



핵연료봉 지르칼로이-4 지지체부착을 위한 레이저용접부의 특성 조사

김수성* · 이성구** · 이영호****

*한국원자력연구소

**홍성기능대학 산업설비과

***충남대학교 기계공학과

An Investigation of Laser Welding Characteristics for Attachments of Zircaloy-4 Bearing Pads of Nuclear Fuel Elements

Soo-Sung Kim*, Sung-Gu Lee** and Young-Ho Lee****

* Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

** Dept. of Industrial Facility, Hongsung Polytechnic College, Hongsung-gun 350-703, Korea

*** Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 306-764, Korea

Abstract

A new laser welding system for the appendage of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements has been developed. This system consists of laser oscillator, a optical fiber transmission, a monitoring device and a welding controller. The basic welding experiments of the appendage of Zircaloy-4 bearing pads were carried out. The laser welded samples were investigated and made by using the optical fiber of GI 400 μ m. As a result, the seam welding with the bead width of 1.0mm and the weld penetration of 0.3mm could be accomplished.

(Received July 9, 2001)

Key Words : Nd:YAG laser beam welding, Bearing pads, Optical fiber, Zircaloy-4

1. 서 론

가압중수로형 (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR) 핵연료의 제조를 위한 연료봉 용접기술의 제반 특성중 봉단밀봉뿐만 아니라 이외 부착물들의 적합방법의 선정에 대한 타당성 조사는 원자력분야의 핵연료 가동시 접합부의 안전성과 핵연료 성능향상을 고려할 때 반드시 필요한 것이다. 그중 핵연료봉에 부착하는 지지체와 간격체는 핵연료 다발내에서 피복관사이와 일정한 간격을 유지하도록 접합시킨다. 이것은 원자로 내에서 핵분열시 피복관과 피복관사이의 간격, 그리고 핵연료다발과 압력관과의 간격을 유지하여 냉각수를 잘 흐르게 하고, 또한 냉각수의 흐름으로 인한 피복관의 진동으로 생기는 마모방지를 위한 것이다.

이러한 핵연료 가공관련 부착물의 중요성으로 인하여

원자력 산업분야의 핵연료봉 부착물에 대한 접합방법에 대하여 꾸준히 연구가 수행되고 있으며, 현재 핵연료봉 부착물을 위한 상용화 단계의 접합방법은 크게 브레이징, 저항용접, 초음파용접 그리고 레이저용접으로 분류될 수 있다. 이상의 실제적인 접합부의 특성, 접합구조 설계 등 경제적인 관점에서 고려할 때 브레이징은 접합공정이 용이하나 반면에 용가재인 Be의 화학적 유독성을 가지며, 또한 피접합물 형상에 따라 적용이 제한되어 있다. 저항용접은 생산공정에서 매우 유리하나 열변형의 문제와 작업조건이 까다롭다. 현재 핵연료봉의 부착물에 대한 용접연구는 인도의 Bhabha 원자력센터에서 저항용접, 초음파용접 그리고 레이저용접으로 실험을 수행중에 있으며, 특히 레이저에 의한 방법은 용가재를 필요로 하지 않으므로 핵연료봉의 부착물제작에 있어서 레이저용접의 적용을 검토중에 있다¹⁻³⁾. 이와 같은 예로는 PWR 핵연료에서 spacer grid의 용접,

핵연료 피복관의 He 가스 밀봉용접, 온도측정을 위한 티타늄 열전대용접 그리고 개광형 핵연료 특수부품의 정밀용접 등에서 매우 다양하게 활용되고 있는 실정이다⁴⁾.

