

계장 핵연료 조사시험을 위한 시일튜브와 온도센서튜브의 레이저 용접

Laser Welding of Seal tube to Temperature sensor tube for the Instrumented Fuel Irradiation Test

서 준석*, 고 진현*, 김 재학*, 김 건형*, 김수성**

*한국기술교육대학교, **한국원자력연구소

1. 서 론

핵연료 제조과정에서 다양한 용접공정이 적용되고 있으나 최근에는 레이저 용접의 고D/W비율 특성 때문에 적용 가능성에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 핵연료 조립과정에서는 다양한 사이즈와 형태 부품들의 용접 및 접합공정이 필요한데 작은 부품들을 피복관과 노즐 등에 부착하기 위해 LBW의 사용이 예측된다.

원자력 분야에서 새로운 핵연료를 개발 또는 기존 핵연료의 성능을 향상시키기 위한 연구는 꾸준히 계속되고 있는데 이들은 그 성능이 입증되기 위해서는 실험 원자로에서 중성자 조사 실험이 수행되어야 한다. 이때 정확한 온도를 측정하기 위하여 계장형 핵연료 조사시험이 실시된다. 중앙에 구멍이 가공된 펠렛을 통하여 절연체내에 묻혀있는 온도센서를 삽입하고 시험 중 발생하는 핵분열 물질 및 가스의 누출은 방지되어야 한다. 펠렛을 장진하고 온도 센서가 내장된 두께 0.15mm의 Ta 센서 피복관(sensor sheath tube)과 두께 0.3mm의 실튜브(seal tube)사이 원주 방향에서 결함 없는 건전한 용접이 중요하다.

본 연구는 실튜브 재료로 Ta을 사용하기로 선정되었고 이것에 고용도가 우수한 3가지 재료 즉 Zr, Ti과 Mo을 선택하여 이중금속재료 용접을 실시하여 계장형 핵연료 조사 시험시 가장 우수한 성능을 나타낼 재료를 선택하는 것이다. 그리고 이들을 용접하기 위하여 레이저 용접기를 설계 제작하였고, 시편 치수가 작기 때문에 가공이 어려워 제한된 수의 시편을 사용할 수밖에 없기 때문에 데이터 부족을 고려하여 최적의 용접 조

건은 다구치 실험 방법으로 분석하였고, 용접부의 건전성은 금속 미세조직 조사와 미세조점 x-선 방사선 투과검사로 수행하였으며, 시편의 작은 치수에 의해 인장시험 시편 제작과 시험이 어렵기 때문에 용접부의 기계적 성질은 경도시험으로 평가를 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 및 용접

Fig. 1은 계장형 핵연료 조사시험을 위한 시편을 보여주고 있는데 열전대가 MgO 절연체에 묻혀있고 이들은 센서 피복재인 Ta 튜브내에 삽입되고 그 외부는 다시 실튜브에 삽입되어 있다. 센서 피복재 튜브의 외부에 실튜브 끝단 원주방향으로 용접이 되어 이들 사이가 실링 된다. Mo/Ta이음 용접에는 레이저 파워를 42, 60W를 사용하였고, Ti/Ta과 Zr/Ta 이음에는 레이저 파워를 24와 40W를 사용하였다. 그리고 각 이음에는 펄스 폭을 3, 5Hz를 사용하였고 디포커스 길이를 0과 -0.5mm를 사용하여 용접하였다.

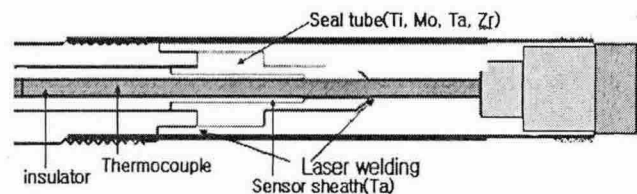


Fig.1 configuration of welding specimen

2.2 용접 시편의 시험

용접비드의 용입, 비드 폭과 용접 단면에서의 결합검사는 금속조직학적으로 되었고, 용접부의 원주 방향으로 용접 건전성은 미세초점 x-선 방사선투과시험으로 검사되었다. 그리고 용접시편이 너무 작아 인장 시험을 수행하기가 어렵기 때문에 용접부는 미세경도시험을 실시하였다.

3. 장 결과 및 고찰

Fig. 2는 용접부의 펄스 폭의 변화에 따른 용접 비드의 용입과 폭을 조사한 결과이다. Zr과 Ti을 실투브 재료로 사용하였을 때는 레이저 파워 증가에 따라 용입이 크게 증가하였으나 Mo에서는 사용된 레이저 파워에서는 용입이 없었다. 레이저 파워 증가에 따른 비드폭은 변화가 거의 없었다.

