

이종금속용접부 예방정비 방법에 따른 잔류응력 분포 고찰

송태광[†] · 최영환* · 박정순* · 정해동* · 오창영**

Investigation on the Effects of Preventive Maintenance Schemes for Dissimilar Metal Welds on the Residual Stress Distribution

Tae-Kwang Song[†], Young Hwan Choi*, Jeong Soon Park*, Hae-Dong Chung
and Chang-Young Oh**

(Received 27 SEP 2011, Accepted 15 OCT 2011)

ABSTRACT

This paper presents the effects of preventive maintenance schemes on the residual stress distributions in dissimilar metal welds. Dissimilar metal weld is known susceptible to PWSCC and thus, effective maintenance schemes to prevent PWSCC are needed. Three preventive maintenances schemes, i.e. weld overlay, MSIP and inlay weld which are widely used in nuclear power plants, are selected and their effects on welding residual stresses are investigated via finite element analyses. As results, weld overlay and MSIP were proved effective method to mitigate residual stresses and inlay weld, on the other hand, produces strong tensile residual stresses in the inner surface. Although Alloy 690 known to be resistant to PWSCC are used in inlay weld, continuous careful observation are needed since tensile welding residual stresses are key parameter for PWSCC.

Key Words : Preventive maintenance schemes(예방정비 방법), PWSCC(일차수응력부식균열), Dissimilar metal welds(이종금속용접부), Weld overlay(덧씌우기 용접), MSIP(기계적응력개선법), Inlay welding(Inlay 용접)

1. 서론

최근 V.C. Summer, Ringhals, Tsuruga 및 영광 등의 가압경수로(PWR) 이종금속용접부에서 일차수응력부식균열(PWSCC)로 판명되는 균열이 발생하였다¹⁻⁵⁾. PWSCC는 재료의 민감도, 인장하중 및 수화학 환경의 3가지 조건이 동시에 만족될 때 발생하며 한 가지 조건이라도 만족되지 않으면 발생하지 않는다^{1,4,6)}. 가압경수로 이종금속용접부는 부식환경에 민감한 Alloy 600계열 재료로 용접되며 이종금속용접부 내면에서는 인장 잔류응력이 발생하기 쉽다. 또한 용접부 내면

은 고온, 고압의 수화학 환경에 노출되므로 균열 발생 잠재 가능성이 높다. 따라서 상업 운전 중인 발전소에 서는 PWSCC 문제를 해결하기 위해 이종금속용접부에 대한 예방정비 방법을 제안 또는 적용하고 있다^{4,7-12)}.

대표적인 예방정비 방법에는 덧씌우기 용접(WOL, Weld overlay), 기계적응력개선법(MSIP, Mechanical Stress Improvement Procedure), Inlay/Onlay 용접, Laser shock peening, Water jet peening 및 고주파가열잔류응력개선법(IHSL, Induction Heating Stress Improvement) 등이 있으며, 현재 국내 원전에는 WOL 만이 적용되고 있다. WOL은 이종금속용접부 배관의 강성을 보강하고, 이종금속용접부 내면에 압축잔류응력을 가하여 PWSCC 발생을 예방하는 방법으로서 신뢰성이 높아 국내외적으로 널리 적용되고 있다¹³⁾. MSIP 및 Inlay

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력안전기술원

E-mail : tksong@kins.re.kr

TEL : (042)868-0878 FAX : (042)868-0730

* 한국원자력안전기술원

** 고려대학교 대학원

용접은 아직 국내에서 적용은 되지 않았지만 미국 및 일본에서 검증 및 적용 되었다⁸⁻⁹⁾. WOL이 용접시간 및 비용문제로 가압기 이중금속용접부와 같은 중/소 구경 이중금속용접부에 적용되는 반면, MSIP 및 Inlay 용접은 원자로 입/출구 이중금속용접부와 같은 대구경 배관에 적용 가능하므로 향후 국내 원전에 적용될 가능성이 높다. Laser shock peening 및 water jet peening은 표면 처리 기술이므로 이중금속용접배관의 형상 변형과 야금학적 조직 변화 없이 이중금속용접부 표면에 압축응력을 발생시킬 수 있다. 그러나 잔류응력 완화 효과가 표면에 한정되고, 장비 개발 및 제어에 비용 부담이 크며 고도의 기술이 필요하므로 MSIP, Inlay 용접과 비교하여 국내 원전에 적용될 가능성이 현재로서는 낮다. IHSI 방법은 일본에서 개발 및 적용되었으나¹⁴⁾ IHSI를 적용한 용접부에서 균열이 발생한 사례가 있어 US NRC의 승인을 받지 못한 상태이며, PWR에 적용된 사례는 지금까지 없다.

본 논문에서는 현재 국내에서 이중금속용접부 예방 정비 방법으로 사용하고 있거나, 향후 적용이 예상되는 덧씌우기 용접, MSIP 및 Inlay 용접을 대상으로 각 방법이 이중금속용접부 잔류응력분포에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 국내 원전 가압기 밀림관 이중금속용접부를 대상으로 유한요소 해석을 수행하여 각 예방정비 방법이 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 해석대상 및 재료

2.1 해석대상

Fig. 1은 본 연구에서 검토한 국내 원전 가압기 밀림관 이중금속용접부에 대한 형상을 보여준다. 밀림관 이중금속용접부는 가압기 하부에 위치하고 있으며 (Fig. 1(a)) Fig. 1(b)와 같이 노즐(nozzle), 안전단(safe end), 배관(piping)과 같은 다양한 기기로 구성된다. 가압기 노즐은 배관과의 연결을 위해 일차적으로 안전단과 이중금속용접을 통해 용접된다. 이 때, 저합금강인 노즐과 스테인레스강인 안전단과의 용접 성능 향상을 위해 노즐 끝단에 버터링 용접(buttering welding)을 우선적으로 수행하며 그 후, Alloy 600계열의 용접재인 Alloy 82/182로 용접(이중금속용접)을 수행한다. 그리고 안전단과 배관은 스테인레스강계 용접재인 Er309L 재료로 용접(동종금속용접)된다. Fig. 1(b) 및 (c)는 WOL

