

원전 가압기 히터슬리브 J-Groove 이종금속 용접부 보수를 위한 용접 공정변수 최적화에 관한 연구

조 홍 석* · 박 익 근** · 정 광 운***,†

*서울과학기술대학교 에너지환경 대학원 에너지시스템 공학과

**서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

***한전KPS(주) 기술연구원

A Study on optimization of welding process parameters for J-Groove dissimilar metal weld repair of pressurizer heater sleeve in nuclear power plants

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 20, 2015 ; Accepted February 28, 2015)

Abstract

This study was performed to develop repair technology for J-Groove dissimilar metal weld of pressurizer heater sleeve in nuclear power plants. Pad, J-Groove automatic welding and mechanical machining equipments to develop repair technology using 'Half Nozzle Repair' were designed and manufactured. To obtain the optimum welding process parameters during Pad temperbead overlay welding, several welding experiments using Taguchi method were conducted. Weldability of Pad overlay weld specimens was estimated by PT/RT test, FE-SEM, EDS and Vickers hardness test. Also, J-Groove welding to adjust weld shape conditions requiring in ASME Code was carried out and its integrity of weld specimens was evaluated through PT/RT test and optical microscope. Consequently, it was revealed that Pad and J-Groove overlay welding for dissimilar metal weld of pressurizer heater sleeve could be possible to meet Code standard without weld defect.

Key Words : ASME code, Temperbead welding, J-Groove welding, Half nozzle repair, Vickers hardness

1. 서 론

현재 국내외에서 가동 중인 원전의 원자로 상부헤드 CRDM (Control Rod Drive Mechanism) /CEDM (Control Element Drive Mechanism) 소구경 관통관, 원자로 하부헤드 BMI (Bottom Mounted Instrumentation) 소구경 관통관 및 가압기 (Pressurizer) 하부헤드 소구경 관통관은 저합금강 재료의 헤드본체와 Alloy 600 (Alloy 82/182) or Alloy 690 계열 노즐부 사이에

약 13% ~ 22%의 Cr 함유량을 포함하고 있는 Alloy 600 재료로 J-Groove 형태의 이종금속 용접방법으로 결합되어 있다. 하지만, 이들 이종금속 용접부에서 환경인자, 재료열화인자, 응력인자 등의 복합적인 요인과 더불어 원전의 가동년수 증가로 인하여 Fig. 1과 같이 일차수응력부식균열(PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Crack)과 같은 결함이 발생하고 있다¹⁻⁶⁾.

특히, 원전 가압기 소구경 관통관 이종금속 용접부는 다수의 해외 원전에서 손상이 발생하여 Alloy 600 재질 대신에 PWSCC에 보다 저항성이 높으며 약 28%

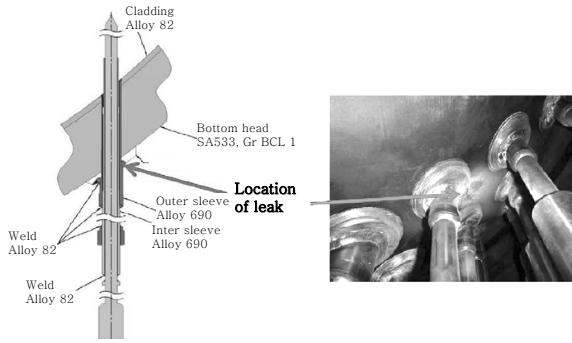


Fig. 1 Calvert Cliffs Unit 2 pressurizer heat sleeve assembly configuration and leakage location2)

~ 31%의 Cr 함유량을 포함하고 있는 Alloy 690 (Alloy 52M) 재질로의 교체와 함께 일체형 덧살붙임 용접 보수(Integral Pad Half Nozzle Repair), 노즐 내부 용접 복합 덧살붙임 용접 보수(Mid-wall Weld Pad Repair) 및 기계적 노즐 밀봉 장치(Mechanical Nozzle Seal Assembly) 등의 다양한 정비 기술을 이용하여 결합 부위에 대한 보수를 수행하였다.

