

## 원전 이중 금속 다층 용접부 잔류응력 예측을 위한 유한요소 변수 민감도 해석

송태광\* · 배홍열\* · 김윤재† · 이경수\*\* · 박치용\*\*

(2008년 4월 18일 접수, 2008년 8월 17일 수정, 2008년 8월 25일 심사완료)

### Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weldment in Nuclear Power Plant

Tae-Kwang Song, Hong-Yeol Bae, Yun-Jae Kim, Kyoung-Soo Lee and Chi-Yong Park

**Key Words :** Residual Stress(잔류 응력), Dissimilar Metal Weld(이종금속용접), PWSCC(일차수응력 부식균열), Sensitivity Analysis(민감도 해석)

#### Abstract

In nuclear power plants, ferritic low alloy steel components were connected with austenitic stainless steel piping system through alloy 82/182 butt weld. There have been incidents recently where cracking has been observed in the dissimilar metal weld. Alloy 82/182 is susceptible to primary water stress corrosion cracking. Weld-induced residual stress is main factor for crack growth. Therefore exact estimation of residual stress is important for reliable operating. This paper presents residual stress computation performed by 6" safety & relief nozzle. Based on 2 dimensional and 3 dimensional finite element analyses, effect of welding variables on residual stress variation is estimated for sensitivity analysis.

#### 1. 서 론

최근 V.C Summer 원전 등에서 이중금속용접부(Dissimilar Metal Weld) 균열이 관찰되었다.<sup>(1~3)</sup> 균열은 Inconel 계열 용접 금속에서 발생하였으며 일차수응력부식균열(PWSCC)이 균열의 주요 발생 원인이었다. 일차수응력부식균열은 재료의 민감도, 용접부 인장 잔류 응력 및 사용 중 하중(In-service load), 부식 환경과 같은 3가지 인자의 상호작용에 의해 발생한다.<sup>(2,4,5)</sup> 따라서, 응력 부식 균열 발생 및 균열 진전을 억제하기 위해서는 용접부 잔류응력에 대한 정확한 예측이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 고리 3호기 6" 안전·방출 노즐에서의 용접 기인 잔류응력(weld-induced residual stress)을 유한요소 해석을 통해 예측하였다. 이를

위해 안전·방출 노즐 mock-up 을 대상으로 잔류 응력 해석 결과에 영향을 미치는 변수에 대한 민감도 해석(sensitivity analysis)를 수행하여 각 변수의 영향 정도를 정량화하였다.

#### 2. 해석 대상 및 용접 변수

Fig. 1은 원전 가압기 상부 6" 안전·방출 노즐로서 스테인리스 강(stainless steel) 배관과 페라이트 강(ferritic steel) 노즐이 안전단(safe end)과의 동종 및 이종 용접(similar metal weld, dissimilar metal weld)을 통해 연결되어 있음을 확인할 수 있다. 이때 용접성 향상을 위해 노즐에는 4~6mm 두께의 버터링(buttering) 용접을 하며 후열 처리를(PWHT)를 수행하여 버터링 용접으로 인한 잔류응력을 제거하게 된다.<sup>(2)</sup>

용접부는 상온에서 용융점 이상의 넓은 온도 범위를 겪게 되며 특히 다층 용접 시 반복적인 용융/응고/재 용융(re-melting) 과정을 겪게 된다. 용접 기인 잔류응력은 용융/재 용융과정을 반복하면서

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

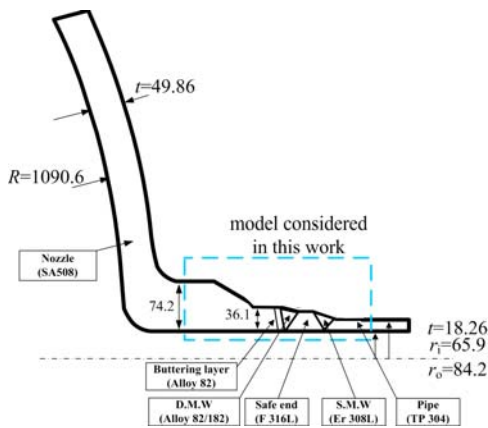
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한전전력연구원

**Table 1** Welding Procedure Specification for safety · relief nozzle

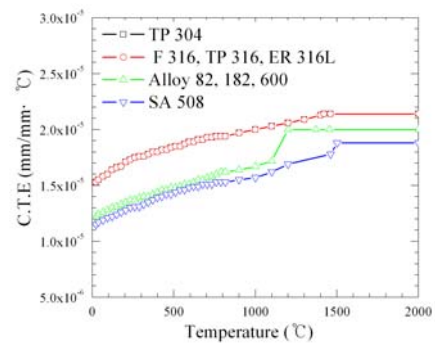
	Pass Name (Pass No.)	Process	Filler metal	size (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Trv. Speed (cm/min)
DMW	Buttering (1~11)	SMAW	ENiCrFe-3	φ 3.2	125	25	5~10
	Root (1~3)	GTAW	ERNiCr-3	φ 2.4	140	12	5~10
	Groove (4~16)	SMAW	ENiCrFe-3	φ 3.2	135	25	5~10
SMW	Root (1~3)	GTAW	ER308L	φ 2.4	140	12	5~10
	Groove (4~11)	SMAW	ER308L	φ 3.2	105	27	5~10



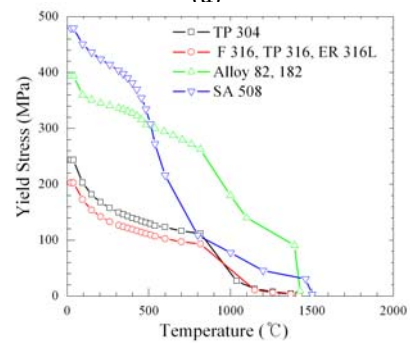
**Fig. 1** Schematic illustration of a safety & relief nozzle. Each component and corresponding material is noted

형성된 복잡한 온도 구배 및 재료 물성 불일치, 용접구조물의 구속 조건에 의해 발생한다.<sup>(3)</sup> 따라서 용접 기인 잔류응력을 예측하기 위해서는 상온에서 용융점 이상의 온도 범위에 대한 열 및 기계 재료 물성이 필요하다. Fig. 2는 안전·방출 노즐에 쓰이는 재료의 온도에 따른 열팽창 계수(C.T.E, Coefficient of Thermal Expansion) 및 항복강도를 나타낸다. 이 밖에 열 해석 및 응력 해석에 필요한 재료 물성으로는 비열, 잠열(latent heat), 밀도, 열전도계수( $k$ ), 대류 열전도 계수( $h$ ) 및 탄성계수 등이 있으며 설계 코드,<sup>(6)</sup> 재료 생산자의 실험 데이터<sup>(7)</sup> 및 문헌<sup>(8)</sup>을 참고하였다.

