

굴곡측정법을 이용한 극후판 용접부 잔류응력분포 정량분석

김 동 규^{*,†} · 우 완 측^{*} · 강 윤 희^{**}

^{*}한국원자력연구원 중성자과학연구부

^{**}POSCO 기술연구원 기계설비연구그룹

Characterization of residual stress distribution of thick steel weld by contour method

Dong-Kyu Kim^{*,†}, Wanchuck Woo^{*} and Youn-Hee Kang^{**}

^{*}Neutron Science Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

^{**}POSCO Technical research lab., Mechanical Facility Research Group, Pohang 790-785, Korea

[†]Corresponding author : kimdk@kaeri.re.kr

(Received January 28, 2015; Accepted February 25, 2015)

Abstract

Residual stresses arising from the materials processing such as welding and joining affect significantly the structural integrity depending on the external loading condition. The quantitative measurement of the residual stresses is of great importance in order to characterize the effects of the residual stresses on the structural safety. In this paper, we introduce a newly devised destructive technique, the contour method (CM), which is applied for the measurements of the residual stress distributions through the thickness of a 80 mm thick steel weld. Residual stresses are evaluated from the contour, which is the normal displacement on a cut surface produced by the relaxation of residual stresses, using a finite element model. The CM provides a two-dimensional map of the residual stresses normal to the cut surface. The CM developed in the present study was validated in comparison with the residual stress distribution determined by a well-established neutron-diffraction residual stress instrument (RSI) instrumented in HANARO neutron research reactor.

Key Words : Welding, Residual stress, Contour method, Neutron diffraction

1. 서 론

산업이 고도화될수록 사회기반시설이 대형화되고 있으며, 그에 따라 구조물의 안전성을 확보하는 것이 무엇보다도 중요해지고 있다. 특히, 선박, 석유가스수송관, 시추선, 해양구조물, 발전소 등에 적용되는 구조물은 대형화 및 후속화와 더불어 고온고압의 가혹한 환경 하에서 장시간 노출되기 때문에 용접 및 접합부에 대한 구조역학적으로 매우 보수적인 설계가 요구된다¹⁾.

대형 구조물의 안전설계에 있어 취약부위인 용접접합부는 접합재료, 부재의 두께, 크기, 형상, 열원종류, 입열량 등의 용접변수에 따른 온도구배와 상변화로 인해 잔류응력을 수반하게 된다. 유해한 잔류응력은 재료의

피로수명과 파괴강도를 저하시키고 응력부식균열(stress corrosion cracking)을 야기한다고 알려져 있다^{2,3)}. 따라서 용접이음부에서의 잔류응력에 대한 신뢰성 있는 안전성 검토가 요구되며, 이를 위해서는 정확한 측정분석 기술이 필요하다.

현재 전 세계적으로 두께가 50 mm 이상인 대형구조물용 극후판 내부의 잔류응력 분포를 정량적으로 측정 및 분석할 수 있는 방법에는 파괴법 기반의 굴곡측정법(contour method)과 비파괴법 기초한 중성자회절법(neutron diffraction)이 최첨단 분석기술로 받아들여지고 있다²⁾. 특히 중성자회절법이 대형 구조물 평가에 가장 신뢰할 만한 방법으로 인정받고 있으나⁴⁾, 접근성, 비용, 시간, 기술적 숙련도 등의 어려움이 단점으로 알려져 있다. 굴곡측정법은 이러한 측면에서 상당한 강점을

보이며 2001년 로스알라모스 연구소의 Prime에 의해 최초로 고안된 이래로 다수의 해외 연구자들에 의해 적용되어 왔다⁵⁾. 하지만, 국내에서는 굴곡측정법에 대해 연구 보고된 사례가 없으며, 관련기술이 전무한 상태이다.

이에 본 논문에서는 굴곡측정법의 기본원리에 대해 설명하고, 국내 최초로 한국원자력연구원에서 개발된 굴곡측정범용 측정장치, 데이터처리, 수치해석방법 등의 개발과정에 대해 소개하고자 한다. 특별히 기계적 절단법에 기초한 굴곡측정법은 광역의 영역에서 복잡한 미세조직 및 잔류응력 분포를 갖는 경우에 있어 특히 매우 유용하다. 이에 개발된 굴곡측정법을 이용하여 극후판 이중용접부에서의 2차원 잔류응력 분포를 측정하고 이 결과를 한국원자력연구원의 하나로 중성자회절 장치인 RSI (residual stress instrument) 측정결과와 상호 비교 검증하였다.