이와 같이 원전 원자로 헤드 및 가압기 등과 같은 1 등급기기 소구경 관통관은 PWSCC에 대한 결합발생 시 경제적 손실 뿐만 아니라 원전 신뢰성에 영향을 미치기 때문에 결합 부위에 대한 보수 및 예방정비 기술 개발이 반드시 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 원전 가압기 히터슬리브 Alloy 600 재질의 J-Groove 이중금속 용접부 결합 부위에 대하여 Half Nozzle Repair 기법으로 정비하기 위하여 덧살붙임(Pad)/J-Groove 자동 용접장비 설계, 제작 및 최적 용접공정 개발을 위한 용접시편 제작과 용접성 품질 및 건전성 평가를 수행하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서 사용한 재료는 가압기 헤드 원재료인 SA508 저합금강 대신 A285 일반 구조용강 재질의 Pad 및 J-Groove 용접시편과 Alloy 690(Alloy 52M) 재질의 용가재이며, Table 1은 각 재료별 화학 성분을 나타낸다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 원전 가압기 히터슬리브 소구경 관통관 Alloy 600 재질의 J-Groove 이중금속 용접부 결합 부위에 대한 정비 방법으로 Half Nozzle Repair에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이 기술의 주요 과정은 Fig. 2와 같이 히터슬리브 가압기 하부 모재 가까운 위치까지 절단 및 보링 가공 후 배관 모재와 동일 재료로 플러깅하여 밀폐시킨다. Pad 오버레이용접의 경우, 용접부 형상 설계 조건에서 요구하는 초층에서 세 번째층까지는 ASME Code Case N- 638-1⁷⁾ 요건인 최대 층간온도(350°F) 및 용접입열량(Max. 45 KJ/in)을 충족시키면서 Alloy 690 용가재로 용접절차서 인정 시 적용한 기계 GTAW 텀퍼비드 용접 공정 변수를 이용하여 오버레이용접을 수행하여 후속 층을 용착한다. J-Groove 오버레이용접의 경우, 용접부 형상 설계에서 요구하는 조건에 맞게 J- Groove 가공한 후, Alloy 690 재질의 새로운 노즐을 삽입하여 Alloy 690 용가재로 용접절차서 인정 시 사용된 용접 공정 변수를 적용하여 오버레이용접을 수행한다.

Fig. 3(a)와 3(b)는 본 연구에서 사용한 Pad와 J-Groove 자동용접장비이다. Pad 오버레이용접 중 텀퍼비드용접의 경우, 단층용접(single pass welding) 시 ASME Code 요건을 충족하는 최적용접 공정 변수(용접전류/전압, 용접속도, 용가재송급속도)를 정량적으로 도출하기 위하여 실험계획법 중 하나인 다구찌기법(Taguchi method)을 이용하여 Melt run 용접 실험을 수행하였으며, 각 용접 조건별 용접결합 유무, 절단면 용접부 경도 및 미세조직 관찰을 통해 용접성을 평

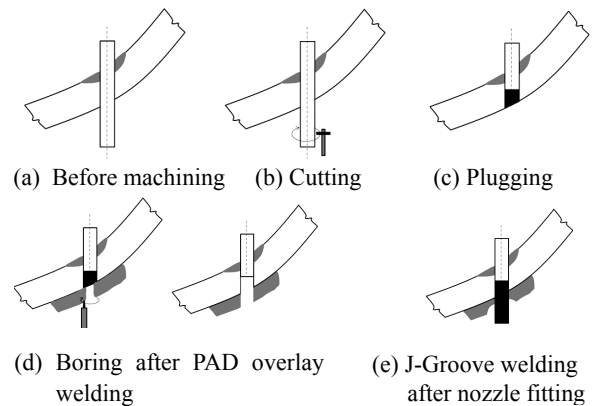
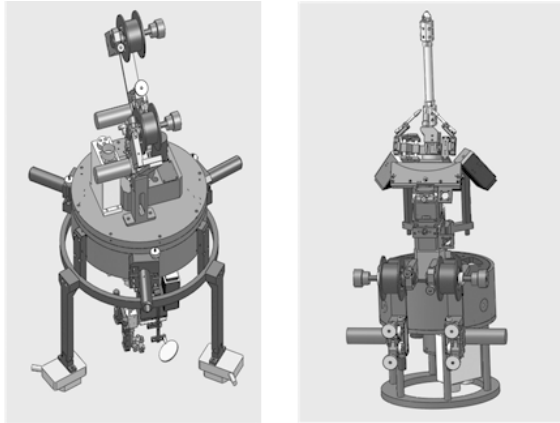


