

研究論文

大韓溶接學會誌  
第9卷第1號 1991年 3月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 9, No. 1, Mar., 1991

## 펄스형 Nd : YAG 레이저를 이용한 지르칼로이-4 용접특성 조사

김수성\* · 김덕현\* · 김철중\* · 이종민\*

### Investigation of Zircaloy-4 Weldability Using a Pulsed Nd : YAG Laser

S.S. Kim\*, D.H. Kim\*, C.J. Kim\*, J.M. Lee\*

**Key Words :** Nd : YAG Laser (네오디뮴야그레이저), Zircaloy-4 (지르칼로이-4), Laser Beam Welding (레이저 용접), Gas Tungsten Arc Welding (가스 텅스텐 아크용접), Plasma Formation (플라즈마 형성)

#### Abstract

Laser beam weldability of zircaloy-4 was investigated using a pulsed Nd: YAG laser of 200 W average power. Mechanical properties of laser and GTA bead-on-plate welded zircaloy-4 test specimens were compared. The influence of plasma generated during laser welding was analyzed and optimum laser welding parameters were investigated.

#### 1. 서 론

1960년에 루비 레이저가 출현한 후 각종 레이저가 개발되어 왔지만 1963년에 Bell 연구소에서 개발한 Nd : YAG 레이저가 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 고체 레이저로서 각종 용도에 이용되고 있다. Nd : YAG 레이저 용접은 광학계 혹은 광섬유로 전송 접속시켜 높은 에너지 밀도의 열원으로 초점부근에서 국부적인 순간 가열로 접합하는 방법으로, 용접으로

인한 변형을 줄일 수 있으며 좁은 열영향부를 만들기 때문에 열에 민감한 재료의 용접에 용이하다.

최근 Nd : YAG 레이저 용접법은 레이저 빔의 용통성과 취급이 용이하여 자동조절이 가능하며 대량 생산 체제를 갖추게 됨에 따라 생산성을 높일 수 있으므로 모든 산업분야에서 광범위하게 응용되고 있으며, 특히 원자력 산업분야에서도 핵연료 제조관련 정밀용접에서 매우 유용하게 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 즉 핵연료제조에서는 지르칼로이-4의 용접, 피복관의 He 가스 밀봉용접,

\* 정희원, 한국원자력연구소

온도측정을 위한 Ti 열전대용접 그리고 특수부품의 섬세한 용접등이 다양하게 활용되고 있다<sup>2)</sup>.

핵연료 피복관과 지지체에 사용되고 있는 재료는 지르칼로이-4로서, 열중성자 흡수 단면적이 적고 높은 온도에서는 기계적, 물리적 성질이 양호하며 그리고 냉각제에 대한 강한 내식성을 가지고 있다. 일반적으로 지르칼로이-4는 열팽창 계수가 작기 때문에 용접후에 잔류응력이 적어 용접균열 등의 결함이 적은 반면에, 높은 온도에서 산소 및 질소와 친화력이 강하여 오염을 일으키는 단점이 있다. 이러한 재료의 특성상 거의 산화를 일으키지 않고 무결합의 용접부를 얻기 위해서는 기온이 GTA 용접법에 비하여 레이저 용접법이 적절함을 인식하게 되었다<sup>3)</sup>.

본 연구는 최대 평균출력 200Watt급인 Nd : YAG 레이저를 사용하여 현재 핵연료 제조에 사용되고 있는 지르칼로이-4 판재를 시편으로 하여 레이저 용접시 플라즈마에 따른 용입상태의 영향을 분석하였으며, 레이저 용접과 GTA 용접의 인장강도, 각 용접부의 파단면, 경도분포, 그리고 미세조직을 비교 조사하였다.

## 2. 용접장치 및 실험방법

### 2.1. 용접장치

Nd : YAG(Yttrium Aluminium Garnet) 레이저는 YAG crystal에 Nd가 약 1% 함유된 Nd : YAG 봉에 섬광등 방전시 발생하는 강력한 빛을 타원형 펄핑 반사체로 집속시켜 광펄핑에 의해 발전되며, 본 실험에 사용된 Nd : YAG 레이저 용접장치의 구성과 제원은 참고문헌에서 "정밀용접용 펄스형 Nd : YAG 레이저 가공기 개발"의 Photo.1 및 Table.1에서와 같다<sup>4)</sup>. 여기서 레이저 용접장치는 섬광등에 전원을 공급하고 제어하는 전원부, 레이저가 발전되며 가공물에 전달되는 광학부, 섬광등에서 방출되는 열을 효율적으로 냉각시키는 냉각부, 가공물을 감시하는 감시장치 그리고 CNC에 의하여 표적이동과 용접제어를 할 수 있도록 구성되어 있다<sup>5)</sup>.