2. 굴곡측정법의 기본원리

굴곡측정법의 핵심원리는 Fig. 1에 주어진 바와 같다. 먼저, 잔류응력이 누적된 평형상태의 부재를 생각해보자 (Fig. 1(a)). 그리고 측정하고자 하는 응력성분 방향에 수직한 면에 대해 절단한다. 이때, 절단에 의한 소성변형을 최소화하여 무시하면 새로운 평형상태를 만족하기 위해 발생하는 순수한 탄성회복 및 응력이완(stress relief)에 의해 표면굴곡이 형성된다(Fig. 1(b)). 이렇게 형성된 표면굴곡을 절단 전의 편평한 상태로 되돌리기 위해 필요한 응력은 잔류응력과 등가이다. (Fig. 1(c)).

3. 극후판 용접부 잔류응력 측정

3.1 용접부 절단면 표면굴곡 측정

시험편은 모재로 탄소강 (선급용 EH40-TMCP) 과 부식저항이 큰 합금원소가 다량 함유된 스테인리스강을 유심용제 한 용접재를 아크용접(flux-cored arc welding, FCAW)을 통해 접합한 것으로써 저입열(1.7 kJ/mm) 다층용접을 통해 Fig. 2에서와 같이 제작되었

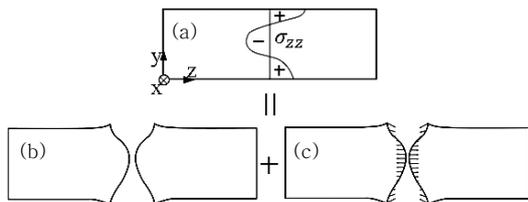


Fig. 1 Principle of contour method, (a) residual stresses in a thick plate, (b) formation of surface contour due to residual stress relief after cutting, (c) stresses required to set back before cutting

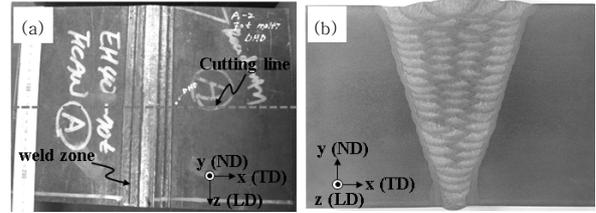


Fig. 2 (a) 80-mm thick steel weld sample, (b) cross-sectional macrostructure of the weld sample

