

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.10.873

예방 용접 Overlay 가 원전 가압기 이종금속용접부 잔류응력 완화에 미치는 영향

송태광* · 배홍열* · 전윤배* · 오창영* · 김윤재† · 이경수** · 박치용**
(2008년 8월 1일 접수, 2008년 9월 4일 수정, 2008년 9월 5일 심사완료)

Effect of Preemptive Weld Overlay on Residual Stress Mitigation for Dissimilar Metal Weld of Nuclear Power Plant Pressurizer

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

Key Words : Preemptive Weld Overlay (예방 용접 오버레이), PWSCC(일차수 응력부식균열), Welding Residual Stress(용접잔류응력), Dissimilar Metal Weld(이종금속용접)

Abstract

Weld overlay is one of the residual stress mitigation methods which arrest crack initiation and crack growth. Therefore weld overlay can be applied to the region where cracking is likely to be. An overlay weld used in this manner is termed a preemptive weld overlay(PWOL). In pressurized water reactor(PWR) dissimilar metal weld is susceptible region for primary water stress corrosion cracking(PWSCC). In order to examine the effect of PWOL on residual stress mitigation, PWOL was applied to a specific dissimilar metal weld of Kori nuclear power plant by finite element analysis method. As a result, strong compressive residual stress was made in PWSCC susceptible region and PWOL was proved effective preemptive repair method for weldment.

약어

PWR : Pressurized Water Reactor(가압수형 경수로)
 BWR : Boiling Water Reactor(비등수형 경수로)
 PWOL : Preemptive Weld Overlay(예방 용접 Overlay)
 PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking
 (일차수 응력부식균열)
 IGSCC : Inter-Granular Stress Corrosion Cracking
 (입계부식균열)
 DMW : Dissimilar Metal Weld(이종금속용접)
 SMW : Similar Metal Weld(동종금속용접)
 PWHT : Post Weld Heat Treatment(용접후열처리)
 IHSI : Induction Heating Stress Improvement
 (고주파 가열 잔류응력 개선)
 MSIP : Mechanical Stress Improvement
 (기계적 응력개선)

WPS : Welding Procedure Specification
 (용접절차규격서)
 HAZ : Heat Affected Zone (열영향부)

1. 서론

최근 V.C Summer, Ringhals 및 Tsuruga 2 등의 PWR 이종금속용접부(DMW)에서 PWSCC 로 판명되는 균열이 발생하였다.⁽¹⁻³⁾ PWSCC 는 재료의 민감도, 인장하중, 수화학 환경의 3 가지 조건이 동시에 만족될 때 발생하며 한 가지 조건이라도 만족되지 않으면 발생하지 않는다.^(4,5) 이종금속용접부 재료로 쓰이는 Alloy 82/182 용접 재료는 PWSCC 에 민감하며 DMW 내면에서는 인장 용접 잔류응력이 발생하기 쉽다. 또한 용접부 내면은 수화학 환경에 있으므로 균열 발생 잠재 가능성이 높다. 따라서 용접잔류응력 개선을 통해 이종금속용접부에서의 PWSCC 발생을 예방할 수 있으며 본 연구에서는 용접 overlay 가 잔류응력 완화에

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 한전 전력연구원

미치는 영향을 파악하였다.

잔류응력 완화 방법으로는 PWHT, IHSI, MSIP, pipelock, shot peening, 정수압 실험(hydro-static proof test), 용접 overlay 방법 등이 있으며 각 방법에 대한 간단한 설명은 다음과 같다.

PWHT는 600~700°C의 고온 처리를 통해 재료의 야금학적 물성을 개선하고 크리프(creep) 특성을 통해 잔류응력을 완화시키는 방법이다.^(6,7) 그러나 PWHT는 재료의 두께 및 종류에 따라 PWHT 온도 및 시간이 다르기 때문에 이중금속용접에서는 서로 다른 PWHT 조건에 대한 절충 및 오스테나이트계 스테인레스 강의 예민화(sensitization)로 인해 적용에 주의가 필요하다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

MSIP, pipe lock은 기계적으로 용접부에 압축 잔류응력을 가해주는 방법이며⁽¹¹⁾ IHSI는 배관 외면에 고주파를 가하여 내·외면의 온도 구배를 통해 배관 내면에 압축 잔류응력을 부가하는 방법이다.⁽¹²⁾ 그러나 IHSI, MSIP는 균열 크기가 작을 때 효과적이나 균열이 깊은 경우 균열 끝단이 인장 잔류응력 영역에 있으므로 오히려 균열 성장을 촉진시킬 위험이 있다.⁽¹³⁾

Shot peening은 표면 잔류응력 완화에 도움이 되나 열처리에 비해 잔류응력 완화 유효 두께가 얇다.^(14,15) 또한 과도한 shot peening은 표면 경화 유발로 인해 재료의 연성을 감소시킬 수 있다.