### 2.2. 시편제작

본 실험에서 사용된 지르칼로이-4 시편은 압연 및 재결정 풀림처리를 받은 1.0mm 두께의 얇은 판이며, 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 지르칼로이-4 판재의 압연 방향과 서로 다르게 시

편의 크기를 폭 30mm, 길이 80mm 되도록 절단하고, 절단된 시편을 화학증기로 세척한 다음, 초음파세척 및 행금처리한 후 실험에 사용하였다. Fig. 1에서는 레이저 용접된 시편, GTA 용접된 시편, 모재의 시편의 인장강도를 조사하기 위한 각 압연방향의 인장 시편을 나타내고 있으며, 시편의 규격은 ASTM E-82에 의하여 가공하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of zircaloy-4

Element	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Zr
wt (%)	1.2	0.18	0.07	0.28	balance
	-1.7	-0.24	-0.13	-0.39	

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa) 0.2% offset	Total elongation (%)
415.8	345.2	34.0

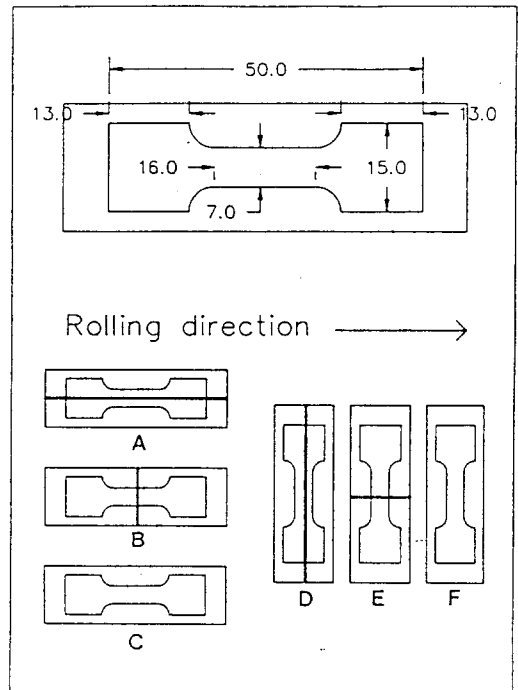


Fig. 1 Shape of zircaloy-4 specimens used in tensile test

### 2.3. 실험방법

#### 2.3.1. 실험조건

레이저 용접시 대기중의 오염이나 산화를 방지하기 위하여 실험박스 및 아르곤 가스(UPC grade)를 사용

**Table 2 Optimum parameters in LBW and GTAW for tensile specimens**

Optimum Laser Weld Parameters		Optimum GTA Weld Parameters	
Peak Power	1.3kW	Welding current	15A
Pulse Width	5msec	Arc Length	0.6mm
Pulse Frequency	10Hz	Welding Speed	200mm/min.
Welding Speed	200mm/min.		

하였으며, 이때의 아르곤 가스의 유량은 레이저가 조사되는 시편의 앞면부분과 뒷면부분에서 모두 30l/min.로 하였다<sup>6)</sup>. 실험에 사용된 조명장치는 CCD 카메라와 할로겐 램프의 빛이 통하게끔 cold mirror와 hot mirror를 사용하였으며, 집광렌즈는 achromatic doublet으로 초점거리가 100mm이고, 집광위치에 He-Ne 레이저를 집광렌즈를 통하여 시편에 멧히게 하고 CCD 모니터를 통하여 He-Ne 레이저의 초점크기가 최소점으로 하였다. 이때 지르칼로이-4의 용접특성과 기계적 성질을 조사하기 위하여 실험조건을 Table 2에서와 같이 정하였다.

2.3.2. 시험방법

인장시험에서는 MTS 인장시험기 (MODEL 810)를 사용하였으며 크로스 헤드 속도는 항복응력까지 0.02 mm/min.로 하여 0.2% 시험응력을 항복응력으로 결정하였고, 항복응력을 지나서 부터는 크로스 헤드 속도를 0.1mm/min.로 하여 파단이 일어날 때까지 실시하였다. 그리고 응력과 변형 곡선으로부터 최대 인장응력, 항복점 그리고 연신율을 구하였다.

인장시험후 각 용접시편과 모재의 파단면을 관찰하기 위하여 AKASHI 주사형 전자현미경을 사용하였다. 인장시편의 파단면을 인장방향과 수직하게 적당한 크기로 절단하여 약 10분간 초음파 세척을 하고 건조시킨 후 파단면을 관찰하였다.

경도시험에서는 비커스 방법의 미세경도기를 이용하였으며, 레이저 용접된 시편과 GTA 용접된 시편의 각 부위에 대한 경도분포를 용접 중심선에서 모재까지 연속적으로 측정하였으며 하중은 200g, 시간은 10초로 하여 측정하였다.

지르칼로이-4 용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 용접시편을 적당히 절단한 다음 마운팅하여 연마지로 No. 100 부터 No. 600까지 연마한 후 1.0um의 알루미나 분말로 폴리싱하였다. 폴리싱된 시편은 초음파 세척한 다음 증류수 45%, HNO<sub>3</sub> 45%, HF 10%의 혼합액을 이용하여 스왑 에칭을 하였다. 에칭된 시편은 지르칼로이-4의 결정 입계의 윤곽을 잘 식별하기

위하여 금속 현미경의 편광법 (polarized light method)을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 플라즈마 발생에 따른 용입의 영향

펄스형 Nd : YAG 레이저 용접은 공동 (keyhole)을 형성하는 고출력 CW CO<sub>2</sub> 레이저 용접과는 달리 재료표면에서 열전도에 의하여 융합하는 방법 (conduction welding)으로 얇은 두께의 재료에 많이 사용되고 있다<sup>7,8)</sup>. 본 실험에서는 Nd : YAG 레이저를 이용하여 얇은 두께의 판재에 용접실험을 수행하였으며, 이때 발생하는 플라즈마 현상에 대하여 파악하고 레이저의 용접조건을 조사하였다.

