

고리 원전 가압기 노즐 용접부 잔류응력 예측 시 안전단 고려가 이종 금속 용접부 잔류응력 분포에 미치는 영향

송태광* · 배홍열* · 전윤배* · 오창영* · 김윤재† · 이경수** · 박치용**
(2008년 6월 16일 접수, 2008년 7월 17일 수정, 2008년 7월 21일 심사완료)

Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End

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

Key Words : Residual Stress(잔류 응력), Dissimilar Metal Weld(이종 금속 용접), PWSCC(일차수 응력 부식 균열), Safe End(안전단)

Abstract

In nuclear power plants, ferritic low alloy steel nozzle was connected with austenitic stainless steel piping system through alloy 82/182 butt weld. Accurate estimation of residual stress for weldment is important in the sense that alloy 82/182 is susceptible to stress corrosion cracking. There are many results which predict residual stress distribution for alloy 82/182 weld between nozzle and pipe. However, nozzle and piping system usually connected through safe end which has short length. In this paper, residual stress distribution for pressurizer nozzle of Kori nuclear power plant was predicted using FE analysis, which considered safe end. As a result, existing residual stress profile was redistributed and residual stress of inner surface was decreased specially. It means that safe end should be considered to reduce conservatism when estimating the piping system.

1. 서론

최근 들어 VC Summer, Rinhals 및 Tsuruga 2 등의 원전 이종 금속 용접부(DMW, Dissimilar Metal Weld)에서 균열이 발생되었다.^(1,2) 균열의 위치는 상대적으로 운전 압력 및 운전 온도가 높은 원자로(reactor) 및 가압기(pressurizer)의 노즐 용접부로서 균열의 원인은 용접부 금속인 니켈 합금(Alloy 82/182) 재료의 일차수 응력부식균열(PWSCC)로 판명되었다. Alloy 82/182 재료는 응력 부식 균열에 민감하다고 알려져 있으며 주로 이종 금속 용접부 용접 재료로 사용되었다.

응력부식균열은 재료의 민감도, 수화학 환경 및 용접 잔류응력(welding residual stress)의 상호 작용에 의해 발생한다.⁽³⁾ 용접 수행 시 구속 조건, 국부적 가열 및

냉각으로 인한 온도 구배(gradient)로 인해 용접부에는 잔류응력이 발생하게 된다.⁽⁴⁾ 용접잔류응력은 입열량, 입열 조건, 냉각 조건, 배관 두께 및 형상 등에 따라 다양하게 나타나며 특히 균열이 발생할 수 있는 지점의 인장 잔류응력이 문제가 된다. 배관에서는 고온 및 고압의 작동 유체와 접촉하는 배관 내면에서 응력 부식 균열 위험이 더 크다.

ASME Sec.XI에서는 배관 용접부 내면 잔류응력 평가 시 두께 1" 이상의 배관에서는 축 방향 및 원주 방향으로 인장 잔류응력을 가정한다.^(1,2) 이는 경험 및 측정에 의한 보수적인 값이다. 그러나 보다 구체적으로 수행한 잔류응력 측정 및 유한요소 해석 결과를 통해 1"이상의 두꺼운 배관에서는 두께비(반경/두께)에 따라 축 방향 및 원주 방향으로 인장 또는 압축 잔류응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.^(1,5-9) 이러한 결과는 동종 금속 용접(SMW, Similar Metal Weld) 및 이종 금속 용접에서 동일하게 나타났다. 이는 동종 및 이종 금속 용접 영향을 별개적으로 평가하였을 때의 결과다.

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한전 전력연구원

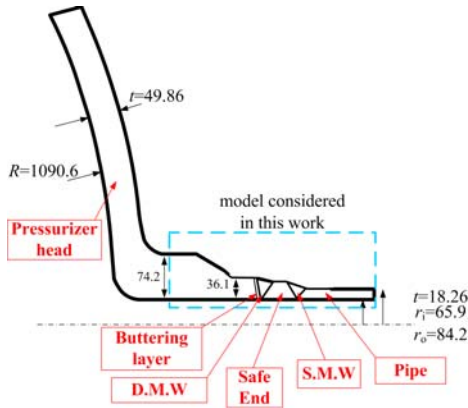


Fig. 1 Schematic illustration of a safety & relief nozzle. Each component and corresponding material is noted

그러나 고리 3호기 가압기 안전·방출 노즐은 노즐과 배관의 용접성(weldability), 현장 작업성 향상 및 노즐 끝단 보호를 위해 안전단(safe end)을 사용하였다. 그러나 안전단의 폭은 안전단 좌, 우의 이중 및 동중 금속 용접부(U-type 또는 V-type groove) 상부 폭과 비슷한 수준으로 상대적으로 짧다. 따라서 노즐/안전단 사이의 이중 금속 용접부 잔류응력은 안전단/배관 사이의 동중 금속 용접에 의해 영향을 받을 수 있다. 즉, 기존 동중 및 이중 용접부에 대한 잔류응력 결과를 안전단이 있는 노즐에 적용할 때에는 주의가 필요하다.

본 논문에서는 국내 원전에서 쓰이는 가압기 노즐을 대상으로 유한요소 용접 잔류응력 해석을 수행하였다. 노즐은 안전단을 포함하고 있으며 동중 금속 용접이 이중 금속 용접부 잔류응력에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 유한요소 잔류응력 해석

안전단을 포함한 노즐에서의 이중 금속 용접부 잔류응력 분포를 파악하기 위해 2장에서는 형상 및 유한요소 잔류응력 해석 방법에 대한 소개를, 3장에서는 안전단이 없는 노즐에 대해 수행한 잔류응력 결과 검토 및 검증, 4장에서는 안전단을 포함한 노즐 이중 금속 용접부 잔류응력 해석을 수행하였다.

