

研究論文

## Nd:YAG LB 와 GTA 를 이용한 핵연료봉의 Zircaloy-4 봉단용접특성에 관한 연구

김수성\* · 이정원\* · 양명승\* · 이영호\*\*

### A Study on the Characteristics of Zircaloy-4 End Cap Welding of Nuclear Fuel Pin Using Nd:YAG LB and GTA

S. S. Kim\*, J. W. Lee\*, M. S. Yang\* and Y. H. Lee\*\*

**Key Words** : Nd:YAG-LBW(네오디뮴야그레이저용접), GTAW(가스텅스텐아크용접), Zircaloy-4(지르칼로이-4), End Cap Welding(봉단용접) Power Density(파워밀도), Peak Power(첨두출력), Pulse Width(펄스폭), Pulse Frequency(반복율), Energy Input(용접입열), Arc Length(아크길이), Aspect Ratio(용입/비이드폭), HAZ(열영향부)

#### Abstract

This study is to compare the weldability of Zircaloy-4 end cap of nuclear fuel pin using by GTA and Nd:YAG LB. The welding parameters which affect bead width and penetration depth have been investigated. The effect of joint geometry of end cap for GTAW and LBW has been studied and optimum conditions of Zircaloy-4 endcap welding have been found. Microstructures and microhardness of GTA and LB welded zones have been also compared.

#### 1. 서 론

현재 원자력 산업분야에서의 용접은 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며, 특히 핵연료봉의 밀봉 용접은 빼놓을 수 없는 핵심기술이다. 또한 최근들어 특수재질 및 용접기법에 따른 새로운 기술이 날

로 향상되어 보급되고 있다.

일반적으로 핵연료봉의 제조를 위한 용접방법으로 가스텅스텐 아크용접 (GTAW ; Gas Tungsten Arc Welding), 저항용접 (RW ; Resistance Welding), 레이저용접 (LBW ; Laser Beam Welding), 전자빔용접 (EBW ; Electron Beam Welding) 등을 들 수 있다. 용접방법중 실제로 용

\* 정희원, 한국원자력연구소

\*\* 정희원, 충남대학교 기계공학과

접부의 기계적 특성, 용접성 그리고 용접공정의 관점에서 볼 때 GTAW 는 높은 입열로 인한 열변형이 심하며, 용접부의 결함발생이 문제로 되고 있고, RW 는 품질면에서는 여타의 용접법보다 우수하나 장비의 복잡성에서는 다소 불리하며, 고속 입자의 광선을 이용한 LBW 는 원격작업과 품질면에서는 유리하나 작업조건이 매우 까다롭다. 또한 높은 에너지밀도의 전자빔을 이용한 EBW 는 공정에서 고진공 챔버가 필요하고 보수 유지비가 많이 든다. 따라서 핵연료봉의 제조를 위한 작업조건과 비용이 고려된 적절한 용접법의 선택이 필요하게 된다.

현재 핵연료봉의 밀봉용접은 미국의 Exxon 에서 PWR (Pressurized Water Reactor) 핵연료의 Zircaloy-4 피복관에 He 가스를 주입하기 위하여 Nd:YAG LBW 가 이미 수행된 바가 있고<sup>1)</sup>, 또한 벌써부터 ORNL 에서는 GTA 을 이용한 He 분위기의 chamber 내에서 회전치구에 의해 밀봉용접이 수행되었다<sup>2)</sup>. 국내에서는 가압중수로형 (PHWR, Pressurized Heavy Water Reactor) 핵연료의 밀봉용접에 이미 고상용접법인 upset butt RW 가 적용되고 있으며<sup>3)</sup>, 그외 산업계에서는 고압가스 배관의 경우 Ti 이나 Ni alloy 용접에 Orbital-GTA 방법이 널리 사용되고 있다<sup>4)</sup>. 최근들어 선진국에서 핵연료가공과 관련된 연구는 CO<sub>2</sub> 레이저나 Nd:YAG 레이저를 이용한 방법이 EB 와는 달리 진공을 필요치 않은 장점을 살려서 대기 분위기에서 수행할 수 있는 봉단용접을 들 수 있다<sup>5)</sup>. 이를 통하여 핵연료봉의 제조가 자동화될 수 있으며 시간단축과 경제성을 향상시킬 수가 있어서 현재 일부에서는 LBW 방법으로 대체중에 있다.

LBW 는 광선을 초점에 집중시켜 생기는 높은 에너지밀도를 이용하므로 국부적인 부위를 순차적으로 용융하여 열변형이 거의 없고, 용융점이 높은 Zirconium 과 같은 섬세한 밀봉용접에 적합하다. 또한 용접으로 인한 가열 및 용접시간이 짧고 HAZ 의 영역이 매우 작다. 이러한 잇점 때문에 미국의 몇몇 연구기관에서는 PWR 의 Zircaloy-4 spacer grid 및 온도측정용 Ti 열전대용접에서 LBW가 사용되고 있다<sup>6)</sup>. 그러나 국내에서는 Nd:YAG 레이저를 이용한 Zircaloy-4 피복관의 용접성과 봉단마개와 같은 이음형상을 가진 용접특성에 관한 연구보고는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 GTAW 와 LBW 를 이용한 핵연료 봉단마개의 용접조건과 용접부의 특성이 비교 조사되었고, 그리고 핵연료봉의 시험편을 이용하여 Zircaloy-4 봉단마개용접에 필요한 기본자료가 제시되었다. 또한 Zircaloy-4 봉단마개용접시 이음부의 설계를 위한 적합한 기하학적 구조와 용접변수를 분석하였고, 이에 따른 각 시험편의 비이드폭, 용입의 영향, 그리고 미세조직을 비교하여 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

실험에 사용된 재료는 Zircaloy-4 이며, 순수 Zr 에 Sn, Fe, Cr 등의 합금원소들을 첨가한 것으로서 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1 과 같다. 시험편의 피복관은 냉간가공후 500 °C 온도범위에서 약 2 시간동안 응력제거 열처리된 것으로 직경 13 mm, 두께 0.4 mm, 길이 100 mm 의 칫수로 하였고, 또한 봉단마개는 Zircaloy-4 의 환봉형태를 냉간가공후 650 °C 온도범위에서 2 시간동안 풀립처리된 것을 요구되는 칫수로 절삭가공하여 제작되었다. Fig. 1 과 같이 Zircaloy-4 피복관을 100 mm 로 절단하여 세척된 봉단마개로 끼움처리한 다음 온수에서 10 분간 degreasing 하여 30 분간 초음파 세척하였다. 그리고 증류수, 아세톤 순으로 행군 다음 건조시킨 후 실험에 사용하였다. 이때 봉단

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of Zircaloy-4

CHEMICAL COMPOSITION				
Alloying Element	Sn	Fe	Cr	Zr plus permitted impurities
W/O	1.2-1.70	0.18-0.24	0.07-0.13	
MECHAICAL PROPERTIES				
Tensile Strength (kpsi)	Yield Strength (0.2% offset, kpsi)		Elongation (%)	
63.8	50.1		32.0	

마개의 기하학적 형상을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같은 시험편 "A" 및 "B" type의 구조를 가진 형태로 절삭가공한 시험편을 사용하였다.