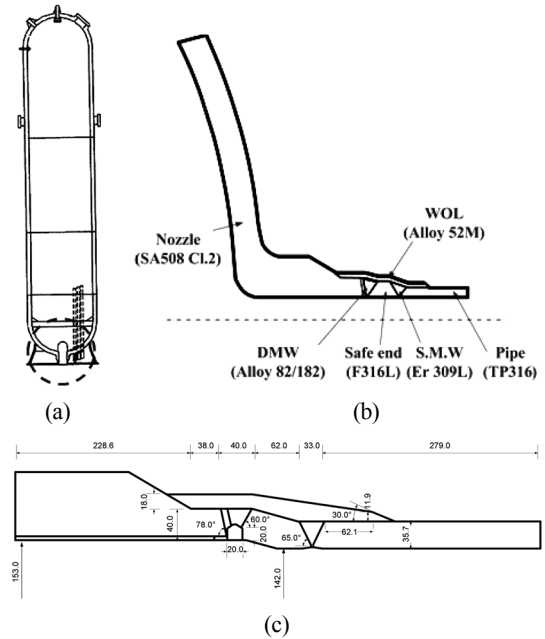


Fig. 1 Geometry of dissimilar metal weld in surge nozzle considered in this work

Table 1 Dimensions for surge line nozzle

Inner radius (r_i)	142 mm
Thickness of pipe (t_p)	35.7 mm
Inner radius (r_i) / Thickness of pipe (t_p)	4.0
Thickness of WOL (t_{wol})	18 mm

이 포함된 밀림관 노즐의 단면도를 나타낸다. WOL은 PWSCC에 대한 저항성이 큰 Alloy 690계열의 용접재료인 Alloy 52/152 재료가 사용된다.

본 연구에서는 WOL, MSIP 및 Inlay 용접이 이중금속용접부 잔류응력에 미치는 영향을 평가하기 위해 이중금속용접부 내면에 보수용접을 가정하였으며, Fig. 1 (b) 및 (c)에서 이중금속용접부 내면에 위치한 보수용접부를 확인할 수 있다. 밀림관 이중금속용접부에 대한 상세 제원은 Fig. 1(c)에서 확인할 수 있으며, 주요 제원인 노즐 내경(r_i), 배관 두께(t_p) 및 WOL의 두께(t_{wol})는 Table 1에서 확인할 수 있다.

2.2 재료

Table 2는 국내 원전 가압기 밀림관 노즐에 사용된 각 기기별 재료를 보여준다. Table 2에서와 같이 밀림관 노즐은 저합금강(low alloy steel), 스테인레스강

Table 3 Material properties of F316L 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)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion ×10 ⁻⁶ (mm/mm/°C)	0% proof strength (MPa)
20	7970	0.460	14.9	195.0	0.27	15.3	243.6
100	7940	0.505	16.3	190.0		16.2	203.0
200	7900	0.531	17.9	183.0		17.0	168.1
300	7860	0.545	19.4	175.0		17.6	149.4
400	7810	0.558	20.9	168.0		18.1	139.7
500	7770	0.567	22.1	160.0		18.5	129.1
600	7720	0.578	23.6	151.0		18.9	123.5
700	7680	0.587	24.9	140.0		19.3	116.5
800	7630	0.595	26.3	130.0		19.4	112.1
900	7580	0.624	26.9	117.0		19.7	70.5
1000	7540	0.639	27.5	100.0		20.0	27.2
1100	7490	0.656	28.7	80.0		20.3	13.1
1200	7440	0.671	29.8	57.0		20.6	7.9
1420	7320	0.703	32.3	2.0		21.4	2.6
2000	6500	0.703	323.0	2.0		21.4	2.6

Table 2 Materials used in each component

Component	Material
Nozzle	SA508 Cl.2
Buttering	Alloy 182
Dissimilar Metal Weld	Alloy 82/182
Safe End	F316L
Similar Metal Weld	Er 309L
Piping	TP316
WOL, Inlay	Alloy 52M

(stainless steel) 및 다양한 용접재가 사용된다. 버터링 및 이종금속용접부에 쓰이는 Alloy 82/182는 니켈기 합금(Ni-based alloy)인 Alloy 600에 대한 용접재료로서 용접성 및 인성이 높아 설계 당시 사용되었다. 그러나 최근 이종금속용접부에서 발생한 일련의 균열 사고에서 알 수 있듯이 Alloy 600계열 재료는 PWSCC에 민감한 것으로 밝혀졌다. 따라서 WOL 및 Inlay 용접에 사용될 재료는 Alloy 600재료에 C_r 함량을 높여 PWSCC에 대한 저항성을 높인 Alloy 690계열 재료(Alloy 52/152)가 사용된다. Alloy 52M은 Alloy 52 용접재에서 발생하는 고온균열에 대한 저항성을 높이기 위해 개발된 재료이다.

용접은 국부적으로 용융점 이상의 고온에서 수행되므로 유한요소 용접잔류응력 해석을 수행하기 위해

서는 상온에서 용융점 이상의 넓은 온도 범위에 대한 기계/물리적 재료 물성이 필요하다. Table 3은 본 연구에서 고려한 F316L 재료의 온도에 따른 재료 물성을 보여준다.

재료 물성은 문헌¹⁵⁻¹⁷⁾, 설계 코드¹⁸⁾ 및 제작사의 실험값¹⁹⁾ 등을 통해 확보하였다.

