

핵연료봉의 지르칼로이-4 봉단밀봉을 위한 레이저 용접성 조사

Investigation of the Weldability of Zircaloy-4 End Cap Closure of Nuclear Fuel Element by Laser

김수성, 김웅기, 이정원, 김종호, 양명승, 박현수

한국원자력연구소
대전시광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 중수로 핵연료봉의 봉단밀봉작업을 위한 레이저용접의 최적용접조건을 선정하는 것으로, 원자로내에서 핵연료 연소시 용접부의 안전성과 연료봉의 성능을 고려할 때 반드시 선행되어야 할 일이다. 중수로 핵연료봉의 봉단용접은 핵연료다발 조립공정의 전단계로서 지르칼로이-4 피복관에 소결체를 장입한 후 봉단으로 밀봉하는 공정이다. 본 실험에서는 향후 핫셀에서의 원격작업을 위한 레이저용접의 광섬유전송조건 및 레이저변수 선정과 지르칼로이-4 용접부에 대한 특성조사에 관한 것으로, 중수로연료봉의 모의시험편을 이용하여 기초실험이 수행되었다. 또한 지르칼로이-4 봉단레이저용접시 봉단마개와 피복관의 기하학적 이음구조와 이에 따른 비이드 및 용입의 영향에 관한 분석 및 플라즈마형성으로 인한 보호가스의 영향 등을 비교하였으며, 용접후에 미세경도, 인장시험, 밀봉과열시험 및 금속학적 관찰을 통하여 양호한 용접결과를 얻었다.

Abstract

The selection of proper welding conditions for end cap closure of nuclear fuel element is important in respect to the soundness of weldment and the improvement of the performance of nuclear fuels during the irradiation in reactor. This study is to investigate the optimization of laser parameters, optical fiber transmission and joint geometry, and the characteristics of bead width and penetration in connection with shielding gas and plasma formation during the laser welding. In this experiment, the results show that the laser beam weldability is satisfactory in respect of the micro hardness, mechanical test and microstructure.

1. 서 론

최근 선진국에서는 이미 새로운 핵연료개발 및 조사시험용 캡슐제작 등이 활발히 진행되고 있음에 따라 핵연료제조 및 특수용도의 연료봉제작에 대한 고방사성의 핫셀장치 내에서 원격으로 용접작업이 수행되어지고 있다.^[1,2] 이때 기존의 용접방법에 비해 우수한 가공능력을 가진 레이저는 현재 광섬유 전송방법이 널리 보급되면서부터 활발히 응용되고 있으며, 특히 핵연료 부품가공에서 용융점이 높은 지르코늄용접이 매우 유용하게 활용되어지고 있는 실정이다. 여기서 고밀도에너지인 광선을 이용하는 레이저용접은 차폐 시설내에서 원격으로 광섬유전송이 가능하다는 특성 때문에 용접작업이 용이하나 그 반면에 보다 높은 용접품질을 확보해야 한다는 까다로운 점도 있다. 핵연료제조의 공정에 있어서 연료봉의 봉단용접은 핵연료다발 조립공정의 전 단계로서 지르칼로이-4 피복관에 소결체를 장입한 후 봉단마개로 용접하여 제조하는 작업이며, 용접품질면에서도 연료봉의 원주방향 어느 한 지점에서라도 결함이 있을 경우 연소중에 핵분열 물질이 누출되어 안전성과 직결되는 문제를 야기한다는 것을 고려하면 어느 공정보다도 높은 신뢰성이 요구된다.^[3]

본 연구는 펄스형 500W Nd:YAG레이저 및 원격전송이 가능한 광섬유를 사용하여 현재 중수로형 핵연료봉의 지르칼로이-4 봉단밀봉을 위한 레이저용접의 최적조건과 용접부의 성능을 조사하기 위한 것이다. 먼저 광섬유전송기구의 광학조건별 용접특성을 분석하였으며 적절한 봉단용접을 위해서 시험편의 기하학적 형상을 변화시켰을 때 용접에 미치는 영향을 알아보았다. 용접과정중에 노즐직경과 보호가스유량의 관계 그리고 용접부의 비이드 및 용입과의 관계를 조사하였으며, 또한 플라즈마형성에 따른 보호가스화 지르코늄의 영향을 알아보았다. 아울러 레이저용접된 시험편의 미세경도, 기계적 시험 및 금속학적 관찰을 통하여 비교 조사하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

