipass FCAW weld, (b) high heat-input one pass EGW weld¹¹⁾

2kJ/mm이하 저입열로 용접된 다층 용접의 경우와 일렉트로 가스 용접법 (Electro-gas welding, EGW)으로 50 kJ/mm 이상의 입열량으로 단층 대입열 용접부 2 종류의 시험편을 이용하였다. (Fig. 5 참조). 상세한 용접조건 및 시험편의 준비는 참고문헌 11에 서술되어 있다. 두 가지 시험편을 각각 중성자 시험 설비 (RSI)를 이용하여 용접 시험편으로 부터 잔류응력을 측정하였다. 용접 시험편을 원자로 빔 룸의 장치 시험편 테이블에 Fig. 6와 같이 설치하였다.

구체적 실험 조건은 2.39 Å의 파장, 72.4도 회절각 (2θ)으로 체심입방격자 (Body Centered Crystal, BCC) 페라이트(ferrite)의 (110) peak을 주로 측정하였으며 측정 부피는 4 (재료 깊이 방향) × 8 (폭 방향) × 4 (길이방향, rolling 방향과 평행) mm로 한 위치별 일반적으로 1 시간 소요하여 측정하였다. 측정 위치는 시험편 표면으로부터 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 mm 지점에서 측정하였다. 식 (2)에서와 같이 응력계산을 위해서는 3축 주응력 방향으로 각각 변형을 측정하여야 하므로 측정 3축 변형방향 ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)이 주응력 방향 (Principal stress direction)이라는 3축 직각 응력 방향으로 가정하고 측정하여 잔류응력을 계산하였다. 또한 응력이 내재되어 있는 시험편 측정 후 시험편을 EDM 절단 가공하여 “stress-free” (기준 시험편)으로 부터 기준 회절 peak

Fig. 6 Neutron diffraction measurement in a weld

(θ)을 각각의 지점에서 측정하여 계산식 식(1)에 적용하였다. 이는 용접부의 경우 매우 극심한 화학성분의 이동에 의한 d-spacing의 변화에 의한 오차를 최소화하기 위한 방법이며 측정된 d-spacing은 오직 마크로 응력에 의한 결과임을 재확인하고자 하는 중요한 방안이다 (Fig. 4b-c 참조).

3.2 고투과 파장의 선택

비파괴 잔류응력 측정하기 위하여 x-ray를 이용하는 것이 일반적인 방법인데 이 방법의 단점은 재료에 대한 투과력이 낮아서 재료 표면에서만 측정가능하고 가속기 방사광을 사용하기도 하는데 이 또한 일반적으로 최대 10 ~ 20 mm 정도 투과력을 보이며 입사각이 매우 낮아 완전한 응력 3축 응력 측정이 어렵다. 미국이나 유럽에서는 최근에 30 mm 이상의 투과력을 가진 중성자 측정 장치를 개발하여 활발히 이용되고 있으며 투과력을 높이는 기술을 경쟁적으로 개발하고 있다. 본 연구에서는 두께 70mm의 극후판의 잔류응력 측정을 목적으로 하며 이에 따른 중성자의 투과력 한계를 뛰어 넘기 위해 (i) 구부린 단결정 단색기를 이용하여 중성자 빔을 집속하여 그 세기와 빔 퍼짐성을 극소화하는 고품해능 빔제조 기술, (ii) 회절시 중성자 빔의 충돌 가능성을 보여주는 중성자 감쇄능 (cross-section)이 최소화된 파장을 선택하는 핵심기술 2가지가 개발되었다 (Fig. 7 참조)¹⁰⁾.

이러한 핵심기술은 중성자 빔이 재료의 깊이 방향으로 집중적으로 투과하여 회절파가 측정되기 위한 가장 중요한 요소로서 본 연구에서는 구부린 단결정 단색기

Fig. 7 Neutron cross-section dependence on wavelength in ferritic steel and an example of diffraction peak¹⁰⁾

Fig. 8 Distribution of longitudinal residual stresses in 70 mm thick weld specimens: (a) low heat-input multipass FCAW weld, (b) high heat-input one pass EGW weld¹¹⁾

(bent perfect crystal monochromator) Si (111) 사용하여 감쇄능이 최소인 take-off angle 45° 및 2.39 Å의 파장 조건을 사용하여 70 mm 두께 용접 시험편의 투과 및 잔류응력 측정에 성공하였다 (Table 1 참조).

3.3 잔류응력 분포

Fig. 9은 용접선 방향의 잔류응력 (σ_x) 에 대한 70mm 두께 강재 중 (a) 다층 용접부 (FCAW) 및 (b) 단층

용접부 (EGW)의 2차원 단면의 잔류응력 분포를 보여 준다. 먼저 FCAW 용접부의 경우 (Fig. 8a) 용접선 직각방향으로 잔류응력은 모재 표면에서 강한 압축 잔류응력이 발달되며 용접부 중앙부에서 큰 인장응력이 발달되는 경향을 보인다. 반면에 EGW 용접부의 경우 (Fig. 8b) 열영향부 (중앙부에서 약 30 mm 떨어진 지점)에서 가장 큰 인장응력을 보이고 용접부 중앙부에서는 다소 감소 (softening)되는 경향을 보인다. 두 가지 시험편의 경우 서로 아주 상이한 잔류응력 분포를 보이고 있으며 이는 입열량 및 용접적층 순서, 용접 자세 등에 기인한 것으로 판단된다. 예를들어 EGW에서 최고 인장응력 위치가 약 30 mm 이동한 이유는 대입 열에 의한 용접 중앙부의 항복강도의 큰 감소와 주변지역으로 열전달이 커져 냉각시 최대 인장응력 부분이 멀리 떨어지는 것으로 판단된다.