Fig. 2 Welding procedures of Half Nozzle Repair

Table 1 Chemical compositions of weld specimen and filler wire used

	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Ti	Cr	Ta	Mo	Al
A285	-	-	Bal.	0.05	0.05	-							
Alloy 52M	0.04	1.0	7~11	0.02	0.015	0.5	0.5	Bal.	1.0	28~31.5	0.1	0.5	1.1



(a) Pad (b) J-Groove

Fig. 3 Automatic welding machines

가하였고, 또한 용접입열량과 희석률 간의 상관관계를 분석하였다. 앞에서 도출된 최적 용접 공정 변수를 적용하여 초층에서 세 번째층까지 텀퍼비드용접 후 실제 텀퍼링효과를 얻을 수 있는지 확인하기 위하여 후속 층까지 오버레이용접을 한 용접시편과 단층용접을 한 용접시편에 대하여 용접 품질을 비교 분석하였다. 용접시편의 용접부 표면과 용착금속 내 균열과 같은 결함 유무를 확인하기 위하여 액체침투탐상검사(PT)와 방사선 투과검사(RT)를 수행하였다. Pad 오버레이용접 시편의 절단면 용접열영향부에 대한 비커스경도 측정, FE-SEM을 통한 미세조직 관찰 그리고 용착금속부의 Cr 함유량을 확인하기 위한 EDS 분석을 수행하였다. J-Groove 용접의 경우, 용접절차서 인정 시 적용된 용접 공정 변수를 이용하여 Fig. 3(b)의 용접장비를 이용하여 정방향/역방향 순으로 180°씩 회전 이동하면서 용접을 수행하고 용접부에 대한 품질을 평가하였다.

3. 다구찌기법을 이용한 단층용접 결과

단층용접 실험은 Table 2에서 나타낸 것과 같이 4개의 제어인자와 용접 공정 변수 조건별 사용 범위는 3개의 수준으로 정하였고, Table 3의 L₉(3⁴)의 직교배열표를 이용하여 용접 공정 변수를 변화시키면서 Melt run 용접 실험을 수행하였다. Fig. 4는 각 용접 실험 조건별로 얻은 용접 품질 결과로, 용접비드폭(Bead width, BW), 적층높이(Deposited height, H), 용입깊이(Penetration depth, PD)를 측정하여 용접 품질을 평가하였다. 평가 결과, 용접전류가 증가할수록 용접비드폭과 용입깊이는 증가하였고, 용접속도가 증가할수록 용입깊이는 큰 변화가 없었으나, 적층높이는 감소하는 것으로 나타났다. 절단면에서의 정량적인 용접 품질 평가

Table 2 Factors and levels used

Factors	Level		
	1	2	3
Welding current(A), P1	180/100	205/115	230/130
Welding speed (cm/min), P2	10.5	11.5	12.5
Wire feeding speed(cm/min), P3	188	208	227
Gas flow rate(L/min), P4	38	38	38

Table 3 L₉(3⁴) orthogonal array

Exp. No.	Number of Parameters(P)			
	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

결과, 용접비드폭은 최소 7.37 mm에서 최대 10.16 mm, 적층높이는 최소 1.27 mm에서 최대 1.67 mm, 용입깊이는 최소 0.44 mm에서 최대 1.1 mm 이내 범위 정도에 있음을 확인하였다. 또한, 전체 용접 실험 조건(No.1-9)에서 용접부 표면에 유의할만한 용접결함 없이 양호한 용접 품질을 얻을 수 있었다.

