

원자로 입출구 노즐 Alloy 82/182 이종금속 용접부 Weld Inlay 적용 후 초음파나노표면개질이 잔류응력 완화에 미치는 영향

조 홍 석* · 박 익 근** · 정 광 운***,†

*서울과학기술대학교 에너지환경 대학원 에너지시스템 공학과

**서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

***한전KPS(주) 기술연구원

The effect of ultrasonic nano crystal surface modification for mitigation of the residual stress after weld inlay on the alloy 82/182 dissimilar metal welds of reactor vessel in/outlet nozzles

Hong Seok Cho*, Ik Keun Park** and Kwang Woon Jung***,†

*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National Univ. of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

**Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

***Technology Research and Development Institute, KEPCO KPS, Naju 520-350, Korea

†Corresponding author : jungkw99@kps.co.kr

(Received January 26, 2015 ; Accepted March 31, 2015)

Abstract

This study was performed to investigate the effect of ultrasonic nano crystal surface modification (UNSM) on residual stress mitigation after Weld Inlay repair for butt dissimilar metal weld with Alloy 82/182 in reactor vessel In/Outlet nozzle. As-welded and Weld Inlay specimens were made in accordance with design standard of ASME Code Case N-766, and two planes of their weld specimens were peened by the optimum UNSM process condition. Peening characteristics for weld specimens after UNSM treatment were evaluated by surface roughness and Vickers hardness test. And, residual stress for weld specimens developed from before and after UNSM treatment was measured and evaluated by instrumented indentation technique. Consequently, it was revealed that the mitigation of residual stress in weld metal after Weld Inlay repair of reactor vessel In/Outlet nozzle could be possible through UNSM treatment.

Key Words : Reactor vessel nozzle, Alloy 82/182, PWSCC, Weld Inlay, UNSM, Residual stress

1. 서 론

원자로 입출구 노즐(SA508: Ferritic nozzle)부는 스테인리스강 안전단(SA182: Austenitic safe end of piping) 사이에 Alloy 600 계열(Alloy 82/182) 재질을 이용한 이종금속 용접부로 결합되어 있다. 이들 용접부는 원전의 가동년수 증가와 함께 원자로 냉각재와의 접

촉, 재료열화 및 용접부 잔류응력 등의 복합적인 요인으로 인하여 일차수응력부식균열(PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Crack)과 같은 결함이 발생하고 있다¹⁻⁵⁾. 원자로 입출구 노즐 Alloy 600 이종금속 용접부의 PWSCC 결함에 대한 보수 방법 중의 하나로 Fig. 1과 같이 ASME Code Case N-766⁶⁾에서 제시하는 요건인 Weld Inlay 기술을 적용할 수 있다. 이 기술은 원자로 냉각재와 접촉하는 입출구 노즐 용접부의 PWSCC에

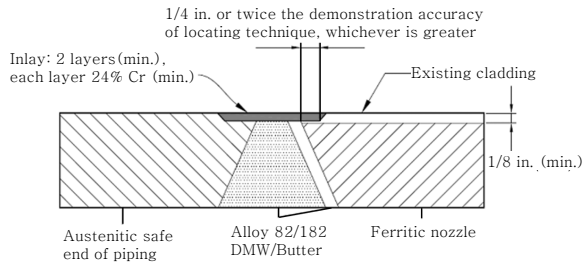


Fig. 1 Repair design condition of Weld Inlay in reactor vessel In/Outlet nozzle⁶⁾

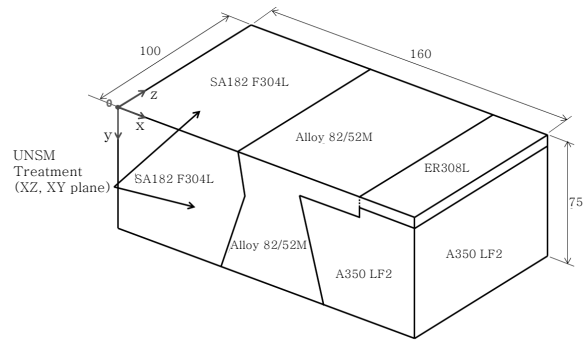


Fig. 2 Shape of weld specimen

민감한 Alloy 600 계열 재질의 두께 일부(최소 1/8 in.)를 기계 가공으로 제거하고, 그 위에 PWSCC에 저항성이 높은 재료인 Alloy 690 계열(Alloy 52M)의 용가재로 ASME Code Case N-803⁷⁾의 건식 레이저용접 템퍼비드 기법(Dry underwater laser beam welding temper bead technique)을 이용하여 클래딩(cladding) 용접하는 방법이다.