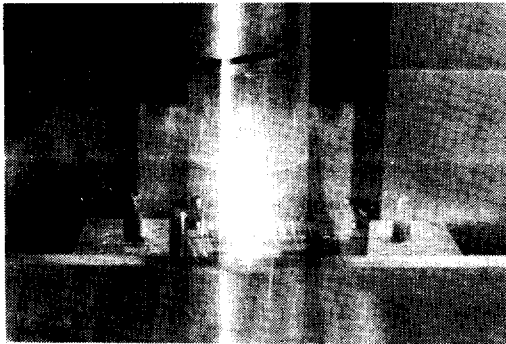
Nd : YAG 레이저를 재료표면에 조사할 경우 낮은 파워 밀도에서는 레이저를 흡수하여 재료면이 용융되고 동시에 표면온도가 비등점이상 되면서 금속증기만을 일으킨다. 더욱 높은 파워밀도를 가진 레이저를 조사할 경우 플라즈마가 발생하며 레이저를 효율적으로 흡수하게 된다. 따라서 파워밀도가 낮을 경우는 재료표면에서 반사가 이루어져 효율적인 에너지를 재료에 전달하지 못하게 되고, 반면에 파워밀도가 높은 경우는 고온의 플라즈마의 열전도에 의한 효율적인 에너지를 재료에 전달하게 된다<sup>9)</sup>.

본 실험에서는 펄스형 Nd : YAG 레이저 용접시 레이저 파워밀도를 변화시켰을 때 재료표면에서 일어나는 금속증기의 현상과 플라즈마 발생에 대하여 관찰하였으며, 이에 따른 각각의 용입상태를 조사하였다. 이때 파워밀도는 출력빔의 발산각 (full angle,  $\Theta$ ), 광속 확대기의 배율 (M), 집광렌즈의 초점거리 (f), 레이저 침투출력 (P)에 의한 다음식을 이용하여 구하였다. 여기서 출력빔의 발산각은 출력경으로부터 0.5M, 2.5 M 떨어진 두지점의 레이저 spot 크기를 측정하여 계산하였으며, 레이저의 침투출력은 펄스에너지와 펄스 폭을 측정하여 계산하였다.

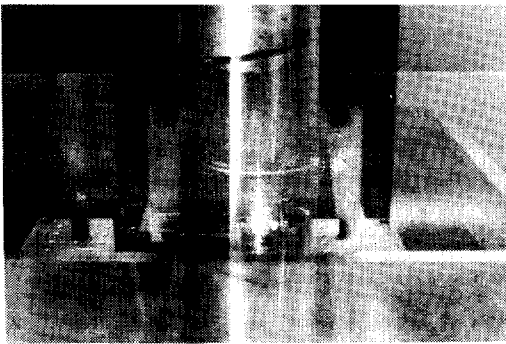
$$I = \frac{4PM^2}{\pi(f\pi)^2} \quad \begin{matrix} I : \text{파워밀도} \\ f : 100\text{mm} \end{matrix} \quad (1)$$

Fig. 2의 A, B는 각각 레이저 펄스 에너지는 12J로 일정하게 하고, 파워 밀도를 0.5MW/cm<sup>2</sup>, 3.0 MW/cm<sup>2</sup>로 하였을 때 플라즈마 상태를 관찰한 것이다. 파워밀도를 0.5MW/cm<sup>2</sup>로 하였을 때 재료면에서 커다란 불꽃기둥과 같은 현상을 볼 수 있었으나, 파워밀도를 3.0MW/cm<sup>2</sup>로 하였을 때는 이러한 불꽃기둥을 관찰 할 수가 없었다. 여기서 파워밀도가 0.5 MW/cm<sup>2</sup>의 경우는 재료면에서 비등점이상에서의 금속증기에 의하여 끊어오르는 현상이라 볼 수 있으며, 파워밀도 3.0 MW/cm<sup>2</sup>의 경우는 재료표면부근에서 작은 동그란 모양의 강한 빛을 가진 플라즈마가 발생된 것으로 판단된다.