정수압 테스트는 설계압의 1.25 배의 압력을 가해줌으로써 잔류응력 및 기계하중의 상호작용에 의해 잔류응력을 완화하는 방법이다.^(9,29) 그러나 원전 1 차측 배관의 경우 통상 두께비(내면 반지름/공칭 두께)가 6 이하이므로 정수압 실험을 하여도 1 차응력이 크지 않아 잔류응력 완화에 미치는 영향은 미미하다.⁽¹⁵⁾

용접 overlay 방법은 BWR에서 문제가 되었던 오스테나이트계 스테인레스 강 배관에서 발생하는 IGSCC 문제를 해결하기 위해 1982년 미국 원전에 처음 적용된 이후 장기 보수 방법으로 승인을 받았다.⁽¹⁶⁾ PWR에는 1993년 최초로 적용되었으며 PWSCC 잠재가능성으로 인해 현재 확대 적용 추세에 있다. 균열 성장 및 발생을 저지하는 효과가 있는 WOL의 장점은 다음과 같다.⁽¹⁷⁾

- 두께 보강을 통한 기계적 강성 보강
- PWSCC에 대한 민감도 낮은 재료(Alloy 52/152)를 사용하여 노즐 완전 관통 균열 시 PWSCC에 의한 추가 균열 진전 억제 효과
- 용접 내면에 압축 잔류응력을 야기하여 균열 성장 및 발생 억제.

BWR에서 수행한 용접 overlay는 배관-배관 용접부를 대상으로 하기 때문에 형상이 비교적 표준화되어 있어 각각의 용접부에 대한 개별적인 추가 해석이 필요하지 않다. 반면 노즐-안전단 사이의 이중금속용접부는 구경 및 두께가 노즐에 따라 다르며 그 형상 또한 발전소마다 다르다. 그리고 통상적으로 이중금속용접부는 동종금속용접부와 인접해 있어 동종금속용접부로 인해 기존 이중금속용접부의 잔류응력 분포 양상이 바뀔 수 있다.⁽¹⁸⁾ 이러한 이유로 PWR에서 용접 overlay의 영향을 파악하기 위해서는 관심 대상에 대한 개별적 해석이 필요하다.⁽¹⁹⁾

따라서 본 논문에서는 PWR에서 용접 overlay가 잔류응력 완화에 미치는 영향을 예측하기 위해 고리 원전 가압기 안전·방출 노즐을 대상으로 가상적으로 용접 overlay를 수행하였다. 그리고 노즐 용접부는 균열이 발생하지 않았으므로 예방용접 overlay라 할 수 있다.

2. 형상 및 재료 물성

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 안전·방출 노즐 형상을 나타낸다. 저합금강(low alloy steel)의 노즐은 안전단을 통해 배관계통과 연결되면 안전단 및 배관은 스테인레스 강이다. 노즐/안전단 사이의 이중금속용접부는 Alloy 82/182 용접재료로 용접되며 안전단/배관 사이의 동종금속용접부는 ER308L 용접재료가 쓰인다. Table 1에서는 노즐 각 부분의 치수를 확인할 수 있다.

용접은 용융 및 응고를 포함하므로 용접잔류응력 해석 시 온도에 따른 기계적, 물리적 재료 물성이 필요하다. 여기에는 밀도, 비열, 잠열, 열전도계수, 항복강도 및 열팽창계수 등이 있다. Table 2는 안전단 재료인 TP316L의 온도에 따른 재료 물성을 나타낸다. 이와 같은 방법으로 노즐, 배관 및 용접부의 재료물성이 고려되었다. 열전도 계수의 경우 용융점 이상에서 복사 및 대류 열전달 등이 활발하므로 이를 고려하기 위해 용융점 이상에서 인위적으로 10 배에 해당하는 값을 사용하였다.^(20,21)

Alloy 82/182 및 용접 overlay 재료인 Alloy 52/152 재료 물성은 기계적, 물리적 특성이 거의 유사한 Alloy 600 재료 물성으로 대체하였다. 또한 동종 용접재(ER308L)의 재료 물성은 TP304 재료 물성으로 대체하였다. 재료 물성은 문헌, 설계 코드 및 재료 제작사의 실험값 등을 통해 획득할 수 있었다.⁽²⁰⁻²⁴⁾

Table 1 Dimensions for nozzle (unit : mm)

r_i	65.9
t_{pipe}	18.3
t_{DMW}	33
t_{SMW}	24
$W_{T,SE}$	16.8
$W_{B,SE}$	54.3

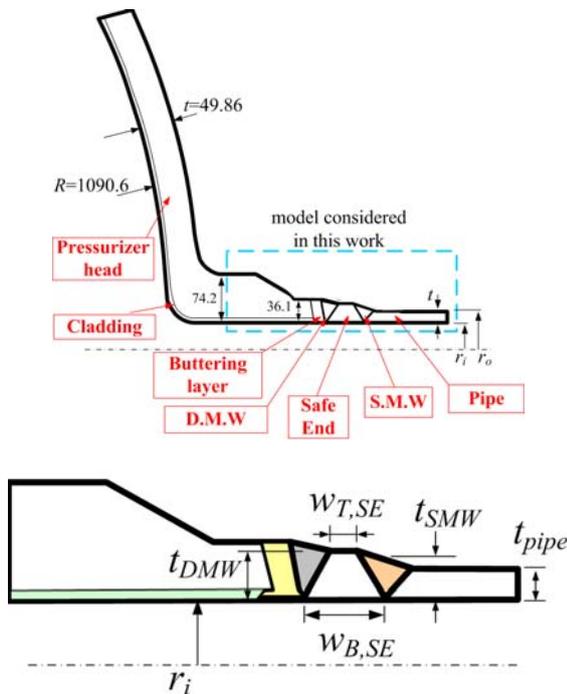
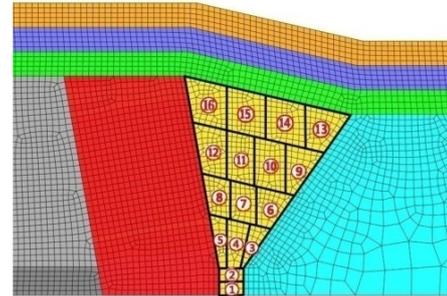


