

## 경수로 연료용 지르칼로이-4 지지격자의 레이저용접부 조사

### Investigation of the Laser Welded Specimens of Zircaloy-4 Spacer Grids for PWR Fuel Assembly

김수성\*, 송기남\*, 윤경호\*, 이강희\*

\* 한국원자력연구소

**ABSTRACT** : The weld quality of spacer grids in Pressurized Water Reactors(PWR) fuel is extremely important for the fuel assembly performance in the nuclear reactor. The spacer grid welds are currently evaluated mainly by the metallographic examination although it reveals only cross-points which are welded by the laser beam. This experiment is also to compare the weldability of Zircaloy-4 spacer grids using by the GTA and laser beam. The effect of node geometries of spacer grids for GTAW and LBW has been studied and optimum conditions of spacer grid welding have been found. Microstructures and micro-hardness of GTA and laser beam welded zones have been also compared.

## 1. 서 론

현재 원자력 산업에서의 용접분야는 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며, 특히 상용 원전의 경수로 연료체인 지지격자 용접은 빼놓을 수 없는 핵심기술이다. 또한 최근들어 특수재질 및 용접기법에 따른 새로운 기술이 날로 향상되어 보급되고 있는 실정이다. 일반적으로 원자력의 재료를 위한 용접방법은 GTAW, RW, LBW 및 EBW 등을 들 수 있으며, 이들 중에 실제로 용접부의 기계적 특성, 용접성 및 용접공정의 관점에서 볼 때 GTAW는 높은 입열로 인한 열변형이 심하고, 용접부의 결함이 발생하게 되며, RW는 품질면에서 매우 우수하나 장비의 복잡성에서 다소 불리하며, 고밀도 에너지를 이용한 LBW는 원격작업이나 품질면에서 유리하나 작업조건이 매우 까다롭다. 또한 EBW는 공정에서 고진공 챔버가 필요하고 보수 유지비용이 많이 든다. 따라서 지지격자의 제조를 위한 용접공정과 비용이 고려된 적절한 용접법의 선택이 필요하게 된다.

레이저를 이용한 용접공정의 특성은 높은 에너지 밀도를 이용하므로 국부적인 부위를 순간적으로 용융하여 열변형이 거의 없고, 용융점이 높은 Zircaloy-4와 같은 섬세한 용접에 적합하다. 또한 용접으로 인한 가열 및 용접시간이 짧고 HAZ 영역이 매우 작다. 이러한 잇점 때문에 선

진국 연구기관에서는 온도측정용 Ti 열전대 용접 및 계장 시험용 seal tube 용접에서 LBW가 사용되고 있다.<sup>1,2)</sup> 따라서 본 연구에서는 GTAW 및 LBW를 이용한 지지격자의 용접부 특성이 비교 조사되었고, 그리고 지지격자 시편을 이용하여 교차점 용접시 이음부 강도 및 용접 품질에 대한 영향을 분석하였고<sup>3)</sup>, 이에 따른 각 시편의 비드 폭과 용입의 영향, 그리고 미세경도 및 미세조직을 비교하여 관찰하였다.

## 2. 시편 및 실험방법

### 2.1 용접시편

Fig. 1은 지지격자 시편 샘플을 개략적으로 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 용접하여 full size 형상의 구조물이다. 실험에 사용된 재료는 Zircaloy-4 이며, 순수 Zr에 Sn, Fe, Cr 등의 합금원소가 첨가되어 있으며 화학조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다. Fig. 1과 같은 full size 지지격자의 용접부위를 부분적으로 절단하여 아세톤으로 세척하고 60°C, 30분간 건조시킨 후 실험에 사용하였다.

### 2.2 실험방법

Zircaloy-4 지지격자 용접부의 경도시험은 미세조직 관찰에 사용되었던 시편을 하중 100 g

의 Vickers 방법인 미세경도기를 사용하여 시편 표면에서 0.2 mm 아래로 위치한 지점에서 용접부의 중심선부터 모재까지 연속적으로 0.2 mm 간격으로 측정되었다. 이때 용접부의 크기가 매우 작기 때문에 각각 3 개의 시험편에서 경도치를 측정하여 그 평균값으로 취하였다. 지지격자의 교차점 압축 강도시험은 상단 및 하단 용접된 시편이 사용되었으며, 이때 상온에서 실시된 용접시편의 삽입 및 하중 방향은 Fig. 2에서와 같다. 그리고 교차점 형태의 기하학적인 node 별로 시편을 5 종류로 설계 제작하여 압축 강도시험을 수행하였다. 용접부의 미세조직은 용접된 시편의 교차점 단면을 정밀하게 절단하여 마운팅한 후 연마지로 No. 600, 1000, 1500 순으로 갈아낸 다음 폴리싱된 시험편은 증류수로 10 분간 초음파 세척하고 건조시킨 후, 부피분율로 H<sub>2</sub>O : 45, HNO<sub>3</sub> : 45, HF<sub>4</sub> : 10 의 용액에 swab 앓칭하여 용접부의 미세조직과 결정립 크기를 광학현미경으로 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Zircaloy-4 교차점 압축강도 조사