레이저를 이용한 용접은 고밀도 열원으로 인한 에너지 투입량이 대입열 전기용접보다 적어서 야금학적으로 여러 문제점을 야기할 수 있는 열영향부(HAZ)가 작고 재료의 열변형을 최소로 줄일 수 있다. 피용접물과의 비접촉공정으로 브레이징이나 아크용접의 용접부에 의한 용접부의 결함, 저항용접의 전류에 의한 피해를 없앨 수 있으며, 정밀제어가 가능하므로 고속용접과 용접 자동화에 유리하고 생산성을 향상시킬 수 있다. 또한 광섬유를 이용한 레이저는 광학기에 의해 레이저빔의 전송이 가능하고 타용접방법으로는 접근이 불가능한 지역에서도 가공이 가능하며 특히, $1.06\mu\text{m}$ 파장을 가지는 Nd:YAG 레이저는 장거리 전송으로 원격용접, 고속용접 그리고 정밀용접의 관점에서 가장 매력적인 요소로 등장하고 있다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 핵연료봉의 부착물에 대한 레이저용접의 기초실험을 수행하였으며, 지르칼로이-4 지지체와 피복관의 용접조건의 최적화, 그리고 실제적인 모델인 가압중수로형 핵연료봉의 지지체 샘플을 제작하고, 이와 병행하여 지지체용접부의 비드와 단면과의 영향, 적정용입 특성에 대한 고찰, 지지체의 gap간격으로 인한 특성 그리고 열변형 등을 조사하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험편은 Fig. 1과 같이 두께 1.5mm인 지르칼로이-4 지지체 $2.5\text{mm} \times 30\text{mm}$, 두께 0.4mm와 외경 13.08mm인 피복관으로 준비되었다.

지르칼로이-4 지지체에 존재하는 이물질질을 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 60°C 로 건조시켰다. 이때 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 레이저용접시 지지체의 용접변형 억제 및 산화방지를 위해서 특수하게 설계된 고정치구와 실험박스를 사용하였다.

광섬유를 이용한 레이저용접 실험을 위하여 원격 레이저전송이 가능한 용접노즐이 필요하다. 레이저를 효율적으로 이용하여 가능한 용접폭과 용입이 적절하게 용접되기 위해서는 높은 파워밀도를 갖도록 레이저를 집중시켜야 하고, 용접중에 발생하는 흠의 제거 및 시험편의 산화방지를 위하여 보호가스인 고순도 헬륨의

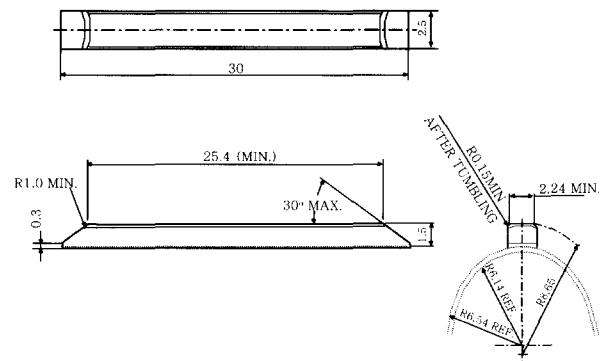


Fig. 1 Joint configurations for the appendage welding specimen

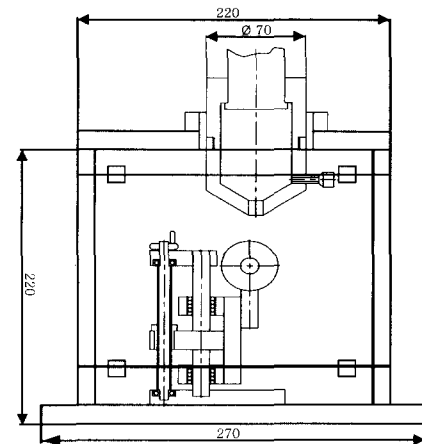


Fig. 2 Schematic illustration of the welding fixture and nozzle

사용이 필요하다. 이러한 미세용접의 요구조건을 만족하도록 용접노즐을 설계 제작하여 사용하였다.

레이저가 시험편의 용접위치에 정확하게 맺히기 위해서 CCD 카메라와 광학출구커플러를 연결하여 사용하였다. 이때 초점위치는 다이오드레이저를 집광렌즈로 통하여 시험편에 초점을 맺히게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 가장 작은 초점이 될 때 용접실험을 수행하였다.

2.2 실험장비 및 주변장치

Photo. 1은 지지체부착을 위한 전체적인 Nd:YAG 레이저용접시스템을 보여주고 있으며, 레이저시스템은 200W급 펄스형 Nd:YAG 레이저와 $400\mu\text{m}$ 구경의 GI type 광섬유 2개로 전송된다. 본 용접시스템의 기본구성은 레이저발전부, 광섬유연결부, 용접감시부 및 용접 챔버로 되어있다. 특히 광학출구커플러에 부착된 용접노즐은 레이저조사시 반사율이 높고 열전도도가 큰 구리로 만들었고, 나머지 부품들은 알루미늄으로 제작하