다음은 파워밀도에 따라 재료표면에서 반사되는 빛의 세기를 알아보기 위하여 광수신 다이오드를 이용하여 조사하였다. Fig. 3의 A', B'는 출력모니터용 레이



(A)



(B)

Fig. 2 Variations of metal vaporization and plasma generation vs. power density

저만을 광수신 다이오드에 입사시켰을 때의 신호를 나타낸 것이며, A는 파워밀도 0.5MW/cm<sup>2</sup>, B는 파워 밀도 3.0MW/cm<sup>2</sup>일때, 재료표면에서 반사된 빛을 광수신 다이오드에 입사시켰을 때의 신호를 나타낸다. Fig. 3의 A'는 A'보다 훨씬 많이 나타내고 있으며, 이것은 재료표면에서 반사되어 나온 빛이 광수신 다이오드로 들어오기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 B는 B'와 거의 같은 형태의 신호를 나타내고 있으며, 이것은 집광렌즈를 통하여 재료표면에 조사된 레이저가 대부분 재료표면에 존재하는 플라즈마에 흡수되고 있음을 의미한다. 즉 플라즈마에 대한 관찰에서 설명한 바와 같이 파워밀도가 0.5MW/cm<sup>2</sup>일 때는 플라즈마가 발생하지 않았고, 파워밀도가 3.0MW/cm<sup>2</sup>일 때는 플라즈마가 발생하고 있음을 광수신 다이오드의 신호에 의해 알 수 있었다.

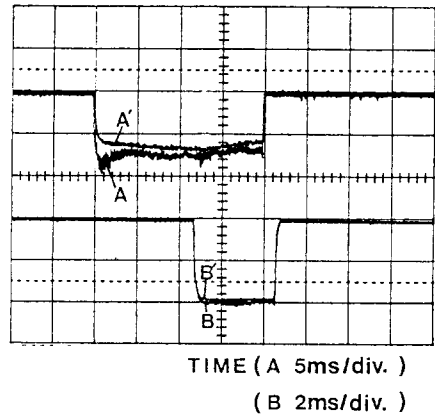


Fig. 3 Dependence of photodiode signal on laser power density

Fig. 4은 레이저 용접시 파워밀도에 따라서 플라즈마를 형성하는 데 필요한 레이저 펄스 에너지를 나타낸 것이다. 여기서 파워밀도가 0.8MW/cm<sup>2</sup> 부근에서부터 플라즈마가 발생하기 시작하였으며, 파워밀도가 낮을 수록 플라즈마 발생에 필요한 레이저 펄스 에너지는 증가한다. Fig. 4의 A는 재료표면에서 커다란 불꽃기둥과 같이 보이는 금속증기 발생구역이며, B는 재료표면에서 강한 빛을 가진 플라즈마 발생구역을 나타낸다.

Fig. 5에서는 이러한 플라즈마 발생에 따른 지르칼로이-4 판재의 용입상태를 나타낸 것이다. 파워밀도 0.5MW/cm<sup>2</sup>일 경우는 플라즈마가 발생하지 않아서

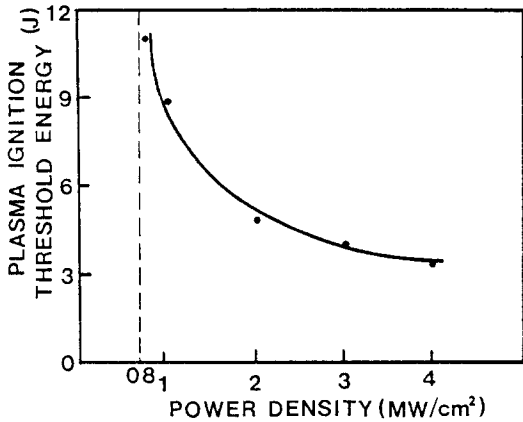


Fig. 4 Plasma ignition threshold energy vs. power density

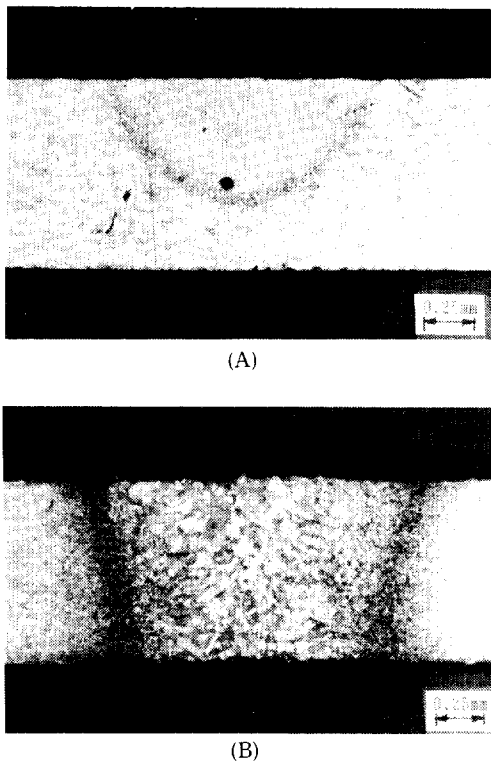


Fig. 5 Variations of penetration depth vs. power density

재료표면의 반사에 의해 레이저 흡수에너지가 작아져 두께 1.0mm의 지르칼로이-4 판재를 0.5mm 정도의 용입이 일어났으며, 반면에 파워밀도 3.0MW/cm<sup>2</sup>일 경우는 플라즈마가 재료표면에 형성되어 많은 에너지

를 흡수하게 되어 1.0mm 두께를 완전히 관통하였음을 보여주고 있다.

