

핵연료 조사시험용 온도센서 피복재의 레이저용접 연구

A Study on the Laser Welding of Cladding Tube with Temp. Sensor for Fuel Irradiation Test

김수성*, 이철용*, 김웅기*, 이정원*, 고진현**, 이영호***

* 한국원자력연구소 ** 한국기술교육대 *** 충남대

ABSTRACT The instrumented fuel irradiation test at a research reactor is needed to evaluate the performance of the developed nuclear fuel. The fuel elements can be designed to measure the center line temperature of fuel pellets during the irradiation test by using temperature sensor. The thermal sensor was composed of thermocouple and sensor sheath. Micro-laser welding technology was adopted to seal between seal tube and sensor sheath with thickness of 0.15 mm. The soundness of welding area has to be confirmed to prevent fission gas of the fuel from leaking out of the element during the fuel irradiation test. In this study, fundamental data for micro-laser welding technology was proposed to seal temperature sensor sheath of the instrumented fuel element. And, micro-laser welding for dissimilar metals between sensor sheath and seal tube was characterized by investigating welding conditions. Moreover, the micro-laser welding technology is closely related to advanced industry. It is expected that the laser material processing technology will be adopted to various applications in the industry.

1. 서 론

국내 원전 핵연료의 성능평가를 위해서는 일정 형태의 조사시험용 캡슐이 필요하며,^{1,2)} 이 캡슐에 장착될 계장 핵연료 연료봉으로 조립된다. 이렇게 조립된 연료봉은 연소시험에 맞도록 설계되었으며 핵연료 성능 특성 중에 소결체 중심온도 측정을 위한 열전대 및 기타 계측기와 함께 부착된다.³⁾ 이러한 열전대 및 계측부품이 부착된 연료봉은 원자로내의 연소 중에 피복재가 파손되지 않아야 할 뿐만 아니라 방사성 핵분열 생성물의 누출도 방지하도록 설계되었다.⁴⁾ 특히 계장핵연료 온도센서 피복재의 건전성에 대한 요구조건이 엄격하여, 연료봉 제조에 있어서 매우 중요한 사항이다. 본 실험은 이종금속별 피복재 용접부의 특성 분석 및 피복재용접의 미세초점 X선 검사 결과를 분석하였다. 특히 온도센서 피복재용접에서 효과적인 용접실험을 위하여 다구찌 실험계획법을 이용한 분석 내용 및 실험 결과를 논하였으며, 아울러 계장 핵연료 온도센서 피복재용접을 위한 적합한 이음구조 및 용접조건 선정에 대해서도 기술하였다.

2. 실험 방법

2.1 용접 시편

계장핵연료 온도센서 피복재의 미세용접에 사용될 시편의 개념도는 Fig. 1에서 보여주고 있으며, 이때 용접시편은 두께 0.1mm인 Ta과 seal tube인 Zr-4, Ti, Mo 및 Ta를 준비하여 사용되었다. 레이저용접 실험 전에 온도센서 피복재는 이종금속별 seal tube에 존재하는 이물질을 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 후 dry oven에서 70°C로 건조시켰다.

3. 실험 결과

3.1 Seal tube용접의 최적화

본 실험에서는 여러 변수를 효과적으로 배열하면서 실험의 양을 줄이고 동시에 실험의 재현성도 얻을 수 있는 다구찌 실험계획법 (Taguchi Experimental Method)을 사용하였다. 이러한 다구찌 실험계획법을 이용하여 피복재용접의 최적 공정조건을 설정하고 나아가 이종재료별 변수의

용접성에 미치는 영향을 고찰하며, 특히 금속학적인 측면에서 용입 특성을 분석하고 이와 병행해서 비파괴검사인 RT를 이용하여 결합을 분석하였다. 이들의 검사결과와 다구찌 법에 의한 SN 비의 결과는 Table 1과 같다. 다구찌 실험계획법에 의한 품질특성의 산포를 줄여서 실험의 재현성을 확보하기 위하여 RT 결과와 용입에 대해서 분산분석을 수행하였다. 또한 Ti 및 Zr-4 재질은 거의 동일한 접합 특성의 거동을 보이는 것으로 해석된다. Fig. 2는 Ti 과 Zr-4 재질에서 0.005를 최적 값으로 하여 도시한 결과의 수준에 따른 영향을 알 수 있다. 데이터 값이 1개여서 S/N 값은 나오지 않고, 단지 차이에 대한 제곱값인 손실함수로 표시한 것이다. Fig. 2에서와 같이 레이저출력에 해당하는 기울기가 가장 큼을 알 수 있었다.