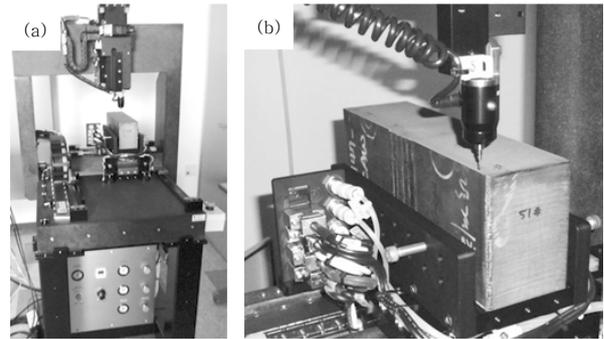


Fig. 3 (a) Contour measurement set-up, (b) tactile probe

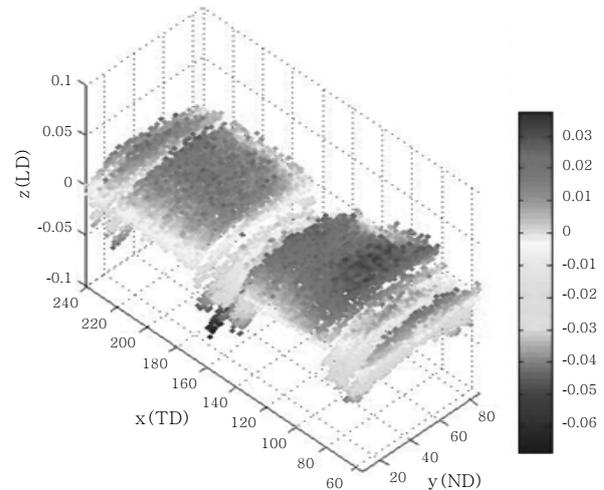


Fig. 4 3-D surface contour measured on cross section of the weld sample

다. 시험편은 크기는 230 mm (길이), 300 mm (폭), 70 mm (두께) 이다. 이때, x, y, z는 각각 용접선의 횡방향(TD), 후판의 법선방향(ND), 용접선방향(LD)을 나타낸다. 그림에서와 같이 점선을 따라 직경이 100 μm 인 와이어 방전가공(wire electrical discharge machining, WEDM)으로 시험편을 절단한 뒤, Fig. 3에 주어진 바와 같은 불접촉 방식의 좌표측정장비를 이용하여 ND-TD 면에서 용접선방향(LD)의 표면굴곡을 측정하였으며, 측정 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

이때, 표면굴곡 측정결과는 절단 이전의 평형상태에서의 평면을 기준면으로 설정하여 도시하였다. 즉, 전체 표

면굴곡 데이터의 용접선방향(LD) 좌표성분의 평균값에 대한 고도를 기준면($z=0$)으로 두었다. 왜냐하면 식 (1)에서와 같이 절단면 전체 영역(S)에서의 면에 수직한 용접선방향(LD)으로 응력(σ_{LD})을 미소면적(dA)에 대해 적분한 힘(F_{LD})의 평형을 고려하면 변형률($d\epsilon_{LD}$) 및 변위(l_{LD})의 합은 0이기 때문이다.

$$F_{LD} = \int_S \sigma_{LD} dA = \int_S E \epsilon_{LD} dA = 0 \Rightarrow \sum \Delta l_{LD} = 0 \quad (1)$$

절단면 전 영역에 걸쳐 면에 수직한 고도는 $-60 \mu\text{m}$ 에서 $+40 \mu\text{m}$ 까지 최고 및 최저점간(peak-to-peak) 약 $100 \mu\text{m}$ 범위에 이르는 표면굴곡이 뚜렷한 경향을 띄며 형성되는 것이 관찰되었다. 여기서, 음의 부호를 갖는 영역은 절단 전의 평형 기준면보다 고도가 낮아지는 영역으로서 절단면에 수직한 방향으로 인장 잔류응력이 존재함을 의미하고, 양의 부호는 반대로 압축 잔류응력이 존재함을 의미한다. 특히 시편의 용접부 가운데에서 용접선을 따라 다른 영역에 비해 고도가 낮은 것을 확인할 수 있는데 이는 용접 시에 용접부 및 열영향부에서의 열팽창과 이후 냉각에 따른 부피수축으로 인해 발생하는 인장 잔류응력이 발생하였음을 의미한다.

3.2 잔류응력분포 정량화

3.2.1 표면굴곡 데이터처리

용접부 절단면에 대한 표면굴곡측정 데이터로부터 잔류응력 분포에 대해 정성적으로 상당히 유의미한 분석을 할 수 있었다. 하지만, 열원, 입열량, 모재 및 용접재료 등의 용접 관련 변수에 따른 잔류응력 발생 기구를 규명하고 적절히 제어하기 위해서는 잔류응력 분포에 대한 정량적인 평가가 수반되어야 한다.

측정된 표면굴곡 좌표를 유한요소해석의 변위 경계조건으로 적용함으로써 잔류응력을 정량적으로 계산할 수 있다. 하지만 Fig. 3에서와 같은 불접촉식 굴곡측정기로 얻어진 데이터는 백래시, 진동, 온도변화 등과 같은 장치의 시스템 및 작동환경 요인들로 인해 상당수의 노이즈를 포함하게 된다. 이러한 노이즈는 잔류응력 계산에 오차를 유발하므로 이를 저감시키기 위해서는 주변부에 비해 과도하게 벗어나는 포인트들은 제거해주어야 한다. 또한, 양쪽 절단면에 대한 표면굴곡 측정을 모두 실시한 뒤 두 표면굴곡을 평균함으로써 노이즈를 보다 더 저감시킬 수 있으며, 양쪽 절단면에서 방향이 서로 반대인 전단변형의 영향을 상쇄시킬 수 있다.