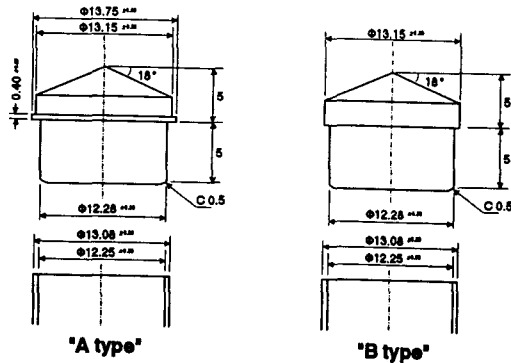


Fig. 1 Joint geometry of experimental specimen for end cap welding

## 2.2 실험장비

본 실험에서 사용된 용접방식중 GTAW는 가장 널리 사용되고 있는 장치로 불활성가스 분위기에서 비소모성 텅스텐 전극과 모재사이에 아크를 발생시켜 용융하는 방법이다. Fig. 2에서와 같이 현재 경수로핵연료의 안내관용접에서 사용되고 있는 용접기로서, DCSP (Direct Current Straight Polarity) 극성과 전류를 주기적으로 변화시키는 방법으로 고주파 펄스형태를 사용하였다. 이때 아크 전류와 용접시간을 프로그래밍하여 출력제어가 가능한 ramp-up, weld, ramp-down 기능이 있고, 아크발생부터 아크정지까지 각 단계에서 자동으로 조절할 수 있게 되어 있다.

LBW는  $Y_3Al_5G_{12}$  (Yttrium Aluminum Garnet)에 약간의  $Nd^{3+}$  이온을 도핑한 결정체가 레이저매질로 사용된다. 레이저는 YAG 봉의 매질 양단에 반사경을 두고 flashlamp의 빛을 방출하여 강력한 빛을 타원 반사체로 집속시켜 pumping에 의해 발진된다. 여기서 레이저용접장치는 flashlamp에 전원을 공급하고 제어하는 레이저발전부, 레이저가 발진되어 용접물에 전달되는 빔전송부, flashlamp에서 방출되는 열을 냉각시키는 냉각부 그리고 용접물을 제어할 수 있는 CNC 제어부로 구성되어 있다.

본 실험의 주변기기는 Fig. 3에 보인바와 같이 레이저전송부의 용접노즐, 보호상자, 회전치구 그리고 회전제어부로 구성되어 있다.

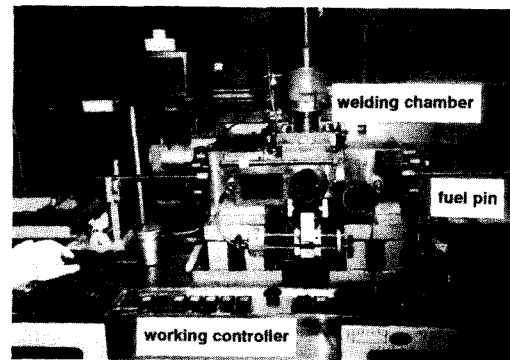


Fig. 2 Welding chamber and CNC controller for GTAW

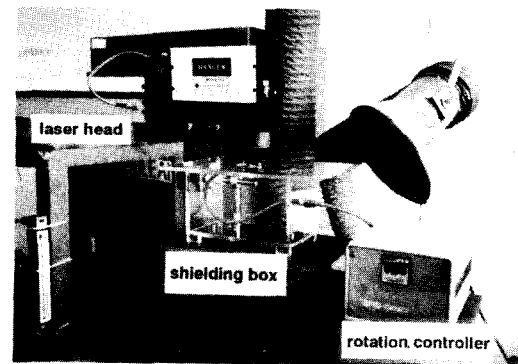


Fig. 3 Shielding box and rotation controller for LBW

핵연료봉의 모의시험편을 이용한 LBW 실험에서는 Zr 합금의 강한 산화성이 있으므로 오염이나 변색을 방지하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 봉단용접을 위한 보호상자가 특별히 고안되었다. 또한 봉단마개연결부분을 원주방향으로 회전하기 위한 고정지지대와 회전제어장치가 제작되었다. 이때 시험편을 지지대에 의해 고정시킨 다음, 시험편을 한바퀴 회전한 다음 바로 10° 정도 overlapping하여 용접할 수 있도록 하였다. 보호상자내에 사용되는

가스는 He (UPC grade) 이며, 이때 피복관내에 He 을 충전시키는 것은 Ar, N<sub>2</sub> 보다 질량분석기에 의한 검출이 용이하며, 봉단마개용접후 비파괴검사인 Leak Test 에 매우 적합하다. 또한 핵연료봉내에서 펠렛과 피복관사이에서 열전도를 좋게 하기 위한 것이다. 본 실험에서는 He 가스를 용접노즐을 통하여 보호상자내부로 채우는 방법으로 하였다.

