

Nd:YAG 레이저 용접에 의한 계장 조사연료봉 제조에 관한 연구 A Study on the Manufacture of instrumented Irradiation Fuel by Nd:YAG Laser Welding

이철용*, 이도연*, 김수성*, 송기찬*

* 한국원자력연구소

ABSTRACT Nd:YAG laser welding system was used to manufacture instrumented irradiation fuel. The optimal condition of zircaloy-4 seal tube is charge voltage 180V and pulse per energy 5J. We got good welding result in charge voltage 400V, pulse width 7ms, pulse frequency 5 in zircaloy-4 endcap welding.

1. 서 론

상용 원자로에서 사용하는 연료봉은 주로 저항 용접으로 제조하고 있다. 그러나 용접재료와 사용 환경에 따라 TIG 아크용접과 전자빔 용접 등이 사용되고 있으며, 최근에는 원격기능을 최대로 발휘할 수 있는 레이저 용접에 대한 연구가 활발하게 연구되고 있다. 사용 후 핵연료를 재사용하기 위해 만든 건식재가공 핵연료는 특성상 고방사성 핵연료이므로 연료봉 제조의 모든 작업 과정이 방사선 차폐시설에서 이루어진다. 따라서 연료봉 제조에 원격 취급이 가능한 레이저 용접이 가장 유리하다. 그러나 레이저 용접을 사용하기 위해서는 용접 조건과 용접성에 대한 연구가 검토되어야 한다. 본 연구에서는 온도센서가 부착된 계장 연료봉 제조에 사용된 Nd:YAG 레이저의 용접 특성과 제조된 연료봉에 대한 건전성을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 Seal tube welding

그림 1은 원자로에서 조사시험 중 핵연료의 중심온도를 측정하기 위한 연료봉 설계도이다. 설계

도 중간부분의 직경 1.2mm 온도센서를 sealing 하기 위해 그림2와 같이 seal tube와 온도센서 sheath를 Nd:YAG 레이저로 용접하고자 한다. 먼저 0.15mm 두께의 tantalum 재질의 온도센서 sheath 와 seal tube를 용접하기 위해 seal tube 재질을 Inconel 600로 선정하여 용접실험을 하였다. Tantalum sheath와 inconel seal tube는 아세톤 용액에서 30분간 담가 세척 후 건조기에서 건조하였다. 레이저 용접은 Ar 차폐가스로 사용하는 소형 차폐박스에서 실험시편을 회전축에 고정 후 초점 위치를 잡기 위해 CCD 카메라 모니터링 시스템이 사용되었다. 용접시편의 초점위치가 정해지면 6rpm 회전속도로 380° 까지 회전하여 용접하였는데, 실험 조건은 충전전압 180V 펄스폭 5ms 반복을 5Hz 및 회전속도는 6rpm이다.

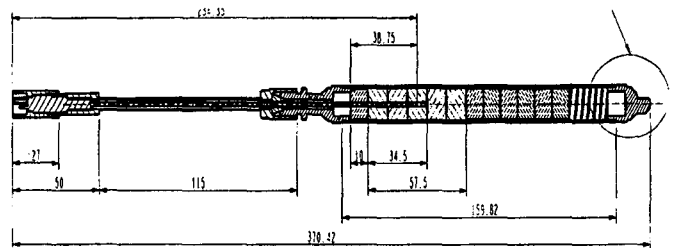


그림 1. 중심 온도 계장 축소 연료봉 설계

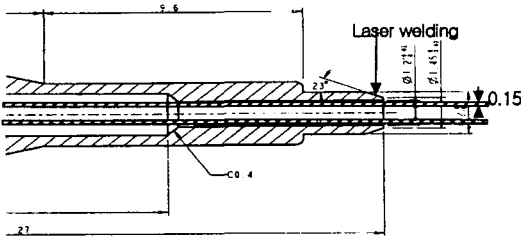


그림 2. seal tube 용접시편 형상

용융점이 훨씬 낮아 레이저 용입열이 tantalum을 용융시키기 전에 inconel이 열을 대부분 흡수하였기 때문으로 판단되었다. 따라서 seal tube의 재질을 inconel 보다 용융점이 높은 zircaloy-4로 바꾸어서 용접실험을 수행하였다. 그림5는 seal tube 재질이 zircaloy-4 용접 결과로 평균출력 30W일 때 tantalum sheath가 과다 용융으로 인해 용입 부분이 함몰된 상태이며, 그림6은 평균출력 15W에서 용입 상태가 약하게 된 용접단면이다. 그러나 그림7과8 에서와 같이 충전전압 180V에서 펄스 당 에너지 5J에서 금속간 화합물 층이 발생하여 적절한 용입 상태 결과를 얻었다.

2.2 Endcap welding

그림3은 연료봉 상단과 하단부의 상세 형상이다. Zircaloy-4 재질의 endcap과 0.66mm 두께의 zircaloy-4 피복관을 끼워 맞추는 후 Nd:YAG 레이저를 사용하여 용접한다. 용접 시편은 5/100 공차로 제작된 시편은 아세톤세척과 건조기에서 충분히 건조하였다. 용접은 별도로 제작된 진공 챔버에서 He 분위기에서 수행되는데, 시편을 6rpm으로 회전시키면서 충전전압 400V, 펄스폭 7ms, 반복을 7Hz 조건으로 수행하였다.