Fig. 5에 용접부 절단면에서 측정된 표면굴곡좌표 데이터 처리에 대한 개략도를 도시하였다. 우선, 포인트 클

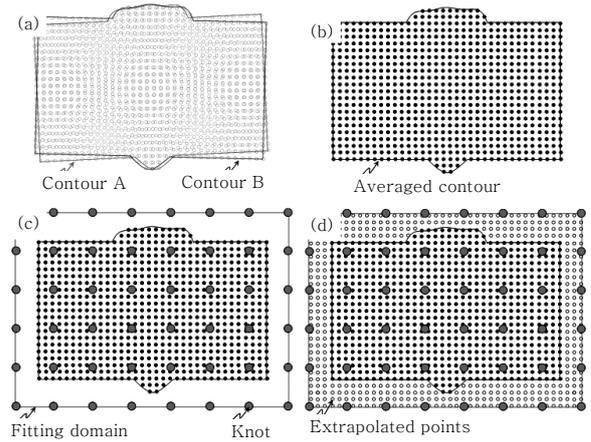


Fig. 5 Data treatment of surface contour coordinate, (b) linear interpolation and averaging on the common grid, (c) setting the region where spline fitting is applied, (d) spline fitting with the extrapolated points

라우드 데이터의 절단면에 수직한 방향(LD) 좌표 성분을 배제한 채 평면 데이터를 둘러싼 최외곽 좌표들을 추출하여 테두리를 도출하고, 양쪽 절단면에 대한 테두리를 일치시킬 수 있는 좌표이동 및 회전변환 값을 구하여 두 클라우드 데이터 영역을 정렬시킴으로써 최대한 일치시킨다(Fig. 5(a)). 동일한 격자망을 구성하여 각 절점 위치에 해당되는 절단면에 수직한 방향(LD) 좌표 성분을 두 클라우드 데이터로부터 각각 선형 보간(linear interpolation)하여 구한 뒤 평균을 취한다(Fig. 5(b)). 다만, 본 연구에서는 한쪽 절단시편만이 훼손되어 한쪽 절단면에서의 표면굴곡 데이터만을 이용하였음을 밝혀둔다.

유한요소해석 시에 변위 경계조건을 임의의 위치에 놓인 절점에 적용하기 위해서는 표면굴곡 포인트 클라우드 데이터를 3차원의 연속적이고 매끄러운 표면굴곡으로 스무딩해야 하며, 이를 통해 추가적으로 상당량의 노이즈를 저감시킬 수 있다. 앞서 구한 양쪽 절단면에 대한 평균적인 표면굴곡 데이터의 전 영역을 포함하도록 임의로 주어지는 스플라인 피팅 매듭밀도(knot density)를 감안하여 스플라인 피팅 영역을 적절히 설정하여야 한다(Fig. 5(c)). 따라서, 스플라인 피팅 영역은 본래의 평균 표면굴곡 데이터 영역보다 클 수밖에 없게 된다. 이렇게 형성된 확장된 영역에 대해서는 평균 표면굴곡 데이터를 외삽(extrapolation)하여 가상의 굴곡좌표로 구성하였으며, 절단면 테두리 경계 영역에서는 본래 절단면 내부영역의 좌표점들과 외삽된 좌표점을 함께 사용하여 스플라인 피팅을 실시하였다(Fig. 5(d)). 이때, 최소자승법(least square method) 기반의 이변수 3차 스플라인 표면 피팅(bivariate cubic spline surface fitting)을 적용하였다.

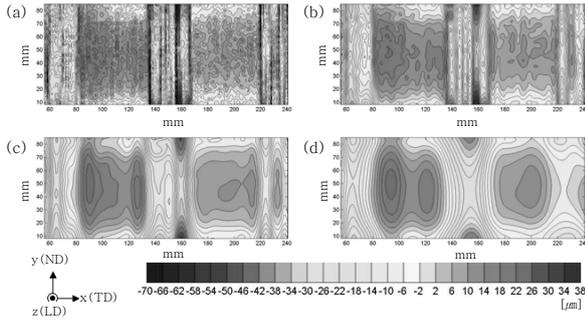


Fig. 6 Bivariate 3rd-order spline fitting of surface contour depending on the knot spacing, (a) 2 mm, (b) 4 mm, (c) 8 mm, (d) 16 mm