### 2.3 실험방법

GTAW 을 위한 실험은 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 용접챔버, 주변기기와 자동프로그램을 이용한 9 단계로 구분될 수 있다. 먼저 용접전에 한쪽 방향으로만 용접될 시편에 원주방향으로 균일한 치수를 얻기 위해 봉단마개 삽입기를 이용하였으며, 이때 사용된 plug 압력은 4.5 bar 이고, clamp 압력이 5 bar 이다. 봉단마개의 끼움처리가

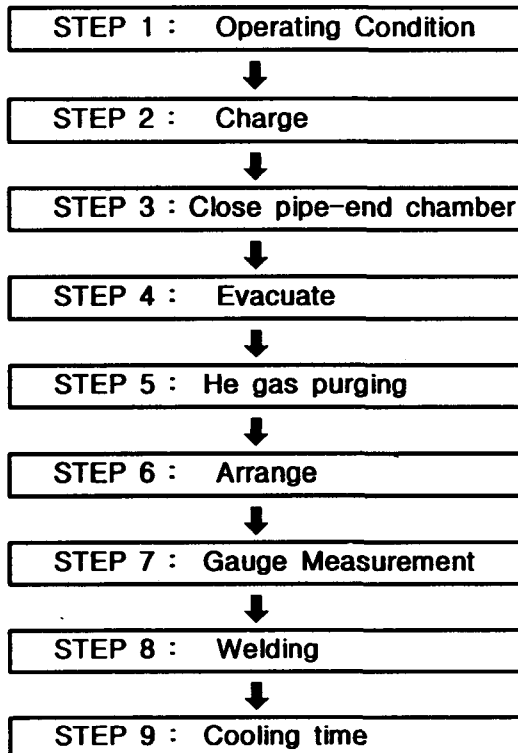


Fig. 4 Experimental procedure for GTAW

완료되면 용접할 챔버내에 시험편을 고정된 후, 첫번째의 'step welding' 단계에서  $7 \times 10^2$  torr 까지 진공시킨다. 진공이 완료되면 He 이 채워지며, 이어서 챔버내의 산소량이 자동으로 측정되며, 이것이 만족되면 프로그램에 의해 용접이 수행된다. 이때 용접후 20 초 정도의 냉각시간을 거친 후 'operating condition'이 표시되면 용접이 완료된다. 이때 사용된 GTAW 의 실험조건은 Table 2 와 같다.

Table 2. Experimental conditions for GTAW and LBW

GTAW	
Electrode material	W-Th 3%, $\phi$ 2.4
Shielding Gas	He (UPC)
Arc Current	24 - 30 A
Arc Length	0.45 - 0.5 mm
Chamber Pressure	0.4 - 0.6 bar
LBW	
Peak Power	3 - 7 kW
Pulse Width	4 - 8 ms
Pulse Frequency	10, 20, 30 Hz
Rotation Speed	4 - 8 rev./min
He Flow Rate	20 - 40 LPM

LBW 을 위한 실험에서는 먼저 레이저가 보호상자내의 시험편에 정확하게 초점이 맺히도록 용접노즐을 사용하여 정렬하였다. 실험에 사용된 집광렌즈는 achromatic doublet 이고, 초점위치의 기준은 다이오드레이저를 집광렌즈로 통하여 시험편에 초점을 맺히게 한 다음 CCD 카메라를 통하여 가장 작은 지점을 초점으로 결정하였다. 이때 시험편의 표면에서 초점간의 거리, 즉 defocusing 은 아래로 1 에서 1.5 mm 정도로 하였고, 초점위치를 정확하게 결정하기 위해서 X-Z 축의 작업대와 CCD 카메라를 사용하였다. 이때 사용된 LBW 의 실험조건은 Table 2 와 같다. 이때 파워밀도는 Fig. 5 와 Table 3 에서와 같이 여러 변수에 의해 정해지는 값으로 계산식에 의해 얻을 수 있다. 여기서 레이저의 발산각은 출력경으로부터 0.5 M 와 2.5 M 떨어진

진 두지점의 spot size 를 측정해서 얻었으며, 또한 침투출력은 펄스당 에너지와 펄스폭을 측정하여 계산하였다.

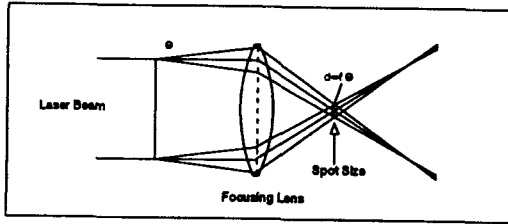


Fig. 5 Spherical aberration of a single lens focussing a parallel beam

Table 3. Experimental conditions of power density measurement

Relation Equation	
$PD = \frac{4P}{\pi(f\theta)^2}$	
PD : Power Density (MW/cm <sup>2</sup> ) P : Peak Power (kW) $\theta$ : Beam Divergence (mrad) f : Focal Length (mm)	
Power Density Measurement	
Beam Divergence ( $\theta$ )	5 - 12 mrad
Focal Length (f)	≈ 100 mm
Mag. of Beam Expander	3 ×
Measuring Plate	AR coating
CCD Resolution	< 0.1 mm

Zircaloy-4 봉단마개용접부의 경도시험은 미세조직관찰에 사용되었던 시험편을 하중 100g 의 비커스방법인 미세경도기를 사용하여 시험편의 표면에서 0.2 mm 아래로 위치한 지점에서 용접부의 중심선부터 모재까지 연속적으로 0.2 mm 간격으로 측정되었다. 이때 용접부의 크기가 매우 작기 때문에 각각 3 개의 시험편에서 경도치를 측정하여 그 평균값으로 취하였다. 용접부의 미세조직은 용접된 시험편의 원주방향으로 임의의 한 단면을 절단하여 마운팅한 후 연마지로 No. 600, 1000, 1500 순

으로 갈아낸 다음 폴리싱된 시험편은 증류수로 10 분간 초음파세척하고 건조시킨 후, 부피분율로 H<sub>2</sub>O : 45, HNO<sub>3</sub> : 45, HF<sub>1</sub> : 10 의 용액에 swab 앓청하여 용접부의 미세조직과 결정립 크기를 광학현미경으로 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 기하학적 형상에 따른 용입조사

봉단마개용접에 있어서 기하학적 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다. 용접이음의 구조개선은 autogenous 방법에 유리하며, 용접중에 응고가 한 방향으로 일어난다면 용융하기가 매우 용이해 질 수 있다. 일반적으로 LBW 는 GTAW 보다 재료내부에 molten pool 형성을 쉽게 일어나게 해주며 깊은 용입을 얻을 수 있다. 또한 열에너지의 공급과 용융되는 부피가 서로 균일하게 이루어 질 때 적절한 molten pool 를 이루게 될 것이다.

펄스형 Nd:YAG LB 를 이용한 용접실험에서 에너지가 시험편에 전달되는 과정을 살펴 볼 때, 에너지 전달에 관계되는 변수는 레이저의 파워밀도, 보호가스의 종류, 재료의 흡수율 그리고 시험편의 기하학적 형상 등을 들 수 있다. 이러한 변수에 의해 재료표면에서 플라즈마의 형성으로 인한 thermal coupling 효과에 따른 용접특성이 크게 달라지게 된다<sup>9)</sup> 여기서 플라즈마생성은 파워밀도, 보호가스, 재료의 특성에 따라 복잡한 관계가 있으므로, 이에 따른 플라즈마의 분광학적 분석과 레이저의 흡수, 산란 등에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 실험에서는 위에서 열거한 변수중에서 시험편의 기하학적 형상을 선택하여 재료표면에서 발생하는 플라즈마효과에 따른 용입특성을 살펴보았다.