Table 1은 안전·방출 노즐에 적용된 용접 절차 시방서(WPS, Weld Procedure Specification)를 나타낸다. 표에서와 같이 이중 금속 용접부는 16개의 용접 패스(pass)를 사용하였으며 동중 용접부는 11개의 패스를 사용하였다. WPS에서 제시된 용접속도, 아크(Arc) 전류, 전압 및 용가재(filler metal)의 특성

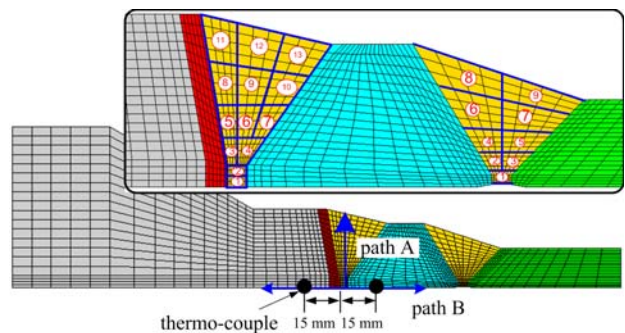


(a)



(b)

**Fig. 2** Material property distribution of typical nozzle materials with temperature variation. (a) C.T.E and (b) yield stress



**Fig. 3** F.E mesh for mock-up

**Table 2** Reference condition of sensitivity analysis for mock-up

parameter	Reference condition
Dimension	2D-Axisymmetric model
Heat input	body flux
initial temp. of molten bead	$T_m+10^\circ\text{C}$
cooling condition	natural convection ( $h=10\text{ W/m}^2\text{K}$ )
boudary condition	shop weld
hardening type	isotropic hardening
pass sequence	refer Fig. 19
phase transformation	not considered
annealing effect	considered
non-linear geometry effect	not considered

등은 ASME<sup>(9)</sup> 및 R6<sup>(10)</sup>에서 제시하는 일반적인 용접 변수에 해당한다. 그러나 유한요소 잔류응력 해석 시에는 코드에서 제시하는 변수 외에 요소 종류, 경계 조건 및 입열 구현 방법 등의 추가적인 용접변수들이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 원전 가압기 안전·방출 노즐에 대한 mock-up 을 제작하였으며 mock-up 에 대한 유한요소 변수 민감도 해석을 수행하였다. 온도 해석 결과는 mock-up 에서 측정된 온도 결과와, 응력 해석 결과는 문헌 결과와 비교하였다. 이를 통해 해석 결과의 신뢰성을 확인하였다.

### 3. Mock-Up 에 대한 유한요소 변수 민감도 해석

Fig. 3은 안전·방출 노즐 mock-up 에 대한 유한요소 망(mesh)을 나타낸다. Mock-up 의 크기는 실형상 이중 용접부 중앙에서 노즐 방향으로 152.4mm(6"), 배관 방향으로 127mm(5") 폭으로 선정하였으며 Fig. 1에서 확인 가능하다.

유한요소 해석을 통해 용접부 잔류응력 예측 시 용접부에서의 기계적 변형이 온도 분포에 주는 영향은 미미하므로 과도 열 해석(transient heat analysis)을 수행한 후 온도 분포 결과를 바탕으로 잔류 응력 해석을 수행하였다. (Uncoupled heat transfer analysis).<sup>(11)</sup>

용접 시 일련의 비드(bead)가 순차적으로 생성되는 것을 모사하기 위해서는 ABAQUS 에서 제공하는 "MODEL CHANGE" 옵션을 사용하였다.<sup>(11)</sup> 이는 모델링 시 모든 요소를 만든 후 각 용접 패스

에 해당하는 비드를 실제 용접과 같은 조건으로 활성화 시키는 해석 방법으로 "요소 망 재 생성 기술"(mesh re-birth technique)이라고도 명명한다.<sup>(12)</sup>

용접 관련 변수는 코드<sup>(9,10)</sup>에서 제시하는 변수 외에 다양하므로 다음과 같이 열 해석 및 응력 해석 관련 변수로 구분하여 각각의 영향을 파악하였다.

용접부 과도 열해석과 관련된 변수는 다음과 같다.

- 용접 입열량 (heat input)
- 용융 비드 초기 온도  
(Initial temp. of molten bead)
- 입열 시간 (heating time)
- 냉각 시간 (cooling time)
- 냉각 조건 (cooling condition)

용접부 응력 해석과 관련된 변수는 다음과 같다.

- 경계 조건 (boundary condition)
- 재료 경화 거동 (hardening type)
- 요소 종류(element type)
- 응력 풀림 (annealing effect)
- 비드 단순화의 임계값  
(critical No. of lumped bead method)
- 용접 순서 (welding sequence)
- 상변태 (phase transformation)
- 비선형 기하 형상 (nonlinear geometric change)

이 밖에 유한요소 잔류응력 해석 결과에 영향을 미치는 변수로는 3차원 효과가 있다. 상 방향 용접(Up-hill progression)<sup>(9)</sup> 시 180°씩 용접을 수행하게 되므로 시작부와 끝단에서는 불연속이 발생하기 때문이다. (Fig. 21)

각 변수가 유한요소 잔류응력 해석에 미치는 영향은 3.1, 3.2 및 3.3에서 확인할 수 있으며 각 변수의 영향을 체계적으로 비교하기 위해 Table 2와 같이 기준 변수 조건을 선정하였다.

Fig. 4(a) 및 (b)는 이와 같은 기준 변수 조건에서 구한 유한요소 잔류응력 분포를 보여준다. 원전에서 발생하는 응력부식균열은 대부분 이중 금속부 내면에서 발생한다.<sup>(13)</sup> 따라서 유한요소 잔류 응력 해석 결과는 노즐 내면 이중 금속부 중앙에서 좌우 50mm 범위에서 산출하였으며(Fig. 3의 path B) 특히 정량적인 비교를 위해서는 응력부식 균열에 민감한 영역인 이중금속 용접부 좌우 10mm 범위(관심 범위)에서의 값을 사용하였다. 이때 관심 범위에서 축 방향으로 22~165MPa 및 평균 109MPa 의 인장 잔류응력이 발생하였으며

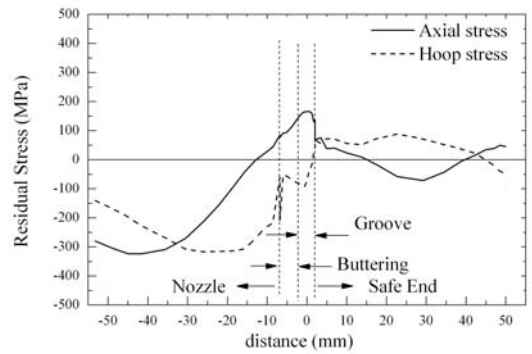
원주 방향으로 -235~72MPa 및 평균 -48MPa 의 압축 잔류 응력이 발생하였다.

Fig. 4(b)는 이중 금속 용접부에서 두께 방향(Fig. 3의 path A) 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서 심벌은 미국 원자력 규제 위원회가 두꺼운 원전 배관 맞대기 용접부에서 측정된 두께 방향 잔류응력을 나타낸다.<sup>(15)</sup> 그림에서와 같이 맞대기 용접후 두께 방향으로의 (내벽→외벽) 축 방향 잔류응력은 “U” 또는 지그재그 형태를 나타낸다. 이와 같은 특성은 이중금속용접부에도 적용되며<sup>(14)</sup> 그림에서와 같이 유한요소 해석 결과와 측정 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 해석 결과 원주 방향 잔류응력은 내면에서 약한 압축, 외면에서 강한 인장 잔류응력을 나타내었다.