한편, Weld Inlay 용접 후 용착된 이종금속 용접부와 열영향부는 국부적인 가열과 냉각으로 인한 수축으로 인장 잔류응력이 존재하게 되며, 이는 PWSCC 감수성을 높이기 때문에 Weld Inlay 용접부 내에 존재하는 잔류응력을 완화시킬 필요가 있다. 현재 원자로 냉각재 1차계통 맞대기 이종금속 용접부에 적용되고 있는 잔류응력 완화 기술로는 기계적 응력 완화 기술 (MSIP: Mechanical Stress Improvement Process)⁸⁾, 레이저 피닝 (LP: Laser Peening)⁹⁻¹¹⁾, 워터젯 피닝 (WJP: Water Jet Peening)¹²⁾ 등이 있으며, 주로 해외 기술에 국한되어 있다.

본 연구에서는 원자로 입출구 노즐 Weld Inlay 적용 후 잔류응력을 완화시키기 위한 방법으로 초음파 진동에너지로 표면 압축 잔류응력을 형성시킬 수 있는 초음파나노표면개질(UNSM: Ultrasonic Nano Crystal Surface Modification)¹³⁻¹⁶⁾ 기법의 타당성을 평가하기 위하여 Weld Inlay 시편을 제작하여 UNSM 처리 후 UNSM 전후의 잔류응력을 계장화압입시험(IIT: Instrumented Indentation Technique)¹⁷⁾으로 측정하고, UNSM이 잔류응력 완화에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

Table 1은 본 연구에서 사용된 UNSM 처리 및 잔류응력 측정용 용접시편에 대한 각 부위별 재료를 나타내며, Fig. 2는 제작된 용접시편의 형상을 보여준다. 각 재료별 화학적 조성 및 물리적 특성은 ASME Code Section II¹⁸⁾를 참조한다.

2.2 용접시편 제작

Fig. 3(a)와 (b)는 As-welded와 Weld Inlay 용접시편 치수 정보를 나타낸다. 용접시편 세부 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, As-welded 용접시편은 모재의 용접할 부위에 대하여 Fig. 3의 용접부 형상 치수 조건을 바탕으로 V-Groove 개선 가공을 수행하였다. 노즐부 모재 A350 LF2 표면 위에 용가재 ER308L을 이용하여 용접절차 인정 시에 적용된 용접조건으로 두께 10 mm 클래딩 용접을 수행하였으며, A350 LF2 V-

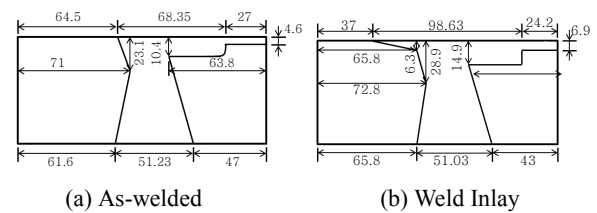


Fig. 3 Dimension of weld specimens (XY plane)

Table 1 Materials of each part of weld specimens used in this research

	Base metal		Filler wire metal		
	Nozzle	Safe end	Clad	Weld	Inlay
As-welded	ASTM A350 LF2 (CS)	SA182 F304L (STS)	ER 308L (STS)	SFA5.14/5.11 (ERNiCr-3) (Alloy 82)	-
Weld Inlay					(ERNiCrFe-7A) (Alloy 52M)

