

# 핵연료봉 지지체부착을 위한 지르칼로이-4 레이저용접연구

## A Study on Zr-4 Laser Welding for Attachment of Bearing Pads of Nuclear Fuel Element

김수성\*, 김용기\*, 이정원\*, 양명승\*, 이영호\*\*

\*한국원자력연구소 \*\*충남대

### 1. 서론

최근 선진국에서는 이미 새로운 핵연료개발 및 조사시험용 캡슐제작 등이 활발히 진행되고 있음에 따라 핵연료제조 및 특수용도의 부품제작에 대한 원격작업으로 레이저가공기술이 수행되어지고 있다.<sup>[1,2]</sup> 현재 중수로 핵연료제조시 핵연료봉의 지지체 부착을 위해서 브레이징방법이 채택되고 있으며, 핵연료봉의 지지체는 연소시 로내의 인접 연료봉과 일정간격으로 유지되면서 연료봉에 냉각수가 흐르는 방향으로 부착하게 되어 연료봉과 압력관사이의 마찰로 발생될 수 있는 피복관 마모를 방지해 준다. 이러한 지지체의 중요한 역할로 볼 때, 레이저용접의 활용은 용융점이 높고 산화가 잘 되는 지르코늄합금의 피복관 용접과 핵연료의 성능향상은 물론 제조시의 다량생산, 생산비 절감 등의 모든 경제적인 측면에서 유효하다. 따라서 용접공의 기능수준에 관계없이 레이저가 광섬유로 전송되어 미세용접이 얻어 질 수 있고 핵연료봉의 지지체 부착에 적합한 초정밀 레이저용접기술이 필요하게 되었다.<sup>[3]</sup>

본 연구는 펄스형 200W Nd:YAG 레이저 및 원격전송이 가능한 광섬유를 이용하여 현재 중수로형 핵연료봉의 지지체 및 간격체 부착을 위한 용접시스템이 개발중에 있으며, 아울러 초정밀 레이저를 이용한 기초 용접실험을 통하여 최적조건 및 용입특성에 대하여 비교 조사되었다.

### 2. 레이저시스템 구성

#### 2.1 레이저발전부 설계

광섬유전송형 정밀용접용 Nd:YAG 레이저장치는 표적에서의 에너지 밀도를 높이기 위하여 400um 정도의 굵기가 가는 광섬유를 사용하여야 하며, 광섬유도 GI(Grade Index) type 이 SI(Step Index) type 보다 좁고 깊은 용접에 적합하다. 본 레이저용접기의 기본구성은 200W급 펄스형 Nd:YAG 레이저와 400um 구경의 GI 혹은 SI type 광섬유 2개로 전송되는 용접시스템이다. 초정밀 레이저공진기는 공진거울(전반사경과 출력경)과 aperture, 레이저로드, 섬광램프 및 펄핑반사체로 구성된다.

#### 2.2 광섬유전송부 설계

레이저빔을 광학렌즈를 사용하여 표적에 바로 입사시키는 직사광학계 구조의 빔전송 장치로 구성된다. 발전된 레이저빔의 광학적 특성을 그대로 가지고 있으므로 절단이나 드릴링 등 에너지 밀도가 높은(작은 레이저빔 spot size)장치에 사용된다. 빔 확대기를 사용하여 확대된 빔을 가공물체가 있는 위치까지 전송한 후 45° 반사거울로 반사시켜 집광 렌즈로 가공물체에 조사시킨다. 광섬유를 이용한 전송광학계의 가장 큰 장점은 원거리 전송이 가능하고 따라서 원격가공에 적합하다. 앞에서 언급한 광속확대기, 열반사거울 및 집광렌즈로 이루어진 레이저 전달장치 대신에 광섬유를 이용하여 레이저를 전송하게 된다.