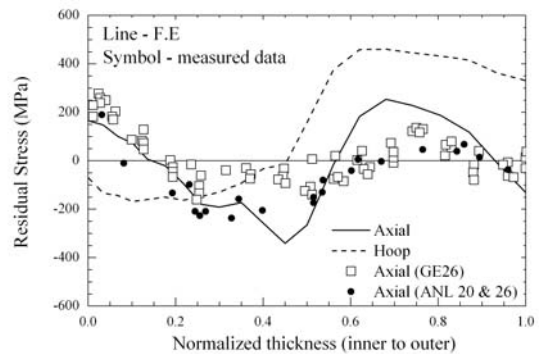
Fig. 5는 안전·방출 노즐 mock-up 을 나타낸다. Mock-up 에 대한 용접 수행 시 mock-up 내면에는 그림과 같이 열전대(thermo-couple)를 설치하여 실시간으로 온도를 측정하였으며 열전대의 위치는 Fig. 3에서와 같이 이중 금속 용접부 좌우 15mm 지점이다. 또한 열전대는 90° 간격으로 총 8개가 설치되었다.

Fig. 6은 노즐 방향 15mm, 원주 방향 90° 위치의 열전대에서 측정된 시간에 따른 온도분포 및 2차원 해석에서 측정된 온도분포 결과를 보여준다. 실제 용접이 16개의 pass 로 이루어 졌으나 2차원 해석에서는 lumped pass method<sup>(16-18)</sup>를 적용하여 13개의 pass 를 사용하였기 때문에 해석 결과 및 실험 측정값은 전체 용접시간 동안 피크 온도에 도달하는 횟수에서 차이를 나타낸다. 그러나 전반적으로 해석 결과값 및 온도 측정값은 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 용접 초기 해석 결과 및 온도 측정값의 차이는 열전대가 용접 아크의 대류 및 복사열에 영향을 받기 때문이라 판단되면 따라서 측정값이 해석값에 높게 나타난다고 사료된다. Fig. 6에서 3차원 해석 결과에 대한 설명은 3.3장에서 언급하겠다.

Fig. 7은 안전단 부분 용융선(fusion line)에서 3mm 떨어진 지점에서의 온도 분포를 나타낸다. 일반적으로 스테인리스 스틸에 대한 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)는 용접 중 최소 800~900℃를 넘는 지점으로<sup>(8,19)</sup> 정의하며 용융선에서 2~4mm 떨어진 영역에 해당한다. 따라서 안전단 부분에서 용융선으로부터 3mm 떨어진 지점을 HAZ line 으로 선정하여 용접 중 최대 온도를 측정하여 Yaghi et al.<sup>(19)</sup>의 결과와 비교하였으며 Fig. 7에서와 같이 잘 일치함을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 4 Residual stress distribution along (a) path B and (b) path A for reference condition. Refer to Table. 2 for reference condition and Fig. 3 for each path

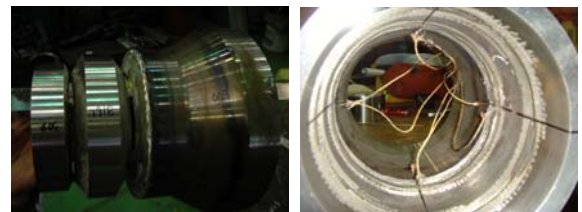


Fig. 5 Figures of mock-up for safety·relief nozzle and thermo-couples. Refer to Fig.3 for position of thermo-couples

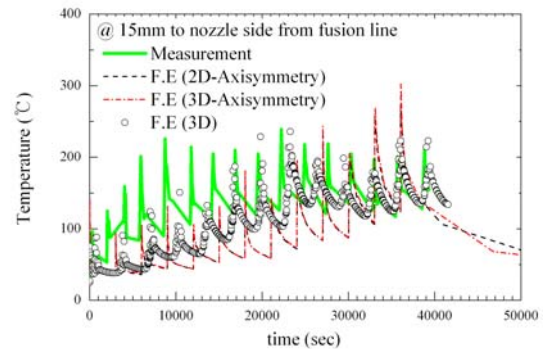


Fig. 6 Temperature history comparison of F.E result with measured value for mock-up

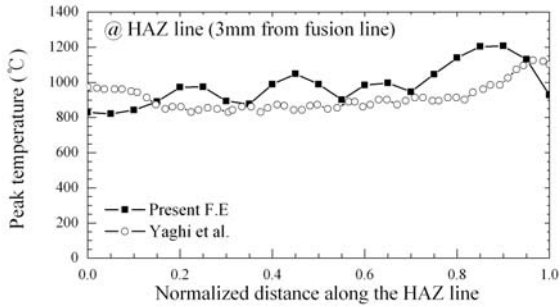


Fig. 7 Comparison of peak temperature at HAZ line with Yaghi's results

3.1 열 해석 관련 변수 민감도 해석

3.1.1 용접 입열량(heat input)

유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 를 사용하여 수행하였다. ABAQUS 는 체적 플럭스 (body flux) 및 표면 플럭스(surface flux)를 통해 입열을 구현하며 바디 플럭스는 식 (1)을 통해 각 패스에서 입열량을 산출할 수 있다..

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

여기서  $\eta$ 는 용접효율로서 SMAW 의 경우 0.7~0.8, GTAW 의 경우 0.5정도의 값을 가진다.<sup>(19)</sup> 그리고  $V$ 는 아크 전압,  $I$ 는 아크 전류,  $A$ 는 용접 비드(bead)의 단면적,  $v$ 는 용접속도,  $t$ 는 용접 시간을 나타낸다. Fig. 8은 식 (1)을 통해 산출된 입열량을 체적 플럭스로 입열하는 경우와 7:3의 입열의 비율로 체적 플럭스와 표면 플럭스를 같이 입열한 경우에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 8에서와 같이 입열 방법의 차이가 특정 지점에서의 시간에 따른 온도 분포 차이를 나타낼 수 있으나 그 차이가 노즐 내면 잔류응력에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있다.<sup>(20)</sup>

3.1.2 용융 비드 초기 온도(Init. Temp. of molten bead)

용가재로부터 용융되어 모재에 부착될 때의 용접 비드는 통상 용융점(liquidus temperature,  $T_m$ )이상이라고 가정하지만 아크 열원에 의해 가열된 용융 비드의 정확한 온도는 알기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 용융비드의 초기 온도를  $T_m+10^\circ\text{C}$ ,  $T_m+200^\circ\text{C}$  및  $T_m+600^\circ\text{C}$  3가지를 선정하여 용융 비드의 초기 온도가 잔류응력에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 9는 각 초기 온도에서 Fig. 3의 경로 B에서의 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 용융 비드 초기 온도가 노즐 내면 잔류응력 분포에 미치는 영향은 미미하였다.