다구찌기법에서의 평가 특성치는 특정한 목표치가 주어져 있는 경우인 망목특성 식 (1), 특성치가 작을수록 좋은 경우인 망소특성 식 (2) 그리고 특성치가 클수록 좋은 경우인 망대특성 식 (3)과 같이 세 가지로 분류된다⁸⁾.

$$SN = 20 \log \left(\frac{\bar{y}}{\sigma} \right) \tag{1}$$

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \tag{2}$$

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \tag{3}$$

여기서, y_i 는 실험에서 얻은 데이터값(BW, H, PD)이고, \bar{y} 는 데이터의 평균값, σ 는 표준 편차를 나타내고

Exp.No	1	2	3
Appearances of weld surface 10mm			
Weld beads of cross section			
BW, H, PD (mm)	8.28, 1.52, 0.57	7.37, 1.67, 0.44	7.92, 1.56, 0.54

(a) Exp. No(1-3)

Exp.No	4	5	6
Appearances of weld surface 10mm			
Weld beads of cross section			
BW, H, PD (mm)	8.28, 1.52, 0.57	7.37, 1.67, 0.44	7.92, 1.56, 0.54

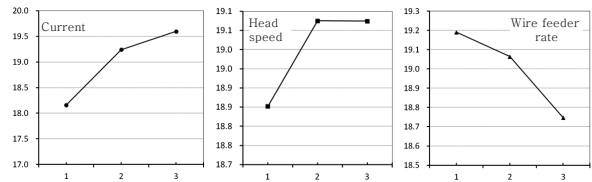
(b) Exp. No(4-6)

Exp.No	7	8	9
Appearances of weld surface 10mm			
Weld beads of cross section			
BW, H, PD (mm)	8.88, 1.55, 0.68	10.16, 1.37, 1.1	9.8, 1.27, 0.97

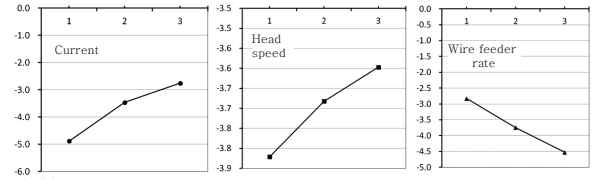
(c) Exp. No(7-9)

Fig. 4 Weld results obtained from experimental conditions using Taguchi method

n은 실험 횟수이다. 단층용접 시 용접비드폭과 적층높이를 평가 특성치로 선정하였으며, 용접비드폭은 망대특성으로 적층높이는 작을수록 좋으므로 망소특성을 이용하여 특성치를 계산하였으며 품질 특성에 의한 신호대 잡음비를 계산하여 S/N비 분석을 수행하였다. Fig. 5는 평가 특성치에 대한 각 제어인자별 S/N비 분석 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)와 (b)에서 S/N비 최대값과 최소값 차이가 클수록 인자에 더 큰 영향을 미치기 때문에 용접비드폭과 적층높이에서 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용접전류이고 다음은 와이어 송급속도와 용접속도로 나타났다. 용접비드폭은 망대특성이므로 평가 특성치를 최대화 하는 조건은 용접전류의 3수준 (230A/130A), 용접속도의 3수준 (12.5 cm/min), 와이어 송급속도의 1수준 (188cm/min)이며, 적층높이는 망소특성이므로 평가 특성치를 최소화 하는 조건은 마찬가지로 앞에서 얻은 용접비드폭 조건과 동일한 결과로 나타났다. 한편, Pad 오버레이용접의 경우, Fig. 7과