2.1 형상, 재료 물성 및 용접 절차

Fig. 1은 원전 가압기 상부 안전·방출 노즐 및 각 요소(component)를 나타낸다. 노즐 및 파이프는 안전단을 통해 연결되어 있으며 노즐과 안전단 사이

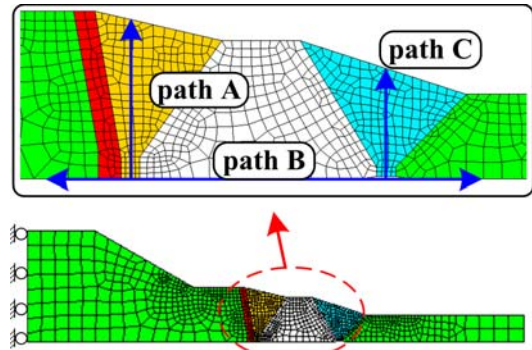


Fig. 2 Finite element mesh for safety-relief nozzle. Note that three paths and boundary conditions are indicated

의 용접성 향상을 위해 노즐에는 버터링(buttering) 용접을 하였다. Table 1에서는 각 요소에 사용된 재료를, Table 2에서는 노즐부의 형상 정보를 확인할 수 있다. 노즐 내면(inner surface) 클래드(clad)는 제작 과정에서 후열 처리(Post Weld Heat Treatment)를 겪으면서 잔류응력이 거의 사라지므로 유한요소 해석에서는 고려하지 않았다. 버터링 역시 같은 이유로 형상 및 재료 물성만을 고려하였으며 버터링 용접에 의한 잔류응력은 무시하였다.⁽¹⁰⁾

용접 수행 시 용접부는 용융점 이상의 고온에서 상온으로 냉각된다. 다중 용접(multi-pass welding)의 경우 후속 용접 비드(bead)에 의해 선행 비드 일부는 재 용융(re-melting)된다. 따라서 유한요소 해석을 위해서는 상온에서 용융점 이상의 온도 범위에 대한 열 및 기계적 재료 물성이 필요하다.

과도 열 해석(transient thermal analysis) 시에는 전도, 대류 및 복사에 의한 온도 계산을 위해 재료의 밀도(ρ , density), 열 전도 계수(k , heat conductivity), 비열(c , specific heat), 대류 열전도 계수(h , coefficient of heat conductivity) 등이 필요하다. 또한 재료의 용융점에서 상변태(phase transformation)가 발생하므로 잠열(latent heat)에 대한 정보가 필요하다.

응력 해석(mechanical stress analysis) 시에는 온도에 따른 항복강도(σ_y , yield stress), 인장강도(σ_u , ultimate tensile stress), 열 팽창 계수(coefficient of thermal expansion) 등이 필요하다.

재료 물성은 재료 제작사의 물성 자료,⁽¹¹⁾ 문헌⁽¹²⁻¹⁴⁾ 및 설계 코드⁽¹⁵⁾를 참고하였다. Table 3은 유한요소 해석에 사용된 안전단 재료(TP316L)의 온도에 따른 열 및 기계적 재료 물성을 나타내며 이와 같은 방법으로 각각의 재료 물성을 고려하였다.

Table 1 Materials corresponding to each component consider in this work, work done by Framatome and EPRI

component	Kori	Framatome	EPRI(MRP-106)
Nozzle	SA508	SA508	SA508
pipe	TP304L	TP304L	TP304
buttering/ D.M.W	Alloy 82/182	Alloy 82/182	Alloy 82/182
Safe end	TP316L	-	-
S.M.W	ER308L	-	-

Table 2 Geometries consider in this work, work done by Framatome and EPRI

	Kori (6")		Framatome (14")	EPRI (5")
	D.M.W	S.M.W	D.M.W	D.M.W
t (mm)	33	24	41	40
r_i (mm)	65.9	65.9	155.6	62.6
r_i/t	2.00	2.75	3.80	1.57

Table 4는 안전, 방출 노즐 제작 시 적용된 용접 절차 시방서(WPS, Welding Procedure Specification)을 나타낸다. 표에서와 같이 이중 금속 용접부는 16개의 패스로, 동종 금속 용접부는 11개의 패스로 구성된다.

2.2 과도 열 해석

유한요소 용접 잔류응력 해석은 열 해석 및 응력 해석을 수반한다. 용접 시 용접 구조물은 과도한 변형을 하지 않으므로 열 해석을 수행하여 시간에 따른 온도 분포를 구한 다음, 각 노드에서의 온도 분포 정보를 바탕으로 응력 해석을 수행하였다.⁽¹⁶⁾

요소는 대칭성을 바탕으로 축 대칭 2차원 요소(2 dimensional axisymmetric element)를 사용하였다. 유한요소 망(mesh)은 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 유한 요소 해석은 상용 해석 코드인 ABAQUS를 사용하였다. ABAQUS에서는 잠열을 포함하는 열 해석 시 1차 요소가 2차 요소에 비해 해석 결과의 정확성이 높으므로⁽¹⁶⁾ 열 해석 및 응력 해석 시 1차 요소를 사용하였다.

ABAQUS에서는 체적 플럭스(body flux) 및 표면 플럭스(surface flux)를 통해 입열을 구현할 수 있으며 각 용접 패스에 대한 체적 플럭스는 식 (1)을 통해 산출할 수 있다.

