

‘98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Zircaloy-4의 Nd:YAG 레이저 용접의 공정변수 연구

이정원, 김수성, 정인하, 양명승

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

고진현

한국기술교육대학교
충남 천안군 병천면 가전리 산37-1

요 약

본 연구는 핫셀(Hot-cell)에서의 활용을 전제로 핵연료 봉단용접기술로 개발되고 있는 레이저(Laser) 용접기술을 핵연료봉 피복재인 Zircaloy-4에 적용하여 그 용접성에 대한 기초적 특성을 분석하고, 관련 용접변수들의 용접성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 사용된 용접기는 평균출력 150W급인 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접기였으며, 보호가스(shielding gas) 종류와 유량(flow rate), 용접속도(travel speed), 초점위치(focus position), 빔 파워(beam power), 시편의 표면거칠기(specimen surface roughness) 등의 용접변수가 용입 깊이와 용접비드 폭, 기계적 특성, 그리고 용접결함에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 용접변수로 빔 파워 125W이상, 초점위치 2mm, 그리고 보호가스로는 He가스가 적절하였으며, 시편의 표면거칠기가 거칠수록 용입깊이가 깊었다. 본 연구를 통해 핵연료봉 피복재 Zircaloy-4의 레이저 용접시 신뢰성 있는 용접조건을 확립하기 위한 기초자료를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

핵연료봉은 Zircaloy-4 피복관 내부에 소결체를 장전하고 피복관 양단을 봉단마개로 끼워 맞추후 용접으로 밀봉하여 제조된다. 이렇게 제조된 핵연료봉들을 모아 조립된 다발이 핵연료 집합체이다. 이러한 핵연료봉들은 원자로내에서 연소중 피복재가 파손되지 않아야 할 뿐만 아니라 방사성 핵분열 생성물(fission products)의 누출도 방지하는 압력용기(pressure vessel)의 역할을 하도록 설계되었다. 따라서 핵연료 봉단마개 용접부의 건전성에 대한 요구조건은 아주 엄격하다. 핵연료 제조시 용접이 적용되는 부분은 연료봉의 봉단마개 용접외에 경수로형 핵연료의 경우 상부 및 하부노즐(nozzle)과 그리드(grid) 조립, 중수로형 핵연료의 경우 연료다발 조립시 집합판(end plate) 용접과 간격체 및 지지체(spacer and bearing pads)의 피복관의 브레이징(brazing) 등 핵연료 제조에 있어 용접은 아주 중요한 공정이다. 이러한 핵연료 부품들의 용접에는 TIG, 저항용접, 브레이징 등

이 이용되고 있으나 핵연료 제조와 같이 정밀용접이 요구되며, 특히 핫셀에서의 원격용접을 위해 레이저 빔 용접의 적용 가능성에 상당한 관심을 갖고 연구가 다양하게 진행중에 있다[1,2].

본 연구에서는 평균출력 150W의 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하여 보호가스(shielding gas) 종류와 그 유량(flow rate), 용접속도(travel speed), 초점위치(focus position), 빔 파워(beam power), 시편의 표면거칠기(specimen surface roughness) 등 용접의 공정변수(welding process parameters)들이 용입깊이와 용접비드 폭에 미치는 영향과 기공(pore) 형성 등 용접결함에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 재료

용접시편은 열처리(annealing)된 Zircaloy-4 판재(두께 2mm)로, 폭 30mm×길이 120mm 크기로 절단하여 사용하였다. 용접될 시편의 표면은 용접하기 전 아세톤으로 깨끗하게 세척하였다.

2.2. 용접장비 및 시편용접

실험에 사용된 장비는 평균출력 150W급 펄스형(pulsed) Nd:YAG 레이저 용접 시스템으로 용접헤드, 전원제어장치 및 냉각장치로 구성되었다. 용접시편은 폭 300mm×길이 120mm×두께 2mm의 크기로 압연방향과 평행 및 수직방향으로 제살(autogeneous) 비드 온 플레이트(bead-on-plate)용접을 하였다. 시편용접은 고정된 용접헤드에서 발생하는 빔 아래 용접시편을 일정 속도로 이동시키면서 용접하였다.