(a) Weld bead width



(b) Deposited height

Fig. 5 Comparison of S/N ratio for factors

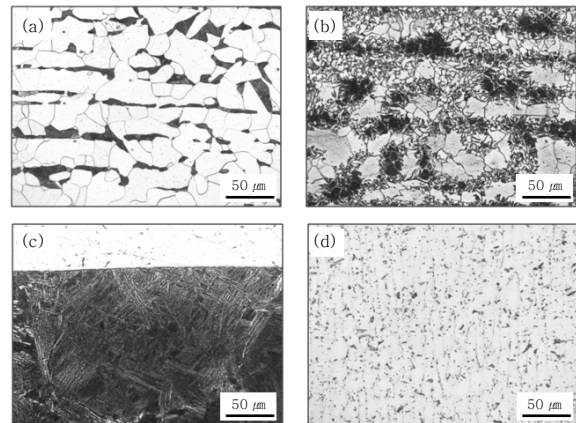


Fig. 6 Microstructure results of weld parts after single pass welding

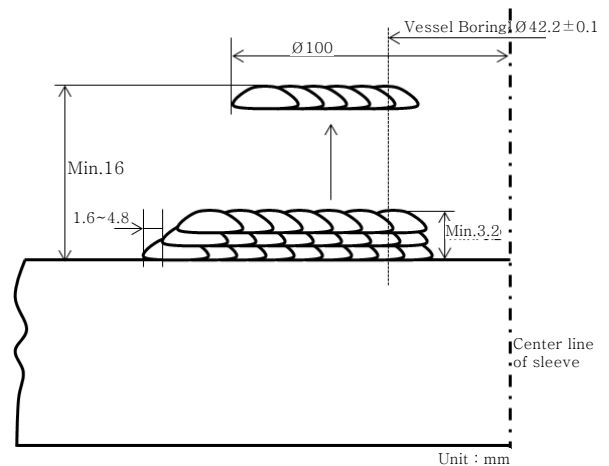


Fig. 7 Weld shape condition of pad overlay welding requiring in ASME code

같이 자동 텀퍼비드 용접 시 초층에서 세 번째층까지 요구되는 최소 적층높이(min. 3.2 mm)를 만족해야 하기 때문에 이 부분을 감안하여 용접전류 230A/130A, 용접속도 12.5 cm/min 및 와이어 송급속도 208

Table 4 Evaluation of welding qualities according to experimental welding conditions

Exp. No.	Heat Input (KJ/in)	Deposited Metal Area (in ²)	Dilution (%)
1	22.5	13.3×10 ⁻³	26.8
2	20.6	13.2×10 ⁻³	20.2
3	18.9	13.1×10 ⁻³	25.2
4	25.7	14.3×10 ⁻³	31.7
5	23.5	16.5×10 ⁻³	24.2
6	21.6	13.7×10 ⁻³	33
7	28.9	15.8×10 ⁻³	28.3
8	26.4	14.6×10 ⁻³	44.4
9	24.3	12.1×10 ⁻³	45

cm/min를 최적 용접 공정 변수 조건(실험조건 9번)으로 선정하였다. 한편, 선정된 용접 공정 변수가 본 연구의 템퍼비드용접 적용에 타당성이 있는지를 확인하기 위하여 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 발표한 논문을 참고하여 비교 분석한 결과⁹⁾, Table 4의 실험조건 9번의 용접입열량(24.3KJ/in)과 용착면적(12.1×10⁻³in²)에서 얻은 희석률 45% 값이 EPRI 연구결과와 상당히 유사함을 확인하였다.

실험조건 9번에 대한 단층용접 후 절단면 용접비드면 용접부위별 미세조직 특성을 파악하기 위하여 FE-SEM 관찰을 수행하였다. Fig. 6은 모재부(a), 결정립 미세부(b), 결정립 조립부(c), 용접금속부(d)의 미세조직 관찰 결과이다. 관찰 결과, 결정립 조립부 영역에서 용접 후 일반적으로 나타나는 취화하기 쉬운 침상조직이 발견되었으며, 결정립 미세부 근처 영역에서 모재부에 가까운 쪽으로 입상 펄라이트 조직이 나타남을 확인하였다. 용접부위별 경화 정도를 평가하기 위하여 경도값을 측정된 결과, 결정립 조립부 영역에서 모재부 경도값인 150 Hv보다 2배 높은 약 300 Hv로 나타났으며, 이 결과로부터 취화된 결정립 조립부 영역에 대한 조직 안정화를 얻기 위해서는 템퍼링 처리가 필요함을 알 수 있다.

4. 오버레이용접 결과

4.1 Pad 템퍼비드 오버레이용접 결과

3 절의 단층용접 시 얻은 최적 용접 공정 조건(실험조건 9번)을 기준으로 용접절차서 인정 시 적용된 Fig. 7의 Pad 오버레이용접부 형상 조건에 맞게 템퍼비드 오버레이 용접을 Table 5와 같이 수행하였다. Fig.

