

경수로 원전연료용 지르칼로이-4 지지격자 레이저용접품질 개선

김수성* · 송기남* · 한형준**

*한국원자력연구소 경수로핵연료개발부

**엘텍 기술개발부

Improvement of LBW quality of Zircaloy-4 Spacer Grids for PWR Fuel Assembly

Soo-Sung Kim*, Kee-Nam Song* and Hyoung-Jun Han**

*Department of PWRs Nuclear Fuel Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600

**Department of Technology Development, Ltek, Pochun 487-805

Abstract

A spacer grid assembly, which is an interconnected array of slotted grid straps and is welded at the intersections to form an egg crate structure, is one of the main structural components of the nuclear fuel assembly for Pressurized Water Reactors (PWRs). The weld quality of spacer grids in PWRs 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 LB. The effect of node geometries of spacer grids for the GTAW and LBW has been studied and optimum conditions of spacer grid welding have been found. Microstructures and micro-hardness of the GTA and LB welded zones have been also compared.

*Corresponding author : sskim7@kaeri.re.kr

(Received June 22, 2006)

Key Words : Spacer grid, Nd:YAG Laser welding, Zircaloy-4, Nuclear fuel, Penetration depth

1. 서 론

우리나라 원자력 발전량의 약 80% 이상이 가압경수로(PWR)에 의해 생산되고 있는데 PWR용 원전연료 중의 한 형태는 Fig. 1과 같이 가로, 세로가 각각 약 200mm이고 길이가 약 4000mm인 구조물이다. 이 원전연료는 Fig. 1에서 보듯이 상단고정체, 하단고정체, 지지격자, 안내관, 계측관 및 200여개 이상의 연료봉으로 구성되어 있고 연료봉 속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO₂) 소결체(직경 약 8mm, 길이 약 10mm 정도의 원기둥 형상임)가 두께 약 0.6mm의 지르칼로이-4 피복관 속에 내장되어 있다.

지지격자는 연료봉이 정해진 위치에 있도록 견전하게 지지하면서 원전연료 집합체 측면으로부터 가해지는 외부하중으로부터 연료봉을 보호하는 핵심 구조물이며,

충분한 횡방향 충격강도를 갖도록 설계하고 용접하는 것이 필수적이다. 지지격자 횡방향 충격강도 요구조건은 지지격자가 횡방향 설계하중하에서의 변형량이 설계 한도 이내로 변형되는 것으로 이를 만족할 경우 구조 조건은 원자로 긴급정지시에 안내관 속으로 제어봉의 삽입이 방해받지 않게 되고 원자로 안전성을 보증할 수 있다. 이때 지지격자의 충격강도는 주로 지지격자를 구성하는 격자판의 기하학적 형상에 영향을 받고 있으나 격자판의 교차점 부위에서 용접품질에도 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다¹⁾. 지지격자 용접은 원자로 노심에서 연료봉을 지지하는 연료봉 지지력 뿐만 아니라 지지격자의 구조강도 즉, 횡방향 하중하에서 격자체의 좌굴 및 충격강도와 밀접하게 연관되어 있다. 일부 선진국에서는 핵연료 재료인 지르칼로이-4 구조체에 대한 레이저용접 특성연구 및 부식성 시험이 수행된 바 있었다²⁻³⁾.