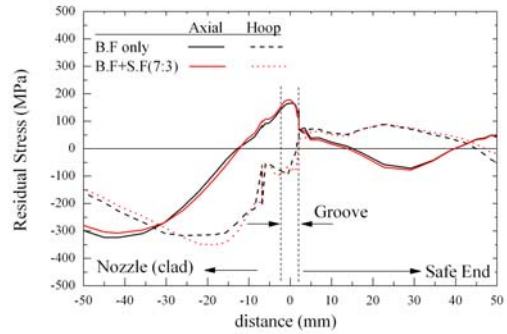


Fig. 8 Effect of heat producing method on residual stress

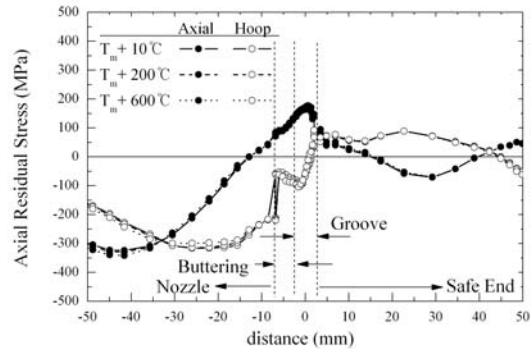


Fig. 9 Effect of initial temperature of molten bead on residual stress

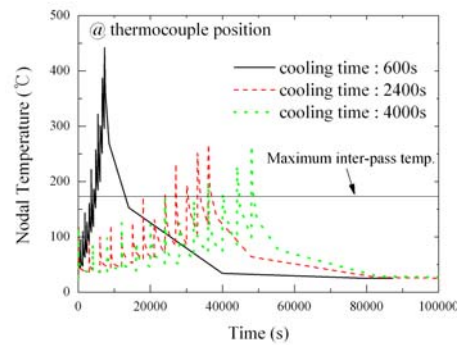


Fig. 10 Temperature history at the thermocouple position for various cooling time

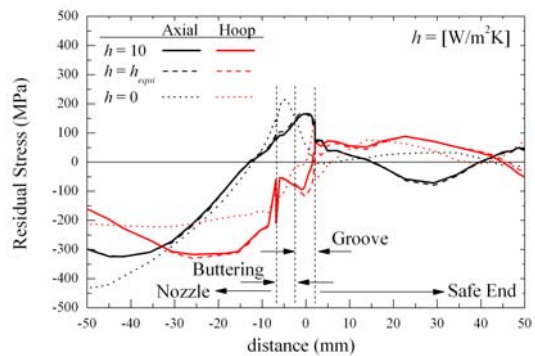


Fig. 11 Effect of convection condition on residual stress

3.1.3 입열 시간

입열 시간은 WPS 를 바탕으로 축 대칭 2차원 모델에서는 식 (2)를 통해 입열 시간을 산출할 수 있다.

$$\Delta t_{heating} = \frac{1}{v} \tag{2}$$

여기서  $v$  는 용접속도를 나타낸다.

3.1.4 냉각 시간(Cooling Time)

용접 시 각 패스 사이의 냉각 시간은 WPS 에서 제시하는 최대층간온도(Maximum inter-pass temperature)를 넘지 않도록 설정한다.<sup>(9)</sup> 따라서 냉각 시간은 mock-up 용접 시 측정된 데이터를 통해 산출하였으며 사용하였으며 Fig. 6에서와 같이 패스 간 최대 온도가 WPS 에서 제시하는 173℃를 넘지 않음을 확인할 수 있다. 냉각 시간이 이중 금속 용접부 내면 잔류응력에 미치는 영향에 대한 민감도 해석은 기본 냉각 시간을 기준으로 2배 및 0.25배의 냉각 시간에 대해 수행하였으나 각 냉각 시간이 잔류응력에 미치는 영향은 미미하였다. 그러나 Fig. 10에서와 같이 0.25배의 냉각시간은 WPS 기준을 만족하지 않았다. 따라서 유한요소 잔류응력 해석 시 냉각 시간은 잔류응력 분포에는 영향을 미치지 않으나 용접 조건(패스 간 최대 온도 조건 기준)을 만족하도록 설정하면 됨을 알 수 있다.

3.1.5 냉각 조건(Cooling Condition)

용접 시 용융부는 이웃한 재료와의 열전도, 대기와의 대류 및 복사를 통해 냉각된다. Mock-up 제작 시 용접은 자연 대류( $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) 조건에서 수행하였으며 유한요소 해석 시 열 전달은 전도 및 대류 조건만을 고려하였다. 그러나 Warren 등은 복사 열 전달을 그에 상당(equivalent)하는 대류 열량으로 환산하기 위해 Table 3과 같이 대류 및 복사 열 전달을 고려할 수 있는 온도에 따른 대류 열 전달 계수( $h$ , coefficient of heat convection)를 도입하였으며,<sup>(17)</sup> Brickstad 등은 같은 목적으로 식 (3) 및 (4)를 사용하였다.<sup>(8)</sup>

$$h_{equi.}=0.0668T \quad (\text{W/m}^2\text{°C}) \text{ when } 0 \leq T \leq 500\text{°C} \tag{3}$$

$$h_{equi.}=0.231T-82.1 \quad (\text{W/m}^2\text{°C}) \text{ when } T \geq 500\text{°C} \tag{4}$$

**Table 3** Equivalent coefficient of heat convection (hequi.) which covers radiation effect

Temperature (°C)	$h_{equi.}$ (W/m <sup>2</sup> K)	Temperature (°C)	$h_{equi.}$ (W/m <sup>2</sup> K)
100	13.57	1200	126.48
200	17.67	1300	149.01
300	21.96	1400	174.37
400	27.08	1500	202.74
500	33.34	1600	234.28
600	40.98	1700	269.17
700	50.19	1800	307.57
800	61.18	2000	395.64
900	74.13	2500	689.63
1000	89.21	4000	2407.17
1100	106.6		

Fig. 11은 냉각 시 자연 대류를 고려한 경우 Warren 이 제시한 방법으로 복사 열 전달을 추가로 고려한 경우 및 대류를 고려하지 않은 경우에 대한 유한요소 잔류응력 해석결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 복사 열 전달이 잔류응력에 미치는 영향은 미미하였다. 그러나 특정 지점의 온도 peak 값은 분포는 Fig. 6과 비교하여 30~50℃ 정도 줄어들음을 알 수 있었다. 반면, 대류 열 전달을 고려하지 않으면 구조물에 용접 입열량이 누적되면서 평형 온도가 상승하기 때문에 잔류응력 분포가 달라지게 된다. 따라서, 유한요소 잔류응력 해석 시 냉각은 자연대류 조건만을 적용하여도 경제적으로 만족할 수 있는 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2 응력 해석 관련 변수 민감도 해석

유한요소 잔류응력 해석 시 등방성 경화 모델 (isotropic hardening model)을 사용하였으며 상변태는 고려하지 않았다. Leggatt 및 Dennis 등은 이동성 경화 모델(kinematic hardening)에 비해 등방성 경화 모델을 사용하면 보수적인 결과를 나타낸다고 주장하였다.<sup>(21,22)</sup> 또한 Bate 등은 상변태 고려 시 재료의 단위 체적이 증가하여 인장 잔류응력이 감소하게 되므로 상변태를 고려하지 않은 해석 결과는 보수적이라고 주장하였다.<sup>(23)</sup> 본 연구에서는 잔류응력 결과의 보수성 및 경제적인 해석을 위해 등방성 경화 모델을 사용하였으며 상변태는 고려하지 않았다. 소성경화모델 및 상변태를 제외한 응력 해석 관련 변수에 대한 민감도 해석 결과는 다음과 같다.