Table 5 Welding conditions in each layer during Pad temperbead overlay welding

Layer	Current (A)	Head Speed (cm/min)	Wire Feeder Rate (cm/min)	Overlap (%)	Number of pass
1	230/130	12.5	207	50	9
2	240/140	11.4	227	50	8
3	240/140	11.4	227	50	7
4	240/140	11.4	227	50	7
5~8	240/140	11.4	227	50	6

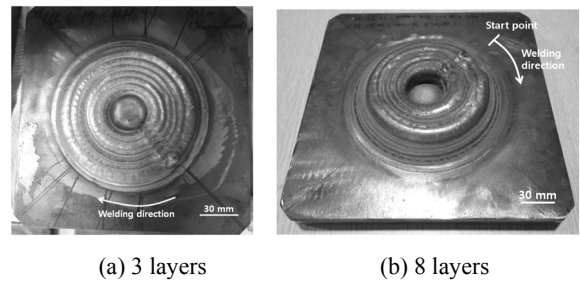


Fig. 8 Appearances of welding specimens after Pad overlay welding

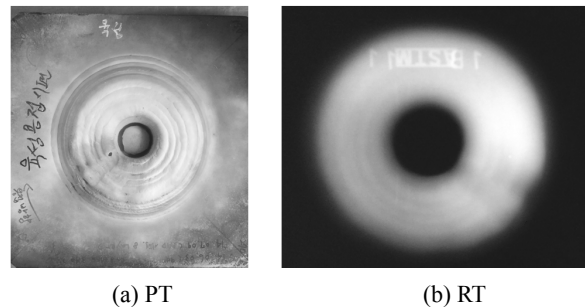


Fig. 9 PT (a) and RT (b) test results for Pad overlay weld specimen

8(a)와 (b)는 각각 초층에서 세 번째층까지의 템퍼비드용접한 시편과 최종 여덟 번째층까지 오버레이용접한 시편의 외관 사진이다. 용접부 표면에 대한 육안 검사 확인 결과, 특이할만한 용접결함이 발견되지 않았으며, Fig. 9의 PT와 RT 검사 결과에서도 유의할만한 결함지시가 없음을 확인하였다. 템퍼비드 효과를 검증하기 위하여 FE-SEM을 이용한 절단된 용접비드면의 용접부위별 미세조직 관찰 결과, 단층용접 시의 침상조직의 결정립 조립부 영역이 템퍼비드 적용 후 Fig. 10(c)와 같이 입상 펄라이트 조직으로 변화되었으며 용접열 영향부에 대한 비커스경도 측정 결과, Fig. 11과 같이 결정립 조립부 영역의 경도값이 약 200 Hv 정도로 크게 감소하였음을 확인하였다. 이 결과로부터 사용된 템

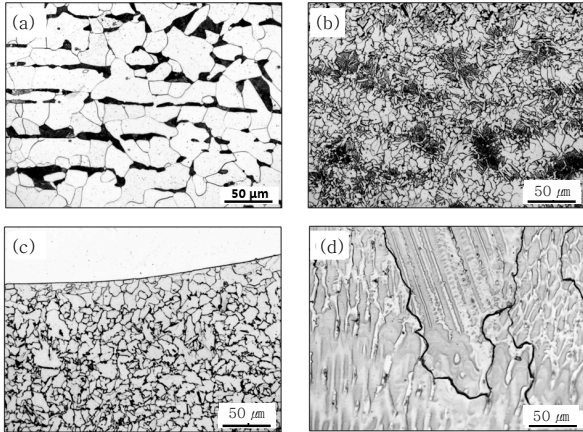


Fig. 10 Microstructure results of weld parts after Pad overlay welding

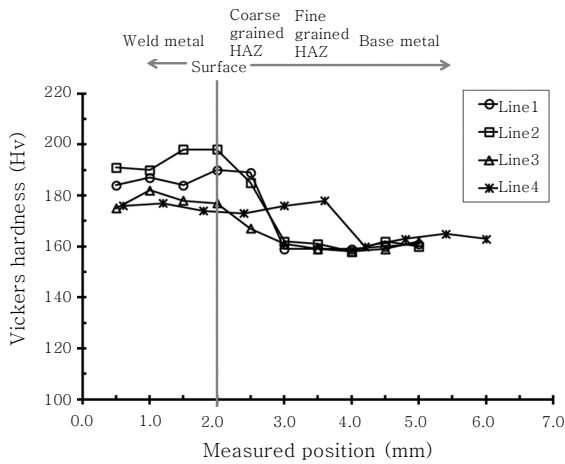
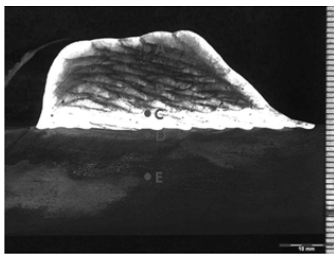