3. 예방정비방법 및 유한요소 해석

3.1 WOL

WOL은 비등경수로(BWR) 오스테나이트계 스테인레스 강 배관에서 발생하는 입계응력부식균열(IGSCC) 문제를 해결하기 위해 1982년 미국 원전에 최초 적용되었다. PWR에는 1993년 최초로 적용되었으며¹³⁾, 국내 원전의 경우에도 2009년 고리 1호기 가압기 노즐에 최초 적용된 이후 확대 적용 중이다. WOL은 1) 두께 보강을 통해 배관의 기계적 강성을 보강하고, 2) PWSCC에 대한 민감도가 낮은 재료(Alloy 690계열)를 사용하여 기존 이종금속용접부 완전 관통 균열 시 PWSCC에 대한 추가 균열 진전을 억제하며, 3) 이종금속용접부 내면에 압축 잔류응력을 야기하여 균열 성장 및 발생을 억제하는 효과가 있다. 그러나 WOL 수행에는 비용 및 시간이 많이 소요되므로 고온관 및 저온관 노즐과 같은 대구경 배관에 대해서는 적용이

어려우며, 이로 인해 국내 원전에서도 가압기 밀립관, 안전/방출 및 분무노즐 이중금속용접부에만 적용되고 있다.

3.1.1 WOL 두께 및 길이 설계

현재 WOL은 ASME B&PV Code, Sec. XI, Code Case N-740에 따라 설계된다²⁰⁾. 이 때, WOL의 두께는 ASME Sec. XI의 IWB-3640조건을 만족하도록 설정하며, IWB-3640에서는 파이프 벽 두께의 75% 이하 균열을 허용하고 있다. 이를 만족하기 위한 WOL의 두께는 Eq. (1)~(3)과 같이 산출할 수 있다.

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

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

$$t_{WOL} \leq t_p / 3 \quad (3)$$

여기서 t_p 는 용접부가 있는 배관의 두께를, t_{WOL} 은 오버레이 용접부의 두께를 나타내며 Fig. 2에서 확인할 수 있다. Eq. (1)~(3)은 용접부가 360° 완전 관통균열이 되었다는 극단적인 가정 하에서 코드 조건을 만족하는 WOL 두께로서 WOL의 두께는 배관 두께의 1/3 이상이어야 함을 알 수 있다.

축 방향 균일 하중을 받는 배관에서 균열 등에 의한 국부 응력 집중이 충분히 사라지기 위한 거리는 $0.75\sqrt{r_o t_p}$ 로 알려져 있다²⁰⁾. 여기서 r_o 및 t_p 는 배관 외경 및 두께를 나타낸다. 따라서 용접부 균열을 가정하면 오버레이용접부의 길이는 용접부 폭 및 $1.5\sqrt{r_o t_p}$ 를 합한 길이가 된다. 그러나 이중금속용접부와 인접한 거리에 동중금속용접부가 있으므로 WOL 길이는 동중금속용접부 끝단에서 배관방향으로 $0.75\sqrt{r_o t_p}$ 를 적용한다.

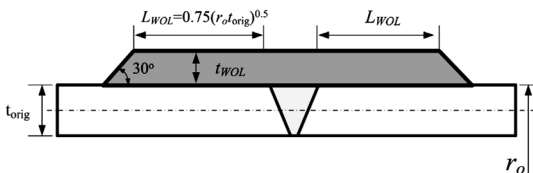


Fig. 2 Schematic illustration of weld overlay

3.2 MSIP

MSIP는 1986년 AEA Technology Engineering Services, Inc.에서 개발한 기술로서 용접부에 영구 변형을 가하여 기계적으로 응력 분포를 개선하는 방법이다¹⁰⁾. 기계적 응력 개선 방법은 원주방향 용접부에 벽면방향 굽힘 하중 (through-wall bending)을 가함으로써 용접부 내면에는 압축 잔류응력이, 외면에서는 인장 잔류응력이 발생한다. 따라서 용접부 내면에서 두께 방향으로 50% 이내의 위치에 있는 영역에서의 잔류응력을 개선할 수 있다.

MSIP는 ANL(Argonne National Labs) 및 EPRI(Electric Power Research Institute)로부터 잔류응력 개선 효과가 있는 방법임을 인증 받았으며, 미국 원자력규제 위원회에서 잔류응력 개선 방법으로 승인받았다⁶⁾. 이 방법은 다른 완화 방법에 비해 비용이 저렴하기 때문에 경제적이며, 빠른 작업 시간으로 인해 작업자의 피로도 줄일 수 있다. 따라서 MSIP는 비등경수로에 널리 적용되었으며, 1986년 이후 응력부식균열에 가장 효과적인 방법 중의 하나로서 전 세계적으로 널리 사용되었다.

가압경수로(PWR)에 대한 MSIP 적용은 VC Summer 원전 고온관(hot leg) 노즐 이중금속용접부에 2002년 최초 적용되었으며 이후 Calvert Cliffs 원전 등에 적용되었다. 그러나 현재 국내에서는 MSIP가 적용된 사례가 없으며, 따라서 사전 평가 차원에서 기계적 응력 개선 방법의 효과에 대한 분석이 필요하다.

3.2.1 MSIP 설계

기계적 응력 개선 방법은 지그를 통해 배관에 원주방향으로 압축 영구 변형을 가하며, 이를 통해 배관 내면에 압축 잔류응력을 발생시킬 수 있다. Fig. 3(a)는 MSIP에 사용되는 지그를 나타내며 Fig. 3(b)에서와 같이 용접부에 일정 거리 떨어진 위치에서 지그(또는 tool)를 통해 압축 변위를 가하게 된다. 이 때 MSIP 특허에서는 다음과 같이 지그의 위치 및 압축 변위를 설명하고 있다⁹⁾.

- 지그에 의해 하중이 가해지는 면의 중심에서의 영구 변위는 원주방향으로 0.2~2.0% 정도여야 한다.
- 응력이 개선될 용접부의 중심 및 하중이 전달되는 지그의 중심사이의 거리는 배관 두께의 2~12배가 되어야 한다.
- 지그 끝단 (또는 하중 밴드의 끝단)은 용접부 중심

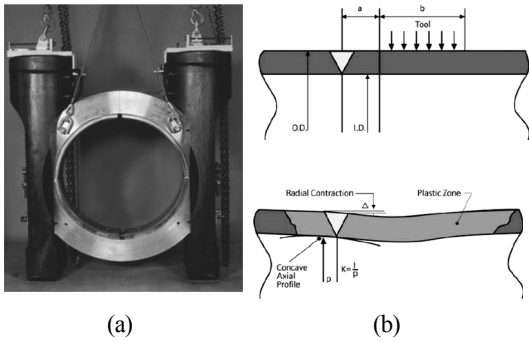


Fig. 3 (a) MSIP jig and (b) schematic diagram for application of MSIP

으로부터 적어도 두께방향의 반 이상은 떨어져 있어야 한다.