용접실험으로 시편표면을 기준으로 빔 파워, 빔의 초점 위치, 보호가스 종류 및 유량 변화, 용접속도 등 용접공정 변수들이 용접에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 시편의 표면거칠기가 용접성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시편표면을 emery paper 거칠기 순으로 표면가공하여 용접하였다.

2.3. 인장시험

용접부의 기계적 성질을 조사하기 위하여 Zircaloy-4 판재를 압연방향과 평행하게 비드 온 플레이트 용접한 후 용접비드가 압연방향과 평행인 종방향(longitudinal direction) 인장시편과 용접비드가 압연방향에 수직인 횡방향(transverse direction) 인장시편 및 모재의 인장시편을 CNC 가공기로 제작하여 인장시험하였다. 인장시편의 게이지 길이는 50mm였고 인장시험시 크로스헤드의 속도는 5mm/min 였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 빔 파워가 용접형상에 미치는 영향

그림 1은 레이저 빔 파워에 따른 용접비드의 폭과 용입깊이의 관계를 보여주며, 그림 2는 용접부 형상을 보여준다. 출력 125W 이하에서는 용접비드 폭이 용입깊이 보다 더 컸으나, 125W에서 용접부의 형상비(폭/깊이 비)가 1에 가까우며, 그 이상에서는 용입깊이

가 용접비드 폭 보다 조금 더 컸다.

3.2. 빔 초점 위치의 영향

일정 출력과 용접속도에서 레이저 빔의 초점이 시편 표면으로부터 상대적인 위치에 따라 용입깊이의 영향을 실험한 결과, 초점 위치가 시편 표면으로부터 표면 아래로 1mm와 2mm 깊이로 변함에 따라 비드 용입깊이 및 폭 모두가 크게 증가하였다. 레이저 빔의 최적 초점위치에 대해서는 시편의 두께와 사용레이저 빔 출력에 따라 다르나[3,4], 본 실험에서는 표면 아래 2mm에서 최대 용입깊이와 폭을 보여 주었다.

3.3. 보호가스 종류 및 유량의 영향

그림 3과 4는 보호가스별 유량이 용접비드 폭과 용입깊이에 미치는 영향을 보여준다. 보호가스 유량을 10~30 l/min 범위에서 변화시킨 결과 He 경우가 Ar 경우보다 용접비드 폭과 용입깊이에 더 큰 영향을 미치고 있다.

3.4. 용접속도의 영향

Ar과 He 두 보호가스를 사용하여 용접속도를 50~300mm/min 범위에서 용접한 결과, He를 사용하여 용접된 경우가 전 용접속도에서 용접비드 폭과 용입깊이가 모두 조금 더 컸다. He를 사용한 경우가 Ar을 사용한 경우 보다 조금 더 깊었던 것은 Ar이 He에 비해 이온화 퍼텐셜(ionization potential)이 더 작아 Ar 경우 플라즈마 발생이 용이하고 양도 많아 레이저 빔을 흡수 및 산란시켜 빔이 모재로 전달되는 것이 방해되었기 때문이다[5].

3.5. 시편표면 가공 영향

Zr 합금의 레이저 빔의 흡수율은 용융상태에서 15% 이하로 작다[5]. 즉 반사손실이 특히 크다. 따라서 용접에서의 표면거칠기 영향을 emery paper로 시편표면을 가공하여 실험한 결과, emery paper 번호를 증가하여 연마된 순으로 용입이 감소하였다. emery paper 번호 100으로 연마했을 때 즉, 시편 표면이 거칠수록 용입이 깊고 용접비드 폭이 증가하였다. 이는 가공된 표면이 거칠수록 레이저 빔 반사가 적어 용입이 증가한 것으로 사료된다. 반면에 표면이 거칠수록 빔 흡수량이 많아져 용융부의 표면이 침하(depression)되는 경향이 있었다.