3.2 Seal tube용접부의 특성 분석

Seal tube 피복재 용접부의 비드관찰에서는 Fig. 3에서와 같이 Ta, Mo 재질이 사용했을 때 레이저출력 60W 이상에서 비드표면이 매우 거칠었으며 spattering이 발생하였다. 이것은 Zr-4 와 Ti에 비하여 Ta, Mo 재질이 용융점이 높아 금속증기로 인한 미세한 산화물 형태로 산재되어 있음을 알았다. 반면에 Fig. 4에서와 같이 출력 40W 이하에서 비드가 매끈하게 관찰되었고 Ti 및 Zr-4 용접시편 주변의 spattering 현상은 없었다.

3.3 Seal tube 용접부의 미세결합 분석

본 실험에서는 용접비드 폭이 1 mm에 불과한 온도센서 용접영역 내부의 미세결합을 비파괴적으로 검사하여 용접부의 건전성을 확인하기 위해 RT 방법을 검토하고 미세초점 X-선 투과시험을 적용하여 미세용접을 정밀하게 검사하였다. 여기서 Ta 재질의 seal tube를 적용할 경우 동종 금속 간에 용접이라는 장점이 있지만 그 외의 부분에서는 단점이 많은 것으로 나왔다. 즉, Ta는 용융점이 3014°C로 매우 높아 Ta를 용융시키기 위해서는 레이저빔의 출력을 높여야 한다. 그러나 레이저빔의 출력이 증가할 경우에 용접 표면이 매우 거칠어지게 되며 특히 sheath 부분의 두께가 0.15 mm로 매우 작기 때문에 레이저빔의 출력에 민감하여 용접부가 관통(burn through)되기 쉬운 단점이 있다. 또한, 용접 후에 파괴적인 검

사 방법보다는 비파괴적인 검사 방법을 적용할 수 있어야 실제 조사시험에 사용될 시편의 건전성 확인에 유리하나 Ta 재질의 seal tube의 용접부에 대해서는 비파괴적인 검사방법인 X-선 투과 시험의 적용에도 한계가 있음을 확인하였다. Fig. 5에서 tube 중심에 나타난 평행한 두 선은 온도센서의 라인이다. 이것은 용접 후에도 이 라인은 손상되지 않아야 하며, X-선 투과 영상을 통해 센서 선의 건전성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 조사시험용 계장핵연료의 온도센서 피복재의 용접실증을 조사하기 위하여 micro 용접을 수행하였으며, 이에 따른 온도센서 피복재 용접을 위한 결과 내용을 다음과 같이 제시한다.

첫째로 조사시험용 계장핵연료 온도센서 피복재 미세용접을 위한 레이저시스템이 구성되었고, 이를 이용한 이중 금속별 기하학적인 용접구조가 선정되었다.

둘째로 본 실험은 Ti 및 Zr-4를 이용한 seal tube의 적정 용접인 0.1mm를 얻기 위해서 평균 출력 30W, 펄스폭 5ms 및 펄스에너지는 8J 정도가 되어야 한다. 이때 용접속도는 6 rpm이다.

셋째로 건식공정핵연료 개발 및 신형핵연료 개발 과제와 긴밀히 협조하여 조사시험용 계장핵연료 연료봉 제조에 활용될 것이며, 먼저 이를 위한 WPQT 및 샘플 시험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. O. Arrestad, : Fuel Rod Performance Measurements and Re-Instrumentation Capabilities at HALDEN project, In-Core Instrumentation Proceeding, 1996.8.
2. S. C. Wilkins, : "Experimental Coaxial Mo-Zr-4 Fuel Cladding Surface Thermocouple", 1978. 9.
3. A. M. Eaton : LOFT Fuel Rod Surface Temperature Measurement Testing, 1978,11, CONF-781105-3.
4. S. C. Wilkins, "Embedded Zircaloy Sheathed Cladding Thermocouple, 1978.6, NUREG/CR-0271.