3.3 Inlay 용접

WOL 및 MSIP가 응력 개선을 통해 PWSCC를 예방하는 정비 방법이라면, Inlay 용접은 PWSCC에 민감한 재료를 부식 환경으로부터 격리(isolation) 시킴으로써 PWSCC를 예방하는 정비 방법이다. 이 밖에 Inlay 용접은 노즐 내면 국부 영역에서 수행하는 작업이므로 대형 장비가 필요하지 않으므로 접근성 문제로 인해 WOL 및 MSIP를 수행할 수 없는 경우 사용할 수 있다. 또한 Inlay 용접은 WOL에 비해 용접량이 적으므로 대구경 노즐에서 비용/작업 시간 면에서 경제성이 높다.

Inlay 용접 보수는 기존 Alloy 600계열 재료일부를 제거(excavation)하고 그 부분에 Alloy 690을 용접 육성(build-up)하는 방법으로서 Fig. 4에서 도식적으로 확인할 수 있다.

3.3.1 Inlay 용접 설계

Inlay 용접에 대한 설계 조건은 ASME B&PV, Sec. XI, Code Case N-766에서 확인할 수 있다²²⁾. CC N-766에서는 Inlay 용접의 최소 요구 두께를 1/8 inch (3 mm)로 설정하고 있으며, 이 때 두께 방향으로 최소 2개의 층으로 용접할 것을 요구한다. 그리고 Inlay 용접부의 두께는 해석을 통해 증명된 길이의 두 배 또는 기존 용접부 끝단에서 1/4 inch (6 mm) 중 큰 값을 사용할 것을 요구하고 있다. N-766에서 제시하는 Inlay 용접의 설계 조건은 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

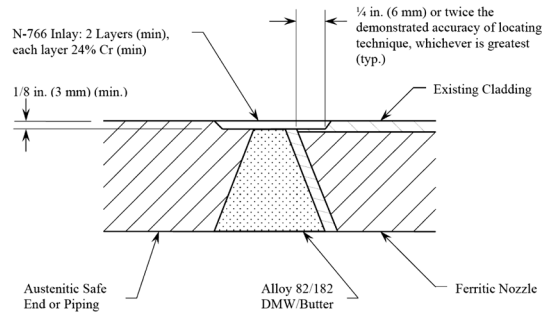


Fig. 4 Typical design of Inlay weld in ref [20]

3.4 유한요소 해석

3.4.1 유한요소 잔류응력 해석 절차

일반적으로 가압기 밀림관 노즐은 공장에서 버터링 용접 후 후열처리(PWHT, Post Weld Heat Treatment)를 겪게 된다. 후열처리를 통해 버터링용접으로 인한 잔류응력이 거의 제거되면 노즐은 안전단과 이종금속용접을 통해 연결된다. 이 때, 제작 시 용접부에 균열 등의 결함이 발견되면 보수 용접(repair weld)을 통해 기존 용접부를 제거하고 용접을 통해 빈 공간을 메우게 된다. 안전단과 연결된 노즐은 현장에서 배관과 동종금속용접을 통해 연결된다. 이와 같은 과정을 통해 설치된 노즐은 현장에서 운전압의 1.25배에 해당하는 수압시험을(hydrostatic test) 받게 된다.

본 연구의 목적은 WOL, MSIP 및 Inlay 용접의 잔류응력 완화 효과를 비교/분석 하는 것이며, 각 예방정비 방법에 대한 유한요소 해석 시 다음과 같은 가정을 하였다.

- 버터링 용접에 의한 잔류응력 무시
- 이종금속용접에 의한 잔류응력 무시
- 동종금속용접에 의한 잔류응력 무시
- 내면 360° 보수용접 가정

버터링 용접에 의해 발생한 잔류응력은 일반적으로 후열처리에 의해 거의 제거된다. 평가 코드인 R6에서는 저합금강의 경우 후열처리를 수행하게 되면 50MPa 이하의 잔류응력이 남는다고 제시하고 있으며²³⁾, 따라서 후열처리가 된 해석 대상에 대해서는 버터링 용접을 생략할 수 있다.

내면 보수용접을 수행하게 되면 보수용접부에 강한 인장잔류응력이 남는다. 이 때, 이종금속용접에 의한 잔류응력을 고려하여 보수용접을 수행한 경우와, 이종금속용접에 의한 잔류응력을 무시하고 보수용접

에 의한 잔류응력만 고려한 경우, 이중금속용접부에 발생하는 잔류응력 분포는 차이가 있을 수 있다. 그러나 선행 연구 결과, 두 경우에 대해 용접부 내면 잔류응력 분포는 거의 유사함을 확인할 수 있었다²⁴⁾. 이는 보수용접 시 기존 용접부의 일부를 제거하면서 잔류응력이 재분배 및 완화 되었기 때문에 용접부 외면에서의 차이를 제외하면 잔류응력 분포가 유사하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이중금속용접부에 의한 잔류응력을 고려하지 않았다.

동중금속용접은 안전단 길이에 따라 차이가 나지만 이중금속용접부 잔류응력 분포에 영향을 미칠 수 있다. 이는 동중금속용접 시 동중금속용접부의 수축으로 인해 노즐 벽면에 두께방향 굽힘하중이 발생하기 때문이며, 따라서 안전단의 길이에 따라 그 영향이 달라진다²⁵⁾. 그러나 본 연구의 목적은 예방정비 방법에 따른 잔류응력 완화 효과의 비교/분석이기 때문에 경제적인 해석을 위해 동중금속용접을 생략하고 보수적인 관점에서 이중금속용접부 내면에서 용접부 두께의 40% 깊이 및 원주방향 360° 길이의 보수용접을 가정하였다.