Fig. 11 Vicker's hardness results measured at weld parts of Pad overlay weld



(a)

Unit : wt%

	C	Si	Ti	Cr	Al	Mn	Fe	Ni
A	2.43	0.28	0.24	29.32	-	0.84	8.32	58.56
B	2.86	-	-	29.54	0.31	0.96	8.87	57.46
C	2.61	-	-	29.18	-	0.91	9.82	57.48
D	2.03	-	-	6.59	0.28	0.75	75.67	14.67
E	1.51	0.3	-	-	-	0.71	97.33	0.16

(b)

Fig. 12 Appearances of cross section after Pad overlay welding and its EDS results

퍼비드용접이 용접후열처리 없이도 용접열영향부의 연화와 조직 안정화를 이룰 수 있음을 확인하였다. 또한, 오버레이용접 시 ASME Code Case N-754¹⁰⁾ 요건에 요구하는 용착금속층의 Cr 함유량을 확인한 결과, Fig. 12와 같이 Pad 오버레이용접 시편의 용착금속층에 약 29% Cr 함유량이 존재하였으며, 이는 ASME Code 기준을 충족시킴과 동시에 PWSCC의 감수성을 낮출 수 있다는 것이 확인되었다.

4.2 J-Groove 오버레이용접 결과

Pad 오버레이용접 후 Fig. 2와 같이 보링 및 J-Groove 가공 후 용접절차서 인정 시 적용된 J-Groove 용접부 형상 조건에 맞게 용접 공정 변수를 Table 6과 같이 층별로 변화시키면서 용접을 수행하였다. 사용된 용접 변수는 용접절차서인정 시 적용된 기준값을 적용하였다.

Fig. 13은 코드 요건을 기준으로 한 J-Groove 용접부 형상 설계 조건이다. Fig. 14는 J-Groove 용접 후 용접시편 외관 사진과 용접부위 4곳(0°, 90°, 180°, 270°)에 대한 용접비드면 사진을 나타낸다. J-Groove

Table 6 Welding conditions for layers during J-Groove overlay welding

Layer	Current (A)	Head Speed (cm/min)	Wire Feeder Rate (cm/min)	Overlap (%)	Heat Input (KJ/in)
1	220/120	10.9	75.6	50	30.8
2	220/120	12.9	75.6	50	25.9
3	220/120	14.9	75.6	50	22.4
4	220/120	10.9	75.6	50	30.8
5	220/120	15.0	75.6	50	22.4
6	220/120	17.6	75.6	50	19.1
7	220/120	10.9	75.6	50	30.8