Fig. 1 Geometry of safety relief nozzle considered in this paper

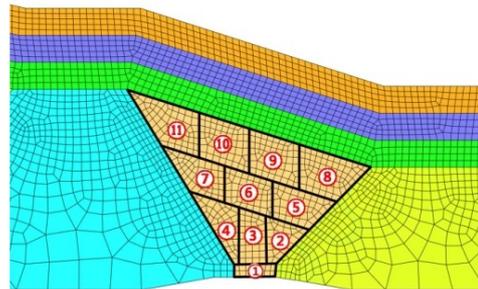
3. 해석 개요

유한요소 해석 시 일련의 비드는 ABAQUS 에서 제공하는 요소 재 생성 기술(model change option) 을 통해 구현하였다.⁽²⁵⁾ 잠열을 포함하는 열 해석에 정확한 1 차 요소를 사용하였으며 체적 플럭스를 통해 입열을 가하였다. 입열 시간 및 입열량은 WPS 를 통해 산출하였다. 냉각 시간은 최대층간 온도(Maximum inter-pass temperature)인 170°C를 넘지 않게 설정하였으며 자연 대류 조건($h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$)을 사용하였다.

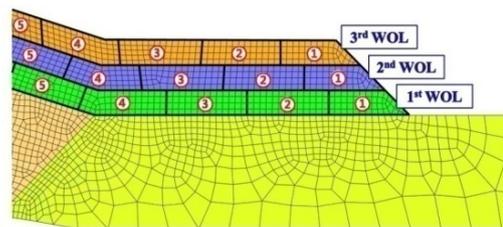
응력 해석 시 재 용융에 따른 응력풀림효과



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 FE meshes for each weld. (a) dissimilar metal weld, (b) similar metal weld and (c) overlay weld

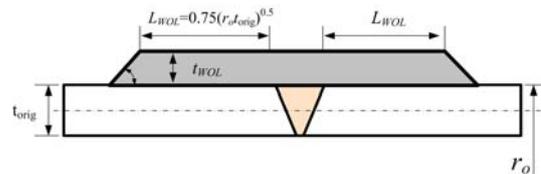


Fig. 3 Schematic illustration of weld overlay

(Annealing effect)는 ABAQUS 에서 제공하는 “Anneal Temperature” 옵션을 통해 구현하였다. 그리고 용접 해석 시 변형량이 크지 않으므로 비선형 기하형상은 고려하지 않았다.^(21,26)

재료 거동은 증분소성이론(Incremental plasticity theory)을 따르며 바우싱거효과(Bauchinger’s effect)를 고려하기 위해 비선형 이동성 경화 모델(non-linear kinematic hardening model)을 사용하였다.^(21,27)

용접 해석은 실제 노즐 제작 순서에 따라 노즐/안전단 사이의 이중금속용접, 안전단/배관 사이의 동종 금속용접, 정수압 실험 및 사용 중 배관에 대한 가상적 용접 overlay 순서로 수행하였으며 각 단계에 대한 구체적 내용은 3.1~3.4 에서 확인할 수 있다.

Table 2 Material properties of TP316L used in this work. Note that solidus temperature is 1420°C, liquidus temperature is 1460°C and latent heat 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 3 Welding procedure specification for safety-relief nozzle

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

3.1 이중금속용접 모사

노즐 및 안전단은 공장 용접(shop weld)이 적용된다. 따라서 용접 해석 시 노즐 끝단 및 안전단을 고정된 채 용접 해석을 수행하며 용접이 끝난 후 자유 조건으로 경계조건을 변경하였다. 버터링(buttering) 및 클래딩(cladding) 용접은 통상 후열처리를 수행하므로 잔류응력이 없다고 가정하였다.⁽²⁸⁾ 따라서 형상 및 재료 물성만을 고려하였다.

해석은 WPS 조건을 준수하였으며 Table 3은 안전.방출 노즐 제작에 사용된 WPS를 나타낸다. 각 비드 적층 순서 및 해당하는 유한요소 망은 Fig. 2(a)에서 확인할 수 있다. 그림에서 원안의 숫자는 적층 순서를 나타낸다.

3.2 동종금속용접 모사

안전단 및 배관은 현장 용접(field weld)조건에서 수행된다. 용접 해석 시 노즐 끝단에만 롤러(roller)조건을 주어 원주 방향의 변위만 허용하였으며 배관 끝단에는 자유경계조건을 주었다. 즉, 이웃하는 배관 계통에서의 반력은 고려하지 않았다. 이러한 반력은 발전소에 따라 다르며 같은 형상이라도 구속조건에 따라 달라진다. 그리고 반력은 별개로 구하여 중첩 원리를 통해 고려할 수 있기 때문에 배관 끝단에 자유 경계 조건을 주었다.⁽¹⁾

동종금속용접부는 11개의 비드로 구성되며 비드 적층 순서 및 그에 따른 유한요소 망은 Fig. 2(b)와 같다. 동종금속용접에 대한 열 해석 및 응력 해석 방법은 이중금속용접에서와 동일하다.