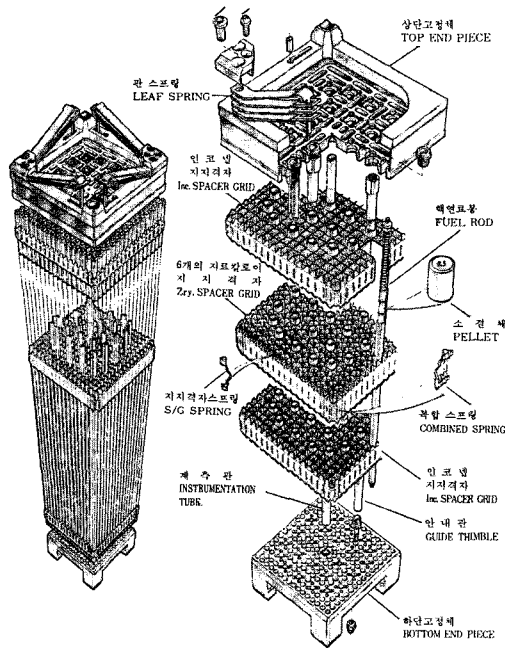


Fig. 1 Fuel assembly for PWR

따라서 본 연구에서는 지르칼로이-4 지지격자 교차점 용접의 품질 개선을 위하여 평균출력 300W 급 Nd:YAG LBW를 이용하여 여러 가지 용접변수들의 조합을 변화시켜 가면서 용입, 비드폭, 변색 및 스패터 발생 등의 용접특성을 조사하였다. 그리고 LB 및 GTA 용접된 지지격자 시편을 이용하여 교차점 용접시 이음부 강도 및 용접품질에 대한 영향을 분석하였고, 이에 따른 각 용접부의 미세경도 및 미세조직을 비교 관찰하였다.

2. 시편 및 실험방법

2.1 용접 시편

Fig. 2는 지르칼로이-4 지지격자 시편을 개략적으로 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로 간격으로 엇갈리게 조립하여 엇갈린 격자판의 교

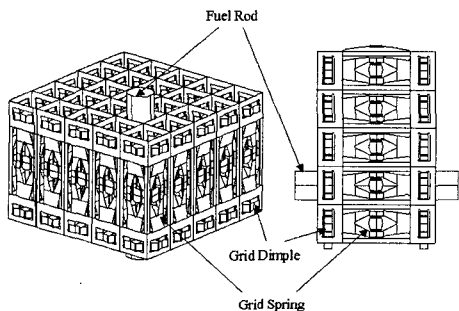


Fig. 2 Schematic views of a spacer grid

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	

차점을 용접한 egg crate 형상의 구조물이다. 실험에 사용된 재료는 지르칼로이-4이며, 순수 Zr에 Sn, Fe, Cr 등의 합금원소가 첨가되어 있으며 화학조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다. Fig. 2와 같은 지지격자의 용접부위를 부분적으로 절단하여 아세톤으로 세척하고 60°C, 30분간 건조시킨 후 실험에 사용하였다.

2.2 실험방법

지지격자의 교차점에 대한 압축 강도시험은 상단 및 하단 용접된 시편이 사용되었으며, 이때 상온에서 실시된 용접시편의 위치 및 하중 방향은 Fig. 3에서와 같다. 그리고 교차점형태의 기하학적인 이음(node)별 시편이 5 종류로 설계 제작되어 압축 강도시험이 수행되었다. 또한 지르칼로이-4 지지격자 용접부의 미세경도시험은 미세조직 관찰에 사용되었던 시편을 하중 100g의 비커스 방법인 micro-hardness tester가 사용되었으며, 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. 지르칼로이-4 용접부의 미세조직은 용접된 시편의 교차점 단면을 정밀하게 절단하여 마운팅한 후 연마지로 그리트번호 200, 400, 600, 1000,

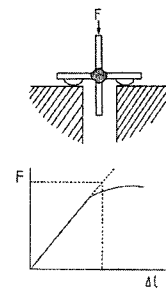


Fig. 3 Experimental method of crosspoint welds and relative values relation strength and deflection

1500 순으로 갈아냈다. 그리고 폴리싱된 시편은 증류수로 10 분간 초음파 세척하고 건조시킨 후, 부피 분율로 H₂O:45, HNO₃:45, HF₄:10의 용액에 스웨칭하여 용접부의 결정립 크기와 미세조직이 광학현미경으로 관찰되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지지격자 교차점의 용접변수 특성 조사

상용 지지격자 생산업체 (B로 표시)와 비교되는 용접품질을 얻기 위해 국내 Nd:YAG 레이저가공 전문업체 (A로 표시)에서 용접변수들의 조합으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. B의 용접조건은 대외비 사항이어서 정확한 값을 알 수 없었고 개략적인 정보를 얻어 A의 초기조건 설정에 참조하였다. B의 용접조건을 참고하여 설정한 4가지 용접변수는 Table 2와 같으며, 지지격자시편을 이용한 용접특성 결과는 Table 3, 4 및 Fig. 4에서 나타나 있다. Table 3, 4 및 Fig. 4에서와 같이 A의 용접품질이 B에는 약간 못 미치고 있으나 용접품질면에서 상당히 근접하고 있음을 알 수 있다. 여기서 Table 3 및 4의 용접특성을 검토한 결과