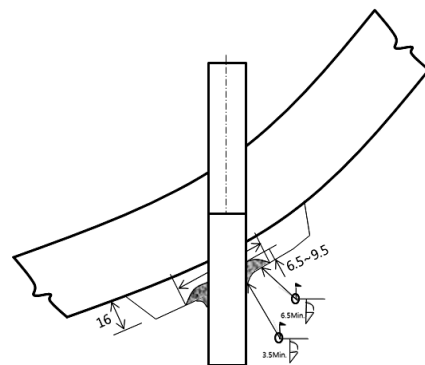


Fig. 13 Weld shape condition of J-Groove overlay welding requiring in ASME Code

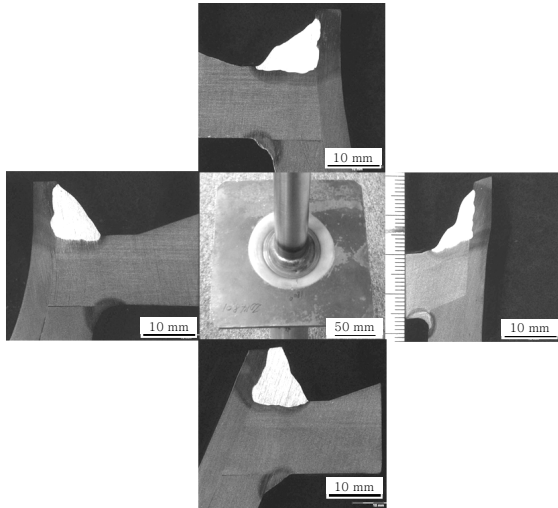


Fig. 14 Cross sections of weld parts after J-Groove overlay welding

용접 후 용접부 표면에 대한 육안검사 결과, 용접결합이 관찰되지 않았으며, PT와 RT 비파괴 검사에서도 유의할만한 결함지시가 나타나지 않음을 확인하였다. 또한, 절단면 용접부위별 용입부족 결함 유무를 확인한 결과, Fig. 14와 같이 완전용입이 이루어졌으며 미세 균열 및 Undercut 등과 같은 용접결합이 발생하지 않음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 원전 가압기 히터슬리브 소형 관통관 Alloy 600 재질의 J-Groove 이중금속 용접부 결함 발생 부위에 대한 정비 기술로써 Half Nozzle Repair 공정에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) Pad 단층용접의 경우, 다구찌기법을 이용하여 ASME Code에서 요구하는 템퍼비드용접을 만족할 수 있는 최적 용접 공정 변수를 도출하였다.
- 2) Pad 오버레이용접의 경우, Pad 용접부 형상 설계 요건에 맞게 오버레이용접이 가능하였으며, PT, RT, FE-SEM와 같은 용접 품질 평가 결과, 유의할만한 용접결합이 발견되지 않음을 확인하였다.
- 3) Pad 오버레이용접 시편의 용접열영향부에 대한 용접부위별 경도 측정 결과, 결정립 조립부 영역에서의 경도값은 단층용접 결과와 비교하여 약 100 Hv 정도 감소하였으며, 미세조직 관찰에서는 모재부에 가까운 입상 펄라이트 조직이 나타났다.

4) Pad 오버레이용접 시편의 용착금속층에 대한 Cr 함유량 측정 결과, ASME Code Case N-754에서 요구하는 28% 이상의 Cr 함유량 기준을 만족시켰다.

5) J-Groove 용접의 경우, J-Groove 용접부 형상 설계 요건에 맞게 용접이 가능하였으며, PT, RT, FE-SEM와 같은 용접 품질 평가 결과, 유의할만한 용접결합이 발견되지 않았다.

지금까지의 연구결과로부터, 개발된 용접장비의 성능을 확인하였으며, 기기별 현장 조건을 고려하여 장비를 보완한다면 원전 1등급기기 소구경 관통관 Alloy 600 재질의 J-Groove 이중금속 용접부에 대한 정비가 가능할 것으로 판단된다.

References

1. Materials Reliability Program-87, PWSCC of Alloy 600 type materials in non-steam generator tubing applications - Survey report through June 2002, (2006), Electric Power Research Institute
2. Materials Reliability Program-341, Laboratory examination results for Calvert Cliffs-2 pressurizer heater sleeve assembly, Electric Power Research Institute, (2012)
3. Materials Reliability Program-102, South Texas Project Unit 1 bottom mounted instrumentation nozzles (#1 and #46) analysis reports and related documentation, Electric Power Research Institute, (2009),
4. Materials Reliability Program-167, Safety evaluation for boric acid wastage of PWR reactor vessel bottom heads due to bottom-mounted nozzle leakage, Electric Power Research Institute, (2012)
5. Materials Reliability Program-220, Review of stress corrosion cracking of alloys 182 and 82 in PWR primary water service, Electric Power Research Institute, (2006),
6. In Chul Jung, Deog Nam Shim and Jin Gui Byun, Overlay welding of Inconel material for nuclear power components, *Journal of KWJS*, 27-2 (2009), 4-6 (in Korean)
7. ASME Code Case N-638-1
8. 이상복, 제3판, 기초부터 현장까지 알기쉬운 다구찌기법 (in Korean)
9. D.W. Gandy, S.J. Findlan and W.J. Childs, Repair welding of SA508, Class 2 pressure vessel steels utilizing the consistent layer temperbead technique, *Materials Ageing and Component Life Extension International Symposium*, (1995), 961-978
10. ASME Code Case N-754