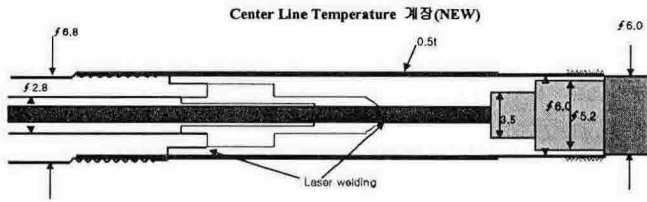


Fig. 1 Seal tube 용접시편의 개념도.

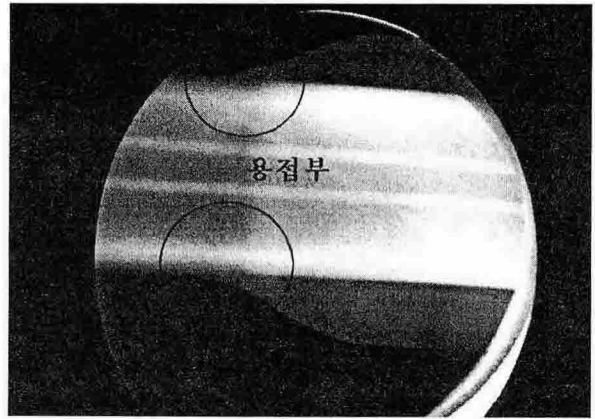


Fig. 5 Zr-4 Seal tube 용접부의 X-선 투과영상.

Table 1 다구찌법에 의한 용접실험 결과.

	A	B	C	D	Radiography Test		Metallography Test		
					Condition		Defects	Bead Width (mm)	Penetration depth (mm)
					V (kV)	A (μA)			
1	Ta/Ta	42	3	0	15	15	L.F.	0.60	0
2	Ta/Ta	42	5	-0.5	15	15	L.F.	0.64	0
3	Ta/Ta	60	3	0	15	15	*	0.72	0.02
4	Ta/Ta	60	5	-0.5	15	15	L.F.	0.77	0
5	Mo/Ta	42	3	-0.5	15	16	L.F.	0.58	0
6	Mo/Ta	42	5	0	15	16	L.F.	0.62	0
7	Mo/Ta	60	3	-0.5	15	16	L.F.	0.67	0
8	Mo/Ta	60	5	0	15	16	L.F.	0.72	0
1	Ti/Ta	24	3	0	15	3	*	0.62	0.05
2	Ti/Ta	24	5	-0.5	15	3	*	0.66	0.04
3	Ti/Ta	40	3	0	15	3	*	0.71	0.08
4	Ti/Ta	40	5	-0.5	15	3	B.T.	0.83	0.1
5	Zr/Ta	24	3	-0.5	15	10	*	0.85	0.02
6	Zr/Ta	24	5	0	15	10	*	0.80	0.07
7	Zr/Ta	40	3	-0.5	15	10	B.T.	0.87	0.1
8	Zr/Ta	40	5	0	15	10	B.T.	0.85	0.1

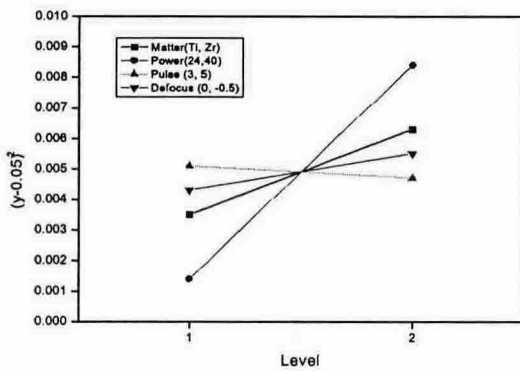


Fig. 2 Ti 및 Zr-4 재질을 이용한 분산분석의 결과.



[60W]

Fig. 3 Ta를 이용한 외관 용접비드 결과.(×10)



[40W]

Fig. 4 Zr-4를 이용한 외관 용접비드 결과.(×10)