

광섬유전송시 Zircaloy-4 봉단레이저용접의 특성조사 (Investigation of Zircaloy-4 endcap laser weldability by optical fiber transmission)

김수성*, 이정원*, 정인하*, 양명승*, 고진현**, 이영호***

*한국원자력연구소 **한국기술교육대 ***충남대

1. 서론

본 연구는 중수로 핵연료봉의 제조를 위한 최적의 봉단용접법을 선정하기 위한 것으로, 원자로내에서 핵연료봉 용접부의 안전성과 연료봉의 성능향상을 고려할 때 반드시 선행되어야 할 중요한 일이다. 중수로핵연료봉의 봉단용접은 핵연료제조의 조립공정에서 전단계로서 Zircaloy-4 피복관에 소결체를 장입한 후 봉단(end cap)으로 밀봉하는 작업이다.[1] 본 실험에서는 광섬유전송시 핵연료봉의 LBW조건의 선정과 성능평가에 관한 것으로, 중수로연료봉의 모의시편을 이용하여 LBW실험을 수행하였으며, 실제로 봉단용접에 필요한 최적조건을 제시하였다. 그리고 Zircaloy-4 봉단용접시 봉단과 피복관의 적절한 기하학적 이음형상과 작업변수를 조사하였으며 이에 따른 비이드, 용입의 영향에 관한 분석 및 가스유량의 영향등을 비교하여 용접부의 특성을 고찰하였다.

2. 시험편 및 실험방법

실험재료는 중수로형 핵연료봉의 Zircaloy-4 피복관과 봉단이 맞닿는 겹치기이음구조로 구성되어 있으며, 용접될 봉단의 끝단은 144° 로 돌출되게 하였다. 봉단은 지름이 13.15mm로 700°C에서 2시간 annealing된 봉이며 피복관은 냉간가공후 520°C에서 2시간 정도 stress-relief annealing하였으며, 직경은 13.08mm, 두께 0.4mm 그리고 길이는 500mm 이다. 봉단의 기하학적 형상을 변화시키기 위해서 Fig.1과 같이 봉단의 구멍깊이 6.5mm, 원추각도 120° 그리고 D_H (Hole Diameter) 4 에서 10mm의 1mm간격으로 가공된 시험편을 이용하였다.

Nd:YAG laser system에서 발진된 빔을 직접 보낼 경우 위치자유도가 떨어지고 가공물체의 좁은 공간에서 사용하기가 불편하므로 유연성이 좋은 가늘고 긴 광섬유를 사용하게 된다. 광섬유 전송기구는 광학입구커플러(optical input coupler), 광섬유(optical fiber), 그리고 광학출구커플러(optical output coupler)로 구성된다. 광학입구커플러는 입사렌즈에 의해 빔이 광섬유의 코어내부로 집속되는 부분이다. 광섬유는 순수 SiO_2 인 석영유리로서 굴절률이 큰 코어부분과 굴절률이 작은 피복부분으로 구성되어 있고, 코어직경은 600, 800, 1000 μm 이고 길이가 20m이다. 이것은 SI(Step Index) 멀티모드형이며 광섬유의 개구수(NA:Numerical Aperture)는 0.22이다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 광섬유전송시 광학출구커플러가 사용되었으며, 조사된 빔이 만나는 부분의 빔 형태를 측정하기 위하여 적외선 CCD센서가 사용되었다. LB의 특성실험은 CCD장치에 부착된 X-Y translator를 이용하여 빔위치별로 정밀하게 이동하게 하였다. 레이저가 CCD센서의 접촉면에서 만나는 빔의 크기가 가장 작을 때 "0"으로 하고, defocus(-) 지점은 CCD센서의 접촉면에서 광학출구커플러와 가까운 방향으로 focusing되고, defocus(+)지점은 CCD센서의 접촉면에서 광학출구커플러와 멀어지는 방향으로 focusing된 것이다. Fig.2는 광섬유의 코어직경이 600 μm 으로 전송시 CCD센서에 의해 빔크기가 측정되었는데, 이때 초점위치에 따른 빔크기의 결과를 보여주고 있다. Fig. 2에서와 같이 "0"지점에 위치할 때 광학출구커플러의 C구조에서 빔크기가 700 μm 이하로 가장 작게 나타났으며, CCD센서위치가 초점위치 "0"지점부터 좌우로 벗어날수록 빔크기는 증가됨을 보여주고 있다. 이때 광학출구커플러의 A구조는 B, C구조에 비하여 빔위치에 따른 변화에서 빔이 대체로 크게 나타내고 있음을 알 수 있다.

핵연료가 연소되면 연료봉내부에서 Xe, Kr 같은 핵분열기체(fission gas)가 발생해서 연료봉 내압을 높이게 되며 핵분열기체의 방출은 연소도가 높아질수록 증가하게 된다. 따라서 핵분열기체를 수용할 수 있는 연료봉내의 공간을 가능한 많이 확보하는 것이 핵연료성능의 관점에서 유리하다.[2] 이러한 관점에서 볼 때 핵연료봉의 봉단형상은 매우 중요한 의미를 갖으며, 용접관점에서 볼 때 기하학적 구조가 열변형, 용입깊이 그리고 용접결함에 큰 영향을 미치게 된다.