Table 2 Initial weld parameters for crosspoint welding

Weldments Parameters	A				B
	I	II	III	IV	
Average Power (W)	193.6	171.5	170.1	182	200~208
Energy(J)	24.2	24.5	24.3	26.0	25~26
Pulse Width(ms)	8.4	8.0	7.5	9.0	8.0
Shot count	8	7	7	7	7~8
Peak Power(kW)	3.0	3.2	3.4	3.0	3.1
Repeat(Hz)	17	17	17	17	17

* T : Thickness of spacer grid

Table 3 Comparison of weld bead sizes (×T*)

Weldments Parameters	A				B
	I	II	III	IV	
Top of Grid					
- Average	5.112	5.057	5.100	5.246	5.152
- Std. Deviation	0.1008	0.1127	0.0963	0.0757	0.1368
- Lower 95% Reliability	5.060	4.999	5.050	5.206	5.110
Bottom of Grid					
- Average	5.370	5.264	5.309	5.437	5.308
- Std. Deviation	0.1105	0.0872	0.1276	0.0970	0.2904
- Lower 95% Reliability	5.313	5.219	5.243	5.387	5.218

* T : Thickness of spacer grid

Table 4 Comparison of weld depths and peel test (×T*)

Weldments Weld quality	A				B
	I	II	III	IV	
Penetration depth(mm)					
- Top part	3.74	3.80	3.94	3.73	3.718
- Bottom part	3.63	3.65	3.93	3.54	3.958
Peel Test					
- Fracture	BM**	BM**	BM**	BM**	BM**

* T : Thickness of spacer grid ** : Base Metal



Weldment A Weldment B

Fig. 4 Comparison of weld penetration depths

실험조건 IV가 상용 지지격자 용접에 가장 근접하게 나타났다.

초기 용접조건으로 실험한 지지격자 충격강도시험의 결과는 기대한 만큼의 충격강도를 갖지 않는 것으로 보이고 있어 교차점부위의 용입을 증가시키고 비드폭을 줄일 필요성이 제기되었다. 이때 상용 지지격자 용접품질에 비해 용입은 약 -0.3~+8.9 % 작으며 비드폭은 약 1.9~3.2 % 정도로 크게 관찰되었다. 이를 개선하기 위해 단위 펄스당 에너지를 일정하게 유지하면서 첨두출력(peak power), 펄스폭(pulse width)의 조합을 Fig. 5와 같은 펄스형태를 변화시키는 실험을 수행하였다. 단위 펄스당 에너지는 26.8 J로 유지하면서 첨두출력은 3.0 kW에서 4.8 kW까지 0.1~0.2 kW 간격으로 변화시키고 펄스폭은 9.0 ms 에서 5.6 ms로 변화시키는 15개 용접조건에 대하여 실험을 수행한 후 용입과 비드폭을 검사하였다. Fig. 6과 7은 첨두출력의 변화에 따른 비드폭으로 통계적으로 처리한 95% 하한 신뢰도 평균값으로 하여 표준편차를 나타낸 것이고 Fig. 8은 교차점 용입의 변화를 나타낸 것이다. 여

