

2001 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 핵연료봉 지지체 부착을 위한 레이저용접특성 조사

# Investigation on Laser Welding Characteristics for Appendage of Bearing Pads of Nuclear Fuel Element

김수성, 김웅기, 박춘호, 고진현, 이정원, 양명승

한국원자력연구소

대전시광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

현재 중수로 핵연료 제조시 핵연료봉의 지지체 부착을 위해서 브레이징방법으로 채택되고 있는 실정이나, 핵연료 성능개선과 생산성 향상을 위해서 지지체 부착용 레이저용접기술이 필요하게 되어 연구중에 있다. YAG 레이저는 미세한 부품용접에 적합하며 광섬유로 전송할 수 있기 때문에 양산방식의 작업장에서 매우 유리하다. 이러한 특징을 살려서 핵연료봉의 지지체부착을 위한 레이저용접기술이 개발되었고, 또한 레이저용접부에 대한 특성연구가 수행되었다.

### Abstract

In CANDU nuclear fuel manufacturing the brazing technology has been adopted conventionally to attach the bearing pads of nuclear fuel elements. However, in order to meet good performance of nuclear fuel and improved working efficiency, we started developing the laser welding technology for attachments of the bearing pads. Since the YAG laser can be suitable for small parts and transmit the beam through the optical fiber, the process is corresponding to mass-production with working shops. Making the most of this feature, we have developed the laser welding for appendage of the bearing pads of nuclear fuel elements, and has studied on the laser welding characteristics of appendages for nuclear fuel element.

## 1. 서 론

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 개발되었고, 아울러 레이저를 이용한 용접시편의 기계적 성질, 부식특성 및 미세조직 등이 관찰되었다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 Fig. 2.1과 같이 두께 1.5mm인 지르칼로이-4 지지체 2.3mm x 30mm의 A 및 B형태를 가지며, 두께 0.4mm와 외경 13.08mm 인 피복관으로 준비되었다. 지르칼로이-4 지지체에 존재하는 이물질 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 60℃로 건조시켰다. 이때 레이저용접시 지지체의 용접변형 억제 및 산화방지를 위해서 특수하게 설계된 holding fixture와 쉘딩박스를 사용하였다.

### 2.2 실험 및 시험방법

레이저용접 실험시 광학출구커플러에 연결된 용접노즐은 레이저절단 보다는 가스압력이 낮으며, 이때 사용되는 보호가스도 용접부의 산화를 방지하기 위한 것으로 용융면을 채울 수 있도록 충분한 부피로 확산되어야 한다. 이러한 보호가스의 역할은 레이저용접시 플라즈마 형성에 높은 에너지를 요하는 헬륨이 레이저와 재료의 상호관계에 유리한 잇점을 가지고 있다. 레이저가 시험편을 정확하게 초점위치를 가지도록 CCD 카메라와 광학출구커플러를 사용하여 정렬하였으며, 초점위치는 다이오드레이저를 집광렌즈로 통하여 시험편에 초점을 맺히게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 가장 작은 초점이 될 때 용접을 수행하였다.

지르칼로이-4 지지체용접부의 미세경도는 미세조직 관찰에 사용되었던 시험편을 하중 100g의 비커스방법인 미세경도기(micro hardness)를 사용하여 시험편의 표면에서 0.2mm 아래로 위치한 지점에서 용접부의 중심선부터 모재까지 연속적으로 0.2mm 간격

으로 측정되었다. 이때 용접부의 크기가 매우 작기 때문에 각각 3 개의 시험편에서 경도치를 측정하여 그 평균값으로 취하였다. 또한 지르칼로이-4 용접부의 건전성을 조사하기 위하여 인장시험 및 밀봉파열시험의 파괴 방법으로 수행하였다. 또한 지지체부착 파열시험은 시험편을 하단플러그를 막은후 55Mpa 까지 가압하였으며, 시험장치의 저장에너지가 175J 이하 인지 확인한 후 시험편을 인장시험기의 가압장치에 설치하여 수행되었다. 여기서 피복관의 탄성변형중 가압속도가 0.23 MPa/sec  $\pm$ 0.02 MPa/sec로 되도록 인장시험기를 조정하여 파열될 때까지 같은 속도를 유지한 후 파열시험의 최대유체압력이 기록하게 된다. 이때 최대파열강도 및 연신율은 시험편을 제거하여 최대 부풀음(bulge)이 일어난 곳에서 파열된 가장자리사이 피복관표면의 원주길이를 측정하여 비교하였다.