지르칼로이-4 판재를 용접하기 위하여 파워밀도를 변화시켰을 때 필요한 레이저 펄스에너지를 조사하였으며, 이때 지르칼로이-4 용접부의 열영향부와 스패터 현상을 관찰하였다. Fig. 6은 파워밀도에 따라서 완전 용입을 위하여 최소한의 레이저 펄스에너지를 나타낸 것으로, 두께 1.0mm의 지르칼로이-4 판재를 용입하기 위해서는 파워밀도가 증가할수록 레이저 펄스에너지는 약간 줄어드는 경향을 보였다. Fig. 7은 파워밀도 1.0MW/cm<sup>2</sup>, 3.0MW/cm<sup>2</sup>에서, 용접에 필요한 레이저 펄스에너지를 각각 5J로 일정하게 하였을 때 용접부의 열영향부를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 파워밀도 3.0MW/cm<sup>2</sup>일 경우의 열영향부는 파워밀도 1.0MW/cm<sup>2</sup>일 경우에 비해 좁게 나타났으며, 지르칼로이-4의 용접속도가 작은 결정립으로 이루어져 있어 용접특성이 더 좋은 것으로 여겨졌다. 또한 파워밀도 1.0, 3.0MW/cm<sup>2</sup> 일때의 스패터는 거의 무시할 정도로 적게 나타났으나, 파워밀도 4.0MW/cm<sup>2</sup> 이상에서는 표면의 금속이 튀어 올라 스패터의 현상을 보였으며, 용접부에서도 움푹 패인 자국이 보였다.

이상과 같이 지르칼로이-4 판재의 레이저 용접이 잘 되기 위해서는 플라즈마 발생이 필수적이며, 이를 위하여 적어도 파워밀도가 0.8MW/cm<sup>2</sup> 이상이 되어야 하며, 그 이하에서는 레이저가 재료표면에 충분히 흡수되지 않아 용입이 충분히 이루어지지 않았다. 또한 파워밀도 1.0MW/cm<sup>2</sup>에서의 열영향부는 파워밀도 3.0MW/cm<sup>2</sup>에 비해 대체로 넓게 나타났으며, 파워밀도 4.0MW/cm<sup>2</sup>에서는 스패터가 많이 나타났다. 따라서 지르칼로이-4 판재의 1.0mm 두께를 용입하기

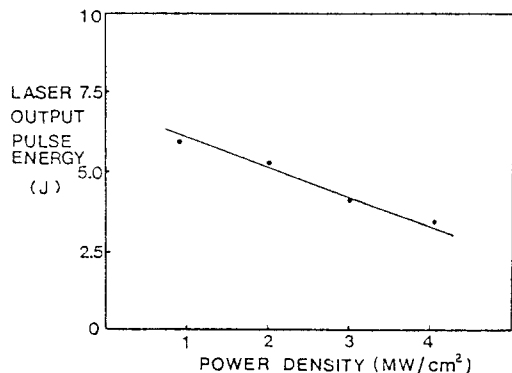
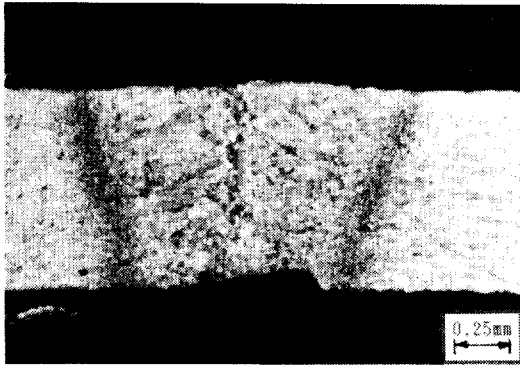
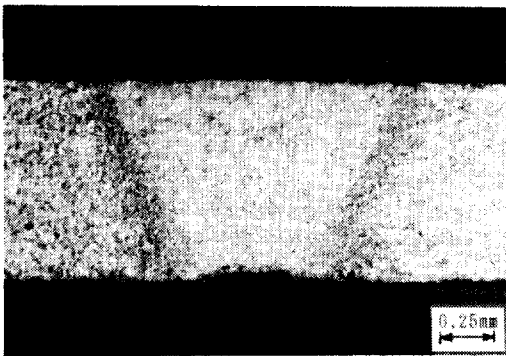


Fig. 6 Power density vs. laser pulse energy for complete penetration



(A)



(B)

Fig. 7 Variations of penetration depth vs. power density

위해서는 파워밀도를 3.0MW/cm<sup>2</sup>, 레이저 펄스에너지 5J 정도에서 용접하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

3.2. 용접강도 조사

지르칼로이-4 판재의 인장강도를 조사하기 위하여

레이저 용접시편, GTA 용접시편, 모재의 인장시편을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 그리고 인장시험후 각각의 압연방향으로 레이저로 용접된 시편, GTA 용접된 시편, 모재시편의 인장치는 Table 3과 같다. 여기서 레이저 및 GTA 용접부의 인장강도는 대체로 모재보다 높았으며, 그반면에 용접부의 연성은 모재보다 낮은 경향을 나타내고 있다. 특히 GTA 용접시편은 레이저 용접시편보다 인장치가 높으며 연신율은 레이저 용접시편이 높은 경향을 나타내고 있다. 압연방향과 서로 다른 각가의 용접시편에 대해서는 성질이 별차이가 없으며 유사한 인장치를 얻었다<sup>10)</sup>. Fig. 8은 압연방향이 같은 인장시편에서 얻은 응력 변형곡선을 나타내며, Fig. 9는 레이저로 용접된 인장시편, GTA 용접된 인장시편 그리고 모재의 인장시편에서 얻은 응력 변형곡선을 나타내고 있다.