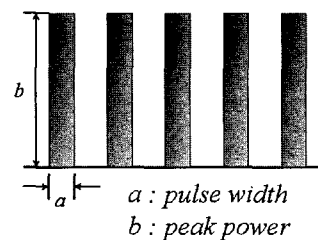


Fig. 5 Basic weld parameters for crosspoint welding

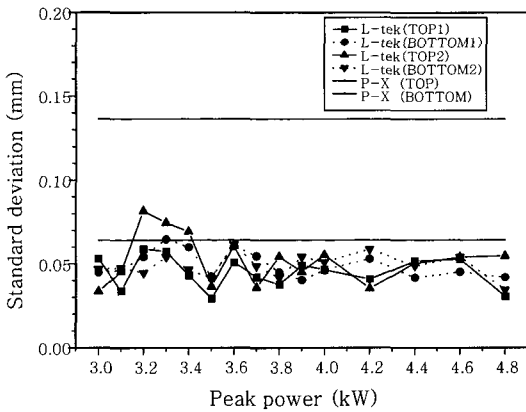


Fig. 6 Weld bead size variation for 1st weld

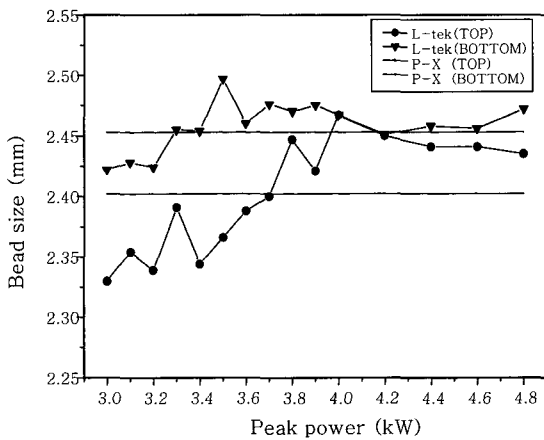


Fig. 7 Standard deviation of weld bead size for 1st weld

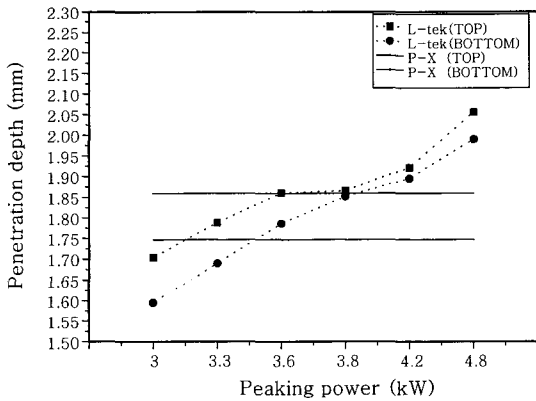


Fig. 8 Weld penetration depth for 1st weld

기서 비드폭과 표준편차는 용접단면의 12곳을 40배로 촬영한 뒤 통계적으로 처리하여 얻은 값이고 용입은 용접단면의 6곳에 대하여 50배로 촬영한 뒤 통계적으로 처리하여 얻은 값이다. Fig. 6에서와 같이 첨두출력이 증가할 수록 비드폭이 점차 증가하다가 포화되는 경향을 보이고 있으나 전반적으로 상용 지지격자에 비해 크을 알 수 있다. 또한 비드폭의 표준편차는 Fig. 7에서

보듯이 거의 일정한 범위내에 있고 특히 상용 지지격자 용접의 비드폭의 표준편차보다 작게 유지되고 있어서 특히 A에서 용접한 비드폭이 상용 지지격자의 그것에 비해 균일하게 용접되었다고 볼 수 있다. Fig. 8에서 보면 첨두출력이 증가할 수록 용입은 계속 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 상용 지지격자 용접품질과 비교한 결과 첨두출력이 3.8 kW이상에서 용입이 상용 지지격자보다 깊으나 비드폭은 약간 크게 나타났다.

3.2 지지격자 교차점 레이저용접의 품질개선

1차적인 용접조건으로 실험한 지지격자의 용접품질을 검토한 결과를 참고하여 교차점 용입을 더 증가시키기 위한 실험이 수행되었다. 이를 위해 단위 펄스당 에너지를 1차 용접시와 동일하게 유지하면서 첨두출력을 3.9 kW에서 6.1 kW까지 0.1~0.2 kW 간격으로 변화시키고 펄스폭은 6.9 ms에서 4.4 ms로 변화시키는 15개 용접조건에 대하여 실험을 수행한 후 용입과 비드폭을 검사하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 첨두출력의