#### 2.3 레이저용접감시부 설계

미세용접은 지르코늄소재의 정밀부품과 같이 용접폭이 1mm 이하의 범위를 갖는 미세한 부분을 정밀하게 용접하기 때문에 오차를 최대한 줄여야 한다. 오차를 줄이기 위해서는 정밀한 기계장치의 조작과 함께 오차가 발생했을 때 오차를 확인할 수 있는 감시장치가 요구된다. 본 실험에서 사용된

일체형 용접부 감시장치는 단축 또는 다축으로 구성된 이동용 테이블에 설치된 레이저용접 헤드에 감시용 카메라장치가 일체형으로 부착되어 있다. 용접면에 초점이 맞추어져도 50mm 초점거리의 렌즈와 확장링을 사용하였다. CCD카메라 영상은 모니터에 디스플레이된다. 용접감시용 카메라로는 흑백 CCD 카메라 또는 칼라 CCD 카메라를 사용한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 지르칼로이 지지체용접부의 비드관찰

본 실험에 사용된 시편은 두께 1.5mm인 지르칼로이-4 지지체 2.3mm x 30mm 크기로 준비되었다. 지르칼로이-4 지지체에 존재하는 이물질을 제거하기 위하여 아세톤용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 66°C로 건조시켰다. 이때 레이저용접시 지지체의 용접변형을 줄이기 위해서 특수하게 설계된 holding fixture를 사용하였다.

지르칼로이 합금은 전자빔이나 레이저를 이용한 용접에 매우 우수하다. 전자빔 용접은 금속의 반응을 막기 위해 진공속에서 이루어졌으나 높은 증기압을 가지는 크롬, 주석등 일부 금속손실이 발생할 수 있다. 반면에 Nd:YAG 레이저용접은 진공을 사용하지 않고 매우 작은 빔크기를 가지고 있어서 열에 대한 변형이 거의 없다. Fig. 1은 광섬유 400um을 이용한 지르칼로이-4 지지체 용접시편의 비드상태를 알아보기 위한 것이다. 여기서 펄스폭을 2.5ms, 평균출력을 90W로 하였을 때, 비드폭은 0.5mm 이상으로 크게 나타났으며 용입비(aspect ratio)는 대체로 1로 나타났다. Fig. 1에서와 같이 지르칼로이-4 지지체의 앞부분과 뒷부분의 미세용접부를 보여주고 있으며 이때 적합한 용접조건은 용접속도 280mm/min, 평균출력 80W, 펄스당에너지는 8J에서 보여주고 있다.

Fig. 1의 시편에서 피복관과 지르칼로이-4 지지체로 연결된 것으로 레이저용접된 단면을 절단하여 살펴보았을 때, 레이저를 45° 방향으로 조사시킬 때 얻은 용접으로 대체로 용접은 만족하나 피복관과 지지체에 만나는 root부에서 용접불량이 발생할 수도 있다. 이러한 용접불량을 일으키지 않기 위해서는 가능한 피복관과 지지체의 간격을 작게 해야 하며 이에 따른 용접지그 설계가 중요한 사항이다. 또한 지지체의 강도면에서 볼 때 전면의 레이저용접될 경우 용입되는 단면적이 늘어나기 때문에 그만큼 강도가 높으며 또한 부식특성에서도 유리한 점을 가지게 된다. 아울러 차후에는 지르칼로이-4 지지체 용접실험에서 전면방법의 용접을 수행할 예정이다.

#### 3.2 지지체용접샘플 제작 및 향후계획

일반적으로 핵연료제조에서 피복관과 지지체의 용접이 끝난후에 핵연료 소결체를 장입하는 것이 더 나은 방법으로 알려져 있다. 그 이유는 이산화우라늄(UO<sub>2</sub>)을 다루어야 하는 시간을 줄일 수 있고, 제조의 용이성, 소결체에 대한 손상을 줄일 수 있기 때문이다. 하지만 이러한 기술은 피복관의 두께가 매우 얇아서 피복관과 소결체의 사이가 매우 좁고 또한 엄격한 품질이 필요하므로 지지체의 용접이 매우 까다로운 제조기술이다.

실제로 핵연료제조에서 소결체과 피복관의 사이는 매우 좁기 때문에 이때의 간격이 0.05에서 0.125mm 정도로 된다 하더라도 간격의 감소로 인해 소결체 장입이 허락될 수 없다. 이것은 피복관의 두께가 매우 얇아서 작은 열과 압력에도 피복관의 내경은 변화를 일으킨다. 따라서 이러한 작업은 용접후에 변형이 절대로 발생되지 않도록 이루어져야 한다. 그리고 원자로내에서 피복관과 지지체사이의 간격에서 용접부에 대한 부식균열이 발생할 지도 모른다는 염려가 나왔으며 이 문제와 더불어 용접물의 강도를 높이는 방법에 대한 연구가 진행중에 있다.