실험재료는 Fig. 1과 같이 중수로형 핵연료봉의 지르칼로이-4피복관과 봉단마개가 맞닿는 겹치기이음인 제살붙이기 방식으로 구성되어 있으며, 용접될 봉단마개는 지름이 13.15mm로 700°C에서 2시간 annealing된 봉이며 피복관은 냉간가공후 520°C에서 2시간 정도 stress-relief annealing하였으며, 직경은 13.08mm, 두께 0.4mm 및 길이는 500mm이다.

2.2 용접장치 및 광섬유전송기구

500W의 Nd:YAG레이저시스템 및 광섬유전송기구를 이용하여 핫셀내에서 중수로 핵연료봉의 봉단마개용접에 활용하기 위한 원격용 용접챔버를 Fig. 2와 같이 설계하여 제작하였으며, 원격용 용접챔버의 구성요소는 몸체, 회전구동부, 봉단삽입부, 광섬유 및 커플러부를 들 수 있다. 레이저시스템에서 발진된 빔을 원격으로 전송될 경우 유연성이 좋고 가늘고 긴 광섬유를 이용하게 된다. 핫셀내부에 있는 핵연료봉과 핫셀외부의 레이저시스템간의 거리가 약 20m이므로, 이때 용접챔버와 광섬유를 연결하는 광학커플러장치가 필

요하게 되어 설계 제작하였다. Fig. 3과 같이 광섬유, 광섬유연결부 및 커플러의 교체가 용이한 방식으로 제작되었으며, 사용된 커플러장치의 특수렌즈는 UV grade fused silica 이다.

2.3 시험방법

지르칼로이-4 봉단마개 용접부의 경도시험은 미세조직 관찰에 사용되었던 시험편을 하중 100g의 비커스방법인 미세경도기(micro hardness)를 사용하여 시험편의 표면에서 0.2mm 아래로 위치한 지점에서 용접부의 중심선부터 모재까지 연속적으로 0.2mm 간격으로 측정되었다. 이때 용접부의 크기가 매우 작기 때문에 각각 3 개의 시험편에서 경도치를 측정하여 그 평균값으로 취하였다. 또한 지르칼로이-4 용접부의 건전성을 조사하기 위하여 인장시험 및 밀봉파열시험의 파괴 방법으로 수행하였다. 인장시험은 한쪽만 용접된 길이 150mm 시험편의 봉단마개 중앙부에 구멍을 뚫어 볼트를 피복관 내부로 삽입하여 볼트 머리부분을 봉단마개와 접촉시킨 후 볼트를 인장시험기에 크립하였으며, 동시에 피복관 내부에 지지봉의 지그를 삽입하여 인장시험중에 피복관이 파열되는 것을 방지하면서 수행되었다. 여기서 인장시험편은 상온에서 실시되었으며, 시험편의 표점거리는 피복관 고정체의 끝단부 사이의 길이로서 최소한 피복관직경의 5배 이상이 되도록 하였다. 인장시험편의 내경과 피복관 고정체의 간극은 0.1mm로 하였으며, 시험편의 내경과 외경을 측정 후 표점거리내에 거리를 표시하였다. 인장시험중에 항복점까지는 0.48mm/min.의 변형률로 하고 항복점 이후에서는 1.02 mm/min.으로 변형시켰다. 또한 밀봉파열시험은 시험편을 하단플러그를 막은 후 55Mpa 까지 가압하였으며, 시험장치의 저장에너지가 175J 이하인지 확인한 후 시험편을 인장시험기의 가압장치에 설치하여 수행되었다. 여기서 피복관의 탄성변형중 가압속도가 0.23MPa/sec로 되도록 상온유압파열시험기를 조정하여 파열될 때까지 같은 속도를 유지한 후 파열시험의 최대유체압력이 기록하게 된다. 이러한 인장 및 밀봉파열시험은 봉단마개 용접부에서 파괴가 발생되지 않으면 건전한 용접으로 평가된다. 지르칼로이-4 용접부의 미세조직은 용접된 시험편의 원주방향으로 임의의 한 단면을 절단하여 마운팅한 후 연마지로 No. 200, 400, 600 및 1000 순으로 갈아낸 다음 폴리싱된 시험편은 증류수로 10분간 초음파 세척하고 건조시킨 후, 부피분율로 H₂O: 45, HNO₃: 45, HF₄: 10의 용액에 스웱 에칭하여 용접부의 미세조직과 결정립 크기 (grain size)를 편광법으로 사용하여 금속광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 광섬유전송시 용접특성 조사