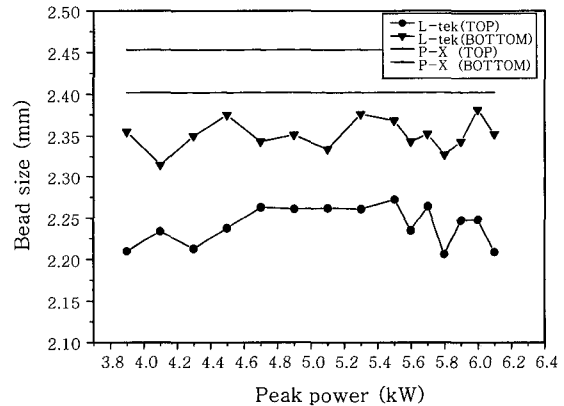


Fig. 9 Weld bead size variation for 2nd weld

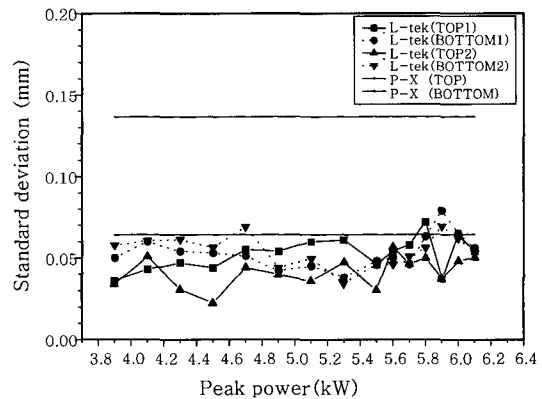


Fig. 10 Standard deviation of weld bead size for 2nd weld

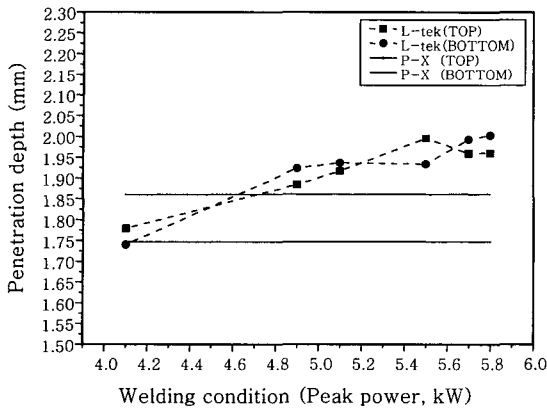


Fig. 11 Weld penetration depth for 2nd weld

변화에 따른 비드폭 및 표준편차를 나타낸 것이고, Fig. 11은 교차점 용입의 변화를 나타낸 것이다. 지지격자 용접의 비드폭 및 표준편차는 용접단면의 12곳에 대하여, 용입은 용접단면의 6곳에 대하여 매크로 촬영한 뒤 통계적으로 처리하여 얻은 값이다. Fig. 9에서 보면 침투출력이 증가할 수록 비드폭이 거의 일정한 크기를 갖는 경향을 보이고 있으며 전반적으로 상용 지지격자에 비해 약 9% 정도 작음을 보이고 있다. 표준편차는 Fig. 10에서 보듯이 거의 일정한 범위내에 있었고, 특히 상용 지지격자용접 비드폭의 표준편차보다 작게 나타나고 있어서 A에서 용접한 비드폭이 상용 지지격자의 그것보다 균일하게 용접되었다고 볼 수 있다. Fig. 11에서 보면 침투출력이 증가할 수록 용입은 계속 증가하는 경향을 보이고 있으나 용접표면의 변색 및 스패터 발생빈도도 증가함이 관찰되었다.

2차적인 용접조건으로 실험한 지지격자의 비드폭, 용입, 용접부의 변색 및 스패터 발생 유무 등을 검토한 결과를 요약하여 Table 5와 같은 4가지 용접조건을 구분하여 여러 가지 용접품질을 조사하였다. Table 6은 4가지 용접조건에서 비드폭을 나타낸 것으로 스패터 발

Table 5 Welding conditions of 2nd crosspoint welding

Weldment Parameters	A			
	I	II	III	IV
Average Power(W)	184.8	159	159	144
Energy(J)	26.4	26.5	26.5	24.0
Pulse Width(ms)	4.9	5.3	5.5	4.9
Shot count Top/Bottom	7/6	6/7	6/6	6/5
Peak Power(kW)	5.5	5.1	4.9	4.9
Repeat(Hz)	17	17	17	17

생빈도가 작고 비드폭도 상용 지지격자에 비해 양호한 용접조건 IV를 얻을 수가 있었다.

Table 7은 A의 2차 용접조건으로부터 실험한 지지격자 시편의 비드폭과 B에서 비드폭의 측정값을 지지격자판 두께(T)의 배수로 나타낸 것이다. Table 7에서 보면 A의 비드폭이 B의 비드폭보다 약 5% 정도 작았고 비드폭의 표준편차도 A가 B보다 작아서 비교적 균일하게 용접된 것으로 알 수 있었다. 여기서 A의 용접된 지지격자는 비드폭이 작기 때문에 열수력학적 관점에서 상용 원전연료의 수력저항을 작게 하여 유리할 것으로 판단되었으며, Fig. 12는 혼합날개가 있는 지지격자 상단부와 혼합날개가 없는 지지격자 하단부에서 비드폭의 형상을 40배로 촬영한 사진을 나타내고 있다. Fig. 12에서 나타내 듯이 A의 비드폭이 B의 것보다 작았음을 알 수 있었다. 각 용접부위별 매크로 단면을 관찰하였으며, 이때 Fig. 13과 Table 7에서의 용접품질에 대한 결과가 나타나 있다. Fig. 13에서 보면 A의 용접은 대체적으로 교차점 정중앙에 용융되고 있음을 보여주고 있고 B의 용접품질과 비교할 때 매우 유사하나 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 내부교차점의 용입을 살펴보면 Table 7에서와 같이 A가 B보다 약 7% 정도 깊게 용접되었으며 여기서 A의 용접품질

