

## 용접부 형상이 협개선 용접부 잔류응력 분포에 미치는 영향<sup>§</sup>

소나현\* · 양준석\*\* · 표창률\*\*\* · 허남수\*†

\* 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부, \*\* KEPCO 전력연구원, \*\*\* 인덕대학 기계자동차과

### Effect of Groove Shape on Residual Stress Distribution in Narrow Gap Welds

Na-Hyun Soh\*, Jun-Seok Yang\*\*, Chang-Ryul Pyo\*\*\* and Nam-Su Huh\*†

\* School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology

\*\* KEPCO Research Institute

\*\*\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Induk Univ.

(Received December 10, 2010 ; Revised March 10, 2011 ; Accepted March 14, 2011)

**Key Words:** Finite Element Analysis(유한요소해석), Narrow Gap Weld(협개선 용접), PWSCC(일차수 응력 부식 균열), Welding Residual Stress(용접잔류응력).

**초록:** 일반적인 용접법은 용접 그루브(groove) 각도가 크기 때문에 용접 결함 발생의 원인이 된다. 따라서 원자력 발전소 배관 용접 시, 용접 그루브 각도가 작고 용접부 비드 폭이 좁은 협개선 용접법을 다수 수행하고 있다. 이러한 협개선 용접법은 용접시간 단축, 용접부 변형과 잔류응력의 감소, 용접 결함의 감소 등과 같은 장점을 갖고 있다. 본 논문에서는 협개선 용접부의 실제 용접 공정을 모사함으로써, ER308L 용접재의 변형 거동과 용접잔류응력을 비선형 2차원 유한요소해석을 통하여 예측하였다. 특히 용접방법 및 순서가 다른 두 형상에 대한 결과를 비교하고, 용접부 폭 넓이 변화에 따른 잔류응력 분포를 분석하였다. 본 논문의 결과는 향후 협개선 용접부의 용접 개선과 용접부 결함의 건전성 평가 등을 위해 적용될 수 있다.

**Abstract:** It is well known that conventional welding techniques can result in welding defects due to the large groove angle of the weld. In this context, the narrow gap welding (NGW) technique is applied in the nuclear industry because of its inherent merits such as the reduction in welding time and the shrinkage of the weld, and the small deformation of the weld resulting from the small groove angle and welding bead width. In this paper, the distribution of welding residual stress and deformation behavior of the ER308L weld due to NGW are predicted through nonlinear two-dimensional finite element analysis, in which the actual NGW process is simulated in detail. In particular, the effects of the shape of weld, i.e., the width of the weld and the shape of the welding groove, on the residual stress are investigated. The present results can be used to assess the integrity of defective nuclear components and to improve the welding process.

## 1. 서 론

원자력발전소의 대형 배관과 기기에 수행되는 수많은 용접으로 인해 발생하는 용접 잔류응력은 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking; SCC) 사고의 원인이 된다.<sup>(1)</sup>

일반적으로 수행되는 기존 용접법은 개선각도가

크고, 용접패스가 많아 용접부의 크기가 커지며 SCC의 원인이 되는 인장 잔류응력을 높게 발생시킬 수 있다. 따라서, 용접변형과 용접잔류응력을 감소시키기 위한 대안으로 협개선 용접법이 다수 수행되고 있으며, 이는 기존의 용접법과는 매우 다르기 때문에 협개선 용접부 고유의 특성을 고려한 평가가 필요하다. 또한 협개선 용접부의 형상에 따라 용접 시에 발생하는 용접잔류응력과 용접변형의 결과가 각기 다르기 때문에, 이러한 협개선 용접부의 형상에 따른 연구가 필요하다. 국내의 경우도 협개선 용접 수행 시 다양한 그루브(groove) 형태가 적용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 협개선 용접부

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, nam-su.huh@seoultech.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

형상의 차이가 용접잔류응력 분포에 미치는 영향을 정량적으로 검토하였다. 이를 위해 먼저, 한 단계로 용접이 수행된(single-side weld) 형상과 두 단계로 용접이 수행된(double-side weld) 형상의 용접방법 및 순서 차이로 인해 나타나는 결과를 비교 분석하였다. 그리고 협개선 용접부 폭 변화에 따른 잔류응력 분포 거동을 분석하였다. 본 논문의 결과는 협개선 용접부 형상에 따른 용접잔류응력과 용접변형 거동을 예측하는 데 활용될 수 있으며, 향후 협개선 용접부의 용접 개선과 신뢰성 평가 등을 위해 적용될 수 있다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석 대상