매듭밀도에 따라 이중접합부 용접선 수직방향(TD) 절단면 표면굴곡 데이터에 대한 스플라인피팅을 적용하였으며, Fig. 6에서와 같이 매듭밀도에 따라 매우 상이한 결과를 보였다. 단, 측정된 표면굴곡 데이터의 측정 지점 간 간격은 1 mm였으며, 스플라인 피팅 매듭밀도는 종횡 두 방향 모두에 대해 동일한 매듭밀도를 적용하였다. 용매듭간격이 가장 작은 2 mm인 경우 (Fig. 6(a)) 표면굴곡측정 데이터 본래의 노이즈가 거의 그대로 남아있으며, 등고선이 불연속에 가깝고 다수의 특이점(singular)을 갖는 오버피팅(overfitting) 현상을 보였다. 매듭간격을 증가시킴에 따라 노이즈는 저감되고 매듭간격이 16 mm인 경우(Fig. 6(d))와 같이 등고선 연결이 연속적이고 매끄러운 스플라인 표면 피팅을 얻을 수 있었다. 다만, 매듭간격의 상한은 표면굴곡측정 데이터 본래의 고유한 특성이 사라지는 언더피팅(underfitting) 현상이 나타나지 않는 선에서 제한되어야 한다.

3.2.2 잔류응력 정량화를 위한 유한요소해석

전술한 방법에 따라 표면굴곡 데이터의 노이즈를 저감시켜 부드러운 스플라인 곡면을 얻을 수 있었다. 잔류응력을 정량적으로 계산하기 위해서 이렇게 얻어진 스플라인 곡면으로부터 변위 경계조건을 기술하고, 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 7은 표면굴곡 변위경계조건을 부여하여 잔류응력을 환산하는데 사용된 유한요소 모델을 보여주고 있다. 이와 같은 유한요소 모델을 생성하기 위해 우선 측정된 표면굴곡 데이터의 최외곽 테두리 지점들을 추출하여 절단면의 2차원 평면형상을 구성하고, 이로부터 용접선 길이 방향(LD)으로 단면 형상을 압출하여 3차원 형상을 생성하였다. 그리고 ABAQUS/cae를 이용하여 유한요소망을 구성하고, 기본적인 절점 및 유한요소망 정보를 갖는 입력 파일(input file)을 만든 뒤 추가적인 후처리

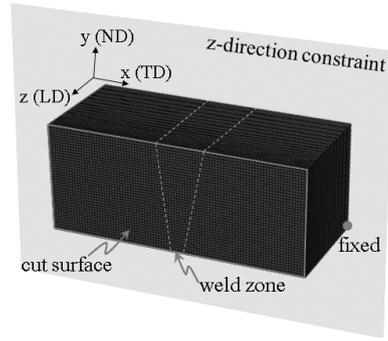


Fig. 7 Boundary conditions and finite element model for conversion of residual stresses

작업을 통해 소재의 물성치 및 경계조건을 부여하였다. 이때, 소재 물성치는 영의 탄성계수(E) 217 GPa와 프아송비(ν) 0.28을 전체 유한요소체에 대해 균질하게 적용하였다.

유한요소해석에 사용된 요소의 종류는 C3D20R이며, 이 요소는 절점이 20개인 3차원 연속체 2차 육면체 요소로서 적분점이 9개인 저감적분요소(reduced integration element)이다. 절단면에서의 탄성변형이 주된 관심사이기 때문에 용접선 길이 방향(LD)을 따라 절단면에 가까울수록 요소밀도를 조밀하게 하였으며, 전 영역에 걸쳐 평균적으로 한 변의 크기가 2 mm인 유한요소를 적용하였다. 해석에 사용된 총 요소 및 절점개수는 각각 68,913개와 294,360개였다.