Table 6 Weld bead size of 2nd crosspoint welding ($\times T^*$)

Weldment Parameters	A			
	I	II	III	IV
Top of Grid				
- Average	5.217	5.242	4.928	4.898
- Std. deviation	0.153	0.130	0.132	0.145
- Lower 95%	5.177	5.211	4.894	4.861
Reliability				
Bottom of Grid				
- Average	5.288	5.841	5.241	5.102
- Std. deviation	0.115	0.120	0.087	0.183
- Lower 95%	5.285	5.813	5.219	5.055
Reliability				

* T : Thickness of spacer grid

Table 7 Comparison of weld bead size ($\times T^*$)

Weldments Parameters	A	B
	Top of Grid	
- Average	4.898	5.152
- Std. deviation	0.145	0.1368
- Lower 95%	4.861	5.110
Reliability		
Bottom of Grid		
- Average	5.102	5.308
- Std. deviation	0.183	0.2904
- Lower 95%	5.055	5.218
Reliability		

* T : Thickness of spacer grid

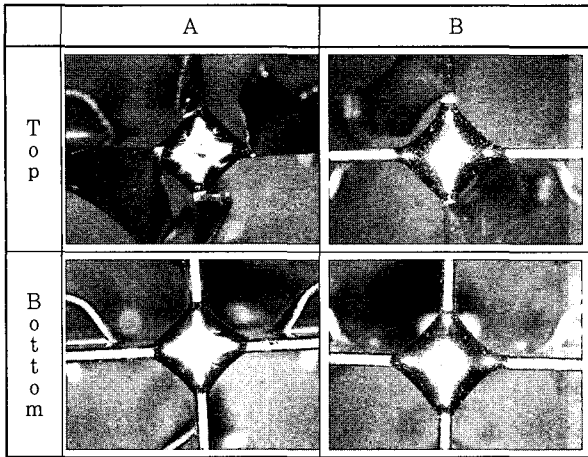


Fig. 12 Comparison of weld bead shapes

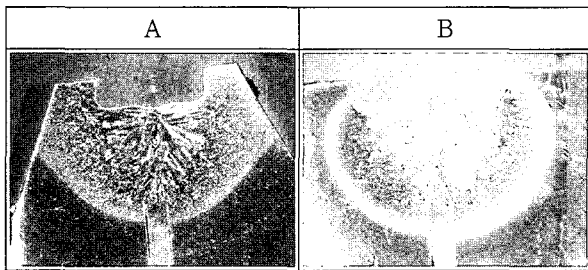


Fig. 13 Comparison of weld penetration depth
이 양호한 것으로 볼 수 있었다.

3.3 지지격자 교차점용접의 기계적 시험 조사

지르칼로이-4 지지격자교차점의 용접부위에 대한 기계적 강도를 평가하기 위해 용접부위를 포함한 십자형 시편을 만들어서 필 시험(peel test)을 수행하였다. 필 시험의 결과는 Table 8에서 요약되었으며, Table 8에서와 같이 A 및 B 모두 LBW 된 부위에서 파단이 발생하지 않았고 모재에서 파단이 발생된 것으로 모두 양호하게 나타났다. 이때 용접강도는 모두 B의 설계요구 기준보다 2.5배 이상으로 나타내고 있어서 교차점용접의 기계적 강도는 충분히 만족하고 있음을 알 수 있었다. 또한 지지격자 교차점의 기하학적인 이음별 접합강도

Table 8 Comparison of weld penetration depths and peel test (×T*)

Weldments	A	B
Weld quality		
Penetration Depth		
- Top of Grid	3.988	3.718
- Bottom of Grid	4.146	3.958
Peel Test		
- Fracture	BM**	BM**