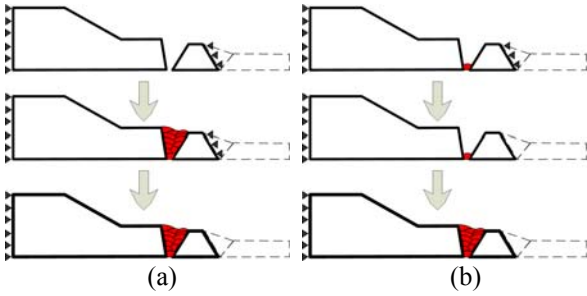


Fig. 12 Idealized boundary condition for (a) shop weld and (b) tack weld

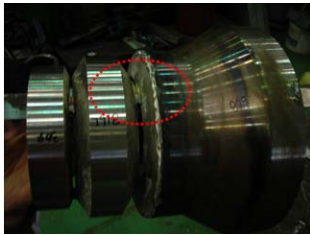


Fig. 13 Figures for mock-up fabrication. Note tack-weld within dash circle line

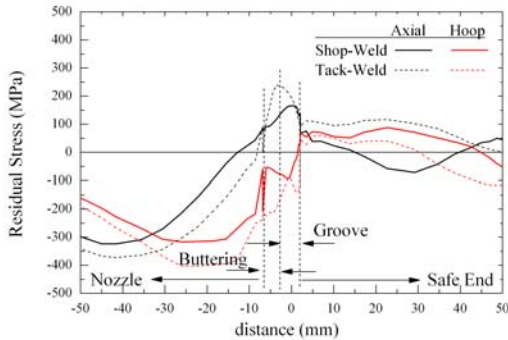


Fig. 14 Effect of boundary condition on residual stress

3.2.1 경계 조건(Boundary Condition)

일반적으로 구조물의 잔류응력은 국부적 가열/냉각 및 구속 조건에 의해 발생한다. 따라서 이중 금속 용접부 잔류응력 해석 시 경계 조건 설정은 중요한 변수가 될 수 있다. Fig. 12는 mock-up에 대한 잔류응력 해석 시 적용할 수 있는 대표적인 경계조건이다. Fig. 12(a)는 공장 용접(shop weld)에 대한 경계 조건으로 노즐 및 안전단은 용접이 끝날 때까지 지그(zig)에 의해 고정되어 있다가 용접이 끝나면 자유로워진다. Fig. 12(b)는 가접(tack weld)에 대한 경계조건으로 노즐 및 안전단은 90° 간격으로 root 부분에서 4개의 가접에 의해 구속되어 있는 상태에서 용접이 수행된다. 실제 Mock-up 용접은 Fig. 12(b) 및 Fig. 13과 같이 가접 조건에서 수행되었다. 그러나 노즐 제작 시 노즐 및 안전단 용접은 일반적으로 공장 용접조건이 적용되므로 공장 용접을 기본 조건으로 선정하였다.

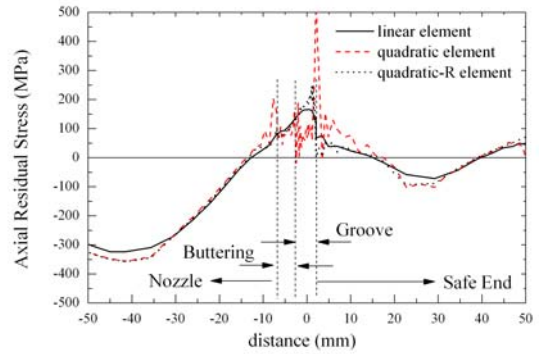


Fig. 15 Effect of element type on residual stress

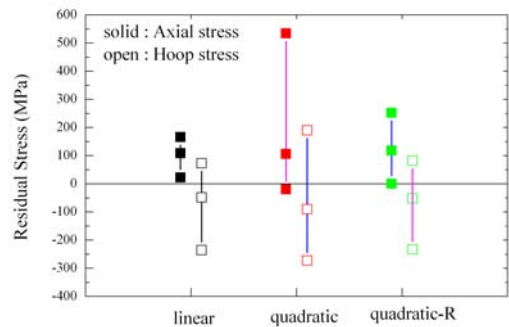


Fig. 16 Quantitative comparison of residual stress for different element type. Note that the value was calculated within “interest” region (weld center±10mm)

Fig. 14는 각 경계 조건에서의 노즐 이중 금속부 내면 잔류응력을 나타낸다. 가접 조건에서 관심범위 축 방향 잔류응력은 -59~239MPa 및 평균 136MPa의 잔류응력이 발생하였으며 공장 용접 대비 30MPa 정도 증가하였다. 반면 원주 방향 잔류응력은 -312~60MPa 및 평균 -124MPa의 잔류응력이 발생하였으며 공장 용접 대비 75MPa 정도 감소하였다. 구속 조건을 제거하게 되면 구조물은 변형을 통해 새로운 잔류응력 평형을 찾게 되는데 공장용접 및 가접 조건은 구속을 제거하는 시점 차이로 인해 최종 잔류응력 분포의 차이가 발생하게 된다.

3.2.2 요소 종류(Element Type)

유한요소 해석을 통한 용접부 잔류응력을 위해서는 열 해석 및 응력 해석이 필요하다. 일반적으로 응력 해석에는 2차 요소가 1차 요소에 비해 결과값의 정확성이 높다고 알려져 있다.<sup>(11)</sup> 그러나 용접과 같이 잠열을 포함하는 열 해석의 경우에는 1차 요소가 2차 요소에 비해 더 정확한 결과를 제공한다.<sup>(11)</sup> 즉, 열 해석에는 1차 요소가, 응력 해석에는 2차 요소가 더 정확한 결과를 제공하기 때문

에 다음과 같은 3가지 경우를 통해 요소에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

- \* 1차 요소 (열 해석) → 1차 요소 (응력해석)
- \* 2차 요소 (열 해석) → 2차 요소 (응력해석)
- \* 2차 요소 (열 해석) → Reduced 2차 요소 (응력 해석)

Fig. 15는 3가지 경우에서의 노즐 내면 축 방향 잔류응력 결과다. 그림에서와 같이 1차 요소에 비해 2차 요소를 사용한 경우 용접부 부근에서 응력 값의 변동폭이 큰 것을 알 수 있다. 잠열을 포함하는 열 해석에서 1차 요소가 안정된 값을 제공함을 보여준다. 그리고 2차 요소의 경우 reduced 요소를 사용하게 되면 응력 값의 변동폭이 작아지게 됨을 확인할 수 있다.<sup>(8)</sup>