이러한 지지체부착 파열시험은 지지체 용접부에서 파괴가 발생되지 않으면 건전한 용접으로 평가된다. 지르칼로이-4 용접부의 미세조직은 시험편의 원주방향으로 임의의 단면을 절단하여 마운팅한 후 연마지로 No. 200, 400, 600 및 1000 순으로 갈아낸 다음 폴리싱된 시험편은 증류수로 10분간 초음파 세척하고 건조시킨 후, 부피분율로 H<sub>2</sub>O: 45, HNO<sub>3</sub>: 45, HF<sub>4</sub>: 10의 용액에 스왑 엡칭하여 용접부의 미세조직을 편광법으로 사용하여 금속광학 현미경조직을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 지지체구조에 따른 용접특성

지르칼로이-4 재질은 고밀도 에너지방법인 전자빔이나 레이저를 이용한 용접에 매우 우수하다. 특히 Nd:YAG 레이저용접은 진공을 사용하지 않고 매우 작은 빔크기를 가지고 있어서 열변형이 거의 없다. Fig. 3.1은 광섬유 400um을 이용한 지르칼로이-4 지지체 시험편 A 및 B의 용접상태를 알아보기 위한 것이다. 여기서 부분용접부의 변수는 펄스폭을 2.5ms, 평균출력을 90W로 하였을 때, 비드폭은 1.2mm 이상으로 나타냈으며 용입비(aspect ratio)는 대체로 0.5로 나타냈다. Fig. 3.2에서와 같이 지르칼로이-4 지지체의 부분용접과 전면용접의 모습을 보여주고 있다. 이때 전면용접인 경우 끝단부의 용접변수는 펄스폭 1.2ms, 용접속도 560mm/min, 평균출력 50W, 펄스당 에너지는 5J 이다.

Fig. 3.3은 용접시험편 A의 사각형 (square type) 및 B의 썸기형 (shim type)에서 레이저를 45°방향으로 조사시킬 때 얻은 용접으로 대체로 만족하나 피복관과 지지체에 만나는 root부에서 약간의 기공이 발생하였다. Fig. 3.4는 용접시험편 B의 경우 레이저용접될 때 지지체와 피복관에서 맞나는 root face 길이를 조사하였고 또한 root face 길이에 따른 용입의 영향을 분석하였다. 이경우 레이저출력이 증가함에 따라 root face 길이는 감소하고 또한 지지체용접의 깊이는 증가함을 알 수 있었다. 여기서 썸기형의 지지체용접을 최적화하게 하기 위해서는 Fig. 3.4에서와 같이 레이저출력 100W에서 120W 범위로 root face가 0.7mm 이며, 용입은 0.3 내지 0.4mm에서 얻었다.

### 3.2 용접부의 기계적특성

미세경도시험은 지르칼로이-4 지지체용접시편의 용입단면에서 모재, 열영향부, 용접 금속으로 구분되어 비커스방법인 경도시험기가 사용되었다. Fig. 3.5는 시험편 A 와 B 그리고 브레이징으로 된 각각의 부위별 측정치를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 3.5 에 서와 같이 레이저용접부의 경도는 모재, 열영향부 그리고 용융부순으로 다수점에서 측 정하여 그 범위를 산출하였다. 그 결과 시험편 A와 시험편 B에서 경도분포는 모재가 180에 서 200 범위의 분포를 보이며, 용융부에서는 250에서 290 범위내에 나타내며, 또한 열영 향부에서는 200에서 240 정도의 분포를 보이고 있었다. 반면에 브레이징부의 경도에서는 대체적으로 레이저용접부의 경도치보다 접합부에서 30에서 40 정도로 높게 나타냈다.