* T : Thickness of spacer grid ** BM : Base Metal

Table 9 The relative strength values of various crosspoint welds of spacer grid

NR.	WELD PROCESS	WELD JOINT CONFIGURATION	WELD DIMENSION	LOAD (N)	δ L (MM)	C (N/MM)
1	LB	NODE WELDS	TOP : 1.f 1.2 2.f 1.2 BOTTOM : 1.f 1.2 2.f 1.2	320	0.55	581
2	TIG	NODE WELDS	TOP : 1.f 22 2.f 22 BOTTOM : 1.f 23 2.f 24	430	0.5	860
			TOP : 1.f 22 2.f 23 BOTTOM : 1.f 24 2.f 23	380	0.62	613
			TOP : 1.f 23 2.f 23 BOTTOM : 1.f 23 2.f 23	450	0.68	662
			TOP : 1.f 25 2.f 23 BOTTOM : 1.f 22 2.f 22	400	0.72	556
3	LB	INTERMITTENT WELDS	TOP AND BOTTOM WELDS 5MM AT 4 POINT	450	0.64	703
4	LB	INTERMITTENT WELDS	TOP WELD ONLY 20MM AT 4 POINT	400	0.56	714
5	LB	CONTINUOUS WELDS	TOP AND BOTTOM WELDS 20MM AT 4 POINT	500	0.36	1390
				600	0.45	1330
				600	0.45	1304
6	LB	CONTINUOUS WELDS	TOP AND BOTTOM WELDS 20MM AT 4 POINT	500	0.44	1136

을 조사하기 위하여 Fig. 3의 시험방법을 이용한 압축 시험에 대한 상대 결과치를 Table 9와 같이 비교하면 LBW로 사용된 연속 용접한 시편이 GTAW로 용접된 시편이나 LBW로 사용된 단속 용접한 시편보다 더 강함을 알 수 있었다. 아울러 교차점 이음의 압축시험에서 파단된 용접시편을 사용하여 지르칼로이-4 용접부의 파단면을 SEM 이용한 파면을 분석하였다. 지르칼로이-4 용접파단면의 관찰에서는 Fig. 14와 같이 LBW와 GTAW 모두 미세공 합체(micro-void coalescence)로 이루어진 연성(ductility)으로 나타났으며, LBW와 GTAW의 용접부의 파단면 형태는 모재의 파단면 형태와 매우 비슷한 것으로 관찰되었다.

지르칼로이-4 지지격자 교차점용접에서 LB와 GTA

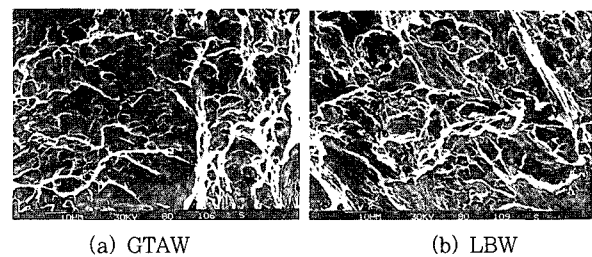


Fig. 14 Fracture morphology of GTAW and LBW

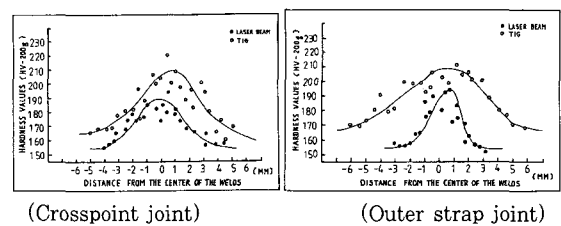


Fig. 15 Microhardness distribution across LBW and GTAW of crosspoint and outer strap joints

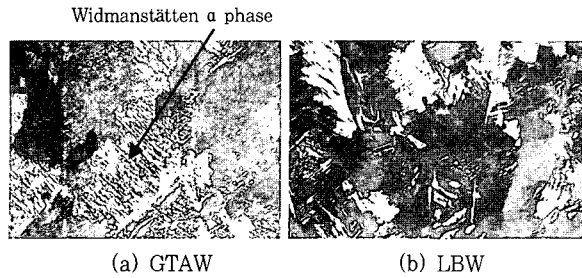


Fig. 16 Microstructure of weld metal of GTAW and LBW (250:1)

로 용접된 시편을 이용한 교차점 및 외부용접부에 대한 미세경도를 분석을 하면 Fig. 15와 같이 LBW의 경도 변화는 160에서 190으로 나타낸 반면에 GTAW의 경도 변화는 200에서 220으로 보다 높게 나타나는 경향을 보였고, 이것은 지르칼로이-4 용접부의 경도가 높을수록 GTAW의 HAZ는 넓게 분포되었으며, 이와는 달리 경도가 낮은 LBW경우 지르칼로이-4 용접부의 연성과 인성에서 유리할 것으로 판단된다. 또한 LBW의 HAZ와 용접금속이 GTAW와 비교하여 보면 매우 좁게 나타내고 있다.