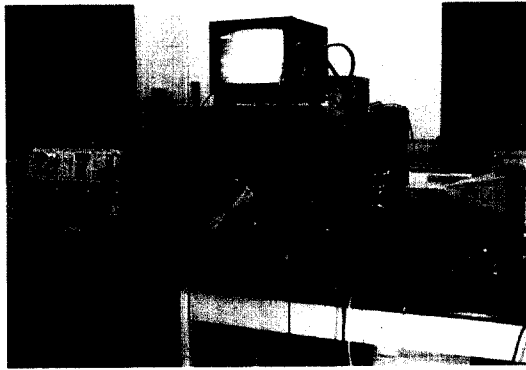


Photo. 1 The laser system for appendage welding

었다. 이 용접노즐은 레이저용접시 핵심부분으로 집광 렌즈에 의하여 집중된 레이저와 보호가스로 시험편에 도달하도록 되었으며, 조정용 이동장치로 범위를 조절할 수 있도록 설계되었다. 레이저 초점은 노즐에서 시험편 표면까지의 거리를 6 내지 7 mm 정도에서 맞도록 하였다.

Fig. 3의 광섬유 전송장치는 정밀용접이나 절단시에 광섬유의 특징을 이용할 수 있으며, 특히 원거리 전송이 용이한 장점이 있다. 진원의 빔모양을 얻을 수 있고 빔의 공간 분포를 광섬유의 종류에 따라 다르게 할 수 있는 특징이 있다. SI (Step Index) type의 광섬유는 공간적으로 균일한 에너지 분포를 가진 레이저광을 얻을 수 있는 반면에, GI (Graded Index) type의 광섬유는 가운데가 가장자리 보다 에너지 밀도가 높은 형태의 레이저 광을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 GI type의 광섬유를 선택하여 사용하였다.

중수로용 핵연료봉의 지지체 부착물을 연료봉 표면에 레이저를 이용하여 용접하기 위해서는 1 mm 이하의 크기를 가진 레이저빔을 정밀하게 제어하여 용접선을 추적하여야 한다. 1 mm 이하의 레이저빔을 이용한 마

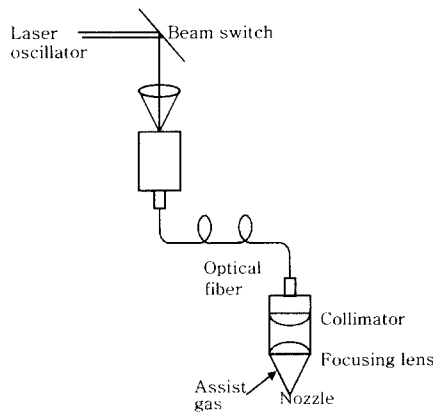


Fig. 3 Schematic illustration of the optical fiber transmission

이크로용접은 용접폭이 1mm 이하로 매우 미세하기 때문에 용접시 기계적인 오차를 최대한 줄여야 한다. 오차를 줄이기 위해서는 정밀한 기계장치의 조작과 함께 오차가 발생했을 때 오차를 확인할 수 있는 감시장치가 요구된다. Fig. 4는 지지체용접용 감시 및 제어장치 구성도를 보여준다. Fig. 4와 같이 다축으로 구성된 이동용 테이블에 설치된 레이저용접 헤드에 감시용 카메라 장치가 일체형으로 부착되어 있다. 용접면에 초점이 맞추어지도록 50mm 초점거리의 렌즈와 확장링을 사용하였다. CCD 카메라 영상은 칼라모니터에 디스플레이 된다.

지지체 부착물을 위한 연료봉의 표면에 용접하기 위해서는 정밀한 기계 및 제어장치가 필요하다. 용접부의 폭이 1mm 이하이기 때문에 정밀한 제어를 하지 않으면 요구되는 용접특성을 만족할 수 없다. 지지체부착을 위한 직선부 자동용접 제어프로그램은 Table 1과 같다. 이 프로그램은 제어장치를 조이스틱 방식 또는 자동으로 구동하며 레이저 장치의 ON/OFF 및 셔터를 제어할 수 있는 입출력 기능을 가지고 있어 설정된 프로그램에 따라 자동으로 용접할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지지체용접의 적정용입조건