본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소 특정 호기에 적용된 협개선 용접부를 대상으로 잔류응력 해석을 수행하였다. 1장에서 언급한 바와 같이 먼저 용접부의 형상이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 용접 그루브 형상이 서로 다른 2가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이 2가지 형상은 국내 가동 중 원전의 협개선 용접을 위해 적용된 형상이다. Fig. 1(a)는 두께에 대해 내면에서 외면으로 한 방향 용접이 수행된 형상(single-side weld)이며, Fig. 1(b)는 배관의 외면에서 먼저 용접을 수행한 후에 배관의 내면에 대해 용접이 수행된 형상(double-side weld)이다. Fig. 1(a)의 배관 내경은 780mm, 두께는 68mm이고, Fig. 1(b)의 배관 내경은 787mm, 두께는 76mm이다. 그리고 용접부 폭의 영향을 검토하기 위해 Fig. 1(a)에 나타낸 용접부 형상에 대하여 폭이 다른 4가지 경우를 각각 해석 대상으로 선정하여 용접잔류응력 및 용접변형의 결과를 비교하였다. Fig. 2는 용접부의 폭이  $w/t=0.27, 0.3, 0.4, 0.5$ 로 서로 다른 4가지의 형상을 나타낸다. Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이  $w$ 는 용접부의 폭,  $t$ 는 배관의 두께를 의미한다. 모든 경우에 대해 두께는 68mm로 동일하며, 적층 순서 및 용접 그루브 각도 또한 동일하게 고정하였다. Fig. 2(a)의  $w/t=0.27$ 인 경우는 용접부 폭이 18.5mm이며, Fig. 2(b)는  $w/t=0.3$ 인 경우로 용접부 폭이 20.4mm인 형상을 나타내는 것이다. 또한 Fig. 2(c)는  $w/t=0.4$ 로 용접부 폭이 27.2mm, Fig. 2(d)는  $w/t=0.5$ 로 34mm의 폭을 갖는 형상을 나타낸다.

본 논문에서 해석 대상으로 고려한 협개선 용접부 배관 모재의 소재는 SUS316LN 스테인리스강이며, ER-308L로 용접되었다.

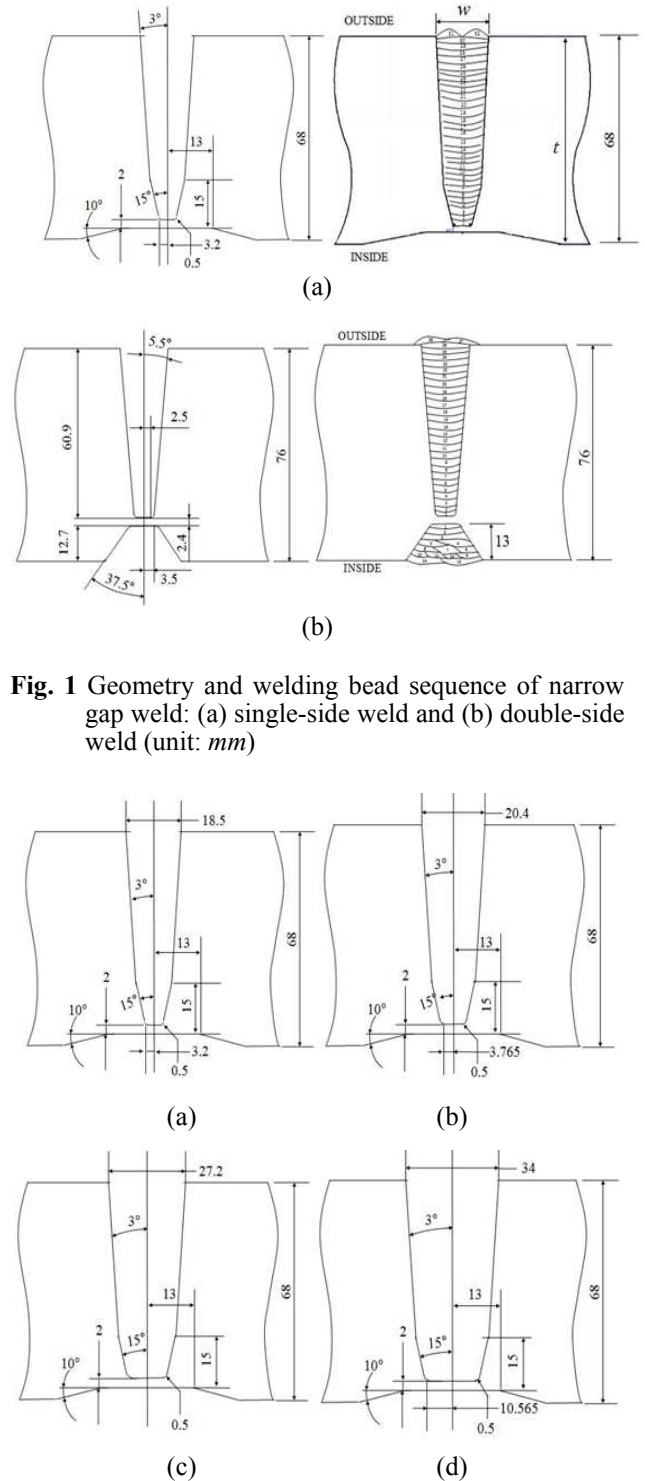


Fig. 1 Geometry and welding bead sequence of narrow gap weld: (a) single-side weld and (b) double-side weld (unit: mm)