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

여기서 η 는 용접 효율을 나타내며 피복 아크 용접(SMAW, Shielded Metal Arc Weld)에서는 0.7, 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW, Gas Tungsten Arc Weld)에서는 0.5를 사용하였다.⁽⁵⁾ 그리고 V 는 용접 전압, I 는 용접 전류, A 는 각 비드의 단면적, v 는 용접 속도, t 는 용접 시간을 나타낸다. 용접 입열에 대한 또 다른 표현인 선 밀도 에너지(Q' , line energy)는 식 (2)와 같다.

$$Q'(MJ/m) = \frac{\eta VI}{v} \quad (2)$$

안전-방출 노즐 용접의 경우 GTAW에서는 $Q'=0.51$ MJ/m, GMAW에서는 $Q'=1.42$ MJ/m를 사용하였다.

각 용접 패스에 대한 냉각 시간은 WPS에서 제시하는 패스 간 최대 온도(Maximum Interpass temperature)를 넘지 않도록 설정하였다.⁽¹⁷⁾ 본 해석에서는 고려한 패스 간 최대 온도는 173°C이다.

냉각은 대류 및 복사 열 전달을 통해 구현하였다. 자연 대류 조건 시 $h=10$ W/m²K를 사용하였으며 복사 열전달을 고려할 시에는 식 (3) 및 (4)와 같이 복사 열 전달을 고려한 수정된 대류 열 전도 계수를 사용할 수 있다.⁽¹²⁾

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

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

그러나, 복사 열 전달을 고려한 냉각 조건 및 자연 대류만을 고려한 냉각 조건이 잔류응력 분포에 미치는 민감도 해석을 수행한 결과 그 차이가 미미하였으므로 본 연구에서는 자연 대류 조건만을 고려하였다.^(18,19)

Table 3 Material properties of TP316L used in this work. Note that liquidus temp. is 1420°C, solidus temp. is 1460°C and latent heat is 300kJ/kg

Temp. (°C)	Density (kg/m ³)	specific heat (kJ/kg°C)	heat conductivity (W/m°C)	Poisson's ratio	Thermal expansion x10-6 (mm/mm/°C)	0% proof stress (Mpa)	20% proof stress (Mpa)
20	7970	0.460	14.9	0.27	15.3	243.6	517.1
100	7940	0.505	16.3		16.2	203	467.8
200	7900	0.531	17.9		17.0	168.1	410.1
300	7860	0.545	19.4		17.6	149.4	348.5
400	7810	0.558	20.9		18.1	139.7	328.2
500	7770	0.567	22.1		18.5	129.1	285.8
600	7720	0.578	23.6		18.9	123.5	224.6
700	7680	0.587	24.9		19.3	116.5	187.3
800	7630	0.595	26.3		19.4	112.1	152.2
900	7580	0.624	26.9		19.7	70.5	86.2
1000	7540	0.639	27.5		20.0	27.2	33.3
1100	7490	0.656	28.7		20.3	13.1	15.9
1200	7440	0.671	29.8		20.6	7.89	9.4
1420	7320	0.703	32.3		21.4	2.63	3.0
2000	6500	0.703	323		21.4	2.63	3.0

Table 4 Welding Procedure Specification for safety-relief nozzle

	Pass Name (Pass No.)	Process	Filler metal	size (mm)	Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Trv. Speed (cm/min)
DMW	Buttering (1~11)	SMAW	ENiCrFe-3	φ3.2	DCRP	125	25	5~10
	Root (1~3)	GTAW	ERNiCr-3	φ2.4	DCRP	140	12	5~10
	Groove (4~16)	SMAW	ENiCrFe-3	φ3.2	DCRP	135	25	5~10
SMW	Root (1~3)	GTAW	ERNiCr-3	φ2.4	DCRP	140	12	5~10
	Groove (4~11)	SMAW	ENiCrFe-3	φ3.2	DCRP	105	27	5~10

2.3 응력 해석

다층 용접 구조물은 반복하중을 받게 된다. 반복하중을 받는 구조물은 일반적으로 바우싱거 효과(Bauchinger Effect)를 나타내며⁽²⁰⁾ 이를 고려하기 위해서는 항복면(yield surface) 이동을 고려할 수 있는 이동성 경화 모델(kinematic hardening model)을 고려해야 한다. 반면 등방성 경화 모델(isotropic hardening model)은 소성(plasticity)정도가 증가할 때 항복면 이동 없이 항복면 크기 증가만을 고려한다. 따라서 유한요소 잔류응력 해석 시

등방성 경화 모델을 사용하게 되면 잔류응력을 더 보수적으로 예측할 수 있다.^(21,22) 본 해석에서는 등방성 경화 모델을 사용하였다.

다층 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 풀림 효과(Annealing Effect)는 반드시 고려해 주어야 한다.^(4,23) 본 해석에서는 재료의 용융점을 응력 풀림 온도로 설정하였다.

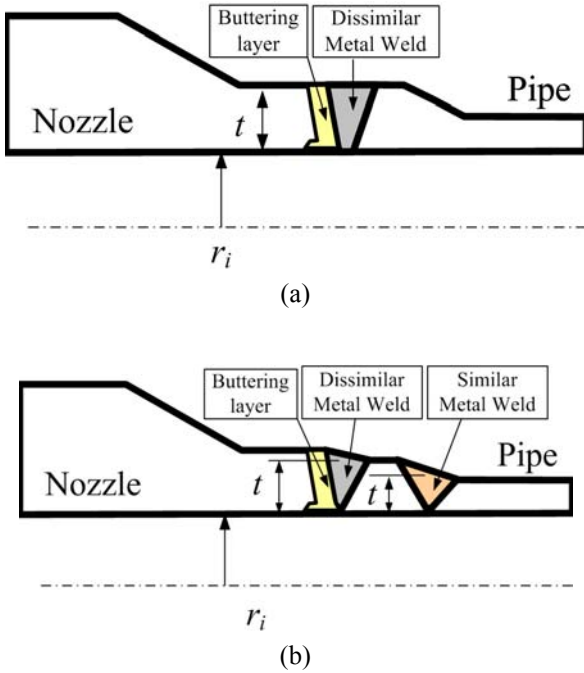


Fig. 3 Typical configuration of nozzle-pipe joint. (a) nozzle welded to pipe without safe end and (b) nozzle welded to pipe through safe end