Groove 개선면 위에 용가재 ERNiCr-3을 이용하여 10 mm의 버터링(Buttering) 용접을 수행하였다. 클래딩 용접부 표면과 V-Groove 개선 버터링 용접부 표면에 대하여 평탄도를 유지하기 위하여 표면으로부터 3 mm 정도까지 정삭 가공 처리하였다. 정삭 가공 후, 용접부 내 결함 여부를 확인하기 위하여 초음파탐상검사(UT: ultrasonic testing)와 합금분석검사(PMI: positive material identification)를 이용한 비파괴 검사를 실시하였다. 용접 결함 미 검출 확인 후, 608~612°C에서 2Hr 40min 조건 하에 용접후열처리(PWHT)를 수행하였다. PWHT 후 열처리 과정에 따른 결함 발생 여부를 확인하기 위하여 UT를 이용한 비파괴 검사를 재실시하였다. 한편, 용접시편은 시편 사면을 완전히 구속시킨 후, V-Groove 개선 공간에 ERNiCr-3을 이용하여 용접을 실시하였다. V-Groove 이종금속 용접부에 대하여 결함 유무를 확인하기 위하여 방사선투과검사(RT: radiographic test), UT, PMI 등의 비파괴 검사를 실시하였으며, 또한 용접부 표면 내 존재하는 잔류응력 측정을 위하여 측정부 두 평면에 대하여 표면 정삭 및 연마 가공을 실시하였다.

Weld Inlay 용접시편 제작은 Fig. 3(b)와 같이 Weld Inlay 레이저 육성용접 할 부위에 대하여 개선 가공을 실시하였으며, 초층 용접 시 Safe end의 SA182 F304L 모재에는 ER308L, 노즐부의 A350 LF2에는 ERNiCrFe-7A로 용착시켰으며, 두 번째 층 이상에서는 ERNiCrFe-7A로 용접을 실시하였다. Weld Inlay의 레이저용접 조건 특성은 최대 출력 6.6 kW, 초점거리 340 mm, 초점심도 0.3 mm의 사양을 가지는 고출력 디스크 레이저를 이용하여 레이저출력 2 kW, 용접 속도 20 mm/s 용접 조건 하에서 15번째 층까지 육성용접을 수행하였다. 용접 후, 레이저 용접부 표면을 정삭 및 연마 가공을 실시하였다.

2.3 UNSM 처리 및 공정 조건

Fig. 4와 같이 UNSM은 초음파 진동에너지를 이용하여 정적 및 동적하중을 부가하는 초경 볼을 이용하여 1초당 20,000~40,000번, 단위면적당 1,000~10,000번/mm² 정도로 가공물 표면을 직접 타격한 후 국부영역에 대하여 급격한 소성변형을 일으키고 이로 인해 표층부의 조직을 나노결정구조의 미세조직으로 개질함과 동시에 압축 잔류응력을 부가하는 기술이며, 이러한 나노결정 구조 금속 표면은 피로파괴의 시작인 균열 생성 지연, 재료의 피로수명 연장, 그리고 마모물 저감을 통한 내마모성 수명을 연장시키는 특징을 가지

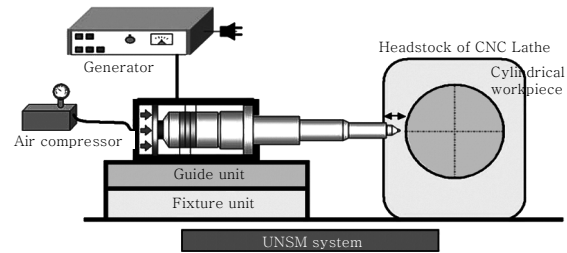


Fig. 4 Schematic configuration of UNSM system

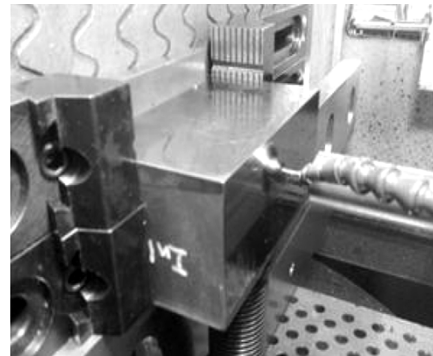


Fig. 5 UNSM treatment for weld specimen

고 있다.

Fig. 5는 용접시편에 대한 UNSM 처리 실제 장면을 나타낸다. 처리 표면은 Fig. 2와 같이 XZ와 XY의 두 개 평면으로 전체 면적에 대하여 UNSM 처리를 수행하였다. 용접시편에 대한 UNSM 처리 시 용접시편 내 잔류응력 개선 효과를 획득할 수 있는 최적 공정 처리 조건을 도출하기 위하여 4개의 가공 변수에 대하여 처리 조건(30~40N static force, 1.5~3.0m/min 속도, 35~50 μ m 진폭, 1.2~2mm 팁 반경)를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 표면 내 압축 잔류응력을 크게 부가시키기 위하여 얻은 Static force, 속도, 진폭, 팁 반경의 최종 처리 조건은 각각 30N, 2.1m/min, 50 μ m, 1.2mm 이다.