Fig. 2 Geometries of narrow gap weld (unit: mm)

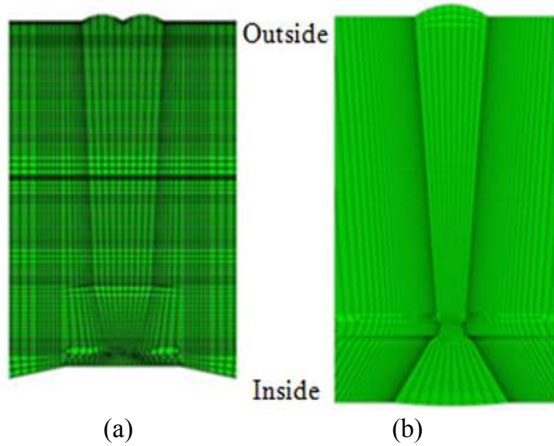


Fig. 3 Typical FE meshes employed in the present study: (a) single-side weld and (b) double-side weld

2.2 해석 방법

본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.9-1<sup>(2)</sup>을 사용하여 유한요소 온도해석과 응력해석을 수행하였다. 원주방향 열구배에 의한 영향은 무시할 수 있다고 가정하여 2차원 축대칭 모델을 이용하였다. 또한, 4절점 축대칭 요소(4-node axisymmetric element, DCAX4 for temperature analysis and CAX4 for stress analysis in ABAQUS element library)를 사용하였으며, 용접 절차서에 주어진 용접 비드(bead) 적층 순서와 비드 크기를 동일하게 모사하였다. Fig. 3에 대표적인 유한요소 모델을 나타내었다. 먼저 Fig. 3(a)는 한 단계로 용접된 형상의 유한요소 모델이며, 해석에 사용된 절점 수는 13099개이고, 요소 수는 12867개이다. 또한 Fig. 3(b)는 두 단계로 용접한 형상의 유한요소 모델을 나타낸다. 여기서 사용된 유한요소 모델의 절점 수는 11375개이며, 요소 수는 11162개이다.

용접해석의 경우에는 용접공정에 따라 온도가 변화하기 때문에 온도 의존적 열 및 기계적 물성치를 고려하여야 한다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 재료 물성치를 나타낸 것으로 국내 및 국외에서 수행한 재료 물성 측정 결과를 참고하여 구한 것이다.<sup>(3)</sup> Fig. 4(a)는 온도에 따른 재료의 탄성 계수이고, Fig. 4(b)는 항복강도를 나타낸 것이다. 또한 용접공정에 따른 비드 생성을 모사하기 위하여 용가재(filler metal)에 의한 각 패스별 용접금속 생성이 재현될 수 있도록 하였으며, 각 용접 비드의 입열을 모사하기 위해 체적 열유속(body heat flux)을 적용하였다.<sup>(4)</sup> 각 용접 패스별 체적 열유속은 다음과 같이 정의된다.