두께별로 살펴보면 EGW 용접부는 시험편 표면에서 가까운 위치 (5 mm, 65 mm)는 압축응력이 걸려있고 내부 (35~45 mm) 지점에서 인장응력이 균형을 유지하여 분포한다. 전반적으로 두께별로 균일한 분포를 보이고 있는 점에 반하여 FCAW는 용접부 상부에 매우 인장응력 (~ 530 MPa)이 발달하여 상부 약 5~10 mm 까지 매우 균열 및 파괴에 취약한 위치라고 판단된다.

4. 요약 및 결론

1) 중성자 회절법을 이용한 잔류응력의 측정법이 개발되어 이 신기술을 이용한 과학적 분석연구가 전 세계적으로 활발히 이용되고 있다. 측정 방법과 순서는 표준화 (ISO/TS 21432, 2005)되어 있으며 그 방법을 따라 두께 70mm의 극후판의 2 종류 입열로 용접부의 두께 방향 잔류응력 측정을 수행하였다.

2) 최근 국내 개발된 중성자 잔류응력 측정장치는 기존의 장치에 비해 투과력이 매우 향상되었다. 영국 ISIS 연구소의 보고에 따르면 철판의 경우 일반적으로

Table 1 Summary of monochromator, take-off angle, reflection plane, diffraction angle, Figure of Merit (FoM), total beam path length, penetration path length in reflection mode and transmission mode

Monochromator	$2\theta_m (^\circ)$	$\lambda (\text{\AA})$	Reflection plane	$2\theta_s (^\circ)$	FoM	$l_m (\text{mm})$	$D_{ref} (\text{mm})$	$D_{tr} (\text{mm})$
Si(220)	42	1.36	(211)	71.2	73	71	21	58
Si(220)	45	1.46	(211)	77.1	82	68	21	53
Si(220)	48	1.55	(211)	82.9	105	77	26	58
Si(220)	51	1.65	(211)	90.1	119	68	24	48
Si(111)	43	2.28	(110)	68.5	90	64	18	53
Si(111)	45	2.39	(110)	72.1	100	83	24	67
Si(111)	46	2.44	(110)	73.8	84.5	80	24	64

투과깊이가 약 40 mm 이었으나 최근에는 80 mm 깊
이까지 가능하다.

3) 70 mm 두께의 저입열 다층 FCAW 용접부 및
대입열 단층 EGW 용접부를 동일 크기로 제작하여 중
성자 잔류응력을 측정 한 결과 두께방향 분포가 매우 상
이하며 용접방향으로 최대 인장응력의 경우 FCAW의
경우 용접부 중앙부 표면쪽에서 최대 530 MPa 까지 발
달되는 반면 EGW의 경우 중앙부로부터 약 30 mm
정도 떨어진 열영향부 두께 중앙에서 최대 약 490 MPa
이 측정되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 원자력 연구기술개발사업
으로 수행되었습니다. 또한 포스코 기술연구소의 사업
(No. 20116118)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. K. Masubuchi: Analysis of Welded Structures, New York, Pergamon, (1980)
2. P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia: Overview residual stress Part 2 - Nature and origin, *Mater Sci Tech*, 17 (2001), 366-375
3. G.A. Webster, A.N. Ezeilo: Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *Inter J Fatigue*, 23 (2001), S357-S383
4. Y. Kim, J. H. Lee: Residual Stress Prediction in Multi-layer Butt Weld Using Crack Compliance Method, *Journal of KWJS*, 30 (2012), 74-79
5. G.B. An, W. Woo, J.U. Park: Brittle crack-arrest fracture toughness in a high heat-input thick steel weld, *Inter J Fract*, 185 (2014), 179-184
6. J. Park, G. B. An, H. Kim, B. Jo: Bead Shape and Conditions of Friction Stir Processing to Improve Fatigue Strength, *Journal of KWJS*, 31 (2013), 73-79 (in Korean)
7. P.J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P.J. Bouchard, D.J. Buttle: Recent advances in residual stress measurement, *Inter J Pres Ves Pip*, 85 (2008), 118-127
8. G.S. Schajer: Practical Residual Stress Measurement Methods, *John Wiley & Sons*, Chichester, 2013
9. M. T. Hutchings, P. J. Withers, T. M. Holden and T. Lorentzen: Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction, 1st edn; London, *Taylor and Francis*, (2005)
10. W. Woo, V. Em, B.S. Seong, E. Shin, P. Mikula, J. Joo, K. Kang: Effect of wavelength-dependent attenuation on neutron diffraction stress measurements at depth in steel, *J Appl Cryst*, 44 (2011), 747-754
11. W. Woo, G.B. An, E.J. Kingston, A.T. DeWald, D.J. Smith, M.R. Hill: Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds, A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study, *Acta Mater*, 61 (2013), 3564-3574

- 우완측
- 1970년생
- 한국원자력연구원
- 잔류응력, 금속변형, 중성자회절
- e-mail : chuckwoo@kaeri.re.kr

- 안규백
- 1970년생
- POSCO 기술연구소
- 용접 파괴 및 구조
- e-mail : gyubaekan@posco.com

- 김동규
- 1984년생
- 한국원자력연구원 선임연구원
- 중성자 잔류응력 측정 및 모델링
- e-mail : kimdk@kaeri.re.kr