### 3.3 용접부 및 브레이징부의 미세조직

지지체용접의 브레이징과 레이저를 이용한 Zircaloy-4 용접부의 금속조직을 기초로 하여 분석해 보기로 한다. Fig. 3.6은 브레이징 및 레이저용접부의 매크로조직이 나타낸 바와같이 Zircaloy-4 피복관과 지지체사이에서 접합계면을 포함한 용접부의 미세조직 변 화를 모재, HAZ, 그리고 용접금속 순으로 관찰되었다. Fig. 3.6 (a) 에서와 같이 Zr+Be 공정반응을 이용한 브레이징부위는 전형적인 공정상 응고조직인 수지상정(dendrite)이 브 레이징 전체영역에서 발생하였다. 이때 수지상정의 일부는 모재에서 브레이징부로 형성 하여 성장하였고, 나머지는 브레이징부의 중앙에서 생성하였다. 또한 브레이징부의 인접 모재부는 브레이징 가열사이클(95℃에서 20초 가열후 냉각)에 의해 생성된 미세조직으로 Widmanstätten으로 크게 두가지로 나타냈다. 하나는 Fig. 3.6 (a)와 같이  $\alpha$ -Zr plate가 서로 연결되어 basketweave 형태의 미세조직을 보여주고 있다. 다른 하나는  $\alpha$ -plate들 이 서로 평행한 플레이트(parallel plate) 조직이 생성되었다.

Fig. 3.6 (b)는 레이저용접부의 특성인 아주 짧은 용접시간에 고입열의 용접공정으로 용융부가 작고 용접부의 냉각속도가 아주 빠르므로 용융부에서는 렌즈모양(lenticular)의 martensitic  $\alpha'$  plate가 생성되었다. 그리고 지르칼로이-4 피복관과 용접금속사이의 경계 로 표시된 미세조직은 대부분  $\alpha$  결정립이 변형되고  $\alpha+\beta$ 상 영역으로 가열된 후 결정립 이 성장되어서 모양과 크기가 불규칙적으로 나타내고 있었다.

## 4. 결론

본 연구는 Nd:YAG 레이저방법을 이용하여 지르칼로이-4 지지체용접부의 특성조사와 기계적 성질 및 야금학적 내용을 기술한 것으로 다음과 같은 요약된 결론을 얻었다.

1. 핵연료성능 향상을 위한 지지체 구조형상에 따른 레이저용접에서는 시험편 A의 사각형보다 시험편 B의 썸기형 용접이 유리할 것으로 판단된다.
2. 지르칼로이-4 지지체용접의 적정용입과 비이드를 얻기 위해서는 평균출력 120 W, 펄스폭 2.5 ms, 반복율 10pps, 펄스에너지는 12J이 되어야 하며, 이때 용접속도는 280mm/min.을 넘지 말아야 한다.

3. 지르칼로이-4 지지체용접부의 야금학적 관찰에 의하면 용접부의 미세조직에서는 렌즈모양의 martensitic  $\alpha'$ 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났으며, 브레이징부에서는 전형적인 공정상 응고조직인 수지상정(dendrite)이 접합부의 전체영역에서 생성되었다

4. 레이저를 이용한 지르칼로이-4 지지체용접은 기존 브레이징만큼의 기계적 성질과 좋은 용접특성으로 나타내고 있다.