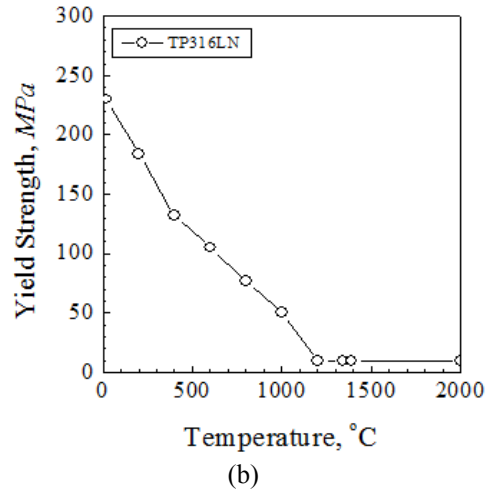
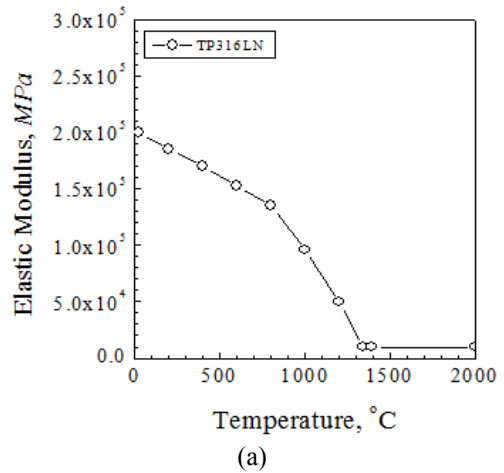
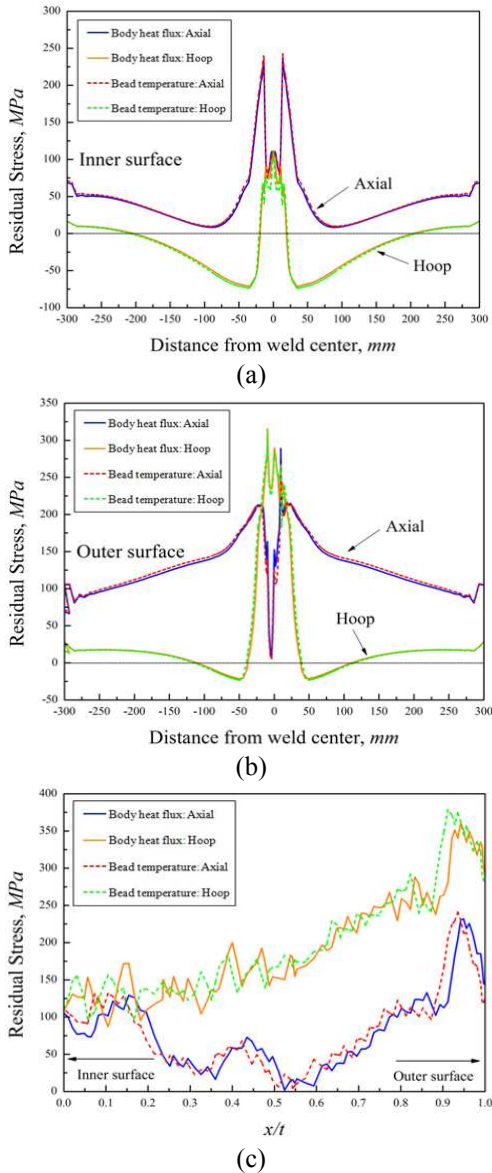


Fig. 4 Material properties with varying temperature: (a) elastic modulus and (b) yield strength

$$Q(W/m^3) = \frac{\eta VI}{A v \Delta t} \tag{1}$$

여기서,  $\eta$ 는 용접 효율이며  $V$ 는 용접 전압 그리고  $I$ 는 용접 전류를 의미한다. 또한  $A$ 는 각 용접 비드의 단면적,  $v$ 는 용접 속도,  $\Delta t$ 는 용접 시간을 나타낸다. 체적 열유속 값은 용접 절차서에 제시된 전압과 전류 값을 기반으로 계산한 후 실제 용접부 및 모재 경계부 온도 조건에 맞게 수정하였다.

용융비드 초기 온도는 용융점 온도 이상인 1800°C를 적용하였고, 입열 시간은 용접 속도의 역수를 사용했으며, 냉각시간은 각 패스만큼 용접하는데 걸리는 시간으로 약 2000초로 간주하였다. 이때에 각 용접 패스에 대한 냉각 시간은 용접 절차서에서 제시하는 패스 간 최대 온도(maximum interpass temperature)를 넘지 않도록



**Fig. 5** Comparison of weld residual stresses based on body heat flux with those based on bead temperature: (a) inner surface, (b) outer surface and (c) fusion center line

설정하였다.<sup>(5)</sup> 또한 온도 해석 시에는 최대 온도 변화(maximum allowed temperature change per time step)를 65°C로 설정하였다.

용접부 열전달 해석 시 용착이 진행됨에 따라 대기와의 자연 대류에 의한 열전달을 고려하였으며, 대류 열전달 계수 값은  $h=28.4W/m^2K$ 를 적용하였다.<sup>(6)</sup> 이와 같은 온도해석 결과를 이용하여 응력해석을 수행하였으며, 응력 해석 시에는 배관 양 끝단을 완전히 구속하였고, 등방성 경화(isotropic hardening) 효과를 고려한 탄소성 유한요소 응력해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 재료의 용융점을

응력 풀림(annealing) 온도로 설정하였으며, 기하학적 비선형성은 고려하지 않았다.<sup>(3)</sup>

이상과 같이 본 연구에서는 체적 열유속을 이용하여 용접 공정을 모사하였다. 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해서는 정확한 측정 실험이 수행되어야 하나 현실적으로 잔류응력 분포를 정확하게 측정하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 실제 용접 공정 중 발생하는 용접 비드의 온도를 직접 부가하는 방법을 이용하여 잔류응력 해석을 수행하였으며, 이를 통해 본 연구에서 적용한 방법의 타당성을 간접 검증하였다. 이 때에 적용된 모델은 체적 열유속을 이용한 해석 시 사용한 모델과 동일하며, 부가된 최대 용접 비드의 온도는 1800°C이다. 이는 용접 공정 중 비드에서 발생하는 온도에 해당한다. 두 방법으로 구한 결과를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 배관 내면에서의 용접잔류응력 분포를 비교한 것이고, Fig. 5(b)는 배관 외면, Fig. 5(c)는 용접부 중심에서 두께 방향을 따른 분포를 비교한 것이다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 체적 열유속을 이용한 잔류응력 해석 결과는 용접 비드 온도를 직접 부가하여 얻은 잔류응력 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 체적 열유속을 이용한 해석 방법의 타당성이 검증되었다. 또한 용접공정 해석 시 온도를 이용한 해석 방법을 적용하면 해석 절차가 단순해질 수 있기에 향후에는 온도를 이용하여 잔류응력을 구하는 방법도 효율적인 것으로 판단된다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 Groove 형상이 미치는 영향