3.3. 파단면 조사

Fig. 10은 인장시편의 용접선이 Fig. 1의 A, D와

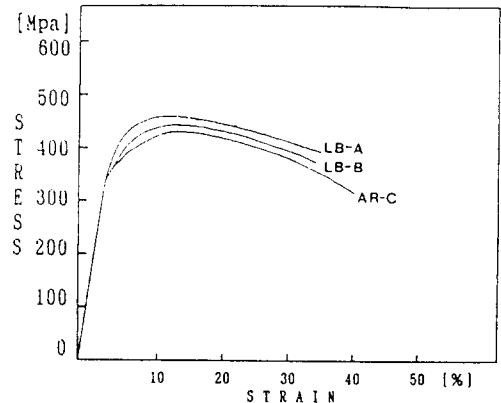


Fig. 8 Stress-strain curves for laser weld(LB-A, LB-B) and unwelded specimens(AR-C)

Table 3 Tensile properties of laser, GTA welded and unwelded specimens

Specimen No.	Ultimate tensile strength (MPa)		Yield strength 0.2% offset (MPa)		Total elongation (%)	
	LBW	GTAW	LBW	GTAW	LBW	GTAW
A	442.3	547.2	358.9	431.5	34.6	22.6
B	426.6	477.6	353.0	366.8	33.3	23.3
C	418.7		348.1		38.0	
D	445.2	510.9	361.9	387.4	34.8	23.5
E	442.3	468.8	322.6	343.2	33.1	19.8
F	416.8		316.8		38.6	

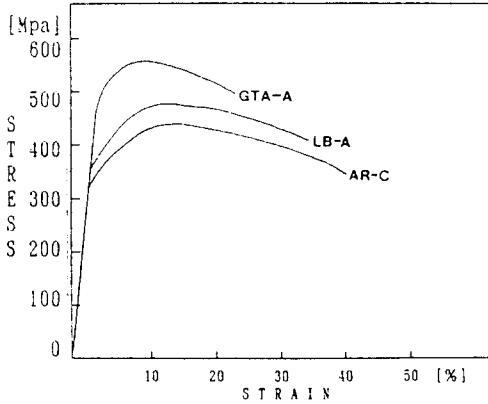
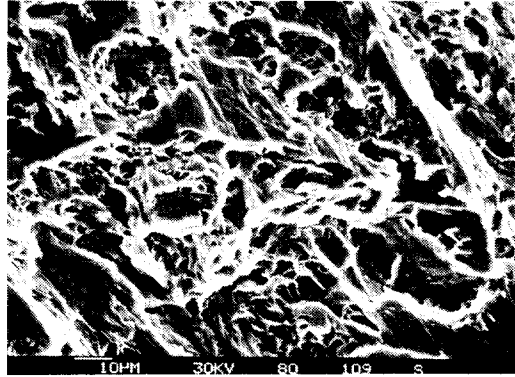


Fig. 9 Stress-strain curves for GTA(GTA-A) and LB(LB-A) welded and unwelded specimens (AR-C)

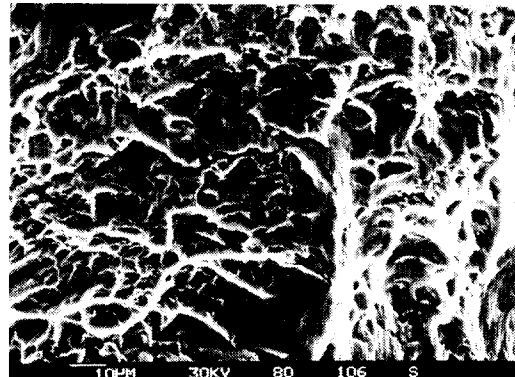
같이 종방향으로 인장시험후 레이저 용접된 시편과 GTA 용접된 시편에서 용융금속의 파괴형태를 모재부분과 비교 조사한 것으로, 이때 파면은 microvoid coalescence로 관찰되는 전형적인 연성파괴를 나타내고 있다. 레이저 및 GTA 용접된 시편의 파단면을 비교할 때 모두 모재의 파단면과 비슷한 형태를 이루고 있으며, 이것은 용접금속에서 파단된 시편의 입계 가장자리에서 수직상정 경계를 따라 파단된 모습을 나타내고 있다. 특히 레이저 용접금속의 파단면은 Fig. 10(A)와 같이 GTAW와 모재의 파단면에 비하여 아주 미세한 하부구조(fine substructure)의 형태를 이루고 있다<sup>3)</sup>.