이 밖에 소성안정해석(shakedown analysis) 및 수압 시험(hydro-static test)에 대한 유한요소 해석은 생략하였다. WOL 적용 후 가압기 노즐이 반복하중에 대해 소성변형을 보이지 않음을 증명하기 위해 상온 조건에서 운전조건으로의 4차례의 반복하중에 대한 소성안정해석을 수행한 선행 연구 결과 노즐은 소성변형을 보이지 않았기 때문에 소성안정해석을 생략하였다⁷⁾. 그리고 수압시험 역시 가압기 노즐과 같이 반복/두께비가 5 이하인 노즐에서는 그 영향이 미미하기 때문에 수압시험에 대한 유한요소 해석을 생략하였다^{7,12,26)}.

3.4.2 유한요소 잔류응력 해석 방법

본 연구에서는 잔류응력 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유한요소 해석 시 일련의 비드는 ABAQUS에서 제공하는 요소 재 생성 기술(model change option)을 통해 구현하였다. 용접에 의한 열해석은 잠열을 고려해야 하므로 잠열 계산에 정확한 1차 요소를 사용하였으며^{26,27)}, 체적 플럭스를 통해 입열을 가하였다. 입열 시간 및 입열량은 용접절차시방서(WPS, Welding Procedure Specification)를 통해 산출하였다. 냉각 시간은 최대

층간온도(Maximum inter-pass temperature)인 170°C를 넘지 않게 설정하였으며 자연 대류 조건($h=10W/m^2K$)을 적용하였다. 응력 해석 시 재 용융에 따른 응력풀림효과(Annealing effect)는 ABAQUS에서 제공하는 “Anneal Temperature” 옵션을 통해 구현하였다. 그리고 용접 해석 시 변형량이 크지 않으므로 비선형 기하형상은 고려하지 않았다^{16,26)}.

재료 거동은 증분소성이론(incremental plasticity theory)을 따르며 바우싱거효과(Bauchinger's effect)를 고려하기 위해 비선형 이등성 경화 모델(non-linear kinematic hardening model)을 사용하였다^{16,28)}.

Fig. 5는 본 연구에서 고려한 유한요소 망을 나타낸다. 보수용접부는 40% 깊이에 대해 실제 비드 면적(18 mm²)을 고려하여 20개의 비드로 모델링하였다. Overlay 용접 시 WOL의 두께 및 길이는 3.1절의 조건에 따라 설계하였으며 이 때, WOL은 Fig. 5(b)와 같이 6개의 층으로 구성되며 1개의 층에 40개의 비드를 고려하였다.

Fig. 6은 기계적 응력 개선 방법을 고려할 때, 본 연구에서 고려한 지그의 위치를 보여준다^{3,2)}. 절에서 언급한 바와 같이 지그는 이중금속용접부의 중심에서 배관 두께의 2~12배 만큼 떨어져야 하며, 지그 끝단에서 이중금속용접부 중심까지의 거리가 최소 배관 두께의 반 이상이어야 한다. 이 조건을 만족하기 위해서는 지그 폭이 동중금속용접부를 포함하므로 Fig. 6

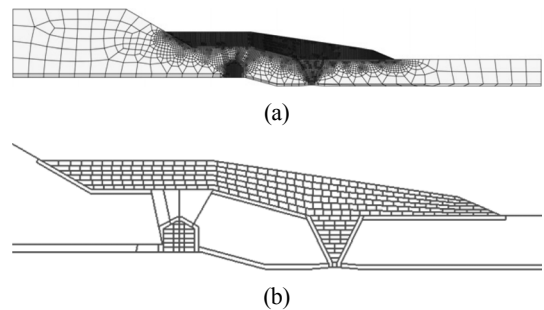


Fig. 5 (a) Finite element model for weld overlay analysis and (b) design of weld bead

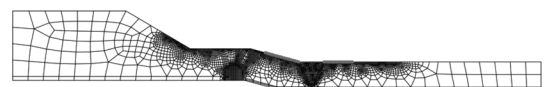


Fig. 6 Finite element model for MSIP analysis. Note that red line represents displacement-applied region by MSIP jig

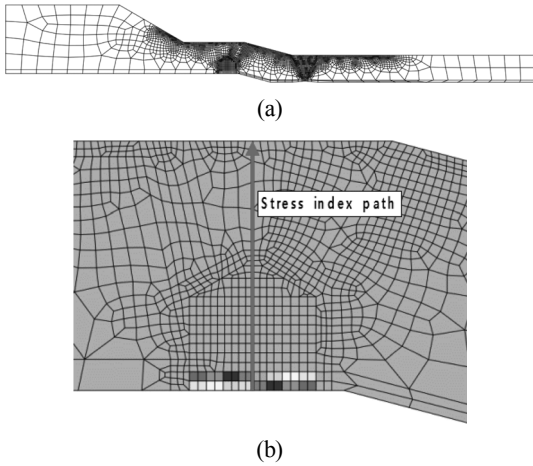


Fig. 7 (a) Finite element model for inlay weld analysis and (b) design of weld bead

과 같이 동종금속용접부 양쪽으로 밴드를 설계하였으며⁹⁾, 지그 폭은 배관 두께의 1.9배로 설정하였다. Fig. 7은 Inlay 용접에 대한 유한요소 망 및 비드 설계를 보여준다. Inlay 용접부의 두께는 3.3절에 따라 3mm로 설계되었으며 Fig. 7에서와 같이 2개의 층으로 구성되며 1개의 층에 8개의 비드가 사용되었다.

3.4.3 유한요소 잔류응력 해석 방법 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°C의 최고 온도를 나타낸다고 하였으며 이 지점을 HAZ(열영향부)로 정의하였다¹⁶⁾. 따라서 유한요소 해석 시 용융선으로부터 2.5mm에서 최고온도가 850°C가 되도록 입열량을 제어하였으며 이 때, ABAQUS에서 제공하는 “UVARM”기능을 통해 이를 확인하였다.