Fig. 6은 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같은 용접부 형상 차이에 따른 용접잔류응력 해석 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 한 단계로 용접이 수행된(single-side weld) 협개선 용접부 내면에서의 용접잔류응력 분포를 나타낸 것이고, Fig. 6(b)는 두 단계로 용접이 수행된(double-side weld) 협개선 용접부 배관 내면에서의 용접잔류응력 분포이다. 두 경우 모두 용접부와 모재부의 경계 구간에서 피크(peak) 값의 잔류응력이 발생하였고 이는 모재부로 갈수록 점점 감소되는 경향을 보였다. 한 단계로 용접이 수행된 경우, 내면에서의 최대 축방향 잔류응력은 약 242MPa 이었으며 원주방향 잔류응력은 최대값이 약 112MPa 이었다. 두 단계로 용접이 수행된 경우에는 축방향 최대 인장

잔류응력이  $230MPa$ 이고 원주방향 잔류응력의 경우 최대값이 약  $295MPa$ 으로 나타났다. 용접 방법에 따라 축방향 최대 잔류응력은 분포 형상과 크기가 크게 달라지지 않았으나 원주방향 잔류응력의 경우에는 분포는 유사하였으나 최대 크기는 2배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 7(a)는 한 단계로 용접된 헐개선 용접부 외면에서의 용접잔류응력 분포이고, Fig. 7(b)는 두 단계로 용접된 헐개선 용접부 배관 외면에서의 용접잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 배관의 외면에서는 한 단계 용접의 경우 축방향 최대 잔류응력이 용접 경계면에서  $267MPa$ 이었으며, 원주방향 잔류응력의 경우 최대값이 약  $312MPa$ 이었다. 두 단계로 용접이 수행된 경우는 최대 축방향 잔류응력이 약  $190MPa$ , 최대 원주방향 잔류응력은 약  $280MPa$ 이었다. 이처럼 외면 잔류응력의 경우, 한 단계로 용접을 수행한 경우가 두 단계로 용접을 수행한 경우에 비해 다소 증가하는 결과를 보였다. 그러나 잔류응력의 분포 형상은 내면의 경우와 유사하게 나타났다. 두 가지 용접법 모두 축방향과 원주방향 잔류응력이 모재부에서 용접 toe 쪽으로 갈수록 점차 증가하다가 모재부와 용접부의 경계에서

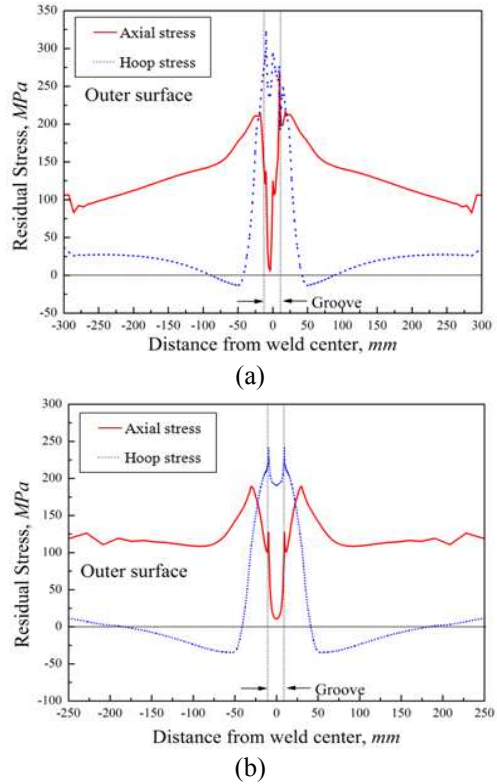


Fig. 7 Weld residual stress distribution at outer surface: (a) single-side weld and (b) double-side weld