용접 시 SA508 과 같은 저합금강(low alloy steel)에서는 750℃ 정도에서 상변태가 발생한다. 상변태 시 재료의 단위 체적은 증가하게 되며 이로 인해 인장 잔류응력은 감소하게 된다. 따라서 상변태를 고려하지 않은 유한요소 잔류응력 해석은 상변태를 고려한 해석에 비해 보수적인 결과값을 제시한다.⁽²⁴⁾ 본 논문에서는 보수적인 해석 결과 및 해석 시간 단축을 위해 상변태를 고려하지 않았다.

용접부는 상온에서 고온의 넓은 온도 범위에서 거동하지만 전체 구조물의 변형량은 미미하므로 비선형 기하 형상(Non-linear geometric effect)을 고려하여도 그렇지 않은 경우와의 차이는 미미하다.⁽¹²⁾ 본 논문에서는 비선형 기하 형상을 고려하지 않았다.

3. 안전단이 없는 노즐에 대한 잔류응력 해석

3.1 검증 대상 선정

Fig. 3은 원전에서 쓰이고 있는 노즐-파이프 연결부의 형상을 나타낸다. Fig. 3(a)는 안전단 없이 노즐과 배관이 직접 용접을 통해 연결된 노즐부를

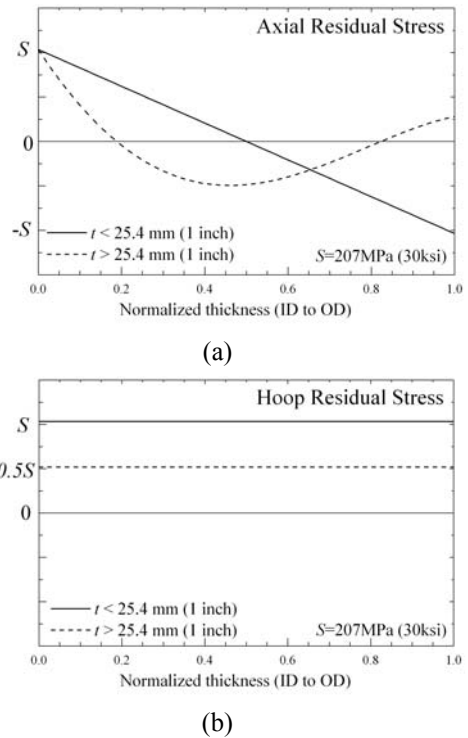


Fig. 4 Residual stress distribution for (a) axial and (b) circumferential direction proposed by ASME Sec. XI committee

나타내며 Fig. 4(b)는 노즐과 배관이 안전단을 통해 연결되어 있는 구조물로서 고리 원전 3호기 안전·방출 노즐(safety and relief nozzle)의 형상을 나타낸다. 안전단은 운송 중 노즐 끝단 보호를 위해 사용되며 국내 대부분의 원전 노즐은 안전단을 사용하고 있다. 그러나 노즐 이종 금속 용접부 잔류응력에 대한 대부분의 연구는 안전단이 없는 노즐에서 발생하는 잔류응력에 대한 결과이다.^(1,2,6,25) 따라서 안전단 없는 이종 금속 용접부 잔류응력 결과를 안전단이 있는 노즐에 적용할 때에는 주의가 필요하다.

안전단 없는 노즐에서 발생하는 용접잔류응력을 예측하기 위해 본 연구에서는 2가지 검증 대상을 선정하였다. Table 1 및 2는 Framatome에서 수행한 14" 이종 금속 용접 노즐 및 ERPI(Electric Power Research Institutes)에서 수행한 5" 이종 금속 용접 노즐에 대한 형상 및 각 구성품에 사용된 재료를 나타낸다.^(1,6)

표에서와 같이 Framatome 및 EPRI에서 사용한 노즐, 배관 및 버터링/이종 금속 용접부 재료는 각각 SA508, TP304 및 Alloy82/182로서 본 논문에서 고려한 고리 원전 노즐과 동일하다.

ASME Sec. XI 위원회에서는 오랫동안 축적된 측

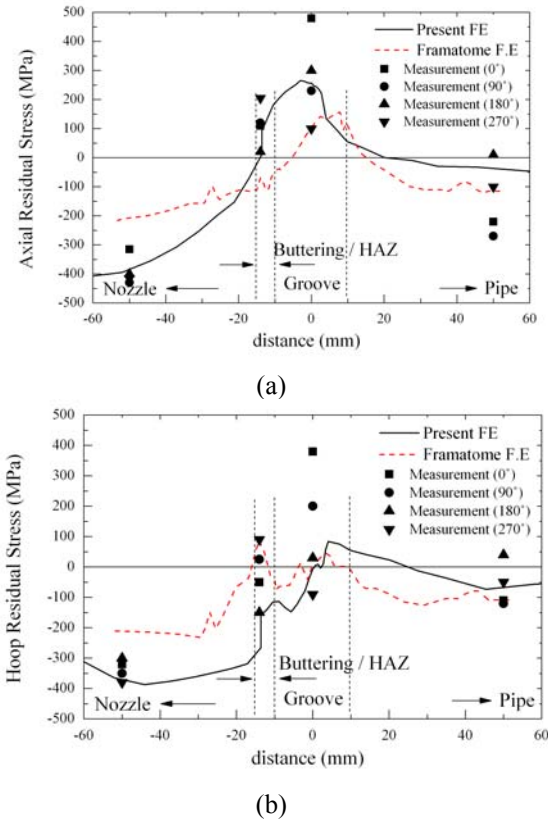


Fig. 5 Comparisons of residual stress at inner surface between the results from Framatome and present FE for 14" mock-up. (a) Axial and (b) hoop residual stress