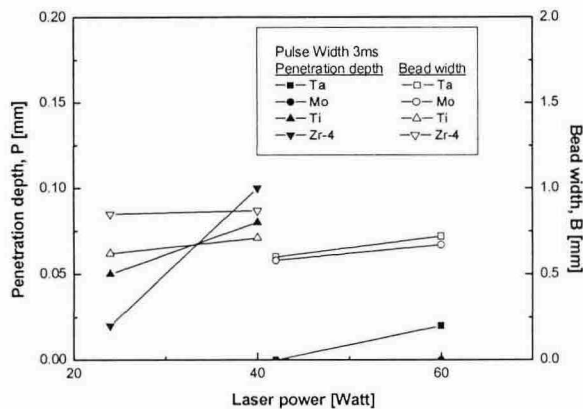
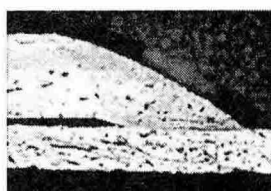
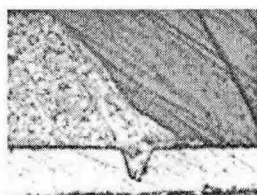


Fig.2 펄스에 따른 용입 깊이

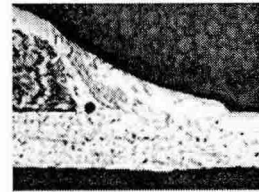
다음 Fig. 3은 이들 이종금속 용접이음의 용접 단면으로 Mo/Ta 이음에서는 거의 용입이 없었으나, Ti/Ta 이음에서는 용입은 깊었으나 비드폭이 작았다. 그러나 Zr/Ta 이음에서는 용입과 비드폭이 앞의 두 이음보다는 우수하였다.



(a)Mo/Ta



(b)Ti/Ta



(c)Zr/Ta

Fig.3 용접 단면, 레이저 파워-60W

다음 Fig. 4는 Ti/Ta과 Zr/Ta 이음에 대한 본 실험에서 얻은 데이터를 다구치 실험 방법으로 분석한 것이다. 레이저 파워가 여러 실험 파라미터 중 가장 가파른 기울기를 보이고 있는데 이것은 파워가 용접시 가장 지배적인 영향을 미친다는 것을 의미한다고 한다.

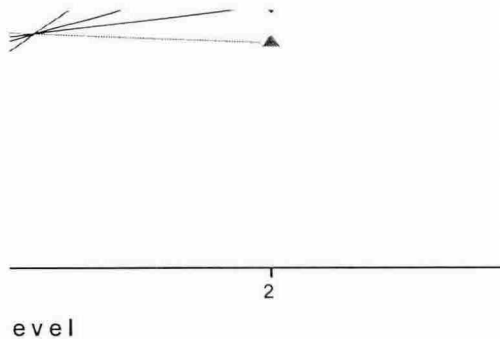


Fig.4 용접 변수에 따른 특성 변화

다음 Fig. 5는 본 실험에서 사용한 3가지 이음을 용접 파워를 변화시켜 용접한 용접부의 외관이다. Mo/Ta 이음에서는 높은 파워(60W)에서는 언더컷이 발생하였고, Ti/Ta 이음에서는 낮은 파워(24W)와 높은 파워(40W) 모두에서 언더컷이 발생하였으나 Zr/Ta 이음에서는 레이저 파워 24W와 40W 모두에서 언더컷 발생이 없는 부드러운 외관을 보이고 있다.

	42W	60W
Ta-Ta (a)		
Mo-Ta (b)		

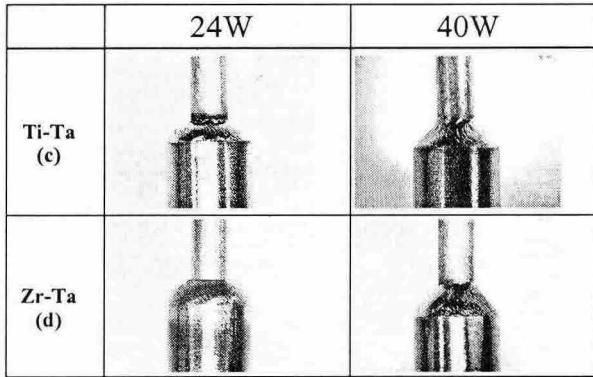


Fig.5 용접 시편의 외관

다음 Fig. 6은 용접이음부의 미세초점 방사선 투과검사에 의한 RT 이미지로서 Fig. 6(a)에서는 원주방향으로 결함없고 용입이 깊은 용접부를 보여주고 있고 또한 용접시 비록 짧은 시간동안 고온으로 가열되었지만 절연재에 묻혀있는 두 가닥의 열전대 와이어를 손상됨이 없이 선명하게 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 실험적으로 용접된 Zr-Ta 이음의 원주방향 용접부의 RT 이미지로서 결함이 없고 용입이 깊은 건전한 용접부를 보여주고 있다.