Fig.3은 봉단마개형상의 구멍크기 D_H 에 따른 용접결과를 나타낸 것으로 D_H 가 커질수록 용입이 거의 일정하게 나타나다가 봉단마개의 벽두께가 2.1mm의 $D_H=8\text{mm}$ 에서 크게 증가되며, 이때 봉단의 가공된 구멍내부에는 약간 변색되어 있었다. 또한 봉단의 벽두께가 1.2mm인 $D_H=10\text{mm}$ 이상에서는 피복관과 봉단의 연결부위가 거의 관통되었고, 역시 봉단내부에서 spattering 흔적과 파랗게 변색되어 있었다.

Fig.4는 LBW시 He이 보호가스로 사용될 때 유량이 용입에 미치는 영향을 보여주고 있다. 이때 광학출구커플러의 노즐간 거리를 6mm로 하였다. Fig.4에서 알 수 있듯이 보호가스의 유량이 증가될수록 용입이 점차 커졌으나 He유량이 50 l/min부터는 급격히 감소된다. 또한 유량증가와 더불어 용접단면의 macro관찰에는 용융금속내의 중앙 혹은 하단부에서 약간의 기공이 형성되었다. 이것은 보호가스의 압력이 LBW중에 형성되는 금속이온의 압력보다 높은 현상으로 기인된 것이다. 여기서 He를 보호가스로 사용할 때의 용입증가현상은 LBW과정에 플라즈마로 인한 입사효율이 커짐과 동시에 최대한의 에너지전달효과(enhanced energy coupling)를 얻은 것이고[3], 반면에 용입감소현상은 He유량이 많을수록 재료에 에너지흡수로 생긴 열이 그대로 빠져나가 냉각효과를 유발했기 때문으로 해석된다.

4. 결론

본 연구는 광섬유전송에 의한 Nd:YAG LBW방법을 이용하여 Zircaloy-4봉단용접시 최적조건을 조사한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 봉단형상에 따른 용입특성의 실험에서는 양호한 실험결과를 얻었으며, 연료봉의 피복관과 봉단의 이음구조가 완전용입되는 경우보다 D_H 가 적어도 8mm까지는 용입과 변색정도에서 적절한 것으로 판단되었다.
2. Zircaloy-4봉단용접의 적정용입과 비이드를 얻기 위해서는 laser power 230W, pulse width 5ms, pulse energy는 적어도 15J로 하며, 이때 rotation speed는 8RPM을 넘지 말아야 한다.
3. 광학출구커플러의 보호가스는 He이 사용되었고, 가스유량은 용입에 지대한 역할임이 확인되었다. 이때 He유량이 30l/min 내지 40l/min에서 좋은 비이드와 용입을 얻을 수가 있었다.

참고문헌

- [1]P.T.Truant, "CANDU Fuel Performance : Power Reactor Experience", AECL-MISC-250-3 Rev.1(1983)
- [2]Liv. Lunde, Nuclear Engineering and Design 33 (1975)
- [3]K. Behler, E. Beyer : Laser Welding of Aluminium, LMP ICALEO'88, November, (1988), pp.249-258

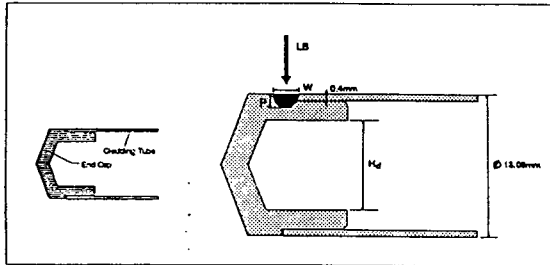


Fig. 1 Joint geometry of experimental specimen for end cap welding

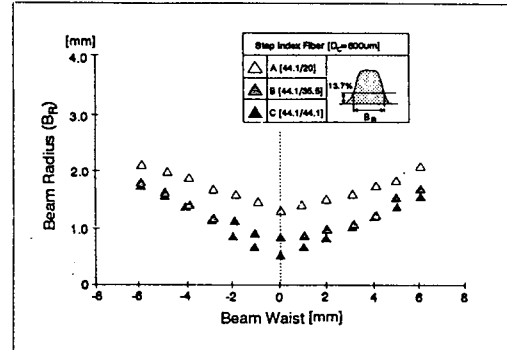


Fig. 2 Beam radius vs. beam waist using fiber 600µm.

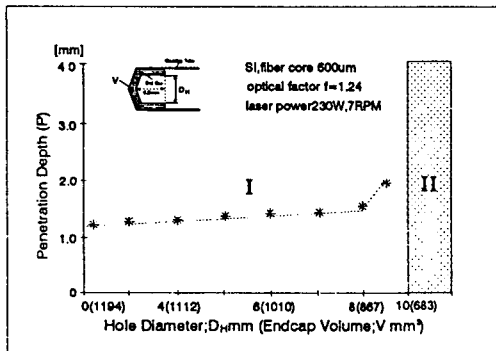


Fig. 3 Dependence of penetration depths on various D_H parameters.

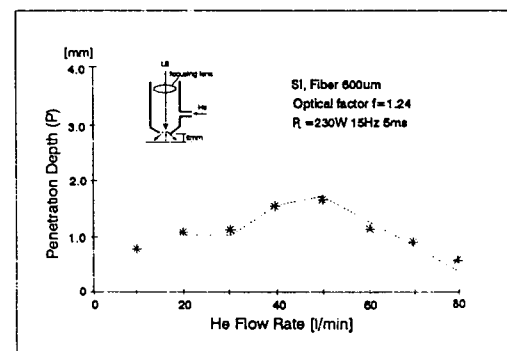


Fig. 5 Effect of the penetration depths on flow rate of He gas.