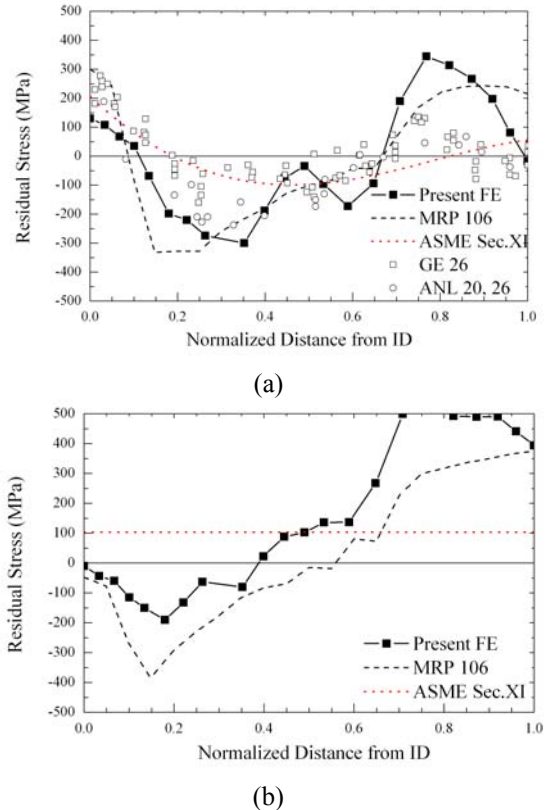


Fig. 6 Comparisons of residual stress along the wall thickness between the results from EPRI and present FE for 5" nozzle under working condition. (a) Axial and (b) hoop residual stress

정 및 해석 결과를 바탕으로 용접부 중앙에서 두께 방향에 따른 (내면에서 외면 방향) 축 방향 및 원주 방향 잔류응력을 제시하였으며 Fig. 4와 같다. 여기서 S 는 $30\text{ksi}(=6.89\text{MPa})$ 이다. 그림에서와 같이 잔류응력 분포는 얇은 배관 및 두꺼운 배관에 따라 다르며 $25.4\text{mm}(1")$ 를 기준으로 한다. 안전·방출 노즐의 경우 용접부 두께가 일정하지 않으므로 용접부 두께는 평균값을 취하였다. Fig. 4의 기준에 따른다면 고리 원전 노즐과 Framatome 및 EPRI의 해석 대상은 두꺼운 배관에 해당한다.

이상과 같이 재료 및 형상의 유사성을 바탕으로 비교 대상을 선정하였으며 3.1장에서는 Framatome, 3.2장에서는 EPRI의 연구결과를 검증하였다.

3.2 Framatome 결과 검증

Framatome은 14" 노즐 mock-up을 제작하여 HDM(Hole Drilling Method)방법을 통해 잔류응력을 측정하였으며 동시에 유한요소 잔류응력 해석을 수행하였다.⁽⁶⁾ 해석 코드는 SYSWELD를 사용하였으

며 2차원 축 대칭 모델을 고려하였다. 2개의 층으로 된 버터링 용접을 모사하였으며 버터링 용접은 20개, 홈(groove) 용접은 59개의 비드로 모델링하였다. 버터링 용접 후에는 버터링 용접 표면 일부분을 연마하였으며(grinding) 해석에서는 버터링 표면 부분 요소의 강성을 "0"으로 만들어 연마를 모사하였다. 해석 시 1차 요소를 사용하였으며 등방성 경화 모델 및 비선형 기하형상을 고려하였다. 또한 노즐 재료인 저합금강의 상변태를 고려하였다.

Fig. 5는 14" mock-up을 대상으로 Framatome에서 수행한 노즐 내면 잔류응력 해석 결과 및 측정 결과를 나타낸다. 잔류응력 측정은 90°간격으로 노즐, 열 영향부(HAZ, Heat Affected Zone), 용접부 및 배관의 단면부에서 수행되었다. 그림에서와 같이 유한요소 해석 결과 용접부에서는 축 방향으로 인장잔류응력이, 원주 방향으로 인장 및 압축 잔류응력이 남아 있음을 확인할 수 있다. 각 단면에서의 잔류응력 측정 결과는 편차가 최대 400~500MPa 정도 발생한다. 그러나 일반적으로

Table 5 Quantitative comparison for residual stress in dissimilar metal weld

	Framatome		Present FE	
	Axial	Hoop	Axial	hoop
Mean	20	-10.1	162.8	-81.1
S.D	105.7	44.5	115.5	119.9

HDM의 측정 정확도가 $\pm 70\text{MPa}$ 인 점과 원주 방향 측정 위치에 따른 영향을 감안하여 각 지점에서의 측정 평균값을 사용할 수 있으며, 그 결과 해석 및 측정값이 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 Framatome에서 고려한 mock-up과 동일한 형상 조건의 노즐을 모델링하여 유한 요소 잔류응력 해석을 수행하였다. 그러나 Framatome과 달리 ABAQUS를 통해 해석을 수행하였으며 버터링 용접은 형상 및 재료 물성만을 고려하였다. 또한 홈 용접의 경우 17개로 비드 수를 단순화 하였으며(lumped bead method)^(23,26) 상 변태는 고려하지 않았다. 이러한 해석 조건에서의 잔류응력 결과는 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

그림에서와 같이 본 연구에서 수행한 유한 요소 잔류응력 해석 결과 및 Framatome의 결과는 정성적인 분포가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 즉 노즐 및 배관에서는 축 방향 및 원주 방향으로 압축 잔류응력이 발생하며 용접부 및 버터링 부근에서는 축 방향으로 인장, 원주방향으로는 인장 또는 압축 잔류응력이 발생한다.