레이저변수란 발전부에서 얻어지는 출력 특성 즉, 침투출력 및 펄스에너지 등을 제어하기 위하여 작업자가 바꿀 수 있는 조건들이다. 일반적으로 레이저의 발산각이 커지면 spot size가 커질 뿐만 아니라 집광렌즈로 입사되는 레이저빔의 크기가 달라지게 된다. 특히 레이

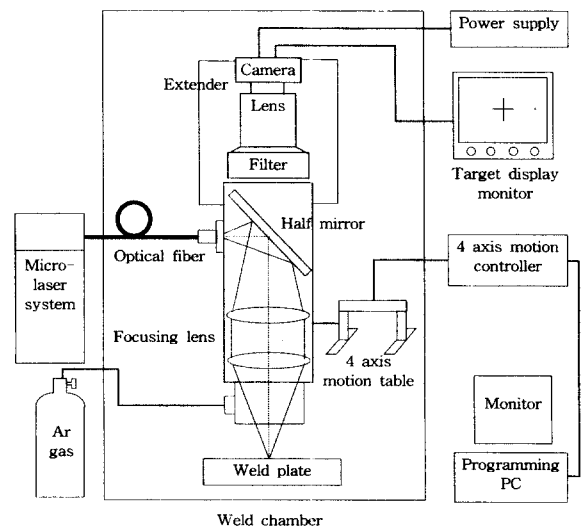


Fig. 4 Schematic diagram of monitoring system for appendage welding

Table 1 The typical programmings for appendage welding

```

PROGRAM NAME - Laser Welding Machine for Bearing Pad, jlg-130
DEL SETUPP
DEF SETUPP
TRACE1
INFNC1-2P      :INPUT #1(CONTROL MODE ENABLE SAW-ON) DEFINED TO SELECT PROGRAM #1
INFNC2-A      :NOMAL INPUT(EXTENDED INPUT)
INFNC3-A      :NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC4-A      :NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC5-A      :NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC6-A      :NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC7-A      :NOMAL INPUT(RUN SW)
INFNC8-D      :STOP INPUT(STOP SW)
INFNC9-L      :JOG SPEED SELECT INPUT
INFNC10-A     :NOMAL INPUT(HOME SW)
OUTFNC1-A     :STANDARD OUTPUT(CONTROL BOX MODE LED)
OUTFNC2-D     :END OF TRAVEL LIMIT (ERROR LED)
OUTFNC3-B     :MOVING/NOT MOVING AXIS(RUN LED)
OUTFNC4-A     :STANDARD OUTPUT(EXTENDED OUTPUT LED)
INSEL P2.50   :SELECT PROGRAM ENABLE, STROBE TIME IN 50MILLISECONDS
LH3,3,3,0    :HARDWARE LIMIT SWITCH ENABLE
HOMV3,3,3    :HOME VELOCITY
HOMVF1,1,1   :HOME BACKUP VELOCITY
HOMBAC111    :HOME BACKUP ENABLE
HOMEDG111    :HOME EDGE
INFEN1       :INPUT FUNCTION ENABLE
OUTFEN0      :OUTPUT FUNCTION ENABLE
JOG0000      :JOG(I=DISABLE,1=ENABLE)
JOGAS0,50,50,50 :JOG ACCELERATION
JOGAD100,100,100,1 :JOG DECELERATION
JOGVL0,3,0,3,0,3 :JOG VELOCITY LOW
JOGVH5,5,5,3   :JOG VELOCITY HIGH
COMEXL111
ERROR00000001
ERRORP ERR    :ERROR PROGRAM ASSIGNMENT
OUT0000
END
    
```

저용접에서 레이저변수에 의해 결정되는 파워밀도는 에너지가 시편에 입사되는 효율을 결정짓는데 중요한 역할을 하게 된다. 펄스형 Nd:YAG 레이저는 용접형상에 영향을 주는 레이저변수는 펄스에너지, 반복율, 펄스폭, 초점위치 및 이송속도 등이다. 본 내용은 이러한 여러 가지 변수에 따라 적합한 지지체와 피복관의 용접형상이 어떻게 변하는지 알아 보았다.