경계조건인 경우 절단면에 위치한 144,650개의 절점에 대해 면에 수직한 방향의 변위 경계조건을 부여하였다. 이때, 경계조건으로 부여되는 변위는 각 절점별 좌표정보를 앞서 구해진 표면굴곡 스플라인 곡면에 대입하여 구하고 부호를 반대로 하여 측정된 굴곡변위의 방향을 전환시켜 주어야지만 절단면을 본래의 평편한 상태로 되돌리기 위해 필요한 잔류응력을 구할 수 있다. 한편, 강제운동을 방지하고 해의 수렴성을 높이기 위해서는 적절한 구속조건을 부여하여야 한다. 이를 위해 Fig. 7에서와 같이 절단면 반대쪽 면에 위치한 144,650개의 절점에 대해 면에 수직한 방향 즉, 용접선 길이 방향(LD)으로 구속을 주고, 원점에 위치한 한 절점의 모든 자유도를 완전히 구속시켜 주었다.

4. 극후판 용접부 잔류응력분포 측정결과

4.1 굴곡측정법에 의한 측정결과

Fig. 8(a)와 (b)는 극후판 이중접합 용접부 절단면에서의 용접선방향(LD) 잔류응력 분포를 매듭간격에 따른

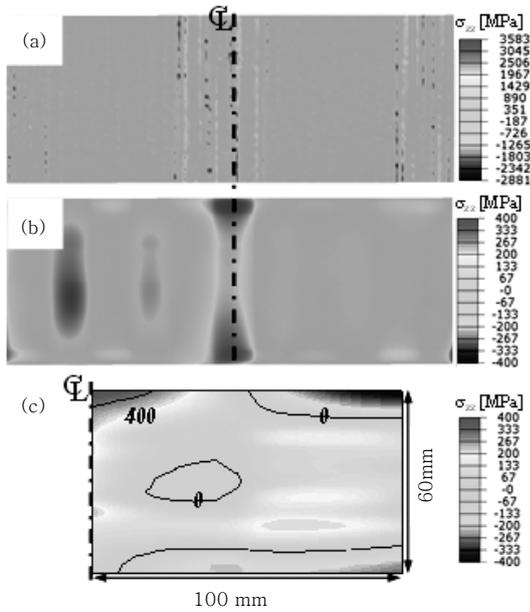


Fig. 8 Comparison of distribution of residual stress components in the longitudinal direction with different knot spacing (a) 2mm, (b) 16mm, (c) neutron diffraction⁶⁾

스플라인 표면굴곡을 경계조건으로 적용하여 유한요소해석으로부터 도출된 결과를 보여주고 있다. 매듭간격이 가장 작은 스플라인 표면굴곡을 경계조건으로 적용한 경우, Fig. 8(a)에서와 같이 국부적으로 약 3000 MPa에 이르는 다수의 특이점들이 발생하여 상당히 불연속적이고 인위적이며 규칙적인 패턴의 응력분포가 도출됨을 확인할 수 있다. 이러한 오버피팅은 스플라인 피팅의 매듭간격이 증가됨에 따라 저감되었으며, Fig. 8(b)에서와 같이 매듭간격이 16 mm인 경우 매끄럽고 연속적인 응력분포를 보임을 확인할 수 있다.

이는 절단면에서 측정된 표면굴곡 데이터를 스플라인 피팅하더라도 매듭간격에 따라서 측정 시의 노이즈가 그대로 남아서 후속단계인 유한요소해석 결과에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 최종적인 잔류응력 분포를 정확히 환산하기 위해서는 본래의 표면굴곡 데이터의 측정간격과 스플라인 피팅 매듭간격을 적절히 감안해야 한다. 또한, 이와 같은 스플라인 피팅 매듭간격을 결정하는 것은 주관적인 판단에 의존하게 되므로 객관적인 기준을 마련할 필요가 있다고 사료된다.

최종적으로 굴곡측정법을 통해 도출된 극후판 용접부 잔류응력분포는 Fig. 8(b)에 주어진 바와 같다. 앞서 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 이중접합 시편의 가운데 용접선을 따라서 다른 영역에 비해 고도가 낮고, 용접 시에 용접부 및 열영향부에서의 열팽창과 이후 냉각에 따른 부피수축으로 인해 최대 약 400 MPa의 인장 잔류응

력이 발생함을 확인할 수 있는 반면에, 용접부와 이웃한 좌우 영역에서는 주변부에 비해 고도가 높고 약 330 MPa의 압축 잔류응력이 발생함을 확인할 수 있다.