Fig. 16은 각 요소를 사용할 때 관심 범위에서의 축 방향 및 원주 방향 잔류응력 값을 나타낸다. 그림에서 각 요소에서의 심벌은 최대, 최소 및 평균값을 나타낸다. 축 방향 및 원주 방향 응력 모두 1차 요소 해석 결과에 비해 2차 요소 해석 결과값이 변동폭이 더 크음을 확인할 수 있다. 반면 잔류 응력 평균값은 1차 및 2차 요소에서 축 방향으로 최대 10MPa, 원주 방향으로 최대 50MPa 정도로 큰 차이가 없었다. 따라서 용접부 잔류응력 해석 시에는 열 해석의 안정성(stability) 및 해석 시간 단축을 위해 1차 요소 사용이 바람직하다고 판단된다.<sup>(1)</sup>

### 3.2.3 응력 풀림(Annealing Effect)

용접 시 용접부는 일련의 용접 비드가 반복적으로 가열 및 냉각되며 이 때 각 비드에서는 반복하중에 의한 응력 및 변형률이 누적되게 된다. 그러나 용융 시 재료의 모든 소성 변형률 이력(plastic strain history)은 “0”이 되기 때문에 잔류응력 해석 시 응력 풀림은 반드시 고려해 주어야 하는 변수이다. 일반적으로 강(steel)의 경우 850℃ 이상의 온도에서 크립(creep)현상이 발생하게 되며<sup>(23)</sup> 이로 인해 그 이상의 온도에서는 가공 경화(work hardening)현상이 급격하게 줄어들게 된다. 따라서 본 연구에서는 850℃ 및 용융점( $T_m$ )을 응력 풀림 온도(annealing temperature)로 설정하여 응력 풀림 온도가 잔류응력 해석결과에 미치는 영향을 알아보았으며 그 결과, 영향이 미미함을 알 수 있었다. 따라서 용융점을 응력 풀림 온도로 선정하여 응력

풀림 효과를 고려하였다.

### 3.2.4 비드 수 단순화의 임계값(Critical No. of lumped bead)

용접부 잔류응력 해석 시 실제 사용된 용접비드를 해석에서 그대로 모사할 수 있지만 해석의 경제성을 위해 몇 개의 비드를 묶어서 하나의 비드로 단순화할 수 있다. (Lumped bead method)<sup>(16-18)</sup> 노즐 이중 금속 용접부는 16개의 용접비드로 구성된다. 따라서, 잔류응력 유한요소 해석에서는 6, 10 및 13개로 비드 수 단순화를 적용하였으며 추가적으로 실제 보다 많은 17개의 비드를 고려해 보았다.

Fig. 17은 각 경우에 해당하는 용접부 비드를 나타내며 괄호 안의 숫자는 용접 순서를 나타낸다. 용접 비드의 순서는 안전단에서 노즐 방향으로 일괄 적용하였다. Fig. 18은 각 경우에 해당하는 축 방향 및 원주 방향 잔류응력을 나타낸다. 그림에서와 같이 축 방향 및 원주 방향 잔류응력은 13개의 비드를 사용한 결과값에서 수렴하게 된다. 원주 방향 잔류 응력의 경우 6개 및 10개의 비드를 사용한 결과는 수렴값과 큰 차이를 가진다. 따라서 해석의 효율성을 위해 비드 수를 단순화 하더라도 실제 비드수의 70% 이상을 고려할 필요가 있다.

### 3.2.5 용접 순서(Welding Sequence)

Fig. 19는 용접 수행 시 적용할 수 있는 다양한 용접 순서를 나타낸다. 용접순서를 나타내는 괄호 안 숫자와 같이 “path 1”은 안전단에서 노즐 방향을, “path 2”는 노즐에서 안전단 방향을, “path 3”은 지그재그(zig-zag) 용접 방향을 나타낸다. 각 경우에서 용접 패스는 13개를 사용하였다. 이와 같이 가정한 용접 패스 순서에 대해 유한요소 해석을 수행한 결과 내면 잔류응력에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 본 논문에서는 “path 1”을 따라 용접을 하였다.

### 3.2.6 비선형 기하 형상(Non-linear Geometric Change)

Fig. 20은 용접부 잔류응력 해석 시 비선형 기하 형상 변화(Non-linear geometric change) 효과를 고려한 경우에 대한 결과이다. 용접부 비드는 상온에서 고온의 넓은 온도범위에서 거동하지만 전체 구조물의 변형량은 미미하므로 비선형 기하 형상을 고려하여도 결과값의 차이는 미미하였다.<sup>(8)</sup>



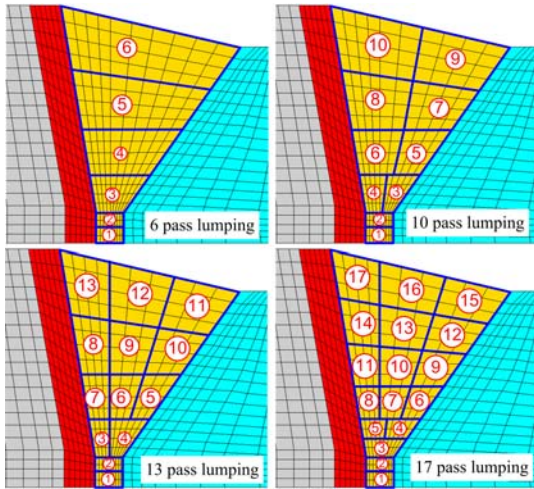


Fig. 17 Schematic diagram of lumped bead method. (a) is for 6-bead lumping model, (b) is for 10, (c) is for 13 and (d) is for 17