그러나 일차수 응력 부식 균열 관점에서는 이종 용접부 내면의 잔류응력이 관심 영역이므로 정량적인 비교를 위해서 다음과 같이 관심 영역을 선정하였다. 14" 노즐 mock-up의 경우 용접부 홈의 크기는 19.3mm이므로 이종 금속 용접부 내면 중심에서 노즐 방향으로 -20mm, 배관 방향으로 +10mm 범위를 관심 영역으로 선정하였다. 관심 범위에서 축 방향 및 원주 방향으로의 잔류응력 평균 및 표준 편차는 Table 5와 같다. 표에서와 같이 본 연구에서의 잔류응력 해석 결과는 Framatome 결과와 비교하여 축 방향으로는 140MPa 정도 높게, 원주 방향으로는 70MPa 정도 낮게 나타났다. 표준 편차는 두 경우 비슷하게 나타났다. 본 해석에서의 잔류응력 결과가 Framatome의 그것에 비해 더 크게 나타난 것은 상변태 미 고려, 입열 및 냉각 조건 설정 등의 해석 방법 차이에 기인한다고 판단된다.

3.3 EPRI 결과와 비교

EPRI에서는 5 inch 가압기 안전, 방출 노즐을

바탕으로 유한요소 잔류응력 해석을 수행하였다.⁽¹⁾ 배관의 형태는 Fig. 3(a)와 같으며 형상 및 재료는 Table 1 및 2에서 확인 가능하다. 이 밖에 EPRI는 노즐 내부 클래딩(cladding)을 고려하였다.

EPRI에서는 잔류응력 해석 시 ABAQUS를 사용하였다. 1차원 요소를 사용하였으며 재료는 탄성-완전 소성(Elastic-Perfectly Plastic)으로 가정하였다. 해석 시 노즐 끝단만을 축 방향으로 구속하였으며 파이프 끝단 구속은 설정하지 않았다. 그리고 실 운전 상태에서의 잔류응력을 예측하였으며 이때 가압기 노즐의 온도는 345°C, 내압은 15.40 MPa (2.235 ksi)이며 내압에 해당하는 인장 응력을(End cap force)를 배관 끝단에 가하였다.

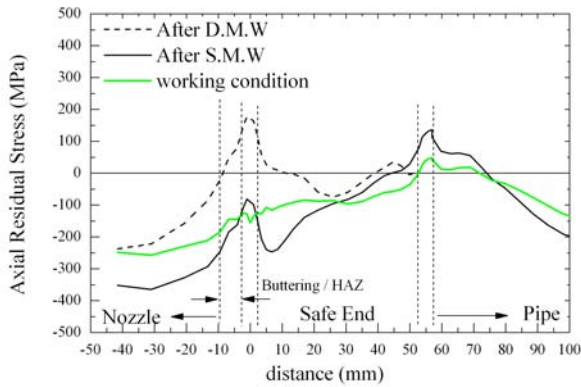
본 연구에서는 EPRI에서 수행한 5" 노즐과 같은 형상을 모델링 하였으며 ABAQUS를 통해 해석을 수행하였다. 재료는 탄성-선형 소성경화-완전 소성 재료를 사용하였다. Table 3에서와 같이 TP316L의 경우 20% 변형률까지는 소성 경화를 가지며 그 이후부터는 완전 소성 거동을 한다. 이 밖에 경계 조건 및 요소 종류등은 EPRI와 일치한다.

Fig. 6은 5" 안전, 방출 배관이 운전 상태에 있을 때 용접부 중앙에서 두께 방향으로 작용하는 잔류응력 분포를 나타낸다. Fig. 6에서는 5"노즐에 대해 수행한 본 논문에서 수행한 연구 결과, EPRI 결과 및 25.4mm 두께 이상에 적용할 수 있는 ASME Sec. XI 위원회의 제안식을 확인할 수 있다. 또한 심벌(symbol)은 현재 미국에서 사용 중인 두꺼운 배관 용접부에서 측정된 잔류응력 분포이다.⁽⁸⁾

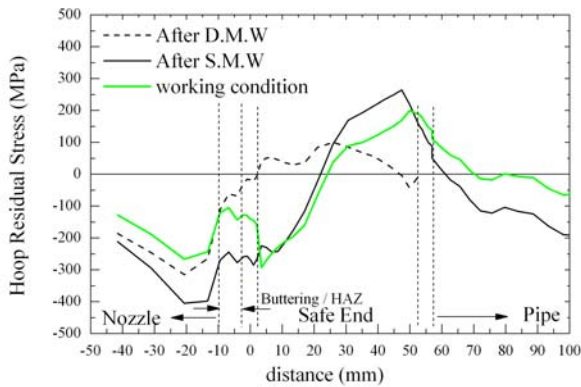
그림에서와 같이 축 방향 잔류응력의 경우 두께 방향으로 내벽 및 외벽에서는 인장, 벽 중앙에서는 압축 잔류응력이 작용하고 있다. 원주 방향 잔류응력의 경우 내벽에서는 낮은 압축 또는 "0"에 가까운 잔류응력이 발생하며 외벽으로 갈수록 인장 잔류응력이 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 본 연구 결과는 EPRI 및 기존 측정값들과 잘 일치한다.