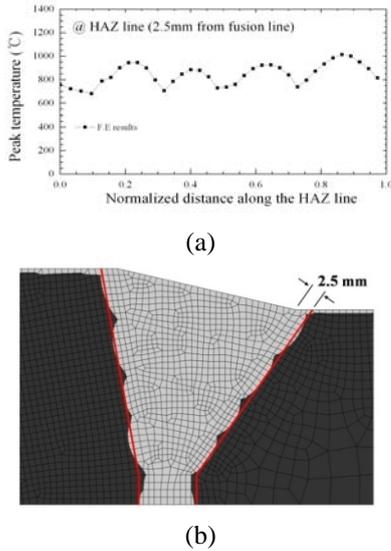


Fig. 4 (a) Peak temperature distribution along the HAZ line and (b) FE contour of peak temperature for DMW

3.3 정수압 실험 모사

정수압 실험(hydro static proof test)은 배관 누수 탐지 및 균열 끝단 둔화를 위해 수행하며 1 차측 배관의 경우 설계 압력의 1.25 배의 수압을 가한다.^(9,29) 고리 원전의 운전압력은 15.4MPa(2.235 ksi), 설계압력은 17.2MPa(2.485 ksi)이며 정수압 실험압력은 21.5MPa(3.107 ksi)이다. 정수압 실험 모사 시 배관 말단에는 내압에 의한 인장 하중(end-cap force)를 가하였다.

3.4 용접 overlay 모사

용접 overlay 는 자동화된 가스텅스텐아크용접(GTAW)을 통해 수행하며 통상 배관 내부에 물이 있는 조건에서 수행한다.⁽¹⁷⁾ 용접 overlay 수행 시 배관의 두께 방향 온도 구배(gradient)가 클수록 내면 잔류응력 개선 효과가 크기 때문이다.⁽¹⁷⁾ 그러나 본 연구에서는 용접 overlay 효과를 보수적으로 제시하기 위해 배관 내면이 물이 아닌 공기 조건에서 용접 overlay 를 수행하였다. Fig. 2(c)는 용접 overlay 에 대한 유한요소 망 및 적층순서를 나타낸다. 용접 overlay 는 배관에서 노즐 방향으로 적용하였으며 용접 overlay 의 두께 및 길이 설정은 3.4.1 및 3.4.2 와 같다.

3.4.1 용접 overlay 의 두께 설정

용접 overlay 의 두께는 ASME Sec. XI 의 IBW-3640 조건을 만족하도록 설정할 수 있다.⁽³⁰⁾ IBW-3640 에서는 파이프 벽 두께의 75%이하 균열을 허용하고 있으며 이러한 조건을 적용하여 구한 용

접 overlay 의 두께는 Eq. (1)~(3)과 같다.

$$crack\ depth / (t_{orig} + t_{WOL}) \leq 0.75 \quad (1)$$

$$t_{orig} / (t_{orig} + t_{WOL}) \leq 0.75 \quad (2)$$

$$t_{WOL} \geq t_{orig} / 3 \quad (3)$$

여기서 t_{orig} 는 용접부 두께이며 노즐의 경우 일반적으로 용접부가 경사져있으므로 이중금속용접부 평균두께를 사용하였다. t_{WOL} 은 용접 overlay 의 두께이며 Fig. 3 에서 확인할 수 있다. Eq. (1)~(3)은 용접부가 360°C완전 관통균열이 되었다는 극단적인 가정하에서 코드 조건을 만족하는 용접 overlay 의 두께로서 용접부 균열 발생 시 용접 overlay 의 두께를 배관 두께의 1/3 이상의 두께로 사용하도록 권장한다. 그러나 예방 용접 overlay 에서는 벽 두께의 10%이상인 균열이 없는 상태에서 예방차원으로 수행하는 방법이므로 용접 overlay 없이도 자동적으로 IBW-3640 조건을 만족한다. 따라서 예방 용접 overlay 에서는 잔류응력 완화관점에서 두께를 설정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 Eq. (3)으로 구한 용접 overlay 두께를 3 개의 층으로 모사하였으며 그 결과 예방 용접 overlay 의 최적 두께를 찾을 수 있었다.

3.4.2 용접 overlay 의 길이 설정

축 방향 균일 하중을 받는 배관에서 균열 등에 의한 국부 응력 집중이 충분히 사라지기 위한 거리는 $0.75\sqrt{r_o t_{orig}}$ 로 알려져 있다.⁽³¹⁾ 따라서 용접부 균열을 가정하면 용접 overlay 의 길이는 용접부 폭 및 $1.5\sqrt{r_o t_{orig}}$ 를 합한 길이가 된다. 용접 overlay 의 길이는 Fig. 3 에서 확인할 수 있으며 그림에서 r_o 은 배관 외경을 나타낸다.

3.5 유한요소 해석 결과 검증

용접잔류응력에 대한 유한요소 해석은 열 해석 및 응력 해석과 관련된 많은 변수를 포함하므로 해석 결과에 대한 검증이 중요하다.