Fig. 6 은 Zircaloy-4 피복관의 봉단마개용접에 있어서 시험편 "A" type 을 사용했을 때 전형적인 GTAW 와 LBW 의 용입단면을 보여주고 있다. Fig. 6 에서와 같이 LBW 는 GTAW 에 비해 HAZ 가 매우 작고 용접속도 적게 나타났다. 시험편 "A" 와 "B" type 을 사용했을 때 Fig. 7 은 LBW 경우 파워밀도를 일정하게 하고 펄스에너지를 변화시켰을 때 그리고 Fig. 8 은 GTAW 경우 아크전류

에 따른 용입상태를 비교한 것이다. 여기서 LBW 경우 대체로 펄스에너지가 커질수록 용입은 증가하였으며, 이때 시험편 "A" type은 "B" type보다 큰 용입을 얻을 수 있었다. 이것은 Nd:YAG 레이저에 의해 발생된 플라즈마가 재료표면 바로 상단에서 에너지 전달효율에 영향을 준다는 사실이 이미 보고된 바 있으나 아직까지 플라즈마와 LB 사이에서 재료의 상호관계가 충분히 해명되어 있지 않은 편이므로 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 본다. 본 실험에서는 시험편 "A" type 이 "B" type 보다 고밀도 에너지의 전달효율면에서 유리함을 알았고, 또한 실험중에 재료표면에서 강한 빛을 가지는 작고 원형모양의 LSC파로 판단되는 플라즈마현상을 Nd:YAG 레이저보호용 유리로 관찰할 수 있었다. 반면에 GTAW 경우는 시험편 "A" type 과 "B" type 에 관계없이 비슷한 경향을 보여 주었다. 이것은 집속된 에너지에 의해 용융시키는 LBW 에

비해 GTAW 는 대체로 용융되는 부피가 커져서 용입에 큰 영향을 얻을 수가 없었다.

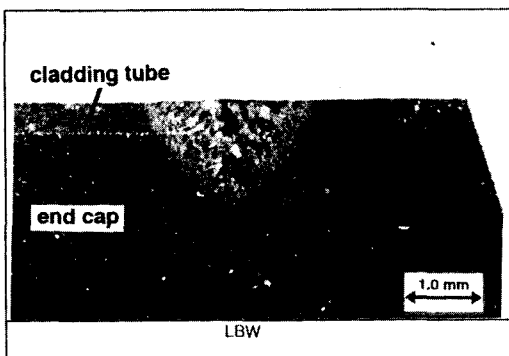
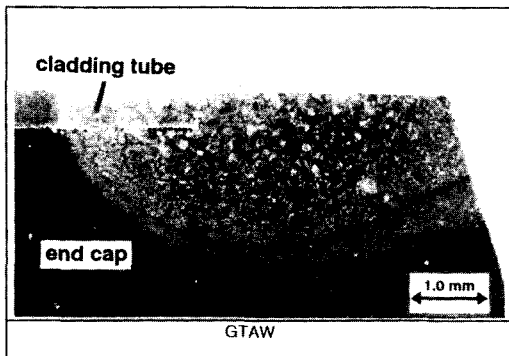


Fig. 6 Comparison of GTA and Nd:YAG LB weldment

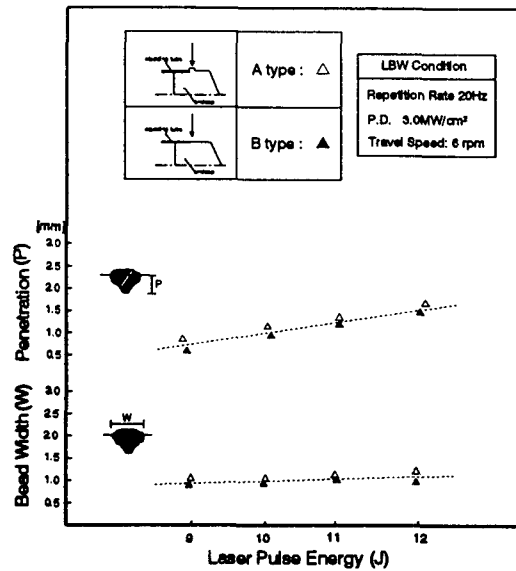


Fig. 7 Dependence of penetration depth and bead width on laser pulse energy

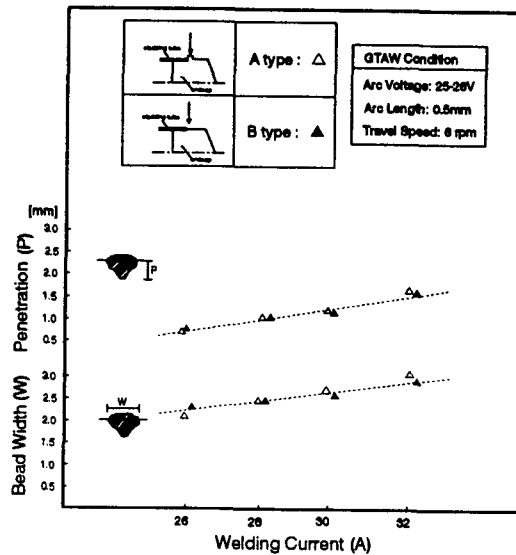


Fig. 8 Dependence of penetration depth and bead width on arc amperage

### 3.2 파워밀도와 입열에 따른 용입특성

Nd:YAG LBW 에서 용입에 영향을 줄 수 있는 변수는 파워밀도, 침투출력, 반복율, 용접속도 등을 들 수 있다. 본 실험에서는 이러한 여러 가지 변수에 따른 용입이 어떻게 변하는지 알아 보았다. 펄스형 Nd:YAG LB 는 CO<sub>2</sub> LB 에 비해 평균출력이 작으나 침투출력은 수 kW 이상으로 얻을 수 있으며, 또한 발산각이 작고 파장이 짧아 재료흡수율이 매우 높은 장점을 가지고 있다<sup>10</sup>. 특히 여러 변수중에서 파워밀도는 레이저가 시험편에 입사되는 에너지효율을 결정하는 데 중요한 역할을 하며, 용융점이 높은 Zirconium 과 같은 재료경우 효과적으로 에너지를 흡수시키기 위해 파워밀도를 적절하게 유지시켜야 한다. 따라서 봉단마개용접은 Zircaloy-4 의 피복관과 봉단마개에 레이저를 재료표면에 효과적으로 전달되기 위한 적정수준의 파워밀도가 필요하다. 또한 두께가 얇은 피복관과 봉단마개에 적절한 molten pool 을 형성하기 위한 용접은 재료표면에서 금속증발이 일어나는 순간까지 일어나므로 침투출력이나 펄스폭을 크게 할 필요가 없게 된다.