2.4 잔류응력 측정 위치 및 방향

Fig. 6은 UNSM 처리 전후 용접시편에 대한 잔류응력 측정 포인트 위치 정보를 나타낸다. 잔류응력 측정 위치(Line1과 Line2)는 원자로 입출구 노즐 배관 내부로 일차냉각재와 접촉하는 표면이다. 잔류응력 측정을 위한 장비로는 프론틱스사의 AIS3000 Compact의 IIT 장치이다. IIT 압입 시험 경우, 비커스압입자와 구형압입자 간 측정 거리는 압입으로 인한 가공경화의 영향을 피하기 위하여 약 3 mm 정도로 이격하여 측정하였다.

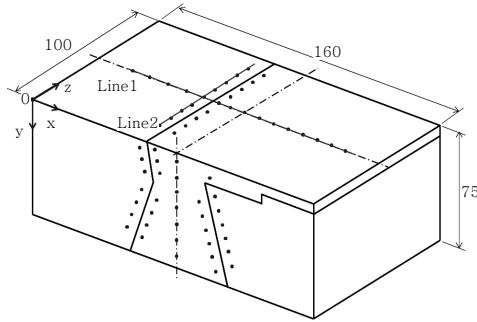


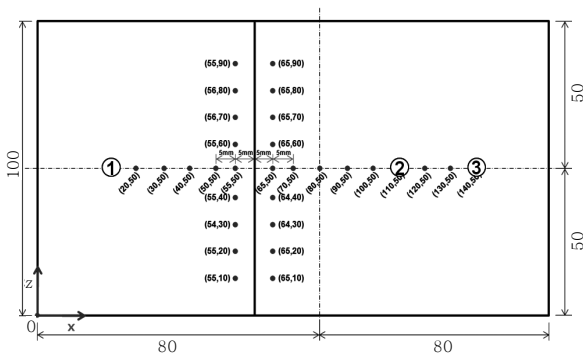
Fig. 6 Location information of residual stress measurement for weld specimen

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 UNSM 처리 결과

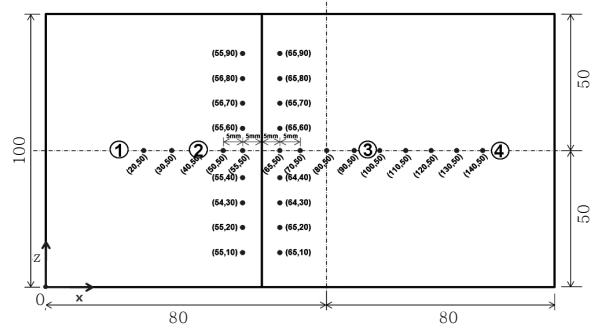
As-welded와 Weld Inlay 용접시편에 대하여 2.3 절에서 얻은 UNSM의 최적 공정 조건 적용 시 용접시편에 대한 품질 평가를 수행하였다. Fig. 7은 As-welded와 Weld Inlay 용접시편에 대한 UNSM 처리 후 가공된 표면에 대한 중심선표면거칠기(Ra, μm)를 측정된 결과이다. As-welded 용접시편의 XZ 평면의 표면거칠기(Ra)는 0.075~0.113 μm 범위였으며, Weld Inlay 용접시편의 경우는 0.128~0.133 μm 범위였다. 이 결과는 잔류응력 측정을 위한 IIT 시험에서 요구하는 표면조도 기준치를 만족하였다.