Bricstad 등은 용융선(fusion line)으로부터 2~3mm 지점에서 용접 중 800~900°C 의 최고 온도를 나타낸다고 하였으며 이 지점을 HAZ(열영향부)로 정의하였다.⁽²¹⁾ Fig. 4(a)는 이중금속용접부 해석 시 용융선으로부터 2.5mm 위치에서 온도 분포를 나타내며 Fig. 4(b)에서 용융선을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 이중금속용접부 해석 시 ABAQUS 에서 제공하는 “UVARM” 기능을 통해 용접시간 동안 각 지점에서의 최고 온도를 나타낸 그림으로서 밝은

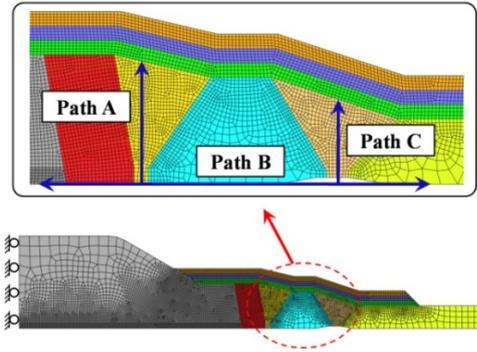


Fig. 5 Three paths for indexing residual stress of interest

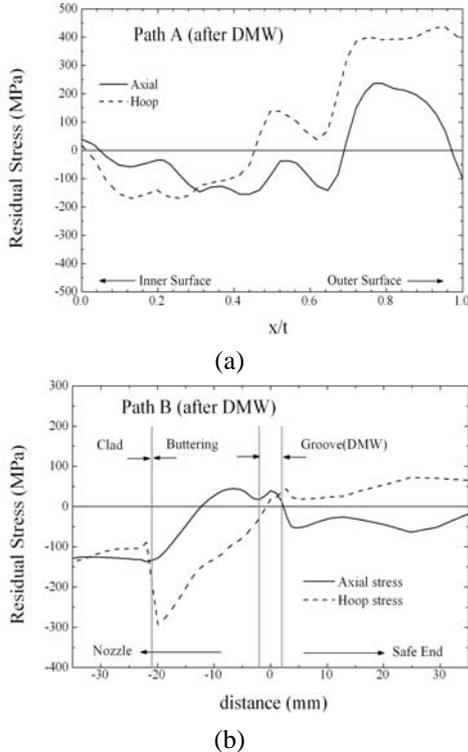


Fig. 6 Residual stress distribution along the (a) path A and (b) path B after dissimilar metal weld

부분은 용접 중 900℃ 이상을 한 번이라도 겪은 영역이며 어두운 부분은 900℃를 넘은 적이 없는 영역이다. Fig. 4(a) 및 (b)에서와 같이 열 해석 결과는 Brickstad 등이 제시한 일열 조건을 준수하였다.

이 밖에 응력해석은 기존 보고서 및 논문 결과를 통해 검증하였다.^(32,33) 대부분의 기존 연구 결과는 안전단 없이 노즐 및 배관이 이중금속용접으로 연결되어 있으므로 같은 형상을 모사하여 잔류응력해석을 수행하였으며 그 결과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.⁽¹⁸⁾

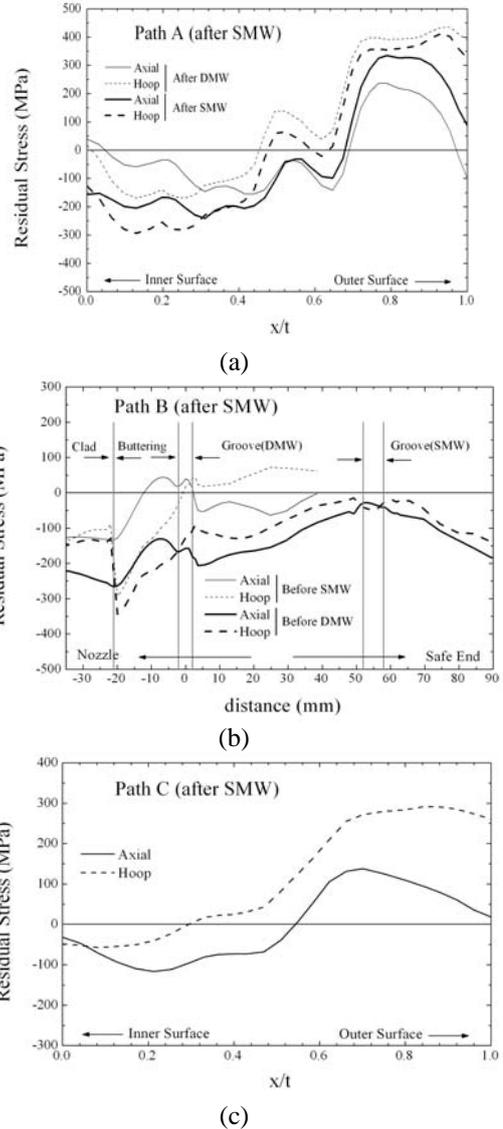


Fig. 7 Residual stress distribution along the (a) path A, (b) path B and (c) path C after similar metal weld

4. 결과 및 토의

용접잔류응력 해석 결과는 이중금속용접부 및 동종금속용접부에서 두께 방향으로, 노즐 내면에서 축 방향으로 산출하였으며 응력 산출 경로는 Fig. 5 와 같다.