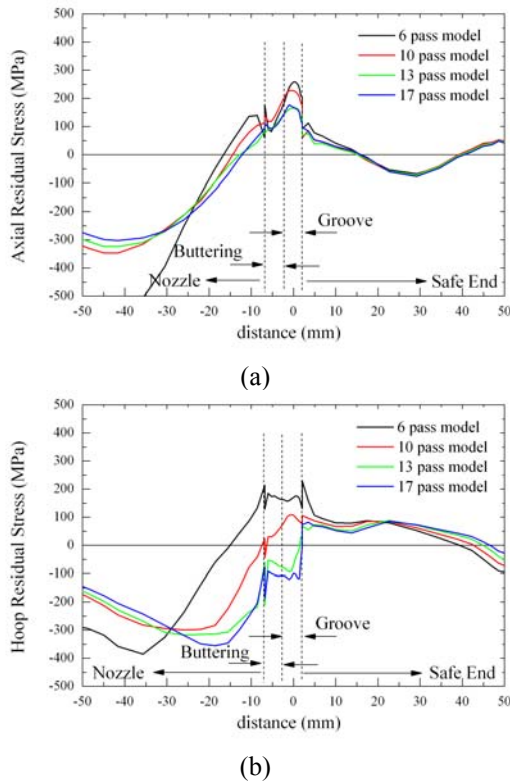


Fig. 18 Effect of No. of lumped bead on (a) axial and (b) hoop residual stress

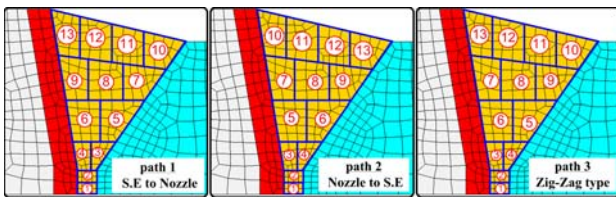


Fig. 19 Schematic diagram for various welding direction

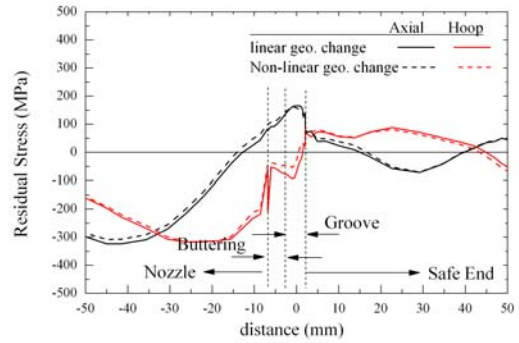


Fig. 20 Effect of geometrically non-linear change on residual stress

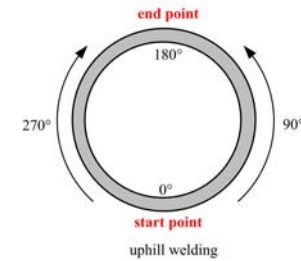


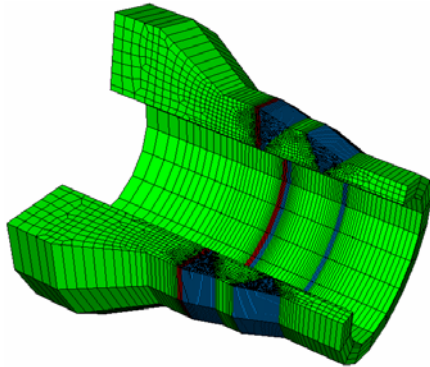
Fig. 21 Schematic diagram of up-hill process welding. Note that clock wise and anti-clock wise half circle welding was done in sequence

3.3 시작/멈춤 영향(start/stop effect)

Fig. 21은 노즐 용접에 적용된 용접 방향을 나타낸다. 용접은 노즐 아랫부분부터 상방향으로 수행하게 되며<sup>9)</sup> 이는 용접 시 발생하는 고온 균열을 피하기 위해서다. 그림과 같이 반 시계 방향으로 180°, 시계 방향으로 180°씩 반복적으로 용접을 하게 되면 용접이 시작 되는 지점(0°) 및 끝나는 지점(180°)에서는 불연속 점이 발생하게 된다. 따라서 이와 같이 시작과 끝부분에서 발생하는 불연속이 잔류응력에 미치는 영향을 알아 보기 위해 3차원 해석을 수행하였다.

Fig. 22는 3차원 해석에 사용된 유한요소 망을 보여준다. ABAQUS 에서 제시하는 “SYMMETRIC MODEL GENERATION” 옵션을 사용하였으며<sup>11)</sup> 23,000개의 노드 및 22,000개의 요소가 사용되었다.

3차원 해석에서 원주방향으로 각 층(layer)에 있는 비드를 동시에 생성시키면 2차원 축 대칭과 같은 해석 조건이 된다. 2차원 해석을 모사한 3차원 해석 및 2차원 해석 결과는 동일하여야 하며 Fig. 6에서와 같이 온도 이력이 같음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서 심별은 온도를 측정 한 지점과 같은 위치에서 계산한 온도 이력으로서 2차원 해석에 비해 실험값과 더 유사함을 확인할 수 있다.

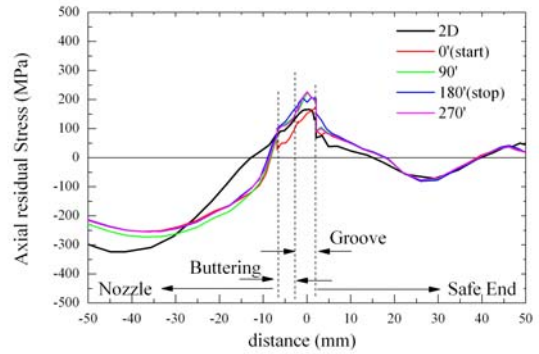


**Fig. 22** Schematic diagram of up-hill process welding. Note that clock wise and anti-clock wise half circle welding was done sequently

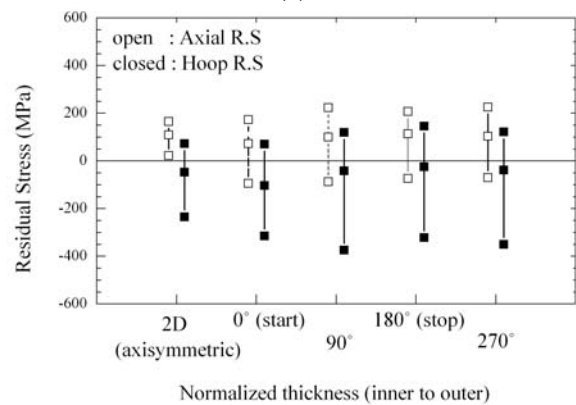
3차원 해석에서는 2차원 해석에서의 기본 조건에서와 같이 13개의 pass 를 사용하였으며 각 패스는 원주방향으로 16개의 비드(bead)로 이루어졌다. 따라서 총 208개의 비드를 순차적으로 생성시켰다. Fig. 23(a)는 3차원 해석 조건에서 얻은 노즐 내면 축 방향 잔류응력 결과이며 Fig. 23(b)는 2차원 해석 및 3차원 해석에서 관심영역에서의 축 방향 및 원주 방향 잔류응력 값이다. 3차원 해석에서의 값은 각 90°지점에 해당하는 값이다. Fig. 23(b)에서와 같이 3차원 해석에서 시작/끝 효과는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 다층 용접에서 응력 풀림 효과로 인해 불연속 효과가 사라지기 때문이며 따라서 마지막 비드에서만 불연속 영향이 남아있게 된다.<sup>(20,23)</sup> Fig. 24는 각 90° 단면에서 최종 원주 방향 잔류응력 분포 (contour)를 나타낸다. 언급한 바와 같이 최종 용접이 끝나는 180°지점에서만 불연속 효과가 남아있음을 알 수 있다. 그러나 응력 부식 균열에 대한 해석에서는 노즐 내면 잔류응력이 관심 사항이기 때문에 3차원 영향이 미미하다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 원전 가압기 안전·방출 노즐을 대상으로 유한요소 해석을 통해 용접 기인 잔류응력을 예측하였다. 용접 기인 잔류응력에 영향을 미치는 변수는 열 해석 변수, 응력 해석 변수 및 3차원 효과로 나누어 체계적으로 그 영향을 파악하였다. 그 결과 다층 용접에서 각 변수가 잔류응력 분포에 미치는 영향은 다음과 같다.