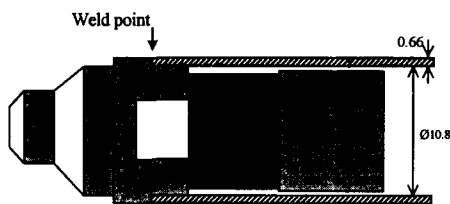


그림 3. Endcap 용접시편 형상



그림 4. 용접된 Inconel 시편



그림 5. 과다 용접된 시편

3. 실험 결과

3.1 Seal tube welding

그림4는 Inconel seal tube와 tantalum과의 레이저 실험 결과이다. 레이저 출력을 15W에서 30W로 변화시키면서 용접실험을 수행하였으나 실험결과는 그림4와 같이 용입 열이 inconel 만 용융시키고 tantalum까지 용융시키지 못하였다. Tantalum을 용융시키지 못한 이유는 용융열이 작은 것이 아니라 inconel 재질이 tantalum 보다

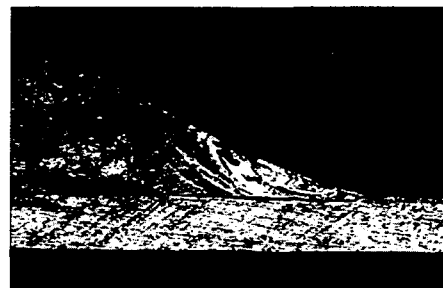


그림 6. 용입 부족 시편

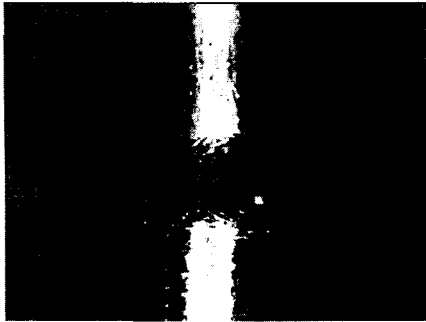


그림 7. Ta+Zr 용접시편

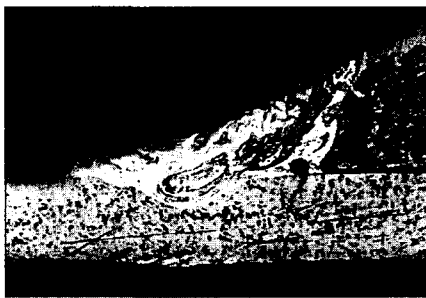


그림 8. Ta+Zr 용접단면

3.2 Endcap welding

그림9는 endcap 용접 단면이다. 용접은 피복관 두께 기준으로 280% 이상으로 매우 양호하게 용접되었으며 열 영향 영역부(HAZ)에서 기공이나 크랙이 발생하지 않았다. 또한 시편의 가공 공차가 약간 있어도 레이저 출력이 높아 용접비드나 용입 깊이에서 매우 만족스러운 결과를 얻었다.

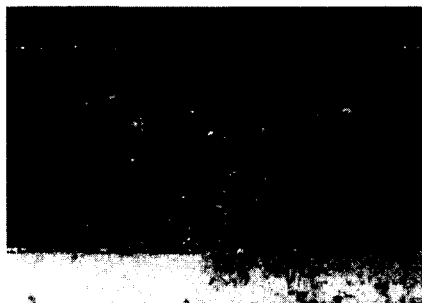


그림 9. Endcap 용접단면

3.3 헬륨 누출 시험(He Leak Test)

계장 조사 연료봉 제조를 위한 seal tube 및

endcap 용접 자격화 수행 후 제조된 연료봉에 대해 건전성 실험을 수행하였다. 먼저 실험실에서 seal tube와 상단 endcap을 용접한 다음 최종적으로 방사선 차폐시설에서 원격으로 하단 endcap을 용접하여 He 누출시험을 수행하였다. 건전성의 실험결과는 배경누출 이하(5×10^{-7} mbar l/s)의 합격기준을 만족하였다.

4. 결론

계장 조사연료봉의 seal tube 및 endcap을 Nd:YAG 레이저 용접으로 사용하였을 때 용접성에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1) 온도센서의 tantalum 재질과 용접성이 좋은 재료는 용융점이 높은 zircaloy-4이며, 충전전압 180V 펄스 당 에너지 5J에서 적절한 용입 결과를 얻었다.

2) Zircaloy-4 재질의 endcap 용접은 충전전압 400V 펄스폭 7ms, 반복율 7Hz 조건에서 매우 양호한 용접성을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. S.S. Kim : A study on the Seal Tube welding for Measurement Irradiation Test Using Dry Process, Korea Nuclear Society Autumn Meeting 2003.
2. 김진덕 : 특수용접 이론과 실제, 원창출판사, 1996.