4.2 중성자 회절법에 의한 측정결과와 비교

개발된 굴곡측정법 기반의 잔류응력 측정 시스템을 비교검증하기 위해서 동일한 시편에 대해 하나로 잔류응력 중성자회절 장치⁶⁾와 굴곡측정법으로 측정된 결과를 Fig. 8(c)에 함께 도시하였다. 두 측정결과 모두에 대해서 시편 가운데에 위치한 용접선을 따라서 최대 약 400 MPa 정도의 인장 응력이 발생하였고, 나머지 대부분의 영역에서는 100 MPa 정도로 상대적으로 크기가 작은 압축 응력이 넓게 분포하였다.

비록 시편의 외곽 주변부에서 약간의 국부적인 차이를 보이지만 굴곡측정법과 중성자회절법에 의한 결과가 전반적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 앞서 전술한 바와 같이 방전가공과 표면굴곡측정시스템 및 작동환경 요인들에 따른 노이즈로 인해 오차가 발생할 수 있다. 또한, 측정된 표면굴곡 데이터에 대한 스플라인 피팅을 적용할 때 한쪽 절단면에 대한 표면굴곡 데이터만을 사용하였기 때문에 양쪽 절단면 측정 데이터의 중첩을 통한 노이즈 및 전단변형과 같은 오차인자를 상쇄시키지 못한 점, 스플라인 피팅 매듭간격과 외삽방법에 따라 유한요소해석 경계조건이 상이해지는 점, 용접부 및 모재 영역에 대해 동일한 탄성물성을 적용한 점 등을 감안한다면 국부적인 약간의 차이는 무시할 수 있다고 사료된다.

이와 같이 본 연구에서 개발된 파괴법 기반의 표면굴곡측정법을 이용한 잔류응력 측정 시스템은 가장 강건한 측정법으로 여겨지는 비파괴법 기반의 중성자 회절법과 견주어 정성적인 잔류응력 분포 특성을 전반적으로 잘 포착해낼 뿐만 아니라 정량적으로도 타당한 응력값을 도출함을 검증할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 최근 개발된 파괴법 기반의 굴곡측정법 시스템을 이용하여 잔류응력분포를 수치해석을 통해 정량화하는 방법에 관해 상술하였다. 굴곡측정법을 이용하여 극후판 이중접합 용접부의 잔류응력분포를 정량화하고, 비파괴법 기반의 중성자 회절법에 의한 측정결과와의 비교분석을 통해 개발된 굴곡측정법 기반의 잔류응력 측정 시스템을 검증하였다. 파괴법에 기초한 개발된 굴곡측정법 기반 잔류응력 측정 시스템은 x선 및 중성자 회절법과 같은 기존의 비파괴 측정방법에 대한 검

증법으로 활용되며 대면적에 대한 광역의 2차원 잔류응력분포를 분석할 수 있는 고유의 장점을 가지고 있다. 따라서 중성자 회절법과의 융합하여 고 성능화 한다면 최근 거대화 및 후속화되어 가는 다양한 구조물 및 압력관 등의 안전성을 도모하는데 크게 기여하리라 사료된다.

후 기

본 연구 한국연구재단의 원자력연구개발사업 중성자 융복합 연구의 일환으로 수행된 연구임.

References

1. G.A. Webster, A.N. Ezeilo. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *International Journal of Fatigue*, 23 (2001), 375-383

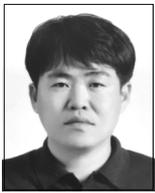
2. P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia, Residual stress Part 1 Measurement techniques *Materials Science and Technology*, 17 (2001), 355-365
3. J.U. Park, G.B An, W.C. Woo, S.M. Heo, Measurement of welding residual stress in a 25-mm thick butt joint using inherent strain method, *Journal of KWJS*, 31 (4) (2013), 67-72 (in Korean)
4. S.H. Kim, J.H. Lee, Analysis of residual stresses for the multipass welds of 316L stainless steel pipe by neutron diffraction, *Journal of KWS*, 21 (6) (2003), 670-676 (in Korean)
5. M B Prime, 2001, Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123 (2001), 162-168
6. 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 Materialia*, 61 (2013), 3564 - 3574



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



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



- 강윤희
- 1971년생
- 포스코 기술연구원 전문연구원
- 용접/접합공정 수치해석 및 고상접합 기술 개발
- e-mail : yhkang@posco.com