Fig. 8은 As-welded와 Weld Inlay 용접시편에 대한 UNSM 처리 전후 가공된 표면에 대한 비커스경도값(Hv)을 측정된 결과이다. XZ 평면에서 UNSM 처리 후 경도값을 측정된 결과, As-welded 용접시편의 경우, 1, 2번의 스테인리스강(SA182 F304L)의



Specimen	Surface roughness (Ra, μm)		
	1	2	3
As-Welded	0.075	0.113	0.106
Weld Inlay	0.133	0.133	0.128

Fig. 7 Surface roughness measurement after UNSM treatment (XZ plane)



Specimen		Vickers hardness (Hv)			
		1	2	3	4
As-Welded	Before	139	211	173	186
	After	159	240	229	238
Weld Inlay	Before	138	210	175	173
	After	154	243	230	237

Fig. 8 Vickers hardness measurement after UNSM treatment (XZ plane)

경도값은 UNSM 처리 전과 비교하여 평균 14%, 3, 4번의 Alloy 82 경우는 평균 30% 증가하였고, Weld Inlay 용접시편의 경우, 1, 2번에서 평균 14%, 3, 4번의 Alloy 52M에서 평균 34% 증가하였음을 확인하였다. Alloy 52M의 경도 증가 비율이 스테인리스강보다 2배 정도 차이를 보였으며, Alloy 52M이 스테인리스강보다 가공경화 효과가 더 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 이 결과로부터, 두 종류의 용접시편에 대한 UNSM 처리 후 재료 표면의 경화 정도는 다소 증가하였으나, 균열 민감도를 증가시킬 우려는 없는 것으로 판단된다.

3.2 As-welded 용접시편 UNSM 처리 전후 잔류응력 분석 결과

Fig. 9는 UNSM 처리 전후 As-welded 용접시편에 대한 포인트별 잔류응력 측정 결과를 보여준다. As-welded 용접시편에 대한 UNSM 전후 잔류응력 측정값을 비교한 결과, 용접시편 내 재료별(SA182 F304L: SS, Alloy 82: Al) UNSM 처리 전 IIT 잔류응력 측정값은 스테인리스강, Alloy 82 재료별 최대 인장/압축 잔류응력이 각각 119.65 MPa과 -29.29 MPa, 74.26 MPa과 -65.79 MPa이었으며, UNSM 처리 후 스테인리스강, Alloy 82 재료별 최대 인장/압축 잔류응력은 각각 42.76 MPa과 -86.53 MPa, 81.12 MPa과 -109.09 MPa이었다. 한편, UNSM 처리 전후 측정된 잔류응력을 비교한 결과, UNSM 처리 후에 얻은 측정 위치별 잔류응력값은 부분적으로 응력 완화 효과가 나타났지만, 반대로 잔류응력이 인장방향 쪽으

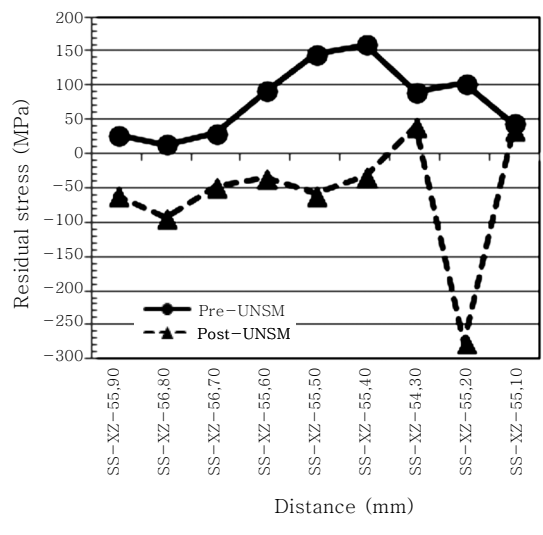
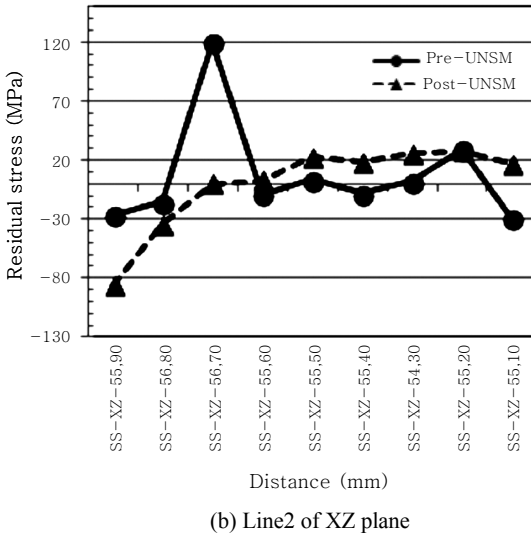
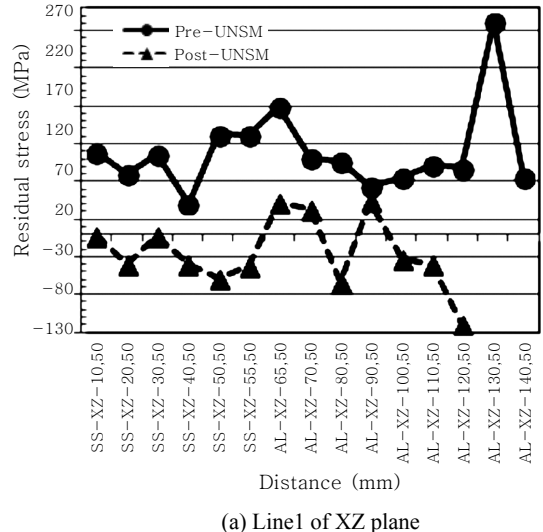
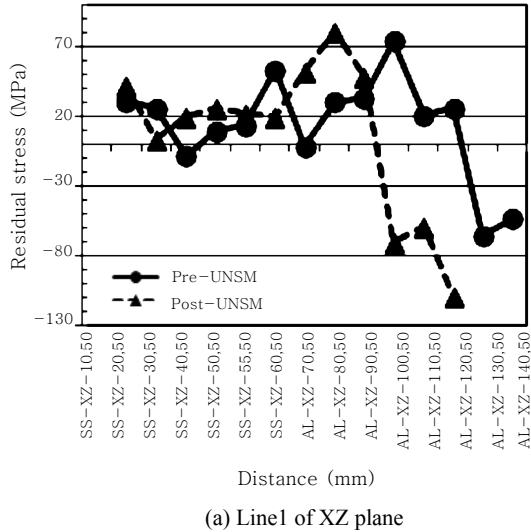