Fig. 6 은 이중금속용접이 끝났을 때 경로 A 및 B 에서 축 방향 및 원주 방향 잔류응력 분포를 나타낸다. 축 방향 잔류응력은 용접부 중앙 내면에서 외면 방향으로 약한 인장→압축→인장 잔류응력을 나타내며 원주 방향 잔류응력은 용접부 내면에서 “0”에 가까운 잔류응력이, 외면에서는 강한 인장 잔류응력을 나타낸다. 이러한 결과는 안전단

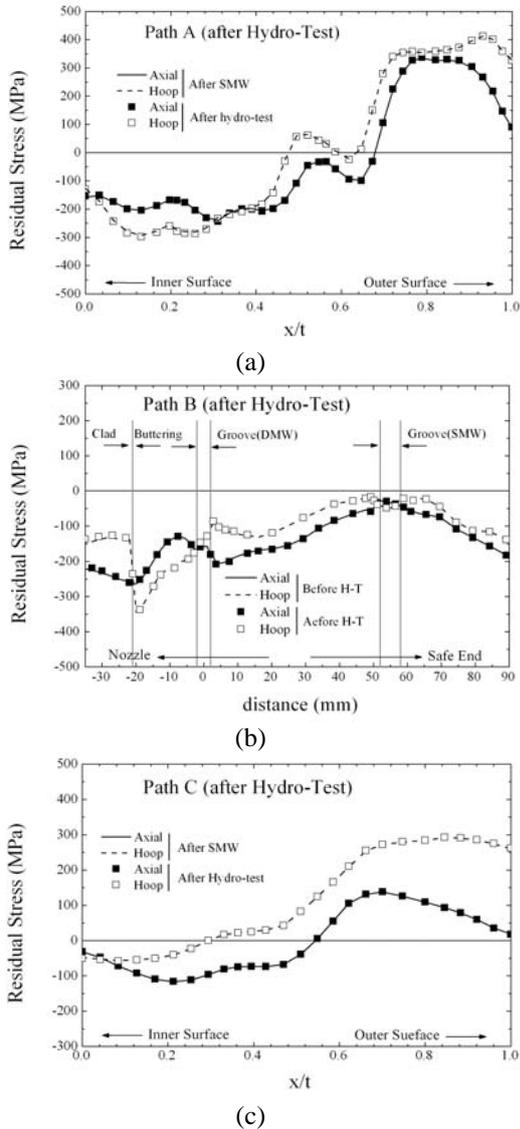


Fig. 8 Residual stress distribution along the (a) path A, (b) path B and (c) path C after hydro static proof test

없는 기존 연구 결과들과 잘 일치한다.^(32,33)

Fig. 7 은 동중금속용접을 수행한 후 경로 A, B 및 C 에서의 잔류응력 결과를 나타낸다. Fig. 7(a) 및 (b)에서와 같이 동중금속용접을 수행하게 되면 기존 이중금속용접부 잔류응력은 낮아져 내면의 경우 축방향 및 원주 방향으로 압축 잔류응력을 나타내게 되며 동중금속용접부는 Fig. 7(c)에서와 같이 초기 이중금속용접부와 같은 잔류응력분포형태를 나타낸다.

Fig. 8 은 노즐-배관구조물에 정수압실험을 수행한 후 재분배된 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 정수압 실험을 통한 잔류응력 재분배는 미미하며 이는 노즐 구조물의 두께 비가 상대적으로 작아서 내압에 의한 1 차 하중의 영향이

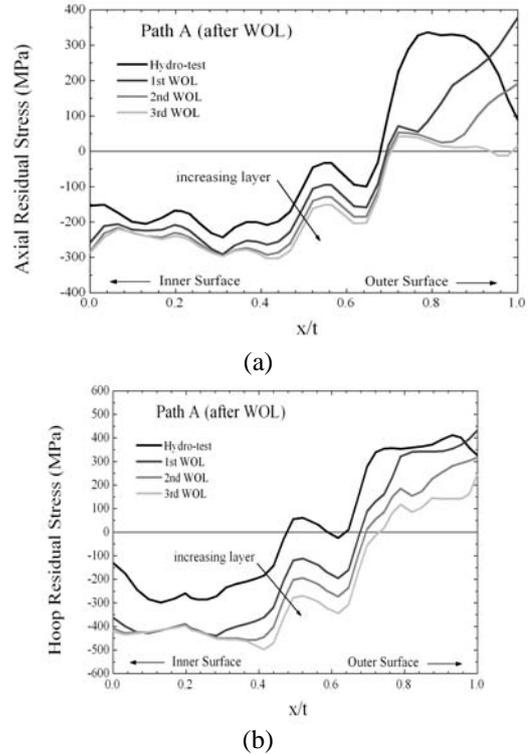


Fig. 9 Effect of cumulated weld overlays on residual stress along the path A. (a) axial stress and (b) hoop stress

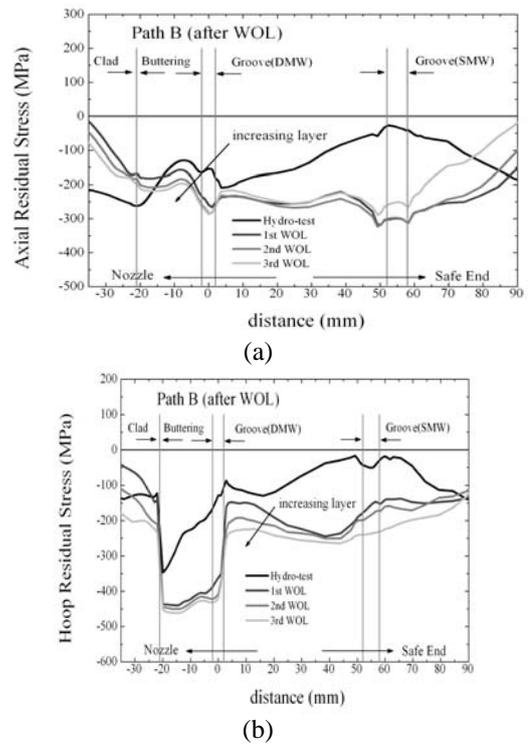


Fig. 10 Effect of cumulated weld overlays on residual stress along the path B. (a) axial stress and (b) hoop stress