이 밖에 응력해석은 기존 보고서 및 논문 결과를 통해 검증하였다²⁴⁻²⁶⁾. 대부분의 기존 연구 결과는 안전단 없이 노즐 및 배관이 이종금속용접으로 연결되어 있으므로 같은 형상을 모사하여 잔류응력해석을 수행하였으며 그 결과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

4. 용접잔류응력 해석 결과

4장에서는 본 연구에서 고려한 예방정비 방법(WOL,

MSIP, Inlay 용접)이 이종금속용접부 잔류응력 분포에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 이 때, 잔류응력 분포는 이종금속용접부 중심면에서 두께방향으로의 축방향 및 원주방향 잔류응력을 구하였으며, Fig. 7(b)에서와 잔류응력 추출 경로를 확인할 수 있다.

본 연구의 목적은 각 예방정비방법의 정성적인 효과를 비교/분석하는 것이기 때문에 경제적인 해석을 위해 이종금속용접 및 동종금속용접에 대한 시뮬레이션을 생략하였다. 즉, 보수 용접 및 각 예방정비 방법만을 고려하였다. 따라서 각 예방정비 방법의 정량적인 완화 효과보다는 정성적인 효과 및 그 원리를 중심으로 결과를 검토하였다.

4.1 이종금속용접부 내면 보수 후 잔류응력 분포

Fig. 8에서 실선은 이종금속용접부 내면 보수 용접

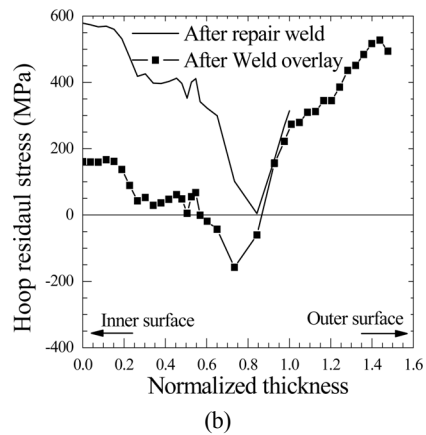
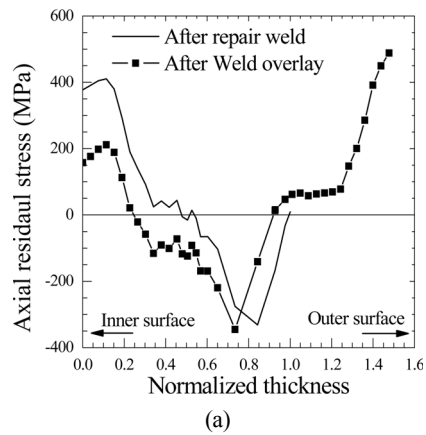


Fig. 8 Effects of weld overlay on the residual stresses in dissimilar metal weld. (a) axial and (b) hoop direction

시, 축 방향 및 원주 방향 잔류응력 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 보수 용접부에서는 축 방향 및 원주 방향으로 강한 인장 잔류응력이 발생한다. 이는 보수 용접부가 축 방향 및 원주 방향으로 구속되어 있기 때문에 용접 비드 수축 시 용접부에 인장 잔류응력 발생하기 때문이며, 이로 인해 실제 보수 용접부에서 균열이 발생하는 사례가 많다. 일반적으로 보수 용접부 내면에는 재료의 항복강도 값에 해당하는 인장 잔류응력이 발생하게 된다.

4.2 WOL이 잔류응력 분포에 미치는 영향

Fig. 8에서 “심벌+실선”은 보수 용접된 이종금속 용접부에 WOL를 수행하였을 때, 축 방향 및 원주 방향으로 발생하는 잔류응력 분포를 나타낸다.

Overlay 용접 비드는 냉각 시 수축을 하게 되며, 따

라서 이종금속용접부를 축 방향 및 원주 방향으로 압축하게 된다. 이로 인해 overlay 용접은 이종금속용접부 잔류응력 분포를 완화시키는 역할을 하며, Fig. 8에서와 같이 보수 용접으로 인해 발생하였던 노즐 내면의 강한 인장 잔류응력이 완화되는 것을 확인할 수 있다. 반면 overlay 용접부에서는 그림에서와 같이 강한 인장 잔류응력이 발생한다. 이는 overlay 용접부가 냉각할 때 노즐에 의해 구속을 받기 때문이다.

4.3 MSIP가 잔류응력 분포에 미치는 영향

Fig. 9에서 “심벌+실선”은 보수 용접된 이종금속 용접부에 MSIP를 수행 하였을 때, 축 방향 및 원주 방향으로 발생하는 잔류응력 분포를 나타낸다. 이 때, 배관에는 원주방향으로 배관 직경의 0.2%, 1.0% 및 2.0%에 해당하는 영구변형을 가하였다. 그림에서와

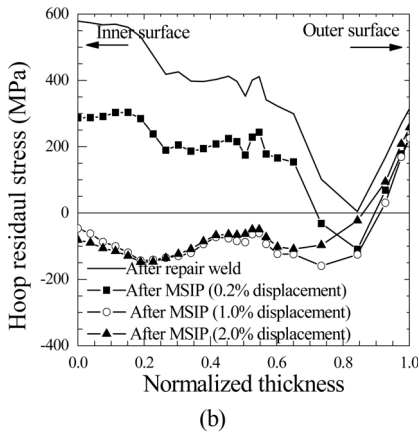
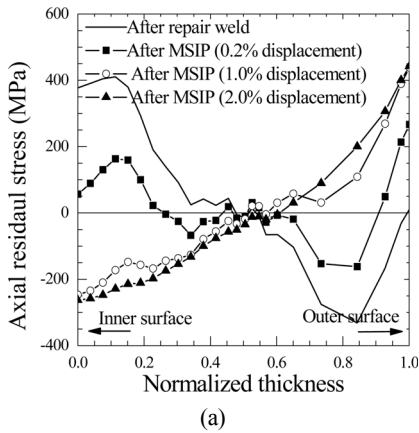


Fig. 9 Effects of MSIP on the residual stresses in dissimilar metal weld. (a) axial and (b) hoop direction