Fig. 9 는 레이저의 파워밀도에 따른 용입과 비이드폭을 나타낸 것으로 파워밀도가 높을수록 용입과 비이드폭의 비가 커짐을 알 수 있으며, 특히 비이드폭은 파워밀도 3 MW/cm<sup>2</sup> 이상에서 오히려 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 이것은 재료표면의 molten pool 형성시 펄스에너지를 일정하게 유지하면서 펄스폭을 작게하면 파워밀도가 커지게 되는 데, 이때 파워밀도가 커짐에 따라 재료내부에서 존재하는 key hole 형성이 쉽게 일어나는 것으로 판단된다. 그리고 파워밀도 5 MW/cm<sup>2</sup> 이상에서는 비이드폭이 작게 나타내면서 재료표면에서 과도한 금속증발로 인한 spattering 현상이 심하게 관찰됐으며, 또한 비이드표면도 매우 거칠게 나타났다. Fig. 10 은 GTAW 의 경우 용접입열에 따른 용입과 비이드모양을 나타낸 것으로 용접입열이 증가할수록 대체로 용입은 커짐을 알 수 있으며, 이때 용입과 비이드폭의 비는 거의 일정하게 나타내고 있다. 여기서 용접입열이 1.8 kJ/cm 이상일수록 비이드폭이 커지면서 비이드표면이 약간 변색되면서 오목한 형태를 보여 주고 있다.

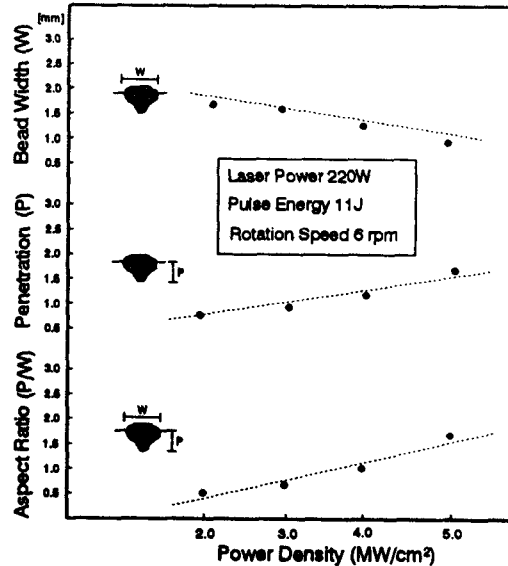


Fig. 9 Dependence of penetration depth and bead width on power density

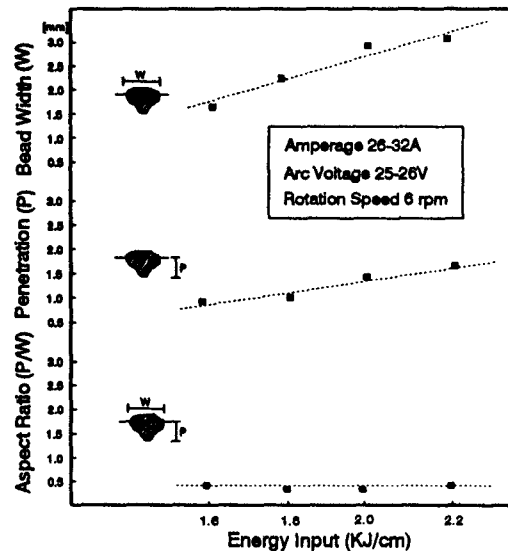


Fig. 10 Dependence of penetration depth and bead width on energy input

### 3.3 침투출력과 반복율의 영향

앞절에서 언급했듯이 레이저출력에 따라 spot

size 뿐만아니라 빔의 발산각이 달라지므로, 특히 레이저 출력변수가 될 수 있는 침두출력, 반복을 그리고 펄스에너지가 중요한 조건이 될 수 있다. 일반적으로 평균출력을 일정하게 하고 펄스폭이 길 경우 침두출력은 작아져서 빔의 spot size 가 커지며, 반면에 펄스폭이 작을 경우 침두출력은 커져서 빔의 spot size 가 작아지면서 용입이 깊어지고 입사효율이 좋아지게 된다. 그러나 과대한 침두출력은 구멍작업이나 절단에는 효과적일지는 모르나 용접에서는 별로 좋은 결과를 얻을 수가 없다. 여기서 침두출력의 변화는 에너지가 시험편에 입사되는 효율을 결정하는 데 중요한 역할을 하며, 또한 용융점이 높은 Zircaloy-4 재질의 경우 빔을 시험편에 효과적으로 흡수하는 데 적정수준의 침두출력에서 유지시켜야 한다. 따라서 침두출력에 따른 Zircaloy-4 봉단마개 용접특성의 변화에 대한 정확한 정보를 가질 필요가 있다.

S. Aruga 등은 Nd:YAG-LBW 에서만 나타나는 현상으로, 펄스폭이 긴 형태에서 용입감소를 볼 수 있었으며, 대체로 펄스모양이 축 처진 모양으로 이루어져 있어서 입사효율을 저하시킨다고 보고되고 있다<sup>11)</sup>. Fig. 11 은 레이저 평균출력 220 W 로 일정하게 하고 침두출력을 변화시킬 때 시험편의 용입과 비이드폭을 비교한 것이다. Fig. 11 에서 나타내듯이 용입은 침두출력이 커짐에 따라 점차로 증가함을 보이고 있으며, 반면에 비이드폭은 침두출력에 따라 별 다른 영향을 보이고 있지

않았다. 이때 Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 육안관찰에서는 적어도 5 kW 이상부터 시험편의 표면에 기화로 인한 spattering 현상이 많이 나타났으며 비이드표면도 거칠었다. 본 실험에서는 4 kW 부터 5 kW 이내에서 적절한 것으로 판단된다.