3.4 지르칼로이-4 용접부의 미세조직 관찰

핵연료 재료인 지르칼로이-4를 이용한 GTAW와 LBW의 용접열사이클에 의해 이루어진 야금학적 조직을 기초로 하여 분석하였다³⁾. 앞의 지지격자 교차점 용접시편에서 얻은 Fig. 16 처럼 용접부의 미세조직이 나타낸 바와같이 격자판 사이에서 접합계면을 포함한 용접부의 조직변화를 BM(base metal), HAZ(heat affected zone) 및 WM(weld metal)순으로 표시한 위치에서 관찰되었다. 지르칼로이-4 용접부의 WM과 HAZ 사이에서 결정립 성장이 일어났으며, 특히 LB로 용접된 WM의 결정립크기가 GTAW에 비하여 비교적 작게 나타났다. 여기서 결정립 크기가 35 μm 초과하지 않은 범위에서 지르칼로이-4 용접성이 좋은 것으로 여겨진다. Fig. 16의 GTAW와 LBW에 대한 WM 미세조직은 빠른 냉각속도 때문에 마르텐사이트 α' (martensitic α') 조직과 prior β -grain 내에 위드만스태텐(Widmanstätten) α 상이 서로 혼합된 조직으로 유사하게 나타났으며, 여기서 LBW의 WM은 prior β -grain 크기가 GTAW에 비하여 비교적 작게 나타내고 있다. 이것은 LBW의 경우 용접시간이 짧고 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 국부적으로 열에너지의 입열량이 GTAW 보다 작아서 일어난 것으로 해석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용 원전연료 지지격자의 제품 품질에 버금가는 용접기술을 개발하기 위해 여러가지 용접조건에 대하여 실험을 수행하였고, 지지격자 교차점에 대한 용접특성을 분석한 후 기존보다 최적의 용접조건으로 사용할 수 있는 공정으로 개선하게 되었다. 또한 이번에 선정된 용접조건으로 LBW된 지지격자의 제품은 상용 지지격자 생산업체에 버금가는 우수한 용접품질을 얻을 수 있게 되었다. 본 실험에서 지르칼로이-4 지지격자 교차점을 이용한 LBW와 GTAW 시편에 의한 용접특성, 기계적 시험 및 야금학적 관찰을 요약한 내용은 다음과 같다.

1) 지지격자 교차점의 LBW 특성실험에서는 레이저 가공 전문업체인 A의 비드폭이 상용 생산업체인 B의 비드폭보다 약 5% 정도 작았고 비드폭의 표준편차도 A가 B보다 작아서 비교적 균일하게 용접되었으며, 또한 용입면에서도 A가 B보다 약 7% 정도 깊게 용접되어서 A의 용접품질이 더 양호한 것으로 나타났다.

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

3) GTAW와 LBW 방식을 이용한 지르칼로이-4 지지격자용접은 모두 가능하나, LB를 이용한 용접부는 GTAW와 비교하면 대체로 용입비가 크며, 미세결정립을 이루고 있어서 좋은 용접금속으로 나타났다.

4) 지르칼로이-4 용접부의 미세조직 관찰에 의하면 HAZ가 LBW, GTAW 순으로 작게 나타났으며, 용접부의 미세조직은 GTAW와 LBW 모두 유사한 마르텐사이트 α' 와 위드만스태텐 형태의 혼합조직으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업에서 고성능 지지격자개발과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. O. Arrestad : Fuel rod performance measurements and re-instrumentation capabilities at HALDEN project, In-core instrumentation proceeding, (1996)
2. C. Dawes : Laser welding, Abington publishing, (1992), 51-55
3. V. Ram, G. Kohn, A. Stern : CO₂ laser beam weldability of Zircaloy-2, AWS Journal, (July, 1986), 33-37