3.4. 경도 조사

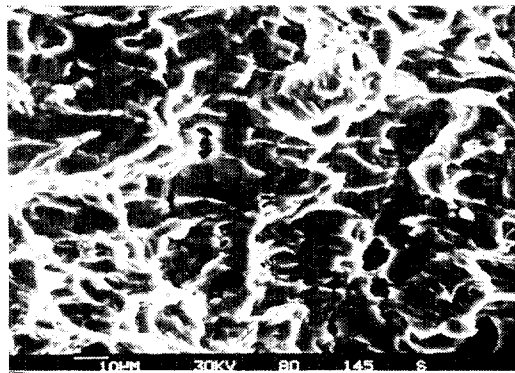
Fig. 11은 지르칼로이-4 판재의 레이저 용접된 시편과 GTA 용접된 시편의 경도 분포를 용접금속(WM), 열영향부(HAZ) 그리고 모재(BM)의 세부분으로 구분하여 연속으로 측정된 결과를 보여주고 있다. 여기서 레이저로 용접된 시편과 GTA 용접된 시편에서 모재와 열영향부의 경도치는 큰 차이를 보이지 않으나, 용접금속에서는 경도치 차이가 약 Hv 20-30 정도로 레이저 용접부에서 대체로 높게 나타났음을 알 수 있다. 이것은 지르칼로이-4 판재에 레이저를 조사시키면 용접열사이클로 인하여 급열, 급냉과정이 일어나서 GTA 용접부에 비하여 작은 입열을 가지므로 경도치가 증가한 것으로 해석할 수 있다. 특히



(A)



(B)



(C)

Fig. 10 Fractography of laser welded (A), GTA weld (B) and unwelded specimen (C)

레이저 용접부의 열영향부는 GTA 용접에 비하여 매우 좁은 영역으로 나타났다.

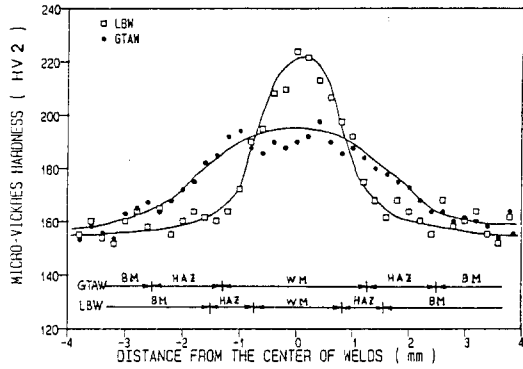


Fig. 11 Microhardness distribution across zircaloy-4 welds

### 3.5. 미세조직 관찰

지르칼로이-4 시편의 BM 조직은 등축된 결정립들로 구성되어 있으며, WM 조직은 용접열에 의해 용융되었다가 응고하는 동안에 상당히 크게 성장한 prior  $\beta$ -grain 내에  $\alpha$  plate들이 basket weave 형태로 발달하여  $\beta$ -quenched 조직과 흡사한 미세조직을 나타내고 있다. HAZ 조직은 WM 조직보다는 작은 prior  $\beta$ -grain 내에  $\alpha$ 상이 plate 형태로 성장한 전형적인 워드만스태텐조직을 갖는 것으로 나타내고 있다<sup>11)</sup>.