지지격자 교차점(cross-point)에서의 기하학적인 node 별 용접실험에서 압축시험에 대한 상대 결과치를 Table 2에서와 같이 비교 분석하면 LBW로 사용된 연속 용접한 시편이 GTAW로 용접된 시편이나 LBW로 사용된 단속 용접한 시편보다 더 강함을 알 수 있었다. 이때 교차점 node 의 압축시험에서 파단된 용접시편을 사용하여 파단면을 SEM으로 분석하였다. Zircaloy-4 용접 파단면의 관찰에서는 Fig. 3에서와 같이 LBW와 GTAW 모두 micro-void coalescence 로 이루어진 연성(ductility)으로 나타났으며, 그리고 LBW와 GTAW의 용접부의 파단면 형태는 모재의 파단면 형태와 매우 비슷한 것으로 관찰되었다.

#### 3.2 Zircaloy-4 용접부의 미세경도 분석

Zircaloy-4 지지격자의 교차점(cross-point) 및 외부격자(outer strap) 용접에서 LB와 GTA로 용접된 시편을 이용한 미세 경도 분석을 하면 Fig. 4 에서와 같이 LBW의 경도 변화는 160에서 190으로 나타낸 반면에 GTAW의 경도 변화는 200에서 220으로 보다 높게 나타나는 경향을 보였고, 이것은 Zircaloy-4 용접부의 최고 경도가 높을 수록 HAZ는 취약하게 되므로 그와는 달리 최고 경도가 낮은 경우 Zircaloy-4 용접부의 기계적 성질인 연성과 인성에 매우 유리할 것으로 판단된다. 또한 LBW의 weld zone에서 HAZ와 weld metal이 GTAW와 비교하여 보면, 매우 좁

게 나타내고 있다.

#### 3.3 Zircaloy-4 용접부위 미세조직 관찰

GTAW와 LBW를 이용한 Zircaloy-4 지지격자의 용접열사이클에 의해 이루어진 야금학적 조직을 기초로 하여 분석하였다. 앞의 교차점 용접 샘플에서 얻은 Fig. 5 처럼 용접부의 매크로조직이 나타낸 바와같이 격자판 사이에서 접합계면을 포함한 용접부의 미세조직 변화를 모재(BM), 열영향부(HAZ), 및 용접금속(WM) 순으로 표시한 위치에서 관찰되었다. Zircaloy-4 용접부의 WM과 HAZ 사이에서 결정립 성장(grain growth)이 일어났으며, 특히 LB로 용접된 WM의 결정립 크기가 GTAW에 비하여 비교적 작게 나타났다. 여기서 결정립 크기가 35  $\mu$ m 초과하지 않은 범위에서 Zircaloy-4 용접성이 좋은 것으로 여겨진다. Fig. 6의 GTAW와 LBW 용접금속의 미세조직은 빠른 냉각속도 때문에 martensitic  $\alpha'$  조직과 prior  $\beta$ -grain 내에 Widmanstätten  $\alpha$ 상이 서로 혼합된 조직으로 유사하게 나타났으며, 여기서 LBW의 용접금속은 prior  $\beta$ -grain 크기가 GTAW에 비하여 비교적 작게 나타내고 있다. 이것은 LBW의 경우 용접시간이 짧고 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 국부적으로 열에너지의 입열량이 GTAW보다 작아서 일어난 것으로 해석된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 Zircaloy-4 지지격자의 GTAW와 LBW를 이용한 샘플 시편에 따른 용접특성과 기계적 시험을 조사한 내용이다.

1. Zircaloy-4 용접부의 압축 강도시험에 의하면 LBW로 사용된 연속 용접한 시편이 GTAW로 용접된 시편이나 LBW로 사용된 단속 용접한 시편보다 더 강함을 알 수 있었다.

2. GTAW와 LBW 방식을 이용한 Zircaloy-4 지지격자용접은 모두 가능하나, LB를 이용한 용접부는 GTAW와 비교하면 대체로 용입비가 크며, 미세결정립을 이루고 있어서 좋은 용접특성으로 나타났다.

3. Zircaloy-4 용접부위 미세조직 관찰에 의하면 HAZ가 LBW, GTAW 순으로 작게 나타났으며, 용접부의 미세조직은 GTAW와 LBW 모두 유사한 martensitic  $\alpha'$ 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. R. K. Welty : External Attachment of Ti Sheathed Thermocouples to Zr-4 Nuclear Fuel for the Loss-Of-Fluid-Test (LOFT) Reactor, SPIE Vol. 247, pp.30-37.
2. S. C. Wilkins : Fabrication and Use of Zr-4/Ta Sheathed Cladding Thermocouples and Mo/30 Sheathed Fuel Centerline Thermocouple, EGG-TFBP-6739(1985).
3. I. K. Kim, : Nickelizing and Brazing of Spacers made of Hardenable Nickel Alloy for PWR Fuel Assemblies, LF-FE-106, KAERI LWR Fuel Div. (1988).