Fig. 5는 본 실험에 사용한 레이저발전부에서 여기램프의 전압을 변화시켰을 때 비드와 용접깊이의 관계를 나타낸 것이다. 펄스에너지의 증가에 따라 용접시편에

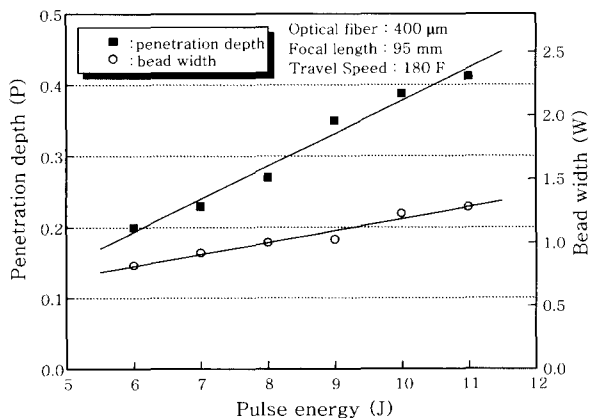


Fig. 5 Relation between bead width and penetration depth on laser pulse energy

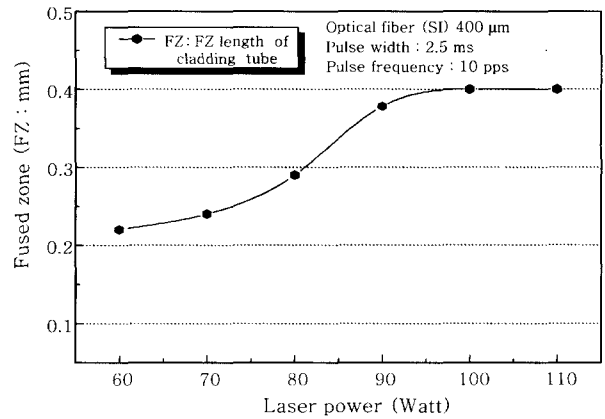


Fig. 6 Dependence of laser fused zone on laser powers

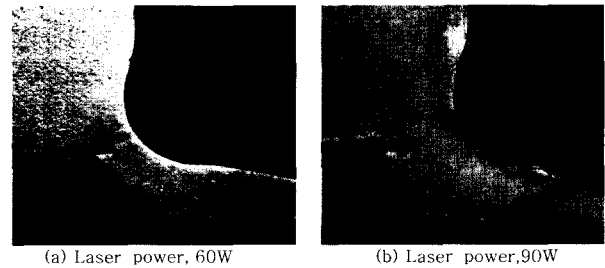


Photo. 2 Transverse section of appendage welding dependence on laser power 60W and 90 W (×50)

서 나타나는 비드폭과 용입깊이는 대체로 증가함을 알 수 있다. Fig. 5에서 나타내듯이, 피복관두께가 0.4 mm 이기 때문에 펄스에너지가 적어도 8J부터 9J범위에서 적절하다. 또한 Fig. 6에서와 같이 피복관내벽에 관통되지 않기 위해서 레이저출력이 80W부근 이어야 함을 알 수 있었다. 이때 얻어지는 비드는 1.0mm, 용입깊이는 0.3mm 이며, 용접속도는 180mm/min.이다. Photo. 2는 레이저출력 60W와 90W에서의 지지체와 피복관의 용융정도를 비교한 것이다. 여기서 출력 60W에서는 용융깊이가 0.2mm 인 반면에, 출력 90W에서는 피복관의 두께 0.4mm 이상으로 용융됨을 알 수가 있다. 그리고 레이저용접실험후 육안관찰에서는 레이저출력이 60W인 경우 비드가 매끈하게 나타난 반면에 출력 90W이상인 경우는 비드의 표면이 거칠었고, 용접표면의 스패터링 현상으로 용접시편 주변에 금속증기로 인한 미세한 산화 지르코늄분말이 산재해 있음을 알 수 있었다.

3.2 지지체용접부의 특성조사

레이저용접은 집광된 빔 에너지를 이용한다는 점을 감안하여 볼 때, 광학 전송계의 특성인 집광렌즈의 초

접거리를 비롯하여 레이저빔의 성질, 시편의 gap간격 및 열변형 등이 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 공정 변수들은 용접장치가 정해지면 작업자로서 손댈 수 없는 부분이 있는 반면에 용접을 실시할 때마다 시편조건에 따라 작업자가 최적의 상태로 유지해야 하는 조건이 있다. 따라서 레이저용접에서 용입깊이에 영향을 주는 공정변수로는 초점위치, 보호가스, 용접속도 및 시편의 gap간격 등을 들 수 있다. 본 실험에서는 핵연료봉의 지지체와 피복관의 gap간격에 따른 용입깊이가 어떻게 변하는지 알아 보았으며, 아울러 용접후에 발생하는 지지체와 피복관의 열변형으로 인한 치수변화를 조사하였다.