### 감사

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

### 참고문헌

- [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

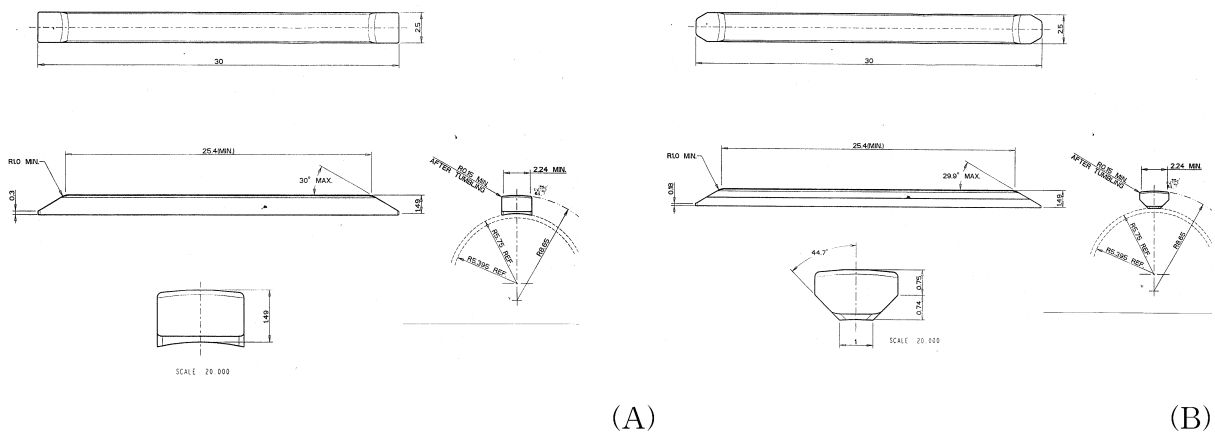
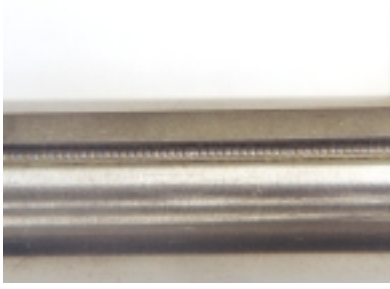
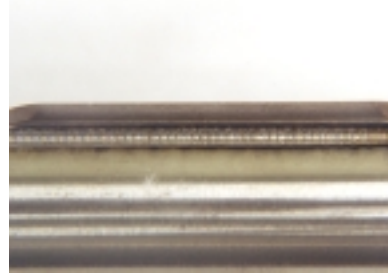


Fig. 2.1 지지체용접용 시험편

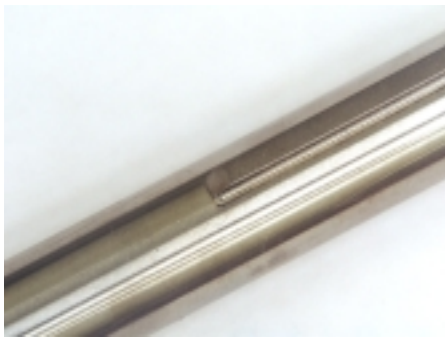


(시험편 A)

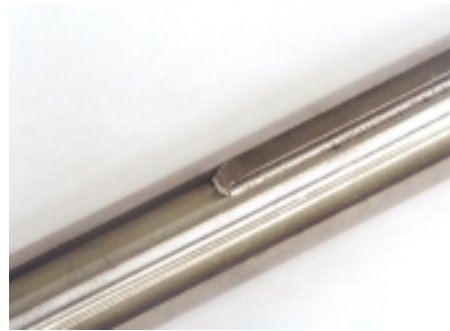


(시험편 B)

Fig. 3.1 레이저를 이용한 피복관과 지지체의 용접형상 (x8)

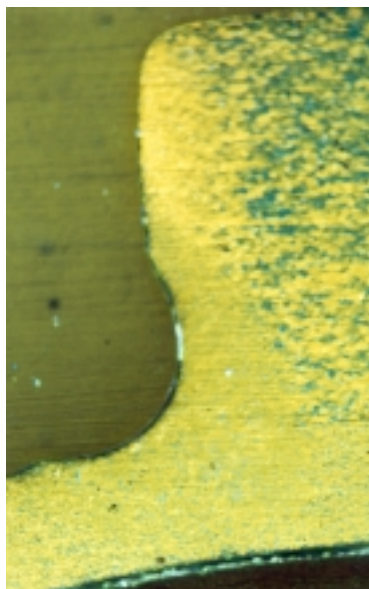


(부분용접)