본 실험에서는 먼저 핵연료 지지체용접을 위한 레이저용접시스템이 개발되었고 이에 따른 지르칼로이-4 지지체 용접특성이 조사되었다. 다음으로는 실질적으로 핵연료봉 제조시 지지체 용접샘플을 제작할 예정이며, 이때 여러 가지의 용접물에 대한 품질규정에 따라야만 한다. 이러한 지지체의 용접은 아래의 규정을 만족해야 한다.

- 1) 야금학적인 용접성 검토 2) 적절한 강도 및 부식특성 검토 3) 좁은 HAZ(발생된 열의 영향을 미치는 영역) 4) 용접부위에 대한 품질의 신뢰성 5) 대량 생산에 대한 수용성 6) 비파괴 검사(NDT)에 대한 수용성

#### 4. 결론

본 연구는 광섬유전송에 의한 Nd:YAG 레이저방법을 이용하여 지르칼로이-4 지지체용접부의 특성조사와 향후 용접샘플 제작에 대한 검토내용을 기술한 것으로 다음과 같은 요약된 결론을 얻었다.

1. 핵연료봉의 지지체부착을 위한 레이저용접시스템이 개발되었고 이에 따른 광섬유연결부, 감시부 및 제어부 등의 성능시험이 수행되었다.
2. 지르칼로이-4 피복관과 지지체의 연결부위에 대한 기초용접실험이 수행되었고, 충분히 용접되기 위해서는 평균출력 80W, 펄스폭 2.5ms, 펄스에너지 8J에서 적절하였다.
3. 추후에는 핵연료봉 지지체의 용접샘플을 제작할 예정에 있으며, 이에 따른 핵연료의 용접물에 대한 품질규정에 의거해서 검사될 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] J. Saito, M. Shimizu : Development of Re-instrumentation Technology for Irradiated Fuel Rod, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp. 125-135
- [2] H. Sakai, H. Kawamura : New Apparatus of JMTR Hot Laboratory, Department of JMTR, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.65-77
- [3] Pankaj B. Desai & P. G. Kulkarni : Trends in Joining Technology Development for PHWR Fuel Assemblies in India. (1999), pp.205-214

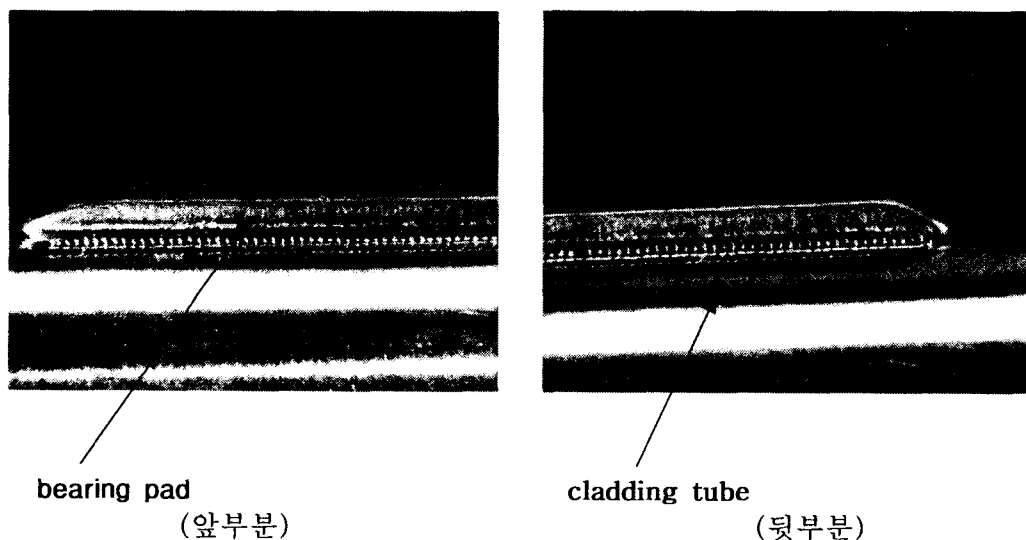


Fig. 1 레이저용접된 피복관과 지지체의 연결부분 (X8)