Fig. 9 Residual stress results after UNSM treatment of As-welded specimen (IIT)

Fig. 10 Residual stress results after UNSM treatment of weld Inlay specimen (IIT)

로 전환 또는 증가하는 경향도 나타났다. UNSM 처리 후 스테인리스강, Alloy 82의 최대 인장 잔류응력은 재료별 항복강도(SA182 F304L: 170MPa, Alloy 82: 207MPa)의 약 25%, 39%의 잔류응력이 존재함을 확인할 수 있었다. 앞에서 얻은 결과로부터, UNSM 처리 후 As-welded 용접시편 내 존재하는 인장 잔류응력은 재료의 항복강도 이하로 감소되었으나, UNSM에 따른 응력 완화 효과는 재료에 대한 측정 위치별로 부분적으로 완화 효과가 나타남을 확인하였다.

3.3 Weld Inlay 용접시편 UNSM 처리 전후 잔류응력 분석 결과

Fig. 10은 UNSM 처리 전후 Weld Inlay 용접시편에 대한 포인트별 잔류응력 측정 결과를 나타낸다.

Weld Inlay 용접시편에 대한 UNSM 처리 전 IIT 시험을 통한 잔류응력 측정 결과, 스테인리스강, Alloy 52M 재료별 최대 인장/압축 또는 최소 인장 잔류응력은 각각 159.03 MPa과 13.83 MPa, 280.95 MPa과 63.74 MPa이었으며, UNSM 처리 후 스테인리스강, Alloy 52M의 재료별 최대 인장/압축 잔류응력은 각각 39.41 MPa과 -276.08 MPa, 42.61 MPa과 -119.36 MPa이었다. 이 결과로부터, Weld Inlay로 인하여 인장 잔류응력이 다소 증가하였음을 알 수 있고, UNSM 처리를 통하여 인장 잔류응력이 완화 또는 압축 잔류응력으로 변환되는 것으로 나타났다. 한편, Fig. 10(a)와 (b)의 특정 위치에서 측정된 잔류응력값이 크게 벗어난 경우가 나타났는데, 이는 압입자가 시편 외각 부분에서 압입 시 편심하중 영향으로 인한 압

입 상태가 불안정하여 생긴 측정 오차로 추정된다.

UNSM 처리 후 스테인리스강, Alloy 52M의 최대 인장 잔류응력은 재료별 항복강도의 약 23%, 76%의 잔류응력이 존재함을 확인할 수 있었으며, UNSM에 따른 응력 개선 효과가 있음을 알 수 있다.