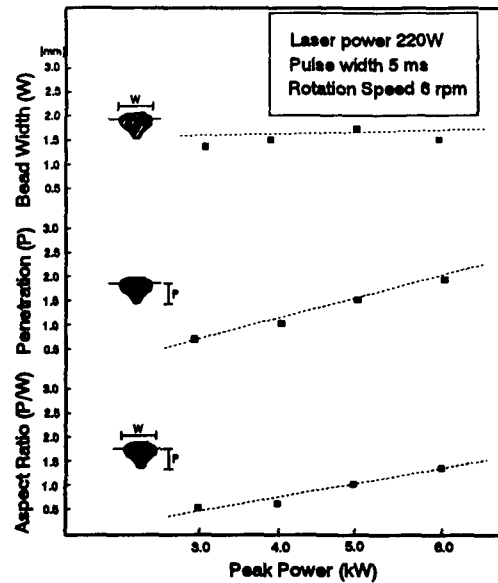


Fig. 11 Dependence of penetration depth and bead width on peak power

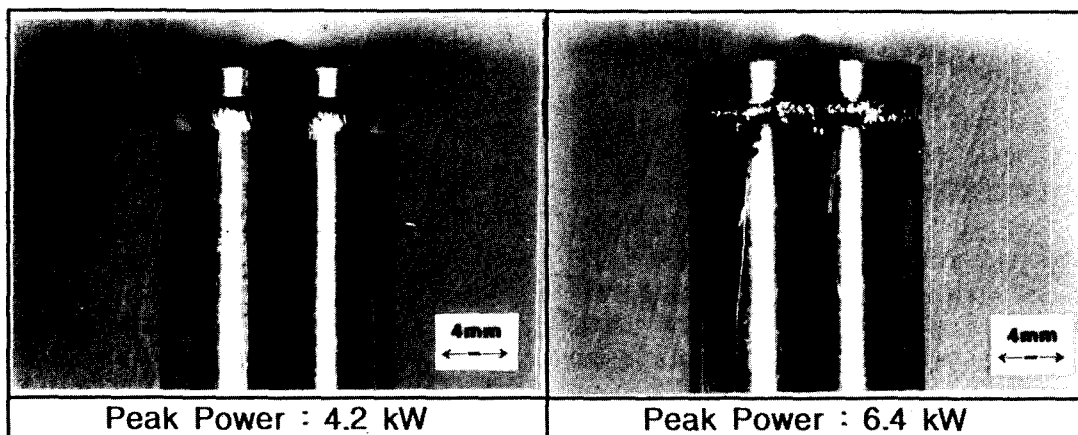


Fig. 12 Photographs of typical bead appearance in various peak powers



Fig. 13 은 레이저 평균출력 200 W에서 반복율만을 변화시킬 때 용접부의 용입, 비이드폭 그리고 aspect ratio 를 나타낸 것이다. Fig. 13 에서 나타난 바와 같이 반복율이 증가할수록 펄스당에너지가 감소하게 되어 용입은 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있으며, 이때 aspect ratio 도 약간 감소함을 알 수 있다. Fig. 14 는 반복율 10, 20, 30 Hz 별로 변화했을 때 시험편의 비이드모양을 보여주고 있다. 여기서 반복율 10 Hz 와 같이 반복율이 작아질수록 용접부의 spattering 현상과 비이드표면이 거칠어지며, 또한 실험중에 플라즈마발생을 관찰할 수 있었다. 반면에 반복율이 증가함에 따라 spattering 현상은 현저하게 줄어들면서 약간 좁은 비이드형태로 매끈하게 나타났다. 본 실험에서는 반복율 20 Hz 부근에서 용접하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

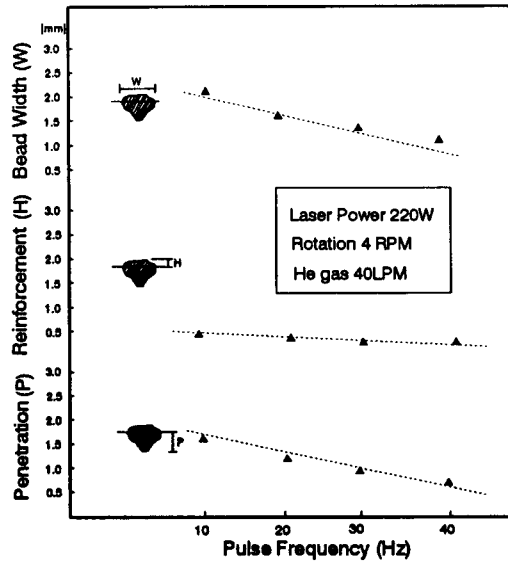


Fig. 13 Dependence of penetration depth and bead width on pulse frequency

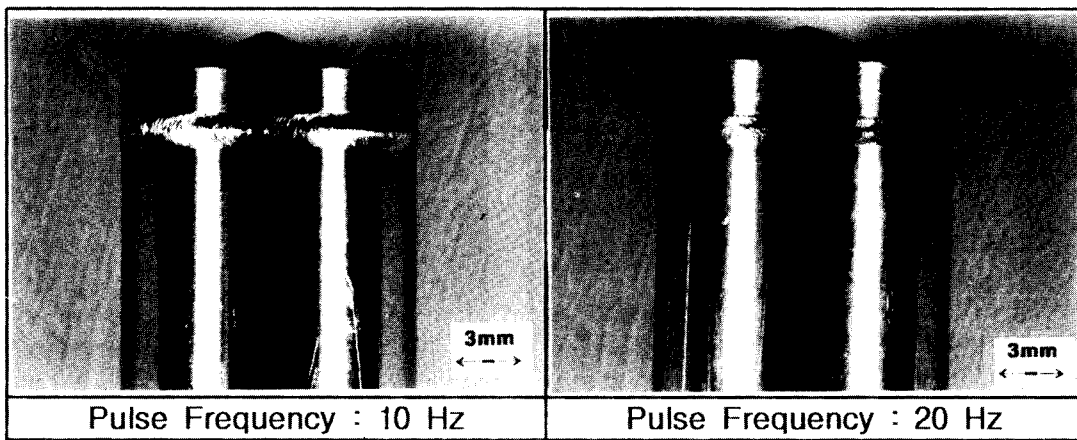


Fig. 14 Photographs of typical bead appearance in various pulse frequencies

### 3.4 초점거리와 아크길이의 영향

Nd:YAG-LBW 와 GTAW 를 이용한 Zircaloy-4 봉단마개용접특성이 어떻게 변하는지 알아보기 위한 것으로, 레이저변수와 관계되는 침투출력, 반복율 그리고 GTAW 의 변수인 아크전압, 전류를 변화시키는 것은 용접부의 특성을 이해하는 데 부족하다. 따라서 Zircaloy-4 봉단마개용접에서

LBW 경우 레이저의 초점거리와 GTAW 의 아크길이의 조절은 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 본 실험에서는 실제의 봉단마개시험편을 사용하여 레이저의 초점거리와 아크길이별로 여러 가지 용접 특성을 살펴보았다.