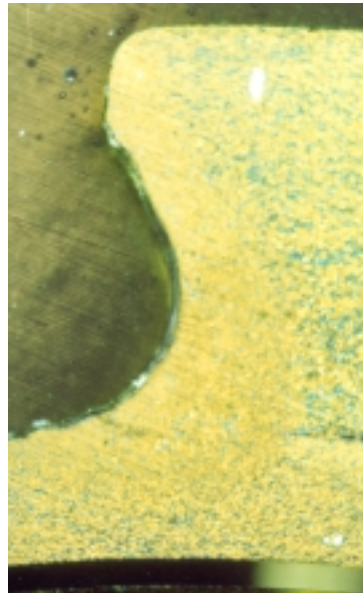


(전면용접)

Fig. 3.2 레이저를 이용한 지지체의 부분용접 및 전면용접형상 (x8)



(시험편 A)



(시험편 B)

Fig. 3.3 레이저를 이용한 지지체 용접단면 (x50)

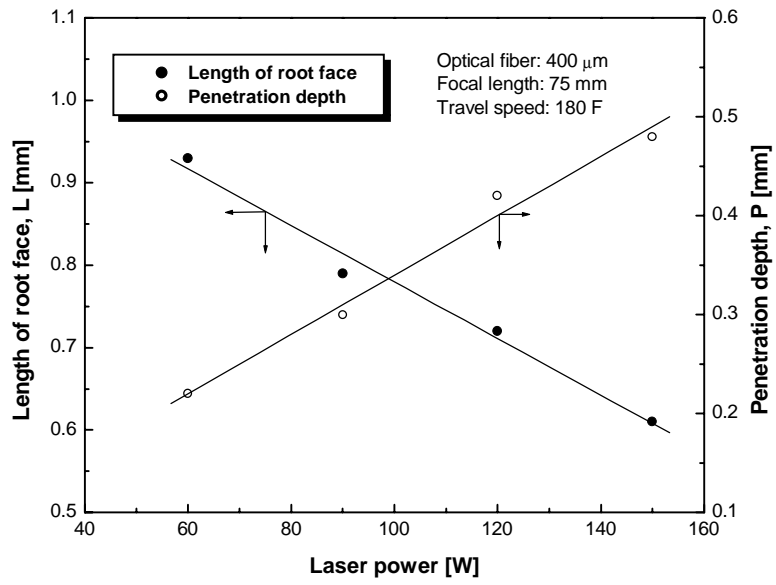


Fig. 3.4 시험편 B의 출력별 root face 길이 및 용입의 영향

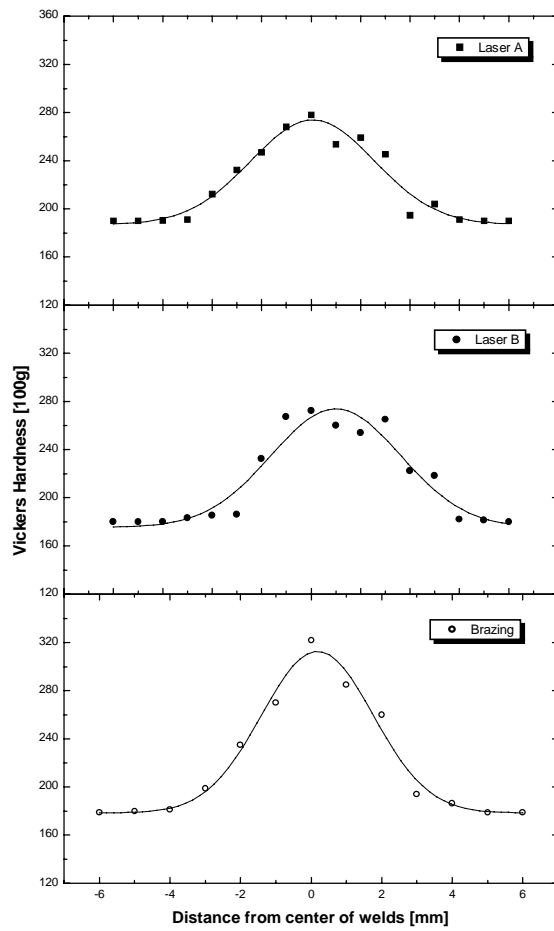


Fig. 3.5 레이저를 이용한 지지체 용접단면 (x50)



(a)



(b)

Fig. 3.6 브레이징 및 레이저를 이용한 지지체 접합단면 (x50)