3.6. 기계적 성질

표 1은 보호가스가 Zircaloy-4 레이저 빔 용접부에 미치는 영향을 기계적 성질로 비교, 조사한 것으로 비 보호가스 분위기인 공기중에서 용접된 시편중 횡방향 시편은 모두 열영향부에서 파괴되었고, 거의 연성이 없는 취성파괴를 보였다. 보호가스를 Ar과 He를 사용하여 용접된 횡방향 시편의 경우에는 인장하중시 열영향부에서 파괴가 발생되었지만 비 보호가스 분위기인 공기중에서 용접된 시편 보다는 연성이 상당히 컸다. 그러나 횡방향 인장시편은 게이지 길이 내에서의 용접부의 면적은 작고 대부분이 모재였기 때문에 연성은 비교하지 않았다. 종방향 용접부 시편에서는 Ar+He 혼합가스 분위기에서 용접된 시편은 Ar과 He의 분위기에서 제작된 용접시편과 비교하여 연성, 항복강도 및 인장강도에서 별 차이가 없었다. 비록 같은 보호가스 분위기에서 용접된 시편이라도 횡방향 시편

보다 종방향 시편의 항복 및 인장강도가 더 높았다. 또 종방향 시편 모두 인장 및 항복강도가 모재보다 훨씬 크다. 횡방향 시편도 종방향 시편보다는 다소 낮으나 모재보다 모두 크다.

4. 결 론

본 실험은 핵연료봉 피복재인 Zircaloy-4 판재를 평균출력 150W급인 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접기로 용접시 주요 용접변수들이 용접에 미치는 영향을 조사하여 신뢰성 있는 용접조건을 확립하기 위한 기초자료를 얻기 위한 것으로 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 출력 125W에서 용접 형상비(폭/깊이)가 1이 되었으며, 출력이 증가할수록 용입깊이가 용접비드 폭 보다 더 커졌다.
2. 빔 초점위치가 시편표면으로부터 아래로 깊어질수록 용입깊이와 폭 모두가 크게 증가하였으며, 두께 2mm 판재 경우 초점위치는 표면아래 2mm가 최적이었다.
3. 보호가스로는 He 경우가 Ar 경우 보다 용접부 형상에 더 큰 영향을 미쳤으며, 더 큰 용입깊이를 얻을 수 있었다.
4. 시편의 표면거칠기의 영향은 표면이 거칠수록 깊은 용입을 얻을 수 있으나, 용접부 표면에서 침하현상이 나타났다.
5. 용접부 기계적 성질은 보호가스 분위기에서 용접된 경우 20%이상 연성을 나타내나, 대기중에서 용접된 시편은 연성이 12%로 아주 취약하였다.

참고문헌

1. V. Ram, G. Kohn and A. Stern, *Welding Journal*, July, 33 (1986)
2. S. S. Kim, D.H. Kim, C. J. Kim and J. M. Lee, *J. Kor. Wel. Soc*, 9(1) 23 (1991)
3. R. A. Wilgoss, et al., *Weld Metal Fabrication*, March, 117 (1979)
4. S. L. Engel, *Laser Focus*, Feb. 44 (1976)
5. J. Mazumder, *Laser Materials Processing*, p.131, North-Holland, (1983)