Fig. 7은 레이저출력 60W, 80W로 일정하게 하고 시편의 gap간격을 0.1mm으로 변화시킬 때 용입깊이를 조사한 것이다. 본 실험에서 초점위치는 시편표면에서 아래방향으로 1mm ($f_d = -1mm$)로 이동하여 실험을 수행하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 gap 간격이 작을수록 용입깊이가 커짐을 나타내고 있으며, 레이저출력 60W와 80W에서는 현저하게 큰 차이를 보여주지 않고 있다. 여기서 피복관과 지지체 사이의 gap간격은 0.1mm 이하에서 용접을 수행하면 유리할 것으로 판단된다. Fig. 8은 여기램프의 전압을 증가했을 때 즉, 레이저출력 변화에 따른 연료봉의 종변형 상태를 측정하여 조사한 것이다. 여기서 변형의 측정방법은 용접선의 시작부분과 끝나는 부분에서 120° 방향으로 3번 측정하고 평균치로 하였다. Fig. 8에서와 같이 레이저출력에 따른 변형량(용접후의 피복관 외경-용접전의 피복관 외경)은 출력 80W 이하에서 변형정도가 극히 낮은 0.02mm로 나타났으며, 특히 시편에서는 용접선의 시작점보다 끝나는 부분에서의 변형량이 약간 커짐을 알 수 있었다. 이때 피복관과 지지체 부착을 위한 레이저용접의 이송속도는 분당 180mm으로 하였다.

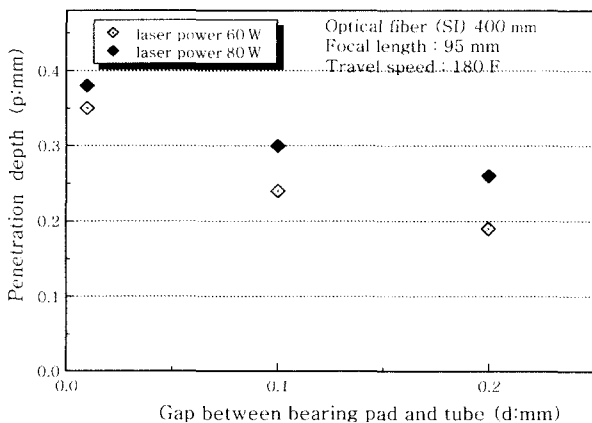


Fig. 7 Variation of penetration depth dependence on gaps between bearing pad and tube

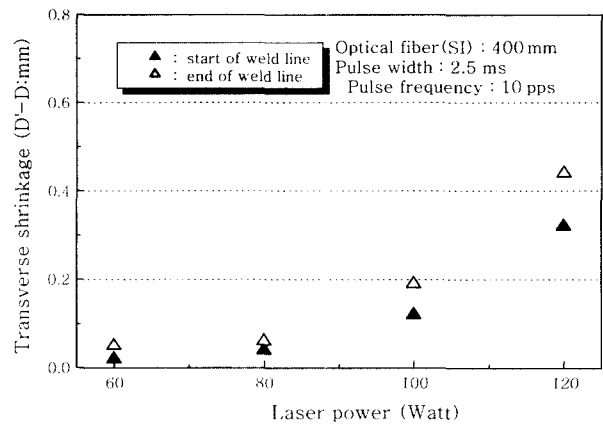


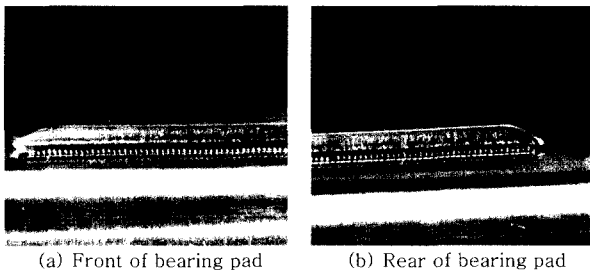
Fig. 8 Variation of transverse shrinkage dependence on various laser powers