Fig. 15 는 레이저의 초점면에서 시험편이 어느 위치에 있는가에 따라 용입과 비이드폭에 미치는 영향을 나타내고 있다. 레이저용접실험에서 이동

거리는 -5 mm 에서 +5 mm로 각각 1 mm 간격으로 defocusing 했을 때, Fig. 15 에서 나타난 바와같이 defocusing -1 mm에서 -2 mm 지점에 위치할 때 용입이 가장 깊게 일어났으며, 시험편을 아래로 이동할수록 용입은 급격히 감소하였다. 이것은 CO<sub>2</sub> LB 를 이용한 몇몇의 연구가들과 비슷한 경향을 보여 준 것으로 보고되었다<sup>12)</sup>. 레이저의 초점면과 맞나는 위치에서는 spattering 현상이 보였고 비이드표면도 거칠게 나타났으며, 본 실험은 시험편의 초점위치를 defocusing -2 mm 정도에서 용접할 때 유리한 것으로 판단되었다.

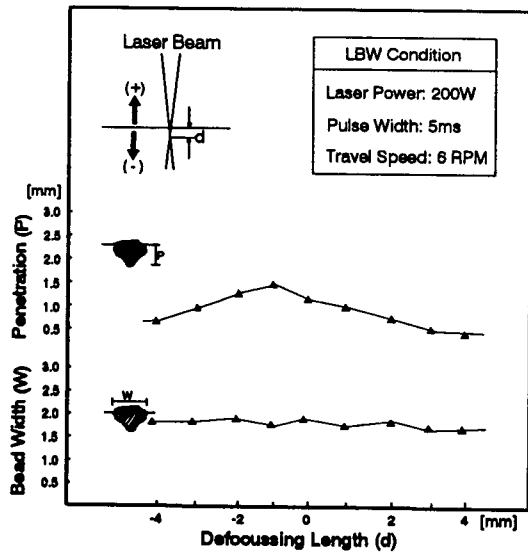


Fig. 15 Dependence of penetration depth and bead width on defocusing

Fig. 16 은 고주파 펄스를 이용한 GTAW 의 아크 길이에 따라서 용입과 비이드폭에 어떠한 영향을 미치는 가를 나타내고 있다. 재료표면과 전극간의 거리, 즉 아크길이는 0.3 mm 에서 1.2 mm 이동하면서 0.3 mm 간격으로 하였고, 시험편과 전극의 위치는 이음부의 중심에서 봉단마개 끝단부쪽으로 0.4 mm 이동된 곳에 놓여 졌다. Fig. 16 에서와 같이 아크길이가 0.9 mm 이하에 위치할 때 아크 발생은 일어나, 용입깊이와 비이드폭은 급격히 감소됨을 알 수 있다. 아크전류가 24 A 부터 30 A 범위내에서 아크길이가 0.5 mm 부터 0.6 mm 사

이에 위치한 지점일때 전극에 고온현상을 일으키면서 안정된 아크를 발생할 수 있었고, 이때 시험편의 용입과 비이드폭도 크게 나타났다. 아크길이가 0.3 mm 이하에서 전극에 금속증기가 작용하거나 전극마모현상이라 할 수 있는 오손이 생기기 쉬운 구역임을 알 수 있었다.

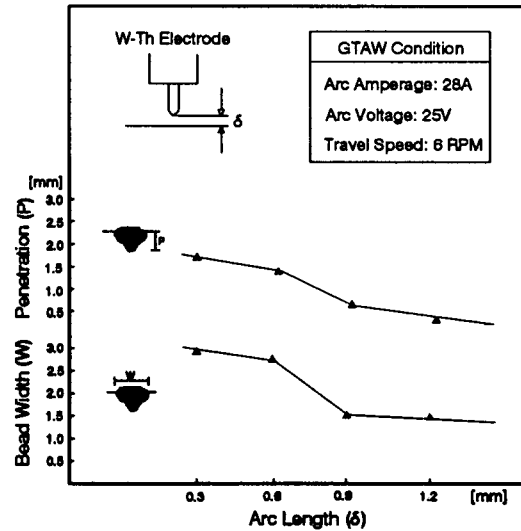


Fig. 16 Dependence of penetration depth and bead width on arc length

### 3.5 미세경도시험 및 미세조직관찰

미세경도시험은 Zircaloy-4 봉단마개시험편의 용입단면에서 모재, HAZ, 용접금속으로 구분되어 비커스방법인 경도시험기가 사용되었다. Fig. 17 은 GTAW 와 LBW 로 된 시험편의 각 부위별 측정치를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 17 에서와 같이 GTAW와 LBW 경우 용접금속에서의 경도치는 180 에서 210 범위내에 나타나며, 용접금속과 모재 사이의 HAZ 에서 160 에서 180 범위의 분포를 보이고 있다. 여기서 LBW 와 GTAW 된 용접금속의 경도차이가 큰 변화는 보이지 않으나, HAZ 의 경도치에서 10 에서 20 정도 GTAW 가 높게 나타났다. 또한 시험편의 봉단마개 끝단부로 이동할수록 GTAW 와 LBW 모두다 피복관쪽보다 약간 높은 경도치를 보였다. 이것은 봉단마개용접부에서 열사

이클에 의한 overheating 에서 갑자기 급냉을 일으키게 되어서 경도치가 증가된 것으로 해석될 수 있다. 그리고 LBW의 용접금속과 HAZ 영역이 GTAW 에 비해 좁게 나타냄을 알 수 있었다.