3.4 As-welded와 Weld Inlay 용접시편 잔류응력 비교 분석 결과

Fig. 11은 As-welded와 Weld Inlay 용접시편의 동일 측정 지점(Line1)에서 UNSM 처리 전후에 측정된 잔류응력을 분석한 결과이다. UNSM 처리 전의 경우, XZ 평면의 스테인리스강과 Alloy 82/52M 재료에서 Weld Inlay 용접시편이 As-welded 용접시편보다 잔류응력이 높게 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 구속조건에서 Weld Inlay 공정으로 인한 모재의

국부적인 가열과 냉각 수축으로 인한 영향으로 본다. 한편, UNSM 처리 후의 경우에는 UNSM 처리 전과는 반대로 Weld Inlay 용접시편이 As-welded 용접시편보다 잔류응력이 전반적으로 낮게 나타났다. 이러한 결과는, As-welded 용접 후 Weld Inlay 후속 공정에서 생성되는 용접부의 조대화 및 인장 잔류응력이 증가된 용접시편이 UNSM 처리에 의하여 용접부 표면의 결정립 미세화, 압축 잔류응력의 부가와 전위밀도의 증가 등으로 설명되는 소성유기변형 (deformation induced transformation) 현상이 효과적으로 작용하였기 때문으로 판단된다¹⁵⁾. 앞에서 얻은 결과로부터, 실제 Weld Inlay 용접 시 UNSM 처리 기술을 이용한다면 보수용접 후 용접시편 내 인장 잔류응력을 완화할 수 있는 응력 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자로 입출구 노즐 이중금속 용접부 Weld Inlay 용접 후 용접부 내 존재하는 잔류응력에 대하여 초음파나노표면개질(UNSM)처리 기술 적용 시 잔류응력 완화 효과에 대한 타당성을 검토하기 위하여 실험적 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) UNSM 적용으로 원자로 입출구 노즐 Alloy 600 재질의 이중금속 용접시편(As-welded, Weld Inlay)에서 잔류응력 완화 효과가 발생하였다.

2) As-welded 용접시편에 대한 UNSM 처리 전후 잔류응력 평가 결과, 용접시편 내 존재하는 최대 인장 잔류응력은 재료별 항복강도 이하의 범위내로 감소하였으나, 응력 완화 효과는 각 재료의 위치별로 부분적으로 나타남을 확인하였다.

3) Weld Inlay 용접시편에 대한 UNSM 처리 전후 잔류응력 평가 결과, 용접시편 내 존재하는 최대 인장 잔류응력은 재료별 항복강도 이하의 범위내로 감소하였으며, 인장 잔류응력은 전반적으로 현저하게 완화 또는 압축 잔류응력으로 변환되는 경향이 나타났다.

지금까지 얻은 연구 결과로부터, 실제 원자로 입출구 노즐 Weld Inlay 보수 시 UNSM 처리 기술을 적용한다면 보수 후에 존재하는 인장 잔류응력을 완화시켜 PWSCC를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Materials Reliability Program-114 : Evaluation of the effect of weld repairs on dissimilar metal butt welds, *Electric Power Research Institute*, (2006)
2. Materials Reliability Program-220 : Review of stress