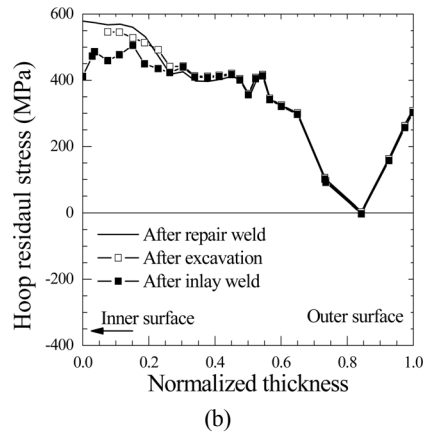
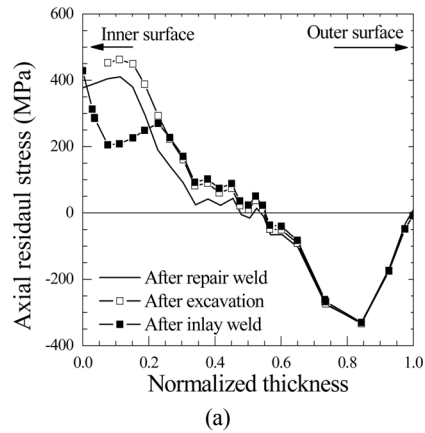


Fig. 10 Effects of inlay weld on the residual stresses in dissimilar metal weld. (a) axial and (b) hoop direction

같이 구조물에 기계적 응력 개선 방법을 가하면 이종금속용접부 내면에서는 압축 잔류응력이, 외면에서는 인장 잔류응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기계적 응력 개선을 하였을 때 변형이 발생하는 지점에서 원주방향으로 수축하기 때문에 이종금속용접부 단면에 굽힘 하중(through-wall bending)을 가하기 때문이다. 따라서 MSIP는 일반적으로 배관 내면에서 50% 이내 범위에 대해서 효과적이다. MSIP로 인한 변형량이 증가할수록 이종금속용접부에 가해지는 굽힘하중은 증가하므로 이종금속용접부 내면에 가해지는 잔류응력 완화 효과 역시 증가한다. 그러나 이러한 완화 효과는 Fig. 9에서와 같이 1.0% 영구 변형에서 그 영향이 포화(saturation)되는 것을 알 수 있다.

4.4 Inlay 용접이 잔류응력 분포에 미치는 영향

Fig. 10에서 “심벌+실선”은 보수 용접된 이종금속용접부에 Inlay 용접을 수행 하였을 때, 축 방향 및 원주 방향으로 발생하는 잔류응력 분포를 나타낸다. 이때, open symbol은 Inlay 용접을 수행하기 전 이종금속용접부 내면을 제거하였을 때(excavation)의 잔류응력분포를 나타내며, closed symbol은 최종 Inlay 용접이 완료되었을 때의 잔류응력 분포를 나타낸다.

이종금속용접부 내면을 제거하면 잔류응력 재분배(re-distribution)로 인해 기존 잔류응력 분포가 변할 수 있다. 그러나 Inlay 용접을 위해 제거되는 기존 이종금속용접부 면적이 미미하기 때문에 Fig. 10에서와 같이 잔류응력 재분배 정도는 미미한 것을 알 수 있다. 이종금속용접부 내면 제거 후 Inlay 용접을 수행하면, 주변 구조물에 의해 Inlay용접부는 수축에 구속을 받게 된다. 따라서 Fig. 10에서와 같이 Inlay 용접부에는 강한 인장 잔류응력이 발생하게 된다. Inlay 용접은 잔류응력을 완화하기 보다는 PWSCC 저항성이 높은 재료를 사용함으로써 PWSCC를 예방하는 방법이기 때문에 Inlay 용접부에 발생하는 인장 잔류응력은 중요하지 않을 수 있다. 그러나 원전 설계 및 건설 당시 부식 저항성 및 인성 등이 우수하여 사용된 Alloy 600 계열 재료에서 PWSCC가 다수 발생한 최근 사건을 고려한다면, 인장 잔류응력이 발생하는 용접부는 지속적인 감시가 필요함을 알 수 있다. 따라서 Inlay 용접이 부식 저항성이 향상된 Alloy 690계열 재료를 사용한다 하더라도, Inlay 용접부에는 강한 인장 잔류응력이 발생하므로 향후 지속적인 감시가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 원전 가압기 밀림관 이종금속용접부를 대상으로 PWSCC 예방정비 방법인 WOL, MSIP 및 Inlay 용접이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 밀림관 이종금속용접부 내면 보수용접을 가정하여 WOL, MSIP 및 Inlay 용접 수행에 대한 유한요소 해석을 수행하여 각 예방정비 방법이 이종금속용접부 잔류응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 각 예방정비 방법이 이종금속용접부 잔류응력 분포에 미치는 정성적인 영향을 분석/비교하는 것이기 때문에 경제적인 해석을 위해 이종금속용접 및 동종금속용접에 대한 시뮬레이션은 생략하였으며, 따라서 보수 용접 및 각 예방정비 방법만을 고려하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- WOL을 수행하면 이종금속용접부 내면에서의 잔류응력이 완화된다. 이는 overlay 용접부가 수축할 때, 이종금속용접부에 축 방향 및 원주 방향으로 압축력을 가하기 때문이다. 반면 overlay 용접부는 수축에 제한을 받기 때문에 overlay 용접부에서는 축 방향 및 원주 방향으로 강한 인장 잔류응력이 발생하게 된다. 그러나 overlay 용접부는 이종금속용접부에 관통균열이 발생하는 극한 상황이 발생하지 않는 이상 냉각재로부터 차단되며, PWSCC 저항성이 높은 것으로 알려진 Alloy 690계열 재료가 사용되므로 overlay 용접부에 발생하는 인장 잔류응력은 중요하지 않다고 판단된다.
- MSIP를 수행하면 이종금속용접부 내면에서의 잔류응력이 완화된다. 이는 MSIP가 이종금속용접부에 벽면방향 굽힘하중(through-wall bending) 가하기 때문이다. 이종금속용접부 인근 지점에서 원주 방향으로 수축하게 되면 벽면 방향으로 굽힘하중이 작용하게 되며, 따라서 이종금속용접부 내면에서는 압축력이, 외면에서는 인장 력이 발생하게 된다. 따라서 MSIP는 배관 내면에서 50% 이하 범위에 대해 효과적인 예방정비 방법이다. 유한요소 해석 결과 1.0%의 원주방향 변형량에서 MSIP의 효과가 포화(saturation)되는 것을 확인할 수 있었다.
- 이종금속용접부 내면에 Inlay 용접을 수행하면 Inlay 용접부에는 강한 인장 잔류응력이 발생하게 된다. Inlay 용접은 PWSCC 저항성이 높은 Alloy 690계열