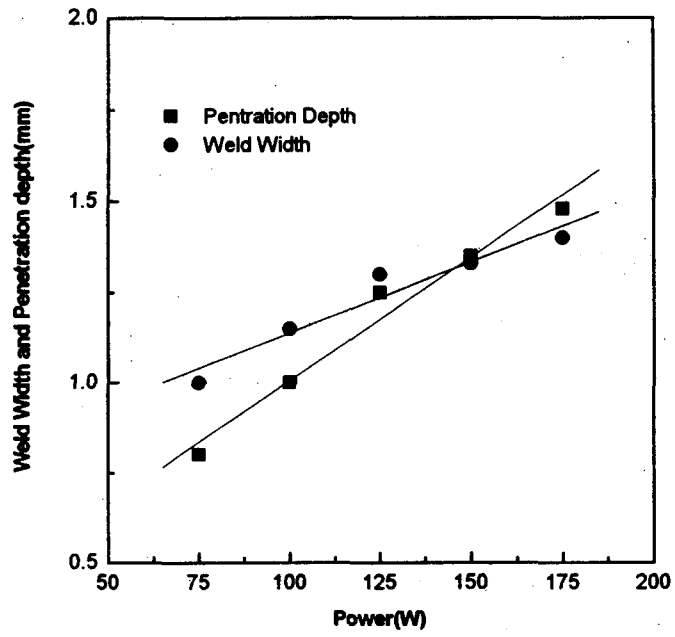


그림 1. 레이저 빔 파워에 따른 용접부 폭과 용입깊이 변화

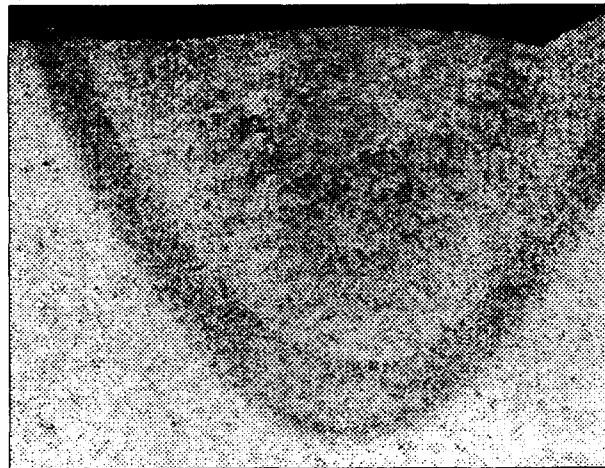


그림 2. Nd:YAG 레이저로 용접된 Zircaloy-4 용접부의 형상

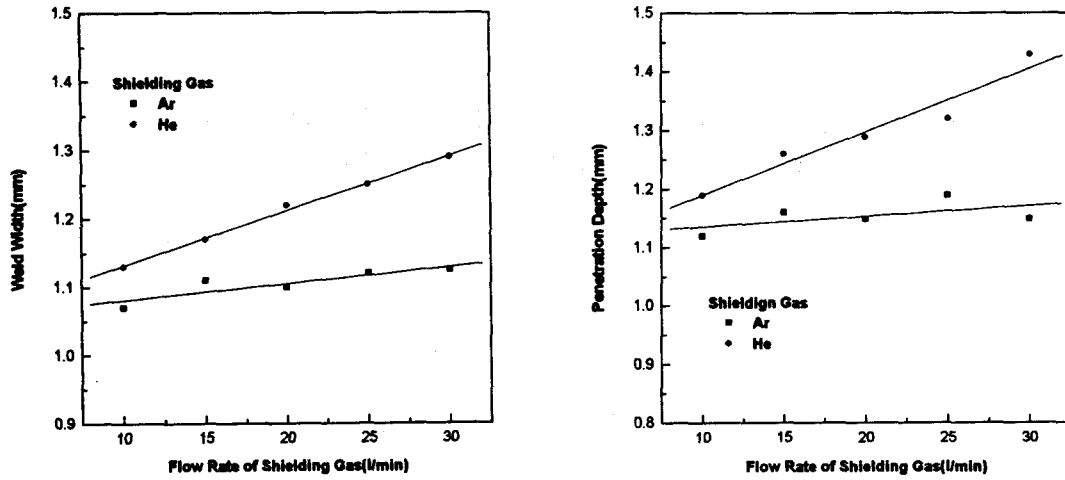


그림 3. 보호가스 종류 및 유량이 용접에 미치는 영향

표 1. 보호가스에 따른 Zircaloy-4용접부의 기계적 성질

Shielding gas	Type of weld specimen	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Y. S. (kgf/mm ²)	T. S. (kgf/mm ²)	Fracture
Ar	transverse	-	-	30.2	47.15	HAZ
	longitudinal	20.2	42	33.1	49.1	
He	transverse	-	-	30.6	47.3	HAZ
	longitudinal	20.4	38.3	30.6	49.5	
Air	transverse	-	-	31.2	37.2	HAZ
	longitudinal	12.2	22	31.8	46.4	brittle
25%Ar75%He	transverse	-	-	29.4	47.2	HAZ
	longitudinal	20	46.1	33.1	49.1	
50%Ar50%He	transverse	-	-	30.6	47.3	HAZ
	longitudinal	20.4	44.1	33.1	49.4	
75%Ar25%He	transverse	-	-	29.4	47.3	HAZ
	longitudinal	20.4	41.2	35	49	
Base metal		21.8	25	27.2	33.7	