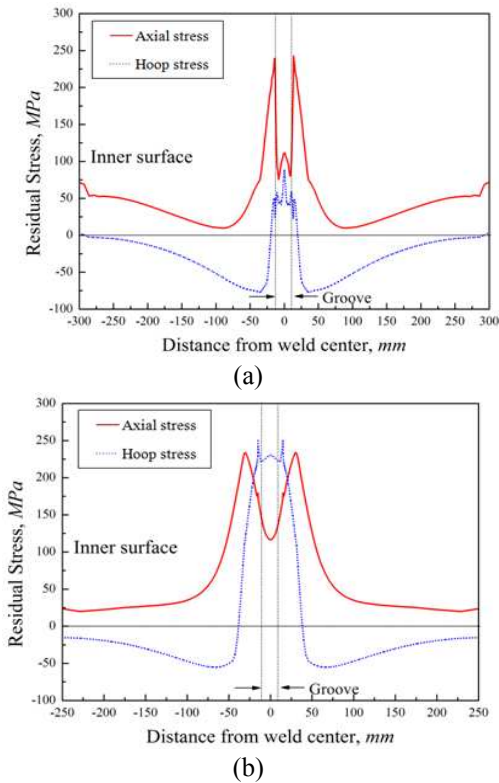


Fig. 6 Weld residual stress distribution at inner surface: (a) single-side weld and (b) double-side weld

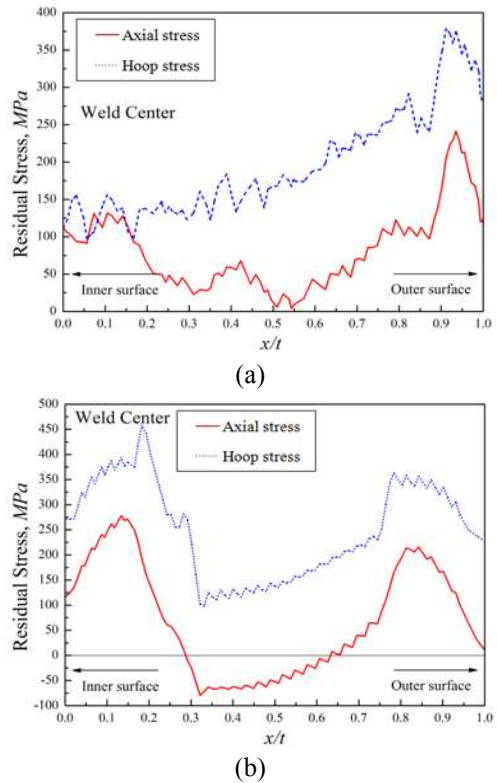


Fig. 8 Residual stress distribution along the fusion center line: (a) single-side weld and (b) double-side weld

피크 값을 보였다. 또한 Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 용접부로부터 멀어짐에 따라 원주방향 잔류응력은 0에 가깝게 수렴하지만 축방향 잔류응력은 어느 정도 남아있게 된다. 이는 기하학적 구속에 의한 것으로 실제 용접 공정과 해석에서는 배관 시편의 양 끝단이 축방향으로 완전 구속되기 때문에 용접부에서 멀어지더라도 이러한 구속으로 인해 축방향 잔류응력이 발생한다. 그러나 원주 방향으로는 기하학적 구속이 없기 때문에 용접부 근처에서만 용접 공정중의 불균일한 온도변화로 인해 잔류응력이 발생하며, 용접부에서 멀어질수록 잔류응력이 0에 가까워진다.

그리고 용접 두께를 따른 잔류응력 분포는 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 Fig. 1(a)에서 나타난 바와 같이 한 단계 용접을 수행한 경우로, 모든 두께 영역에서 축방향 및 원주방향 인장잔류응력이 발생하였으며, Fig. 8(b)는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 두 단계 용접을 수행한 경우로, 두께의 중심부에서 축방향 압축잔류응력이 발생하였다.

이처럼 용접 그루브 형상 차이에 따른 용접잔류

응력 해석 결과, 내면에서의 응력부식균열 측면에서는 두 방법 중 내면에서 외면으로 한 단계 용접을 수행하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

3.1 용접부 폭이 미치는 영향

Fig. 9는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 용접부 폭을 4가지로 변화시킨 경우에 대한 협개선 용접부 내면에서의 용접잔류응력 분포를 나타낸 것으로, Fig. 9(a)는 배관 내면의 축방향 용접잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 용접 중심부와 모재부에서는 용접부 폭이 넓을수록 잔류응력 값이 차례대로 증가하는 경향을 보였으며, 용접부와 모재부의 경계 구간에서는 용접부 폭이 좁을수록 잔류응력 값이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 9(b)는 원주방향 용접잔류응력 분포를 나타낸 것으로, 용접 중심으로부터 약  $-30mm \sim +30mm$  구간에서는 용접부 폭이 넓을수록 잔류응력 값이 크게 나타났다. 반면에 모재부에서는 용접부 폭이 좁아질수록 잔류응력 값이 미세하게 증가하는 경향을 보였다. 즉, 모재부에서는 축방향과 원주방향 모두 큰 차이를 보이지 않았지만, 용접부에서는 용접부 폭의 변화에 따라 각각의 결과가 대략  $50MPa$ 이상의 차이를 보였다.