재료를 사용함으로써, 부식환경으로부터 Alloy 600 계열 재료를 차단하여 PWSCC를 예방하는 정비 방법이다. 그러나 원전 설계 및 건설 당시 부식 저항성 및 인성 등이 우수하여 사용된 Alloy 600계열 재료에서 PWSCC가 다수 발생한 최근 사건을 고려한다면, 인장 잔류응력이 발생하고 부식환경에 접하고 있는 용접부는 PWSCC 발생 잠재 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 Inlay 용접이 부식 저항성이 향상된 Alloy 690계열 재료를 사용한다 하더라도, Inlay 용접부에는 강한 인장 잔류응력이 발생하므로 향후 지속적인 감시가 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 중장기연구 사업(원전 PWSCC 및 열피로 규제지침 및 경년열화 종합관리 방안 개발)의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. EPRI Report, 2004, Materials Reliability Program: Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106).
2. 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.
3. Brust, F. W., Scott, P., 2007, "Primary water stress corrosion cracking (PWSCC) in bimetal nuclear", *Trans. of SMiRT 19 conference*.
4. EPRI Report, 2005, Materials Reliability Program: Technical basis for preemptive weld overlays for Alloy 82/182 butt welds in PWRs (MRP-169).
5. KHNP Report, 2007, Structural integrity report for dissimilar metal welds on SG drain nozzle of Young-Kwang Unit 3.
6. US NRC, 1992, "Technical report on material selection and processing guidelines for BWR coolant pressure boundary piping-final report", *NUREG-0313 revision 2*.
7. 고리 1호기 가압기 노즐 오버레이 용접부 잔류응력 해석, 2009, KINS/HR-980.
8. Rudland D., Csontos, A., Brust, F. W., Zhang, T., 2009, "Welding residual stress and flaw evaluation for dissimilar metal welds with Alloy 52 inlays", *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2009-77167.
9. Fredette L., Scott P., 2009, "Evaluation of mechanical stress improvement process (MSIP) as a mitigation strategy for primary water stress corrosion cracking in pressurized water reactors", Battelle.
10. Rudell, B., Badlani, M., Ray, E. A., 2007, "Mitigation PWSCC in Dissimilar metal butt welds of PWRs", *Trans. of 2007 PWSCC of Alloy 600 International conference & exhibit show*, EPRI.
11. Kim, J. S., 2011, "Investigation on the preventative maintenance schemes for the dissimilar metal welds of components in nuclear reactor coolant system", *Journal of KWJS*, Vol. 29, No. 2, pp. 147-154
12. Hurrel, P. R., Everett, D., Gregg, A., Bate, S., 2006, "Review of residual stress mitigation methods for application in nuclear plant", *Trans. of ASME PVP conference*, PVP2006-ICPVT-11-93381.
13. Riccardella, P. C., Pitcairn, D. R., Giannuzzi, A. J., Gerber, T. L., 1988, "Weld overlay repairs from conception to long-term qualification", *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 34, pp. 59-82.
14. Toshiba Corporation, 2009, "IHSI preventative maintenance technique for primary loop recirculation piping, E-Journal of Maintenance", 1-2, NT6.
15. 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.
16. Brickstad, B., 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
17. Elocate, C. D., Dennis, R. J., Bouchard, P. J., Smith, M. C., 2005, "Three dimensional multi-pass repair weld simulations", *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 82, pp. 244-257.
18. ASME, 2004, Materials-Part D : Properties, AMSE Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. II.
19. Special Metals Corporation, 2007, Inconel 600 & 690 information, www.specialmetals.com.
20. ASME B&PV Code, Sec. XI, Div. I, Code Case N-740, "Dissimilar metal weld overlay for repair of class 1, 2, and 3 items".
21. Timoshenko, S., 1956, *Strength of Materials : Part II - Advanced Theory and Problems*, D. Van Nostrand.
22. ASME B&PV Code, Sec. XI, Div. I, Code Case

- N-766, "Nickel alloy reactor coolant inlay and onlay for mitigation of PWR full penetration circumferential Nickel Alloy dissimilar metal welds in Class 1 items".
23. British Energy Generation Ltd., 2004, Assessment of the integrity of structures containing defects, R6, II.7.
 24. Oh, C.-Y., Song, T.-K., Shim, K.-B., Kim, J.-S., Kim, Y.-J., Lee, K.-S., 2009, "Effect of similar metal weld and preemptive weld overlay on residual stress of repair weldment in surge nozzle", **한국전산구조공학회 논문집**, 22(6), pp. 557-564.
 25. Song, T.-K., Oh, C.-Y., Kim, J.-S., Kim, Y.-J., Lee, K.-S., Park, C.-Y., 2011, "The safe-end length effect on welding residual stresses in dissimilar metal welds of surge nozzles", *Engineering Fracture Mechanics*, 78(9), pp. 1957-1975.
 26. 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", *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 9, pp. 770-781.
 27. ABAQUS, 2007, ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.7. Dassault Systemes Inc.
 28. Dennis, R. J., Leggatt, N. A., Gregg, A., 2006, "Optimisation of weld modeling techniques-Bead on plate analysis", *Trans. of ASME PVP*, PVP2006-ICPVT-11-93907.