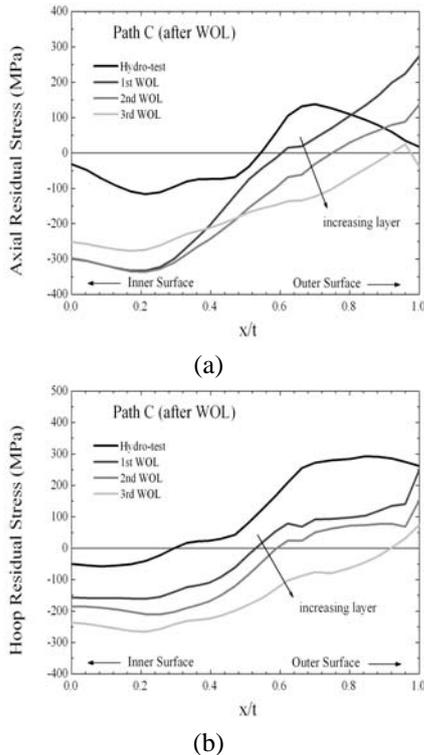


Fig. 11 Effect of cumulated weld overlays on residual stress along the path C. (a) axial stress and (b) hoop stress

미미하기 때문이다. 이러한 결과는 정수압 실험에 의한 잔류응력 완화 효과가 1 차 배관계통에서는 거의 없다는 기존 연구 결과와 잘 일치한다.⁽¹⁵⁾

Fig. 9, 10 및 11 은 3 개의 층으로 구성된 예방 용접 overlay 를 수행하였을 때 경로 A, B 및 C 에서의 잔류응력 분포 결과를 나타낸다. Fig. 9 는 경로 A 에서의 결과로서 축 방향 및 원주 방향 모두 용접 overlay 를 통해 용접부 잔류응력이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 특히 용접부 내면에서는 300~400 MPa 정도의 압축 잔류응력이 발생하며 이는 Alloy 82/182 의 상온 항복강도에 해당하는 값이다. Fig. 10 및 11 에서도 Fig. 9 에서와 같은 용접 overlay 를 통한 잔류응력 개선 효과를 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 9~11 의 결과를 통해 용접 overlay 를 통한 잔류응력 개선 효과는 첫 번째 층에서 충분히 나타나며 두 번째 및 세 번째 층에서는 거의 수렴하는 효과를 확인할 수 있다. 즉 용접 overlay 의 두께는 코드에서 제시하는 두께의 1/3 두께에서 충분한 효과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 PWSCC 에 민감한 이중금속용접

부를 포함하는 가압기 노즐을 대상으로 유한요소 해석을 통해 예방 용접 overlay 를 수행하였다. 예방 용접 overlay 의 효과를 파악하기 위해 실제 노즐 제작 과정을 모사하였으며 다른 연구 결과와의 비교/검증을 수행하였다. 본 논문의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 노즐/안전단 사이의 이중금속용접부는 공장 용접 후 용접 내면에서 축 방향 및 원주 방향으로 0 에 가까운 낮은 인장 잔류응력이 발생하였다.

(2) 안전단/배관 사이의 동종금속용접을 수행하게 되면 기존 이중금속용접부에는 압축력이 작용하며 그 결과 노즐 내면에서는 축 방향 및 원주 방향 모두 전반적인 압축 잔류응력이 발생한다.

(3) 실제 PWSCC 가 발생한 노즐 용접부에서는 모든 경우에서 제작 중 내면 보수(repair) 용접을 수행하였다.⁽¹⁹⁾ 즉, 내면 보수 용접이 없는 경우에는 용접잔류응력으로 인한 위험이 크지 않으며, 동종금속용접 후 노즐 내면에 전반적인 압축잔류응력이 발생하는 본 연구 결과는 이를 간접적으로 증명해준다.

(4) 그러나 노즐 이중금속용접부는 잠재적으로 PWSCC 발생위험을 가지므로 가상적으로 예방 용접 overlay 를 수행하였으며 그 결과 이중금속용접부 내면에서는 Alloy 82/182 재료의 항복강도에 해당하는 압축잔류응력이 발생함을 알 수 있었다.