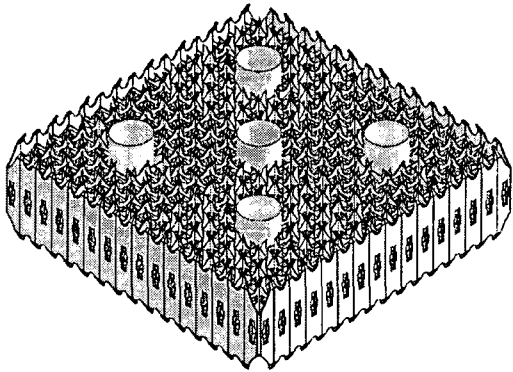


Fig. 1 Schematic illustration of spacer grid

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of Zircaloy-4

CHEMICAL COMPOSITION				
Alloying Element	Sn	Fe	Cr	Zr plus permitted impurities
W/O	1.2 - 1	0.18 - 0.24	0.07 - 0.13	Balance
MECHANICAL PROPERTIES				
Tensile Strength (kpsi)	Yield Strength (0.2% offset, kpsi)		Elongation (%)	
63.8	50.1		32.0	

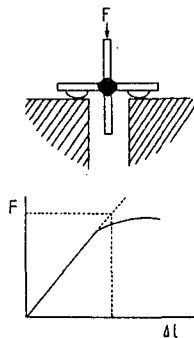


Fig. 2 Experimental method of crosspoint welds and relative values relation strength and deflection

Table 2 The relative strength values of various crosspoint welds of spacer grid

NR.	WELD PROCESS	WELD JOINT CONFIGURATION	WELD DIMENSION	LOAD (KN)	δl (MM)	C (KN / MM)
1	LB	NODE WELDS	TOP : 1.φ12 2.φ12	320	0.55	581
			BOTTOM : 1.φ12 2.φ12			
2	TIG	NODE WELDS	TOP : 1.φ22 2.φ22	430	0.5	860
			BOTTOM : 1.φ22 2.φ22			
			TOP : 1.φ22 2.φ23	380	0.62	613
			BOTTOM : 1.φ22 2.φ23			
			TOP : 1.φ23 2.φ23	450	0.683	662
			BOTTOM : 1.φ23 2.φ23			
TOP : 1.φ23 2.φ23	400	0.72	556			
BOTTOM : 1.φ23 2.φ23						
3	LB	INTERMITTENT WELDS	TOP AND BOTTOM WELDS 5MM AT 4 POINTS	450	0.64	703
4	LB	INTERMITTENT WELDS	TOP WELD ONLY 20MM AT 4 POINTS	400	0.56	714
				500	0.36	1390
5	LB		TOP AND BOTTOM WELDS 20MM AT 4 POINTS	600	0.45	1330
				600	0.46	1304
6*	LB	CONTINUOUS WELDS		500	0.44	1136

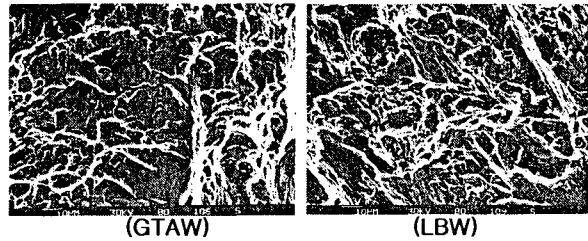


Fig. 3 Fracture morphology of GTAW and LBW

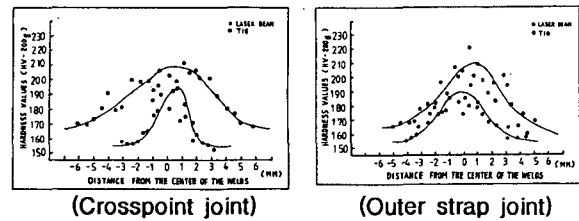


Fig. 4 Microhardness distribution across LBW and GTAW of crosspoint and outer strap joints

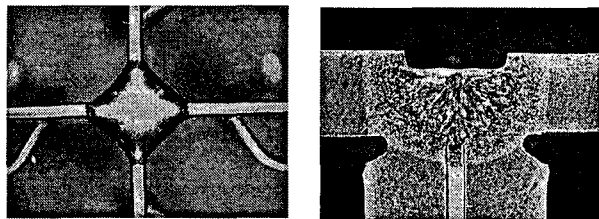


Fig. 5 Visual shape and macrograph of LBW specimen



Fig. 6 Microstructure of weld metal of GTAW and LBW (250:1)