4. 안전단을 포함한 노즐에 대한 잔류응력 해석

고리 원전 가압기 안전, 방출 노즐은 Fig. 3(b)와 같이 안전단을 사용한다. 본 연구에서 고려한 안전단은 Fig. 1, 2에서와 같이 안전단 상단 폭이 용접 두께의 0.5배 정도로써 짧다. 따라서 동종 금속



(a)



(b)

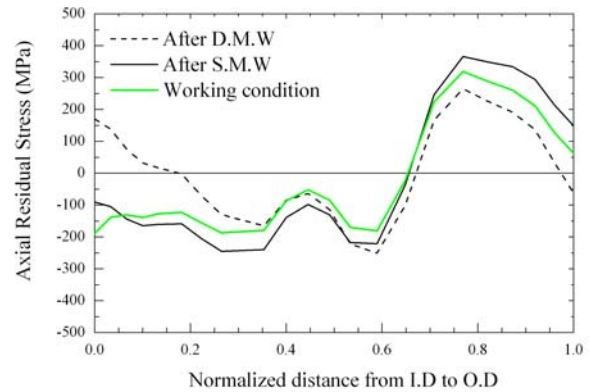
Fig. 7 Residual stress distribution at the inner surface ranged from nozzle to pipe for each condition. (a) axial and (b) hoop residual stress

용접으로 인해 기존 이중 금속 용접부에 발생한 잔류응력 평형장(equilibrium field)의 변화가 예상된다.

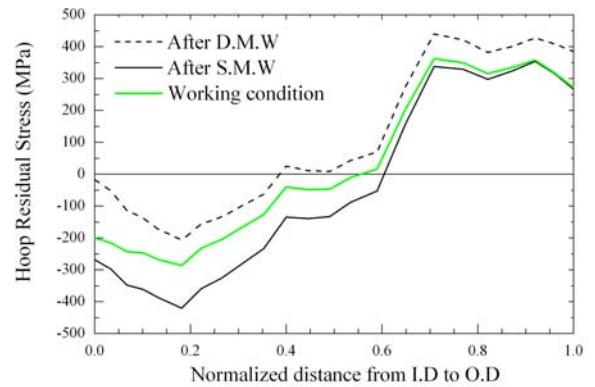
노즐-안전단 접합부는 공장용접(shop weld) 되며 안전단-배관 연결부는 현장 용접(field weld)된다. 따라서 이중 금속 용접부 해석 시 노즐과 안전단은 양 끝단을 구속한 상태로 용접하게 되며 용접이 끝나면 구속 조건을 해제하게 된다. 그리고 동종 금속 용접부 해석 시 안전단 끝단을 축 방향으로 구속하고(roller) 배관 끝단은 자유로운 상태에서 용접 해석을 수행하게 된다.

동종 금속 용접이 끝나면 가압기 온도 및 압력 조건을 모사하여 운전 상태에서의 잔류응력 분포를 확인하였다.

Fig. 7은 이중 금속 용접 및 동종 금속 용접이 완료 되었을 때와 운전 조건일 때 노즐 내면에 발생하는 잔류응력을 나타낸다. Fig. 8은 Fig. 7과 같은 경우에서 이중 금속 용접부의 중앙에서 두께



(a)



(b)

Fig. 8 Residual stress distribution along the wall thickness of dissimilar metal weld. (a) axial and (b) hoop residual stress

방향으로의 잔류응력 분포를 나타낸다.

Fig. 7에서와 같이 이중 금속 용접이 끝나게 되면 이중 금속 용접부에는 축 방향으로 인장 잔류응력이, 원주 방향으로는 '0'에 가까운 잔류응력이 발생한다. 이러한 결과는 앞서 검토한 Framatome 및 EPRI 결과와 일치한다.

동종 금속 용접 시 입력된 에너지는 안전단 및 이중금속 용접부에 전도되며 이로 인해 기존 이중 금속 용접부 및 안전단의 응력 평형장은 새로운 평형조건을 찾게 된다. 그 결과 안전단 및 이중 금속 용접부는 최종적으로 Fig. 7 및 8과 같은 잔류응력 분포를 가진다.

그림에서와 같이 동종 용접을 수행하게 되면 동종 금속 용접부에는 축 방향 및 원주 방향으로 인장 잔류응력이 남게 된다. 반면 이중 금속 용접부 내면의 잔류응력은 축 방향 및 원주 방향 모두 압축 잔류응력으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 8에서와 같이 이중 금속 용접부의 두께

방향 잔류응력은 내면 외에는 큰 변화가 없었다.

운전 조건 모사 시 배관 끝단에는 내압에 해당하는 인장 응력을 가해 주었다. 내압 및 인장 응력으로 인해 노즐에 작용하는 잔류응력은 전반적으로 증가하였으나 증가량은 미세하다. 안전, 방출 노즐은 Table 2에서와 같이 두께 비가 낮은 1차측 요소(primary loop component)이기 때문에 내압의 영향이 미미하게 나타나기 때문이다.⁽²⁷⁾

5. 결론

본 논문에서는 고리 원전 3호기 가압기 안전 방출 노즐에 대한 용접잔류응력 해석을 수행하였다. 노즐 및 배관은 폭이 짧은 안전단을 통해 연결된다. 따라서 노즐/안전단 사이의 이중 금속 용접부 잔류응력 분포는 안전단/배관 사이의 동종 금속 용접에 의한 영향을 받게 된다.