Fig. 2와 같이 핫셀장치내에서 고방사성의 영역을 고려해 볼 때 용접챔버의 윗쪽부분에 광섬유연결부를 사용하여 유사시 원격으로 오염된 광섬유를 즉시 교환 가능하도록 개발되었다. 이것은 광섬유전송시 핫셀장치 바깥쪽의 광학입구커플러부터 핫셀장치내의 광섬유연결부까지 고정시키고 다음의 출구커플러까지는 오염될 수 있는 광섬유를 교체하도록 되었다. 본 실험에서는 광섬유전송시 빔품질 보존법칙의 특성을 고려해 볼 때

collimating lens에서 집속된 빔을 되도록 많은 허용범위내에 들어야 하므로 먼저 레이저 헤드에서 광섬유연결부까지는 광섬유 600um을 사용하였고 다음의 출구커플러까지는 광섬유800 및 1000um을 사용하였다. 용접실험에서는 출구커플러조건인 광섬유 800um, F#=2, 집광렌즈의 초점거리(FL)=95,120mm, 광학조건(optical factor= β) β =1.35, 2.1에서 수행되었다. 먼저 광학조건 β =1.35에서는 FL=120인 경우보다 FL=95에서 용입이 크게 나타났으며, β =2.1인 경우는 FL=120에서 비이드가 1.8mm로 FL=95보다 0.3-0.4mm 넓게 나타났다. 또한 광섬유조건에서는 FL=95, 600um에서 용입이 깊었으며, FL=120일 때 1000um인 경우 비이드폭이 2.2mm로 가장 크게 나타났다.

3.2 보호가스와의 노즐의 영향

레이저용접시 레이저가 재료표면에 도달되면 플라즈마형성으로 plume현상이 발생하게 된다. 이것은 레이저조사시 재료표면에서 발생하는 금속증기반응으로 장시간 사용시 커플러의 집광렌즈의 손상을 줄 위험이 있으므로 고려되어야 한다. 이때 사용될 보호가스의 압력, 커플러의 노즐직경, 커플러의 노즐입사각 및 재료와 노즐간의 거리에 따라 매우 복잡하게 작용된다. 또한 용접과정에서 보호가스와 plume 현상은 매우 밀접한 관계에 있으므로 용접특성에 크게 영향을 미친다. 본 실험에서는 레이저용접시 출구커플러조건인 1차 헬륨유량(노즐내부의 헬륨유량)을 50LPM, 재료와 노즐간의 거리를 12mm, 노즐 직경을 7mm로 하여 수행되었다. 2차 헬륨압력(게이지압력) 즉, 노즐입구에서 수평방향으로 불어줄 때의 경우 0.3atm부터 1.4atm까지 증가될수록 집광렌즈에 산화지르코늄이 거의 달라 붙지 않았음을 알 수 있었으나, 2atm이상에서는 재료표면의 비이드가 boiling현상으로 거칠게 나타났다. 따라서 출구커플러의 1차 헬륨유량이 50LPM에서 사용될 경우는 2차압력은 적어도 1atm 내지 1.4atm 범위로 사용되어야 할 것으로 판단된다.