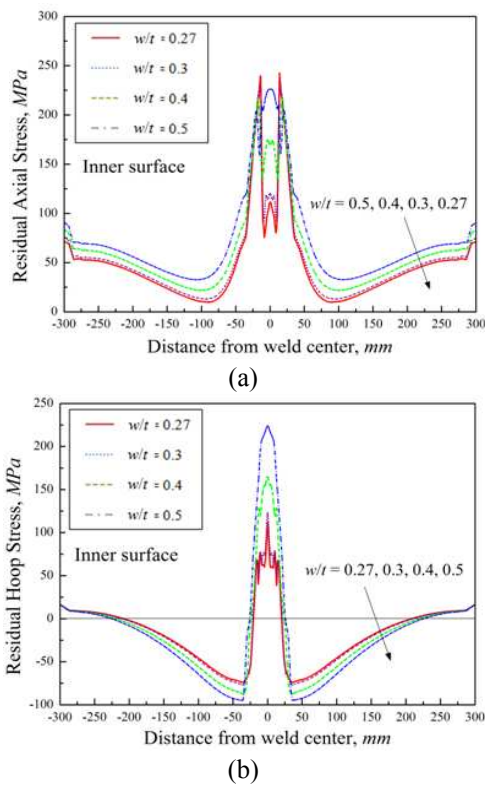


Fig. 9 Weld residual stress distribution for various weld width at inner surface: (a) axial stress and (b) hoop stress

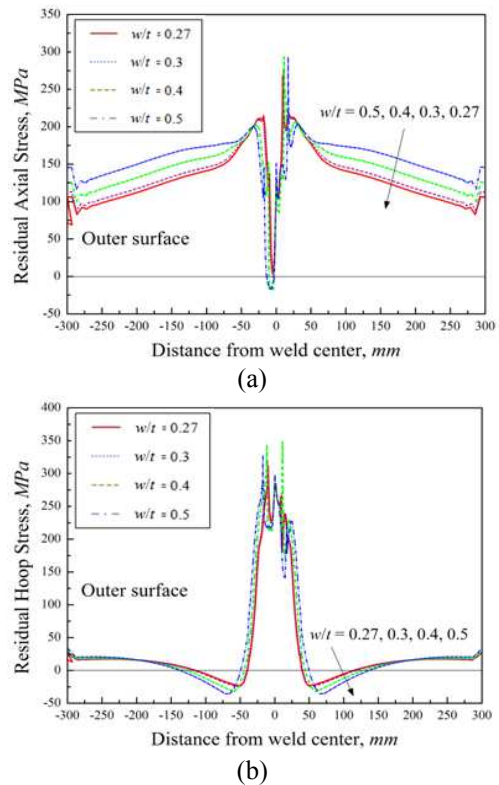


Fig. 10 Weld residual stress distribution for various weld width at outer surface: (a) axial stress and (b) hoop stress

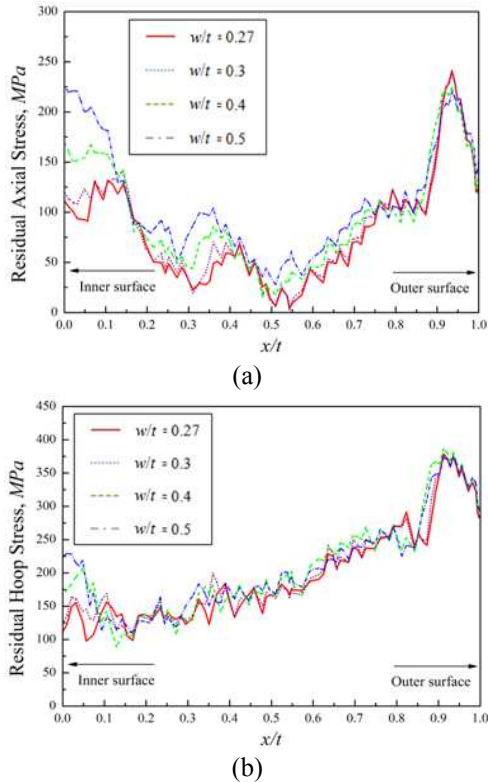


Fig. 11 Weld residual stress distribution for various weld width along the fusion center line: (a) axial stress and (b) hoop stress

Fig. 10은 협개선 용접부 배관 외면에서의 용접잔류응력 분포를 나타낸 것으로, Fig. 10(a)는 축방향 용접잔류응력 분포이다. 이는 Fig. 9의 내면 분포와는 달리, 용접부에서는 폭의 영향에 따라 잔류응력의 분포가 근소한 차이로 비슷한 경향을 보였지만 용접부 폭의 영향을 뚜렷하게 구분 짓는 경향을 보이진 않았다. 모재부에서는 용접부 폭이 넓을수록 잔류응력 값이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 10(b)는 원주방향 용접잔류응력 분포를 나타낸 것으로, 용접부에서는 축방향과 마찬가지로 폭의 영향에 따른 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며, 모재부에서는 근소한 차이로 거의 일치하는 잔류응력 분포를 보였다.