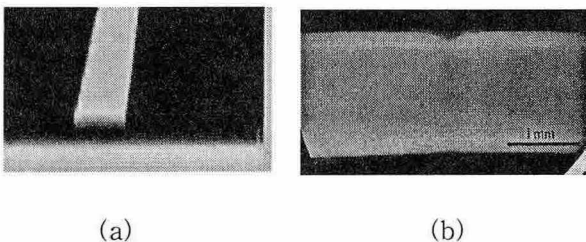


Fig.6 X-ray transmitted image for Zr/Ta seal tube weld joint

Table 1은 본 실험에서 사용한 3가지 종류의 이중금속 이음과 레이저 파워, 펄스 폭, 디포커스 거리 등의 용접 파라미터 변화로 용접된 용접부를 방사선 투과검사와 금속미세조직 검사로 조사된 결과이다. 이 표에서 Zr/Ta 이음이 가장 용입이 깊었고 또한 용접비드 폭도 넓었으며 번쓰류(burn through)를 제외하고는 결함 발생이 가장 적었다. Table 2는 본 실험에서 사용한 3가지 이중금속 이음과 다구치 방법에 의해 분석된 각 이음에서 최적 용접 파라미터이다.

Table 1 Results of welding experiment

	A	B	C	D	Radiography Test Condition		Defects	Metallography	
					V/k	A/μ		Bead Width (mm)	Penetration depth (mm)
1	Mo-Ta	42	3	-0.5	150	16	L.F.	0.58	0
2	Mo-Ta	42	5	0	150	16	L.F.	0.62	0
3	Mo-Ta	60	3	-0.5	150	16	L.F.	0.67	0
4	Mo-Ta	60	5	0	150	16	L.F.	0.72	0
1	Ti-Ta	24	3	0	150	3	x	0.62	0.05
2	Ti-Ta	24	5	-0.5	150	3	x	0.66	0.04
3	Ti-Ta	40	3	0	150	3	x	0.71	0.08
4	Ti-Ta	40	5	-0.5	150	3	B.T.	0.83	0.1
5	Zr-Ta	24	3	-0.5	150	10	x	0.85	0.02
6	Zr-Ta	24	5	0	150	10	x	0.80	0.07
7	Zr-Ta	40	3	-0.5	150	10	x	0.87	0.1
8	Zr-Ta	40	5	0	150	10	x	0.85	0.1

Table 2 Taguchi experimental method

Factor Level	Joint Description [A]	Laser Power [W] [B]	Pulse Frequency [Hz] [C]	Defocus [mm] [D]
1	Mo - Ta	60 (270V 14J)	5	-0.5
2	Ti - Ta	24 (230V 8J)	3	0
3	Zr-4 - Ta	40 (230V 8J)	5	-0.5

Fig. 7은 Zr/Ta 이음의 미세경도 시험결과를 보여 주고있다. 용접부의 경도가 가장 높았고 다음은 열영향부, 모재 순이었다. 이중금속이고 특히 Zr은 에칭이 어려워서 미세조직을 제대로 관찰하지는 못했지만 이와같이 다른 경도는 용접후 냉각속도 차이 때문으로 사료된다.

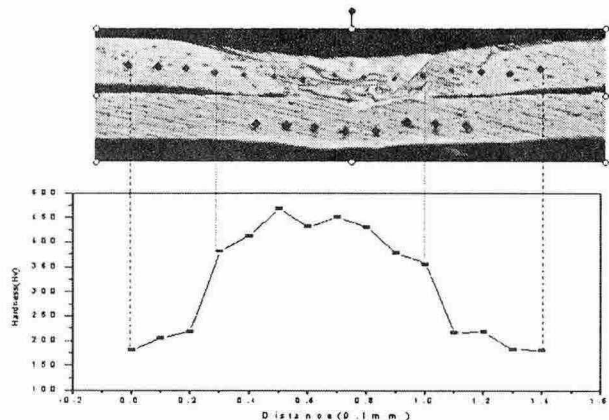


Fig. 7 Zr 용접부의 미세 경도

4. 결 론

본 연구는 계장 핵연료 조사시험을 위하여 실투브와 온도 센서 피복관 사이의 용접에 최적 이음을 선택하기 위하여 Ti/Ta, Mo/Ta과 Zr/Ta의 3가지 이중금속 재료 이음을 레이저 용접하였다. 본 실험을 위해 평균 출력 150W이고 400 μ m SI 광학 섬유 전송이 가능한 펄스형 Nd:YAG 레이저를 설계 및 제작하여 사용하였다. 3가지 이중금속 이음 중 Zr/Ta이 비드 용입과 폭, 언더컷과 기공 등의 결함 발생이 적었기 때문에 실투브와 온도 센서 피복관 사이 용접 이음에 가장 적합한 것으로 선정하였다. 본 연구에서 생산한 적은 데이터 때문에 다구치 실험방법에 의해 선정된 Zr/Ta 이음의 최적 용접 조건은 파워 40W, 펄스 폭 5Hz와 디포커스 거리는 -0.5mm 였다. 그리고 본 실험에서 사용한 용접 파라미터 중 레이저 파워가 용접품질 결정에 가장 지배적인 영향을 미침을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

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. Eatom: LOFT Fuel Rod Surface Temperature Measurement Testing, 1978,11, CONF-781105-3
4. S. C. Wilkins: Embedded Zircaloy Sheathed Cladding Temperature, 1978.6, NUREG/CR-0271