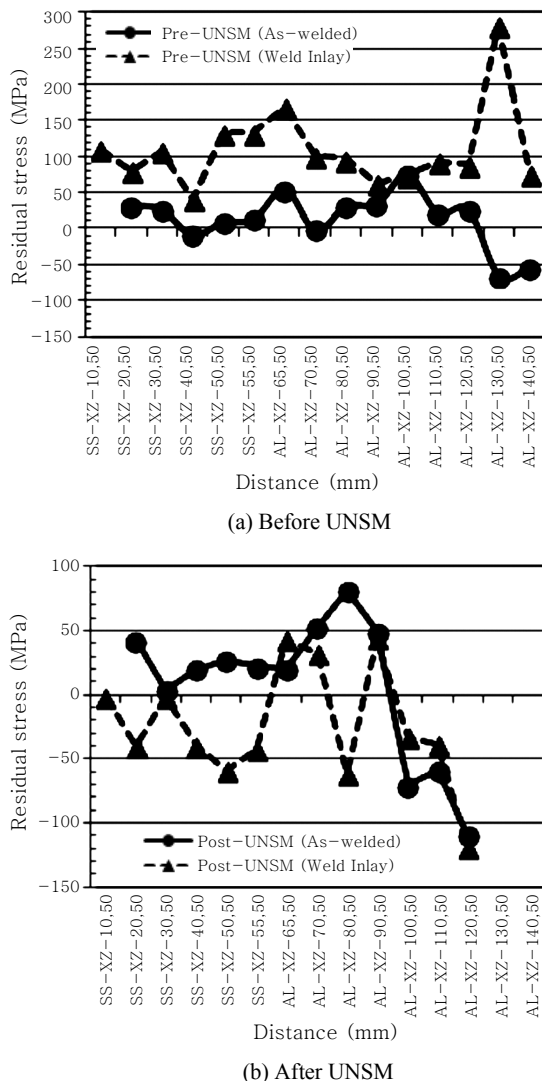


Fig. 11 Comparison of residual stress for As-welded and weld Inlay specimen

- corrosion cracking of alloys 182 and 82 in PWR primary water service, *Electric Power Research Institute*, (2006)
3. Takehisa Hino, Masataka Tamura, Yoshimi Tanaka, Wataru Kouno, Yoshinobu Makino, Shohei Kawano and Keiji Matsunaga: Development of underwater laser cladding and underwater laser seal welding techniques for reactor components, *Journal of Power and Energy Systems*, 3(1) (2009), 51-59
 4. Xudong Zhang, Eiji Ashida, Susumu Shono and Fukuhisa Matsuda: Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd:YAG welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 174 (2006), 34-41
 5. Sang-Chul Kim and Mann-Won Kim: PWSCC crack growth analysis using numerical method in the inner surface repair weld of nozzle, *Journal of KWJS*, 29(2) (2011), 64-71
 6. ASME Code Case N-766
 7. ASME Code Case N-803
 8. Materials Reliability Program-121: Mechanical stress improvement process (MSIP) implementation and performance experience for PWR applications, *Electric Power Research Institute*, (2006)
 9. Arvi Kruusing: Underwater and water-assisted laser processing: Part 1-general features, steam cleaning and shock processing, *Optics and Lasers in Engineering*, 41 (2004), 307-327
 10. Jialei Zhu, Xiangdong Jiao, Canfeng Zhou and Hui Gao: Applications of underwater laser peening in nuclear power plant maintenance, *Energy Procedia*, 16 (2012), 153-158
 11. Materials Reliability Program-162: An evaluation of surface stress improvement technologies for PWSCC mitigation of Alloy 600 nuclear components, *Electric Power Research Institute*, (2006)
 12. Materials Reliability Program-267: Technical basis document for primary stress corrosion cracking mitigation by surface treatments, *Electric Power Research Institute*, (2010)
 13. Amrinder Gill, Abhishek Telang, S.R. Mannava, Dong Qian, Young-Shik Pyoun, Hitoshi Soyama and Vijay K. Vasudevan: Comparison of mechanisms of advanced mechanical surface treatments in nickel-based superalloy, *Materials Science & Engineering A*, 576 (2013), 346-355
 14. Min-Soo Suh, Young-Shik Pyoun and Chang-Min Suh: Variation of fatigue properties in nanoskinned Ti-6Al-4V-Rotating bending and axial loading tension-compression cycle-, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 36(4) (2012), 443-449
 15. Young-Shik Pyoun, Jeong-Hyeon Park, In-Ho Cho, Chang-Sik Kim and Chang-Min Suh: A study on the ultrasonic nano crystal surface modification (UNSM) technology and it's application, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 33(3) (2009), 190-195
 16. Chang-Soon Lee, In-Gyu Park, In-Sik Cho, Jung-Hwa Hong, Tae-Gu Jhee and Young-Shik Pyoun: Rolling contact fatigue and residual stress properties of SAE52100 steel by untrasonic nano-crystal surface modification (UNSM), *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, 21(1) (2008), 10-19
 17. Won-Seok Song, Seung-Gyu Kim, Hee-Jun Ahn, Kwang-Ho Kim and Dong-Il Kwon: A study on utilizing instrumented indentation technique for evaluating in-field integrity of nuclear structures, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 33(2) (2013), 165-172
 18. ASME Boiler and Pressure Code Section II Part A, C, 2010 Edition