3.4 미세경도 조사

미세경도시험은 지르칼로이-4 봉단마개 시험편의 용입단면에서 모재(BM), HAZ 및 용접금속(WM)인 3 부분으로 구분되어 비커스방법인 경도시험기가 사용되었다. 본 시험에서는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)와 LBW(Laser Beam Welding) 시험편의 각 영역별 측정치를 비교하여 조사하였다. BM영역에서 완전어닐링된 봉단마개의 GTAW인 경우는 180-190이며, LBW는 160-170 정도이다. 그리고 응력제거열처리된 피복판에서 GTAW인 경우는 170-180으로 봉단마개보다 10 정도 낮게 나타났으며, LBW는 봉단마개의 경도치와 거의 유사하게 보여주었다. 또한 HAZ에서 완전어닐링된 봉단마개의 GTAW인 경우는 190-200이며, LBW는 매우 좁은 영역에서 170 -180 정도로 나타낸다. 응력제거열처리된 피복판의 경우도 GTAW 및 LBW의 봉단마개와는 거의 비슷한 경도치를 나타내고 있다. 여기서 LBW의 HAZ는 GTAW에 비하여 매우 좁은 영역으로 보여주고 있다. 다음으로 WM영역에서는 GTAW인 경우 190-210으로 넓게 분포되었으며, LBW인 경우는 170-210 범위의 경도치를 나타내었다. 여기서 LBW와 GTAW된 WM의 경도차이는 큰 변화는 보이지 않으나, HAZ의 경도치에서 10-20 정도로 GTAW가 높게 나타났다. 또한 봉단마개의 끝단부로 이동할수록 GTAW와 LBW 모두다 피복판보다 약간 높은 경도치를 보였다. 이것은 봉단마개 용접부에서 용접열사이클에 의한 과

열(overheating)에서 갑자기 급랭을 일으키게 되어서 경도치가 증가된 것으로 해석될 수 있다.

3.5 인장 및 밀봉파열시험

상온에서 인장시험한 후 GTAW와 LBW의 기하학적 형상인 A 및 B구조의 인장시험편에서 비교된 항복강도, 인장강도 및 연신율은 Table 1과 같다. 여기서 GTAW 및 LBW의 인장강도는 대체로 모재보다 높았으며, GTAW 시험편은 LBW 시험편보다 인장강도가 높았으며 연신율은 LBW 시험편이 약간 높은 경향을 보여주고 있다. 또한 기하학적 형상이 서로 다른 A 및 B구조의 인장시험편에 대해서 항복강도 및 연신율은 큰 차이가 없었으며 유사한 인장강도를 보였다. 본 실험에서는 A구조의 경우 filler 역할의 도움으로 제살붙이기 용접강도면에서 유리하나 B구조의 경우 filler가 없으므로 용접표면이 대체로 오목형태를 나타내므로 유효용접두께가 줄어들 경향이 있다. 따라서 B 구조는 충분한 강도를 얻기 위해서는 LBW시 용접선에 정확한 He-Ne 레이저의 빔정렬이 필요하게 될 것으로 판단 된다. 그리고 밀봉파열시험에서 파열거동을 살펴 보면 LBW 시험편의 최대파열연신율의 평균치는 36%로서 GTAW의 시험편보다 크게 나타났다. 또한 지르칼로이-4 용접부의 기하학적 형상면에서도 A구조의 최대파열연신율의 평균치가 높은 것으로 보여주고 있다. Table 2는 상온에서 밀봉파열시험후 각각의 시험편의 최대파열강도 및 최대파열연신율이 비교 조사되었다.

3.6 금속학적 관찰

GTAW 및 LBW 방식에 의해 형성되는 미세조직은 용접변수에 따라 국부적으로 $\alpha+\beta$ 상 영역 및 β 상 이상의 영역까지 가열되어 냉각되기 때문에 용접부는 각기 다른 상변태를 유발하여 여러 가지의 복잡한 미세조직을 가지게 된다.^[4] 모재 피복관의 미세조직은 α 결정립이 길이 방향으로 연신된 상태인 데 반하여 봉단마개의 BM쪽의 미세조직은 등축된 α 결정립이 재결정된 모양으로 불규칙적인 조직으로 관찰되었다. 지르칼로이-4 봉단마개와 WM 그리고 지르칼로이-4 피복관과 WM사이의 경계로 표시된 미세조직은 WM조직보다 작은 prior β -grain내에 α 상이 plate형태로 성장한 전형적인 형태로 보여주고 있다. 여기서 관찰된 HAZ는 대부분 α 결정립이 변형되고 $\alpha+\beta$ 상 영역으로 가열된 후 결정립이 성장되면서 모양과 크기가 불규칙적으로 나타내고 있다. GTAW의 WM조직은 전형적으로 prior β -grain이 크게 성장한 β -quenched 조직과 아주 유사하게 나타내고 있으며, 반면에 LBW의 WM조직이 prior β -grain 크기가 비교적 작게 나타내고 있다. 이것은 LBW의 경우 용접시간이 짧고 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 국부적으로 열에너지의 입열량이 GTAW보다 적어서 일어난 것으로 해석된다. 따라서 지르칼로이-4 봉단마개용접부의 WM조직은 대체로 빠른 가열속도와 냉각속도 때문에 martensitic α' 조직과 prior β -grain내에 widmanstätten α 상이 서로 혼합된 조직으로 유사하게 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구는 광섬유전송에 의한 Nd:YAG 레이저방법을 이용하여 지르칼로이-4 봉단용접의 최적조건 및 용접부의 성능을 조사한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광섬유전송시 용접특성 조사에서는 광학조건인 $\beta=1.35$ 에서 FL=120인 경우보다 FL=95에서 용입이 크게 나타났으며, $\beta=2.1$ 인 경우는 FL=120에서 비이드가 1.8mm로 FL=95보다 0.3-0.4mm 넓게 나타났다. 또한 광섬유조건에서는 FL=95, 600um에서 용입이 깊었으며, FL=120일 때 1000um인 경우 비이드폭이 2.2mm로 가장 크게 나타났음.