이와 같은 영향을 파악하기 위해 안전단이 없는 노즐에 대한 잔류응력 해석을 우선적으로 수행하였다. Framatome 및 EPRI 에서 유한요소 해석을 수행한 14" 및 5" 노즐을 대상으로 선정하였으며 기존 연구 결과와 잘 일치하였다. 즉, 안전단이 없는 노즐의 경우 용접 부 내면은 축 방향으로 인장 잔류응력이, 원주 방향으로는 '0'에 가까운 인장 또는 압축 잔류응력이 발생한다.

안전단이 있는 노즐에 대한 용접잔류응력 결과는 다음과 같다.

(1) 안전단/배관 사이의 동종 금속 용접을 수행하게 되면 이중 금속 용접부 내면에는 축 방향 및 원주 방향으로 압축 잔류응력이 부가되어 최종적으로 압축 잔류 응력이 발생한다.

(2) 동종 금속 용접이 미치는 영향은 이중 금속 용접부 내면 잔류응력에 한정된다. 즉, 내면을 제외한 두께 방향으로의 잔류응력 변화량은 미미하다.

(3) 원전 PWSCC 는 용접부 내면에서 발생한다. 따라서 용접부 균열 및 피로 수명 평가 시 내면 잔류응력 분포는 평가 결과에 큰 영향을 미친다. 이와 같은 이유로 짧은 안전단을 포함한 노즐 용접부에서 안전단을 고려하지 않으면 보수적인 평가를 야기할 수 있다.

(4) 동종 금속 용접부 내면에는 축 방향 및 원주 방향으로 인장 잔류응력이 남는다. 그러나 동종 금속 용접 재료는 PWSCC 에 민감하지 않으므로 인장 잔류응력만으로 PWSCC 가 발생하기 힘들다. 따라서 동종 금속 용접부에서의 인장 잔류응력은 PWSCC 관점에서 중요하지 않다.

이와 같은 결과는 향후 수행될 용접부 균열에 대한 수명 평가 및 파괴역학 평가에서 정확한 입력 자료가 될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- (1) EPRI, 2004, "Materials Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), *EPRI Report*
- (2) Moffat, G., Bamford, W. H., Seeger, D., 2001, "Development of the Technical Basis for Plant Startup for the V.C Summer Nuclear Plant," *Trans. of ASME PVP conference, PVP-Vol. 427*, pp. 33~39
- (3) Fox, M., 1979, "An Overview of Intergranular Corrosion Cracking in BWRs," *Journal of materials in energy system*, 1:3
- (4) Kim, J.S, Jin, T.E., Dong, P., Prager, M., 2003, "Development of Residual Stress Analysis Procedure for Fitness-For-Service Assessment of Welded Structure," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 27, pp.713~723
- (5) Yaghi, A., Gyde, T. H., Becker, A. A., Sun, W., 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
- (6) Courtin, S., Gilles, P., 2006, "Detailed Simulation of an Overlay Repair on a 14" Dissimilar Material Weld," *Trans. of ASME PVP Conference, PVP2006-ICPVT-11-93823*
- (7) British Energy Generation Ltd., 2006, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *R6*, Revision 4
- (8) 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
- (9) Limpus, C.R., Dijamco, D. G., Bax R, Cofie, Nathaniel G., , 2007, "Effect of Size of Butt Weld Repaires on Weld Overlay Residual Stresses," *Trans. of ASME PVP conference, PVP2007-26636*
- (10) Brust, F. W., 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*
- (11) Special Metals Corporation, 2007, "Inconel 600 Information," www.specialmetals.com
- (12) Brickstad, B., 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
- (13) Dong, P., 2001, "Residual Stress Analyses of a Multi-Pass Girth Weld: 3-D Special Shell Versus Axisymmetric Models," *ASME Journal of Pressure*

- Vessel Technology*, Vol. 123, pp. 207~213
- (14) Elocate, C.D., Dennis, R.J., Bouchard, P.J., Smith, M.C., 2005, "Three Dimensional Multi-Pass Repair Weld Simulations," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, pp. 244~257
- (15) ASME, 2004, "Materials," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. II, Part D-properties"
- (16) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4," Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc.
- (17) ASME, 2004, "Welding and Brazing Qualification," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. IX
- (18) Song, T.K., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S., Park, C.Y., 2008, "Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Welding," *Submitted to Transactions of the KSME(A)*
- (19) KEPRI, 2008, "A FEM Analysis Guideline for Residual Stress in Dissimilar Metal Welds," *KEPRI report*
- (20) Dawling, N. E., 1999, "Mechanical Behavior of Materials," *Prentice Hall*, 2nd edition
- (21) Leggatt, N. A., Dennis, R., 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., Gregg, A., 2006, "Optimisation of Weld Modeling Techniques – Bead on Plate Analysis," *Trans. of ASME PVP Conference*, PVP2006-ICPVT-11-93907
- (23) Dong, P., 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
- (24) Bate, S. K., Warren, A. P., Watson, C. T., Hurrell, P., Francis, J. A., 2007, "UK Research Programme on Residual Stresses – Progress to Date," *Trans. of ASME PVP Conference*, PVP2007-26337
- (25) Brust, F. W., Scott, P., 2007, "Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) in Bimetal Nuclear," *Trans. of SMiRT 19 conference*, PVP-Vol. 427, pp. 33-39SMiRT 19
- (26) Warren, A. P., Bate, S. K., 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
- (27) Hurrell, P. R., Everett, D., Gregg, A., Bate, S., 2006, "Review of Residual Stress Mitigation Methods for Application in Nuclear Power Plant," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93381.