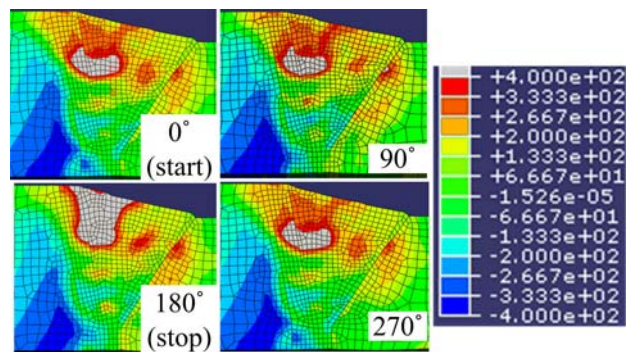


(a)



(b)

**Fig. 23** Residual stress comparison between 2 dimensional and 3 dimensional results. (a) axial residual stress distribution and (b) quantitative value within weld center  $\pm 10$ mm



**Fig. 24** Contour comparison of hoop residual stress at every 90° section

▪ ABAQUS 를 통해 해석 수행 시 용접 입열은 체적 플릭스 및 표면 플릭스를 통해 구현할 수 있다. 그러나 표면 플릭스의 영향은 미미하므로 해석의 경제성을 위해 체적 플릭스만을 통해 용접 입열을 구현할 수 있다.

▪ 용융 비드의 초기 온도에 대한 민감도 해석 결과 그 영향이 미미하게 나타났다. 따라서 본 논문에서는 임의적으로 용융점+10°C를 용융비드 초기 온도로 선정하였다.

▪ 냉각 시간이 잔류 응력 결과에 미치는 영향은 미미하지만 WPS 에서 제시하는 최대충간온도 조건을 만족하기 위해서는 실제 냉각 시간 또는 충분한 냉각 시간을 설정해 주어야 한다.

▪ 냉각 시 복사에 의한 냉각은 미미하므로 대류 조건만을 고려하여도 무방하다.

▪ 응력해석 시 경계조건은 잔류응력 해석 결과에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 안전·방출 노즐에 대한 변수 해석 결과 가접 조건 및 공장 용접 조건에 따른 잔류응력 차이는 75MPa 정도 발생하였다.

▪ 용접은 잠열 해석을 수반한다. ABAQUS 에서 1차 열해석 요소는 2차 요소에 비해 잠열 해석에 대한 정확성이 높다. 따라서 해석의 정확성 및 경제성을 위해 1차 요소 사용을 권장한다.

▪ 용접 기인 잔류응력 해석 시 해석 시간 단축을 위해 비드 수 단순화 방법을 적용하더라도 실제 비드 수의 70% 이상을 고려할 필요가 있다.

▪ 다층 용접에서는 응력 풀림 현상으로 인해 용접 순서의 영향은 미미하게 나타난다.

▪ 용접부의 변위는 크지 않다. 따라서 비선형 기하형상의 영향은 미미하였다.

▪ 시작/ 멈춤 효과는 응력 풀림 현상으로 인해 미미하게 나타난다. 따라서 응력 풀림 현상이 적용되지 않는 최종 비드에서만 시작/멈춤 효과를 확인할 수 있다. 그러나 원전 노즐에서는 노즐 내면 잔류응력이 관심사항이므로 시작/멈춤 효과는 미미하다.

이와 같은 민감도 해석 결과를 바탕으로 원전 이종 금속 다층 용접부 잔류응력에 대한 정확한 예측이 가능하다고 사료된다. 그리고 향후 수행하게 될 보수 용접(repair welding) 및 overlay 용접(weld overlay)이 용접부 잔류응력에 미치는 영향에 대한 연구에 기초 자료로 활용 가능하다고 판단된다.

## 참고문헌

(1) EPRI, 2004, "Materials Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI Report.  
 (2) 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.  
 (3) Kim, J.S., Jin, T.E., Dong, P. and Prager, M., 2003, "Development of Residual Stress Analysis Procedure for Fitness-For-Service Assessment of Welded Structure," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, pp. 713~723.  
 (4) Brust, F. W. and Scott, P., 2007, "Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) in Bimetal Nuclear," *Trans. of SMiRT 19 conference*.  
 (5) Fox, M., 1979, "An Overview of Intergranular Corrosion Cracking in BWRs," *Journal of materials in energy system*, 1:3.  
 (6) ASME, 2004, "Materials," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. II, Part D-properties."  
 (7) Special Metals Corporation, 2007, "Inconel 600 Information," [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com).  
 (8) 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.  
 (9) ASME, 2004, "Welding and Brazing Qualification," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. IX  
 (10) British Energy Generation Ltd., 2001, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," R6 Revision 4.  
 (11) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4," Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc.  
 (12) Zaem, M. A., Nami, M. R. and Kadivar, M. H., 2006, "Global Buckling Investigation in Welding of a Thin Wall Aluminum T Joint," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93106.  
 (13) Mochizuki, M., Katsuyama, J. and Toyoda, M., 2006, "Effect of Geometric and Welding Conditions on Through-Thickness Residual Stress," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93489.  
 (14) Limpus, C.R., Dijamco, D. Bax, G., Cofie, R. and Nathaniel G., 2007, "Effect of Size of Butt Weld Repaires on Weld Overlay Residual Stresses," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26636.  
 (15) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1992, "Technical Report on Material Selection and Processing Guidelines for BWR Coolant Pressure Boundary Piping-Final Report," *NUREG-0313*, Revision 2.  
 (16) Dong, P. and Brust, F. W., 2000, "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components : A Millennium Review and Beyond," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, pp. 329-338.  
 (17) Warren, A. P., Bate, S. K. and Hurrell, P., 2007, "The Effect of Modeling Simplification on the Prediction of Residual Stresses in a Multi-pass Plate Groove Weld," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26339.  
 (18) Rudland, D., Chen, Y., Zhang, T. and Wilkowski, G., 2007, "Comparison of Welding Residual Stress Solutions for Control Rod Drive Mechanism Nozzles," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26045.

- (19) Yaghi, A., Gyde, T. H., Becker, A. A., Sun, W. and Williams, J. A., 2006, "Residual Stress Simulation in Thin and Thick-walled Stainless Steel Pipe Welds Including Pipe Diameter Effects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 864-874.
- (20) Hurrell, P. R., Everett, D., Gregg, A. and Bate, S., 2006, "Review of Residual Stress Mitigation Methods for Application in Nuclear Power Plant," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93381.
- (21) Leggatt, N. A., Dennis, R. and Hurrell, P. R., 2007, "Modeling the Fabrication of a Pressure Vessel Toroidal Seal," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26145.
- (22) Dennis, R. J., Leggatt, N. A. and Gregg, A., 2006, "Optimisation of Weld Modeling Techniques – Bead on Plate Analysis," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93907.
- (23) Bate, S. K., Warren, A. P., Watson, C. T., Hurrell, P. and Francis, J. A., 2007, "UK Research Programme on Residual Stresses – Progress to Date," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26337.