레이저 용접시편과 GTA 용접시편의 미세조직을 비교하면 BM에서부터 HAZ까지는  $\alpha$  plate들이  $\beta$ -

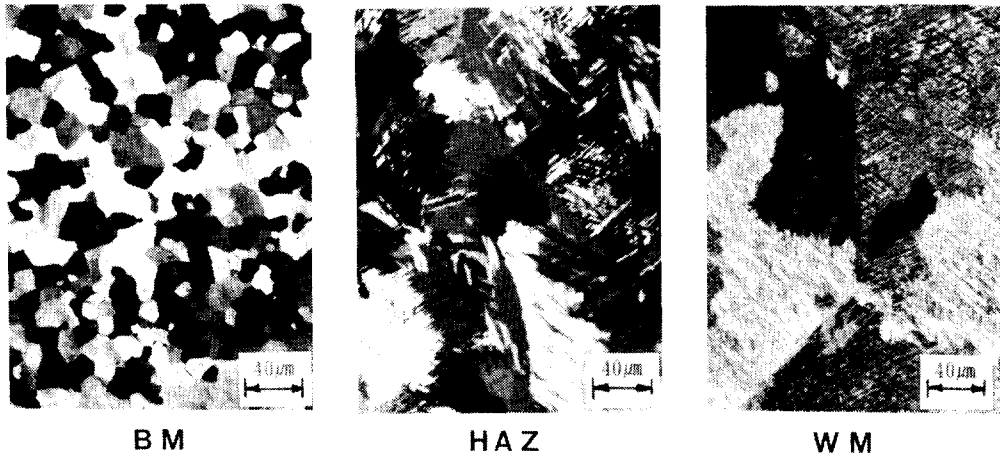


Fig. 12 Microstructure of GTA welded Zr-4 specimens

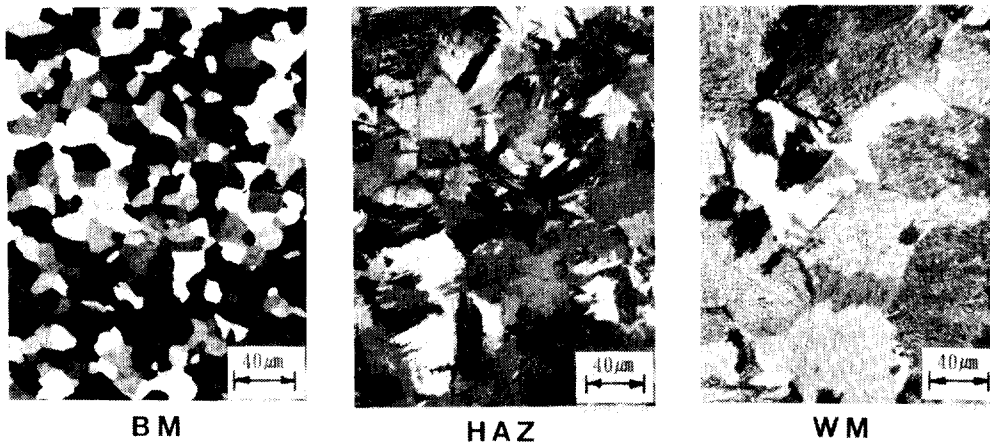


Fig. 13 Microstructure of LB welded Zr-4 specimens



quenched조직과 유사하게 성장한 것으로 나타내며 구조상으로 별 다른 차이는 보이지 않고 있다. 그러나 Fig. 12에서와 같이 GTA 용접의 WM 조직은 prior  $\beta$ -grain이 크게 성장한  $\beta$ -quenched 조직을 가지며, Fig. 13과 같이 레이저 용접의 WM 조직은 prior  $\beta$ -grain 크기가 비교적 작게 나타내고 있다. 이러한 현상은 레이저 용접이 고밀도 에너지에 의하여 국부적으로 급속히 용해되므로 입열량이 GTA 용접에 비하여 매우 작기 때문에 일어난 것으로 해석된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 200Watt급 펄스형 Nd : YAG 레이저를 이용하여 핵연료 재료인 지르칼로이-4의 레이저 용접 특성을 비교 조사한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저 용접을 위해서는 플라즈마발생이 필수적이며, 1.0mm 두께 지르칼로이-4 판재의 완전용입을 위하여 파워밀도 3.0MW/cm<sup>2</sup>, 레이저 펄스에너지 5 J 정도가 적절하였다.

(2) 레이저를 이용한 용접강도는 GTAW 보다 인장치가 낮은 반면에, 연신율은 높은 경향을 나타냈으며, 이때 LBW 및 GTAW의 파단면은 모두 딴플형태를 이루는 연성파괴를 보여주어 기계적 성질이 좋은 것으로 나타났다.

(3) 레이저 용접부의 경도치는 GTAW에 비하여 대체로 높았으며, 이때 LBW의 열영향부는 매우 좁게 나타났다. 또한 레이저 용접부의 미세조직은 GTAW에 비하여 결정립이 작아져서 좋은 용접 특성을 나타냈다.

#### 참고문헌

1) S.R. Bolin: Nd: YAG laser applications

survey, Raytheon Laser Center, (1983), pp. 409.  
 2) 이종민·김철중 외: 핵연료 원격가공 기술개발 KAERI/808/88 (1988), pp. 174.  
 3) V. Ram, G. Kohn and A. Stern: CO<sub>2</sub> laser beam weldability of Zr 2, AWS Welding Journal, Vol., No., 4 (1986), pp. 33.  
 4) 이종민·김철중 외: 정밀용접용 펄스형 Nd : YAG 레이저 가공기 개발 대한용접학회지, Vol. 9, No. 1, (1991), 예정.  
 5) 이종민·김철중 외: Nd : YAG 레이저 용접기 개발, KAERI/RR-794/88, (1988).  
 6) M.N. Watson, P.J. Oakley and C.J. Dawes: Lser welding techniques and testing, Metal Construction, (1985).  
 7) W.H. Kearns, Editor: Resitance and solid-state welding and other joining processes, AWS Welding Handbook Seventh Edition, Volume 3, pp. 223-224.  
 8) G.K. Lewis and R.D. Dixon: Plasma Monitoring of Laser Beam Welds, Welding Research Supplement, Feb. (1985), pp. 49s-54s.  
 9) R.D. Dixon, G.K. Lewis: The influence of a plasma during laser welding, Los Alamos National Lab. (1987).  
 10) Talia, J.E., and Povolo, F.: Tensile properties of zircaloy-4, Journal Nucl. Mat. Vol., No., 3 (1977), pp. 67-198.  
 11) Holt, R.A.: The beta to alpha transformation in zircaloy-4, Journal Nucl. Mat. Vol., No. 2 (1970), pp. 35-322.