2. 레이저용접시 출구커플러의 2차 헬륨압력이 0.3atm부터 1.4atm까지 증가될수록 집광렌즈에 산화지르코늄이 거의 달라 붙지 않았으며, 1차 헬륨유량이 50LPM에서 사용될 경우 2차압력은 적어도 1atm 내지 1.4atm 범위로 사용되어야 할 것임.

3. 지르칼로이-4 봉단마개 용접부의 금속학적 관찰에 의하면 HAZ 및 GTAW 순으로 적게 나타났으며, 용접부의 미세조직은 GTAW와 LBW 모두 유사한 martensitic α' 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났음.

7. GTAW와 LBW 방식을 이용한 지르칼로이-4 봉단마개 용접의 기계적 시험에서는 모두 양호하나, 레이저를 이용한 용접부는 GTAW와 비교해 보면 대체로 용입비가 크며, 작고 미세한 결정립을 이루고 있어서 좋은 용접특성으로 나타났다.

참고문헌

- [1] J. Saito, M. Shimizu : Development of Re-instrumentation Technology for Irradiated Fuel Rod, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.125-135
- [2] H. Sakai, H. Kawamura : New Apparatus of JMTR Hot Laboratory, Department of JMTR, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.65-77
- [3] P. T. Truant : CANDU Fuel Performance & Power Reactor Experience, AECL-MISC-250-3 Rev.1 (1983)
- [4] R. A. Holt : The Beta to Alpha Phase Transformation in Zircaloy-4, Journal of Nucl. Mat., 35 (1970), pp.322

Table 1. Tensile properties of GTA and LB welded specimens.

Specimen Type		Dimension	0.2% YS (ksi)		UTS (ksi)		% E in 50mm	
			Each	Ave.	Each	Ave.	Each	Ave.
GTAW	A	13.08x12.24 (O.D) (I.D)	62.5	62.9	78.4	78.4	37.2	37.1
			65.5		80.1		35.6	
			60.8		76.8		38.5	
	B		58.9	59.2	75.4	76.7	35.7	36.3
			61.4		77.1		36.5	
			57.4		77.6		36.7	
LBW	A	57.5	61.3	75.3	75.4	40.2	39.7	
		65.1		77.1		39.4		
		61.3		73.8		39.4		
	B	57.7	61.9	77.6	77.5	36.2	37.3	
		66.3		78.3		35.8		
		61.8		76.5		39.9		

Table 2. End-cap burst properties of GTA and LB welded specimens.

Specimen Type		Dimension	UBS (MPa)		UBE (%)	
			Each	Ave.	Each	Ave.
GTAW	A	13.08x12.24 (O.D) (I.D)	530	528.3	28.8	28.5
			527		26.4	
			528		30.2	
	B		532	527	28.9	28.2
			524		27.5	
			525		28.1	
LBW	A	524	526	39.9	37.8	
		526		36.2		
		528		37.2		
	B	530	524.7	30.7	35.4	
		520		37.6		
		522		37.8		