Fig. 11은 용접부 중심에서 두께 방향을 따른 용접잔류응력 분포를 나타낸 것으로  $t$ 는 배관의 두께이며  $x/t = 0$ 은 배관 내면을 의미하고,  $x/t = 1$ 은 배관 외면을 의미한다. Fig. 11(a)는 축방향 용접잔류응력 분포를 나타내며, Fig. 11(b)는 원주방향 용접잔류응력 분포이다. Fig. 9의 내면 잔류응력 분포에 나타낸 바와 같이,  $x/t$ 가 0에 가까울 때에는 용접부 중심에서 폭이 넓어짐에 따라 잔류응력 값이 증가하는 결과를 보였다. 그러나  $x/t$ 가 1에

가까워질수록 축방향과 원주방향 잔류응력 분포 모두 크기와 경향에 있어서 거의 비슷한 결과를 나타냈다. 즉, 배관 내면 잔류응력 분포에는 용접부 폭이 큰 영향을 미쳤으나 외면 잔류응력 분포에는 영향을 미치지 않았다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상세 비선형 유한요소해석을 이용하여 두 가지 서로 다른 방법으로 용접이 수행된 협개선 용접부의 용접잔류응력을 분석하였다. 또한, 용접부 폭의 변화에 따라 변화하는 용접잔류응력의 결과를 분석하였다.

Groove 형상이 미치는 영향을 보기 위한 해석을 수행한 결과, 배관 내면에서의 축방향 용접잔류응력 분포에서는 한 단계로 용접한 경우와 두 단계로 용접한 경우 모두 잔류응력의 분포나 최대값의 크기가 비슷하였으나, 원주방향에서는 한 단계로 용접을 한 경우가 두 단계로 용접한 경우에 비해 잔류응력 최대값이 2배 이상 감소했다. 또한 배관 외면에서는 두 방법 모두 잔류응력의 분포는 유사하였으나 한 단계로 용접한 경우가 두 단계로 용접한 경우의 잔류응력 값보다 다소 크게 나타났다. 따라서 배관 내면에서의 PWSCC 측면에서는 한 단계로 용접하는 것이 두 단계로 용접하는 것보다 유리한 것으로 나타났다.

용접부 폭이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가한 결과, 배관 내면에서의 축방향 용접잔류응력 분포에서는 용접부와 모재부의 경계를 제외한 모든 구간에서 폭이 넓을수록 잔류응력 값이 증가하는 결과를 나타냈다. 원주방향의 경우에는 용접부에서 폭이 넓을수록 잔류응력 값이 증가했고, 모재부에서는 폭이 좁을수록 미세한 증가를 보였다. 따라서 배관 내면의 모재부에서는 축방향과 원주방향 용접잔류응력의 분포 차이가 근소했지만, 용접부에서는 폭 변화에 따라 약 50MPa 정도의 차이를 보였다. 또한 배관 외면의 용접부에서는 축방향과 원주방향 모두 폭의 변화에 따른 뚜렷한 경향이 없었으며, 모재부에서는 축방향의 경우 폭이 넓을수록 잔류응력 값이 커졌다. 마지막으로 용접부 중심에서 두께 방향을 따른 용접잔류응력 분포 역시 축방향과 원주방향 모두 용접부 폭의 변화에 따라 비슷한 크기와 경향을 보였으며, 배관 내면에서 외면으로 갈수록 폭에 대한 영향이 줄어드는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 협개선 용접부의 용접형상과 용접방법을 최적화하고 향후 협개선 용접부의 용접 결합 평가 등을 위해 활용될 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Brust, F. W. and Scott, P. M., 2007, "Weld Residual Stresses and Primary Water Stress Corrosion Cracking in Bimetal Nuclear Pipe Welds," *Trans. of ASME PVP Conference*, PVP2007-26297.
- (2) "ABAQUS/Standard User's Manual," ABAQUS Version 6.9-1, Simulia Corp.,
- (3) Brickstad, B. and Josefson, B. L., 1998, "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 11~25.
- (4) Song, T. K., Bae, H. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S., Park, C. Y., Yang, J. S., Huh, N. S., Kim, J. W., Park, J. S., Song, M. S., Lee, S. G., Kim, J. S., Yu, S. C. and Chang, Y. S., 2009, "Assessment of Round Robin Analyses Results on Welding Residual Stress Prediction in a Nuclear Power Plant Nozzle," *Trans. of the KSME A*, Vol. 33, No. 1 pp. 72~81.
- (5) ASME, 2004, "Welding and Brazing Qualification," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. IX
- (6) "Materials Reliability Program: Advanced FEA Evaluation of Growth of Postulated Circumferential PWSCC Flaws in Pressurizer Nozzle Dissimilar Metal Welds (MRP-216, Rev. 1): Evaluations Specific to Nine Subject Plants," EPRI, Palo Alto, CA, U.S.A., 2007.