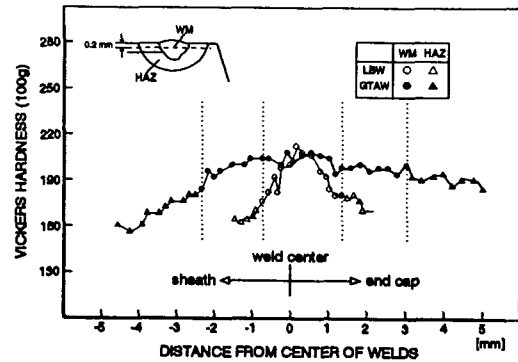


Fig. 17 Microhardness variations along sheath/HAZ/endcap in GTAW & LBW

GTAW 와 LBW 를 이용한 Zircaloy-4 봉단마개용접의 열사이클에 의해 이루어진 미세조직을 기초로 하여 분석해 보기로 한다. 앞의 Fig. 6 처럼 용접부의 매크로조직이 나타낸 바와같이 Fig. 18 과 Fig. 19 는 2 가지 용접방식에 따른 피복관과 봉단마개사이에서 접합계면을 포함한 용접부의 미세조직 변화를 (a) 모재, (b) HAZ, 그리고 (c) 용접금속 순으로 표시한 위치에서 관찰되었다. Fig. 18 (a) 와 Fig. 19 (a) 처럼 모재피복관의 미세조직은  $\alpha$  결정립이 길이방향으로 연신된 상태인 데 반하여 봉단마개의 모재쪽의 미세조직은  $\alpha$  결정립이 재결정된 모양으로 불규칙적인 조직으로 관찰되었다.

Fig. 18 (b) 와 Fig. 19 (b) 는 봉단마개와 용접금속사이의 경계로 표시된 미세조직으로, 대부분  $\alpha$  결정립이 변형되고  $\alpha+\beta$  상 영역으로 가열된 후 결정립이 성장되어서 모양과 크기가 불규칙적으로 나타내고 있다. Fig. 18 (c) 와 Fig. 19 (c) 와 같이 GTAW 와 LBW 의 용접금속의 미세조직은 빠른 가열속도와 빠른 냉각속도 때문에 martensitic  $\alpha$  조직과 prior  $\beta$ -grain 내에 Widmanstätten  $\alpha$  상이 서로 혼합된 조직으로 유사하게 나타내고 있다.<sup>13)</sup> 그런데 Fig. 18 (c) 와 Fig. 19 (c) 처럼 LBW 의 용접금속조직은 prior  $\beta$ -grain 크기가 GTAW 에 비하여 비

교적 작게 나타내고 있다. 이것은 LBW 의 경우 용접시간이 짧고 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 국부적으로 열에너지의 입열량이 GTAW 보다 작아서 일어난 것으로 해석된다.

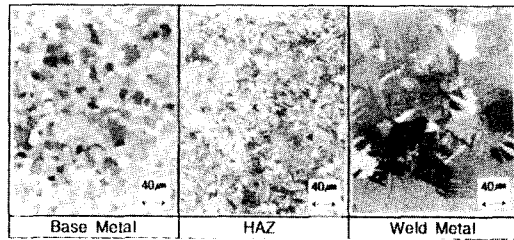


Fig. 18 Microstructures of welded specimens in GTAW method

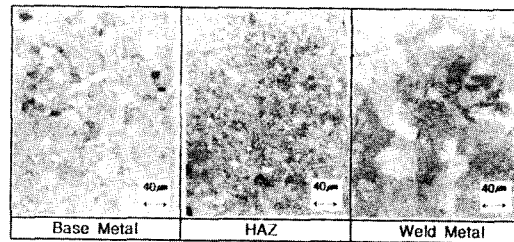


Fig. 19 Microstructures of welded specimens in LBW method

#### 4. 결 론

본 연구에서는 핵연료봉을 Zircaloy-4 봉단마개로 밀봉하는 데 GTAW 와 LBW를 이용한 각각의 시험편에 따른 용접부의 특성과 미세조직을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험편의 형상에 따른 용입의 영향에서 LBW 는 시험편 "A" type 이 시험편 "B" type 보다 더 깊게 나타났으며, GTAW 에 비해 용입면에서 유리하였다.

(2) Zircaloy-4 봉단마개와 피복관의 두께 0.4 mm가 충분히 LBW 되기 위해서는 평균출력 200 W, 파워밀도가 4 MW/cm<sup>2</sup>, 반복율 20 Hz 정도가 적절하였다.

(3) 봉단마개용접부의 금상학적 조사에 의하면 HAZ 가 LBW, GTAW 순으로 작게 나타났으며, 용접부의 미세조직에서는 GTAW 와 LBW 모두 유사한 martensitic  $\alpha$ 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났다.

(4) GTAW 와 LBW 의 방식을 이용한 Zircaloy-4 봉단마개용접은 가능하나, LB를 이용한 용접부는 GTAW 와 비교하면 대체로 용입비가 크며, 작은 미세결정립을 이루고 있어서 좋은 용접특성으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. R. K. Welty : SPIE Proceeding, Vol. 247, 30 (1980)
2. J. D. Sease, A. L. Lottes, F. C. Davis : Th-Uranium-233 Oxide Facility -Rod Fabrication Process and Equipment, Oak Ridge National Laboratory, Union Carbide Corp., (1964), pp.31-32
3. 이정원의 4인 : 중수로핵연료 봉단마개의 저항업셋용접을 위한 용접변수, 대한용접학회지, Vol. 7, No. 2, (1989), pp.60-69
4. B. K. Henon : Orbital GTA Welding Replaces Nickel Convection tubes, Welding Journal, Nov. (1991), pp.59-62
5. P. Modern, K. Schneider : Laser and Laser Material Processing Research and Development at BNFL plc., UK., Proceeding of LAMP 92, Nagaoka (1992). pp.963-968
6. 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 Advances in Laser Engineering and Applications, (1980), pp.30-37
7. 김덕현외 3인 : 정밀용접용 펄스형 Nd:YAG 레이저가공기 개발, 대한용접학회지, Vol. 9, No. 1, Mar., (1991) pp.32-39
8. L. R. Hettche, T. R. Tucker : Mechanical Response and Thermal Coupling of Metallic Targets to High-Intensity 1.06 $\mu$ m Laser Radiation, Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 4, April, (1976), pp.1415-1421
9. R. D. Dixon, G. K. Lewis : The influence of a Plasma during Laser Welding, Los Alamos National Lab. (1987)
10. G. K. Lewis, R. D. Dixon : Plasma Monitoring of Laser Beam Welds, Welding Research Supplement, Feb., (1985) pp. 49s-54s
11. S. Aruga, E. Matsui : Efficient and High-Quality Overlap Welding of Car-Body Aluminum Alloy Metal Sheets with High Power Nd:YAG Laser by Flexible Beam Delivery, Proceedings of LAMP 92, Nagaoka June, (1992), pp.517-522
12. E. Beyer, K. Behler, G. Herziger : Plasma Absorption Effects in welding with CO<sub>2</sub> lasers, SPIE Vol. 1020, (1988), pp.84-95
13. V. Ram, G. Kohn, A. Stern : CO<sub>2</sub> Laser Beam Weldability of Zircaloy-2, Welding Journal, July, (1986), pp33-37