(5) 용접 overlay 의 두께는 코드에서 제시하는 강성 조건을 통해 산출할 수 있다. 그러나 예방 용접 overlay 의 두께는 코드 조건을 자동적으로 만족하므로 유한요소 해석을 통해 최적 두께를 구할 수 있다. 고리 원전 가압기 안전·방출 노즐의 경우 예방 용접 overlay 의 두께는 코드에서 제시하는 두께의 1/3 에서 충분한 잔류응력 개선효과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Material Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI, Palo Alto, CA:2004. 1009378
- (2) Bamford, W., Newton, B. and Seeger, D., 2006, "Recent Experience with Weld Overlay Repair of Indications in Alloy 182 Butt Welds in Two Operating PWRs," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93891
- (3) Tsuruta, T., Sato, K., Asada, S., Kobayashi, T., Okimura, K. and Matsubara, N., 2008, "PWSCC of Nickel Base Alloys in Vapor Phase Environment of Pressurizer," *Proceedings of the 16th international conference on nuclear engineering*, ICONE16-48377

- (4) Fox, M., 1979, "An Overview of Intergranular Corrosion Cracking in BWRs," *Journal of Materials in energy system*, 1:3
- (5) Okimura, K., Konno, T., Narita, M., Ohta, T. and Toyoda, M., 2008, Reliability of Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation," *Proceedings of the 16th international conference on nuclear engineering*, ICONE16-48375
- (6) British Energy Generation Ltd., 2004, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6, II.7
- (7) Smith, D. J. and Garwood, S. J., 1992, "Influence of Postweld Heat Treatment on the Variation of Residual Stresses in 50 mm Thick Welded Ferritic Steel Plates," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 51, pp. 241~256
- (8) ASME, 2004, Welding and Brazing Qualification, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. IX
- (9) ASME, 2004, Rule for Construction of Nuclear Power Plant Components, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. III
- (10) Hamada, I. and Yamauchi, K., 2002, "Sensitization Behavior of Type 308 Stainless Steel Weld Metals After Postweld Heat Treatment and Low-Temperature Aging and Its Relation to Microstructure," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33A, pp. 1743~1754
- (11) Abel, J.S, Tittrington, J., Jordan, R., Porowski, J. S., O'Donnell, W. J., Badlani, M. L. and Hampton, E. J., 1988, "Mechanical Methods of Improving Resistance to Stress Corrosion Cracking in BWR Piping Systems," *Int. J. Pres. Ves. and piping*, Vol. 34, pp. 17~29
- (12) Shimizu, T., Enomoto, K. and Sakata, S., 1984, "Residual Stresses in Girth Butt Welded Pipes and Treatments to Modify These," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 16, pp. 299~319
- (13) Yen, H. J., Lin, M. C. and Chen, L. J., 1996, "Residual Stress Measurement in 304 Stainless Steel Weld Overlay Pipes," *J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 118, pp. 135~142
- (14) Porouski, J. S., O'Donnell, W. J., Bandlani, M. L., Hampton, E. J. and Kasraie, B., 1992, "New Mechanical and Thermal Processes for Mitigating Stress - Corrosion and Corrosion-Accelerated Fatigue," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 50, pp. 63~79
- (15) Hurrell, P. R., Everett, D., Gregg, A. and Bate, S., 2006, "Review of Residual Stress Mitigation Methods for Application in Nuclear Plant," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93381
- (16) Edwards, N. W., 1986, "Weld Overlay of BWR Flawed Piping," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol 25, pp. 17~24
- (17) Riccardella, P. C., Pitcairn, D. R., Giannuzzi, A. J. and Gerber, T. L., 1988, "Weld Overlay Repairs from Conception to Long-Term Qualification," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 34, pp. 59~82
- (18) Song, T. K., Bae, H. Y., Chun, Y. B., Oh, C. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S. and Park, C. Y., 2008, "Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 8
- (19) Materials Reliability Program : Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs (MRP-169), *EPRI*, Palo Alto, CA:2005. 1012843
- (20) Dong, P., 2001, "Residual Stress Analyses of a Multi Pass Girth Weld : 3D-Special Shell Versus Axisymmetric Models," *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, pp. 207~213
- (21) Brickstad, B. and Josefson, B. L., 1998, "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi Pass Butt Welded Stainless Steel Pipes," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 75, pp. 11~25
- (22) Elocate, C. D., Dennis, R. J., Bouchard, P. J. and Smith, M. C., 2005, "Three Dimensional Multi-Pass Repair Weld Simulations," *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 82, pp. 244~257
- (23) ASME, 2004, Materials-Part D : Properties, *AMSE Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. II
- (24) Special Metals Corporation, 2007, Inconel 600 & 690 information, www.specialmetals.com
- (25) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4," Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc.
- (26) Song, T.K., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, "Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Welding," *submitted to Trans. of the KSME(A)*
- (27) Dennis, R. J., Leggatt, N. A. and Gregg, A., 2006, "Optimisation of Weld Modeling Techniques-Bead on Plate Analysis," *Trans. of ASME PVP*, PVP2006-ICPVT-11-93907
- (28) 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*, PVP2007-26636
- (29) Lee, S. H., Son, Y. H., Lee, J. H., Kim, W. S. and Yoon, S. C., 2007, "A Suggestion of Improvement Plan for ASME Sec. III Requirements Through the Construction Experience of Korea Standard Nuclear Power Plants(Hydrostatic test pressure and PWHT temperature of P-No. 4 materials)," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2007-26433
- (30) ASME Code Case N-740, "Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair of Class 1, 2, and 3 Items," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. XI, Division I
- (31) Timoshenko, S., 1956, *Strength of Materials : Part II - Advanced Theory and Problems*, D. Van Nostrand
- (32) Materials Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), *EPRI*, Pal Alto, CA:2004. 1009378
- (33) Courtin, S. and Gilles, P., 2006, "Detailed Simulation of an Overlay Repair on a 14" Dissimilar Material Weld," *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93823