3.3 지지체용접의 샘플분석

T이음부를 가지는 레이저용접에서는 특별히 열변형에 민감한 기하학적 구조를 가지고 있다. 이러한 용접부의 기하학적 형상은 대체로 어스펙트 비(aspect ratio)가 클 경우 자주 발생하게 되며, 어스펙트 비가 작을 경우 즉 상대적으로 비드폭이 넓을수록 열변형을 방지할 수 있다. 여기서 핵연료봉의 지지체와 피복관의 용접구조에서는 Fig. 8에서와 같이 레이저출력에 따라서 열변형의 차이는 있으나 용접부에 대한 적정용입에서는 대체로 어스펙트 비가 0.3에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 원자력분야의 핵연료성능 및 열전도율을 증가시키기 위해서는 필렛 이음구조를 가지는 경우를 고려할 때 피복관과 지지체가 부착되는 단면적이 가능하면 크게 용융될 수 있는 구조가 적합할 것으로 판단된다.

Photo. 3에는 실제로 핵연료봉의 피복관과 지지체 샘플이 이용되었으며, 광섬유 400 μ m을 이용한 지르칼로이-4 지지체 용접샘플의 비드상태를 알아보기 위한 것이다. 지지체의 앞부분과 뒷부분의 외관상의 용접상태를 보여주고 있는데, 여기서 레이저 조사조건을 반복을 10pps, 펄스폭 2.5ms, 평균출력 80W로 하였을 때, 샘플의 용입비는 대체로 0.3으로 나타났다.

Photo. 3에서와 같이 레이저빔을 45° 방향으로 조사시킬 때 얻은 용입깊이는 대체로 만족하나, 피복관과 지지체가 만나는 루트부에서 약간의 용입부족으로 나타났다. 이러한 용입부족을 일으키지 않기 위해서는 가능한 피복관과 지지체의 gap간격을 0.1mm 이하로 유지해야 하며, 또한 Fig. 2의 특수설계된 고정지그를 사용해야 한다. 아울러 최근에는 원자로가동시 핵연료봉의 피복관과 지지체사이의 gap간격에서 접합부에 대한 부식균열이 발생될 지도 모른다는 염려가 나왔으며, 향후



(a) Front of bearing pad (b) Rear of bearing pad
Photo. 3 Typical appearance of laser welded samples ($\times 8$)

이 문제와 더불어 용접물의 강도를 높이는 방법에 대한 연구가 필요로 하게 될 것이다.

4. 결 론

본 연구는 초정밀 레이저용접기를 이용하여 중수로형 핵연료봉의 부착물에 대한 지지체와 피복관의 접합가능성을 조사하기 위하여 광섬유를 이용한 레이저용접이 수행되었다. 이에 따른 핵연료봉의 지지체부착물을 위한 용접특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중수로형 핵연료봉 지지체부착을 위한 용접시스템이 완성되었으며, Nd:YAG 레이저를 이용하는 광섬유 전송장치, 노즐부, 감시부 및 제어부가 자체적으로 개발되었다.

2) GI 400 μm 의 광섬유를 사용하였을 때, 지지체용접시 적정용입을 위해서는 레이저출력이 80W이고, 펄스 에너지가 8J, 이송속도 180mm/min.에서 얻었다.

3) 지지체부착을 위한 샘플제작이 수행되었고, 이에

따른 적정용입, gap간격 및 열변형의 특성을 조사한 결과, 지지체용접의 최적화를 위해서는 비드폭이 1.0mm, 용입은 0.3mm에서 어스펙트 비가 0.3이며, gap간격이 0.1mm 이내이어야 함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부 원자력기반연구사업비에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Pankajb Desai and P.G. Kulkarni : Trend in Joining Technology Development for PHWR Fuel Assemblies in India, (1999)
2. U.C. Gupta, R.N. Jayaraj, Meena, R., V.S. Sastry : Nuclear Fuel Fabrication Developing Indigenous Capability, (1997)
3. R.N. Jaya Raj, B. Laxminarayana and P.S.A. Narayanan : Improved Techniques for Appendage Attachment to PHWR Fuel Elements, Nuclear Fuel Complex, (1995), 3A-55
4. R.K. Welty : External Attachment of Titanium Sheathed Thermocouples to Zirconium Nuclear Fuel Rods for the Loss-Of-Fluid-Test (LOFT) Reactor, SPIE Vol. 247, 30, (1980)
5. P. Modern and K. Schneider : Laser and Laser Material Processing Research and Development at BNFL plc., UK., Proceeding of LAMP '92, Nagaoka (1992), 963-968