

## 펄스형 Nd : YAG 레이저를 이용한 Al의 용접 특성연구

김덕현\* · 김수성\* · 김철중\*

### A study on the pure Al weldability using a pulsed Nd : YAG laser

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

**Key Words :** Nd : YAG laser(Nd : YAG 레이저), Power Density(파워밀도), Pulse Energy(펄스에너지), Focal Depth(초점심도), Sspect Ration(용입비), Crack(균열), Metal Powder(금속 분말), Porosity(기공), Shielding Gas(보호가스)

#### Abstract

Laser welding of ASTM no. 1060 Al plate with a pulsed Nd : YAG laser of 200 W average power was performed for end capping of KMRR nuclear fuel elements. In this research, we performed basic welding experiments.

Firstly, laser output parameters which affect laser welding parameters were studied by changing laser input parameters for effective welding of 1060 Al plates. We found that laser power density and pulse energy are important parameters for smooth bead shape.

Secondly, welding parameters which affect weld width-to-depth ratio were studied by changing power density and pulse energy, shielding gas, and defocusing. We found that power density must be higher than 0.3 MW/cm<sup>2</sup> pulse energy must be higher than 3 J. travel speed must not exceed 200mm/sec, laser focus must be existed beneath 2-3mm from plate surface and helium is proper shielding gas.

Thirdly, we studied the weld defects for Al-1060 such as crack and porosity in lap-joint welding. We designed new welding geometry for crack free welding of Al-1060 plates, and obtained crack free weldment

\* 정회원, 한국원자력연구소 전자광학연구소

but with lack of fusion. However, with Ti, Zr grain refiner elements, we can weld Al plates without solidification hot crack. Finally, we studied the origin of porosity by changing shielding gas. And we found that porosity was resulted from entrapment of shielding gas by the collapsing keyhole.

### 1. 서 론

1960년 처음으로 레이저가 개발된 후 여러가지 종류의 레이저가 개발되었다. 그 중에서 CO<sub>2</sub> 레이저와 Nd : YAG 레이저는 가공기로서 이미 상용화 단계에 있다. CO<sub>2</sub> 레이저는 레이저의 출력이 변하여도 레이저의 발산각이 크게 변하지 않으나 Nd : YAG 레이저는 출력 상태 즉 입력에너지에 따라 발산각이 달라져 레이저 용접에서 중요한 변수가 되는 파워밀도가 달라진다<sup>1)</sup>. 그러므로 레이저 입력 에너지와 관계되는 펄스폭과 섬광등에 입력되는 전압, 펄스반복율 등을 일차원적으로 변화시키는 것은 용입특성을 이해하는데 도움이 되지 못한다. 이러한 현상은 rod 형 Nd : YAG 레이저의 경우 필연적으로 발생한다. 즉 레이저의 출력과 용접변수가 직접 관계되는 것이 아니므로 용입 특성과 출력 변수의 관계를 밝히는 것이 중요한 일이다. 또한 펄스형 레이저는 CW 레이저와는 달리 용접부의 열 cycle을 매우 복잡하게 할 뿐만 아니라 용융부의 온도 경사에 의한 응고 과정이 매우 다르므로 CW 레이저 용접에서 생기지 않는 기공과 응고 균열이 자주 발생한다.

본 연구는 200W급 펄스형 레이저를 이용하여, 레이저의 출력제어 변수가 용접변수인 파워밀도, 펄스 에너지, 초점 심도 등에 영향을 어떻게 미치는지 알아 보았으며, 다시 이러한 용접변수가 용입 현상에 어떠한 영향을 주는지 알아 보았다. 다음으로, lap joint 용접시 용접부에 형성되는 큰 기공과 응고 과정에서 발생하는 균열의 원인과 그 억제책에 관하여 연구를 하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서 사용한 알루미늄 시편은 ASTM No. 1060로써 3×30×80mm를 사용하였으며 연구의 각 실험에서 용접속도는 200mm/min, 보호가스는 헬륨, 첫

점은 용입이 가장 깊이 일어나는 위치로 하여 실험한 것이다. 그리고 측정된 펄스 에너지는 집광 렌즈를 지난 후 측정된 것이다.

출력제어변수에 따른 파워밀도를 계산하기 위하여 레이저의 초점크기를 측정하였으며, 이때에 초점심도 (focal depth)도 조사하였다. 이러한 측정치는 레이저의 공진기 구조에 따라 다르나, 열렌즈 효과가 존재하면 이러한 효과는 일정한 경향을 가지므로 그 특성을 알아두는 것이 중요하다. 본 연구에서는 레이저의 앞뒤 거울을 평면 거울로 하였으며 그 거리는 각각 150mm, 100mm로 하여 특성 실험을 한 것이다.

파워밀도를 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험장치에서 사용한 광속 확대기와 집광렌즈는 실제 레이저 용접에서 사용한 집광렌즈와 광속 확대기를 이용하였으며, 본 연구에서는 100mm의 집광 렌즈와 5배의 광속 확대기를 사용하였다. 입사되는 레이저가 집광되는 위치에 99.7% 정도를 투과시키는 AR 코팅된 면이 위치하도록 하였으며, imaging 렌즈에 의하여 CCD array에 이 초점이 맺히도록 하였다. CCD에 맺힌 상은 1/10mm 이하의 분해능을 가짐으로 집광렌즈의 초점면에서 레이저봉에 입사되는 평균 입력파위에 따라 Fig. 2와 같이 변화였다. 즉 레이저의 출력을 높이기 위하여 평균 입력파위를 높이면 레이저 빔의 발산각이 커져 집광되는 레이저의 초점 크기가

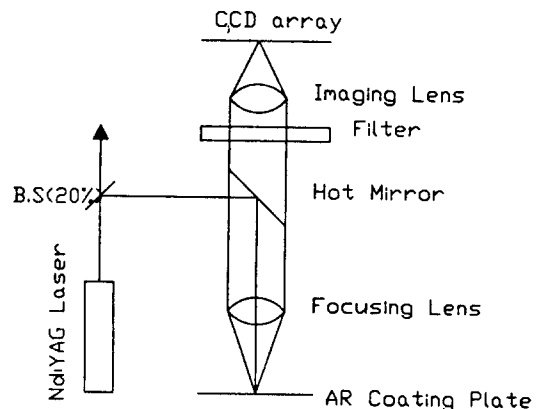


Fig. 1 Experimental arrangement to measure the spot size of laser.

커짐을 알 수 있다<sup>1)</sup>. 이는 파워밀도와 밀접한 관계가 있으므로 용접시 고리를 하여야 한다.

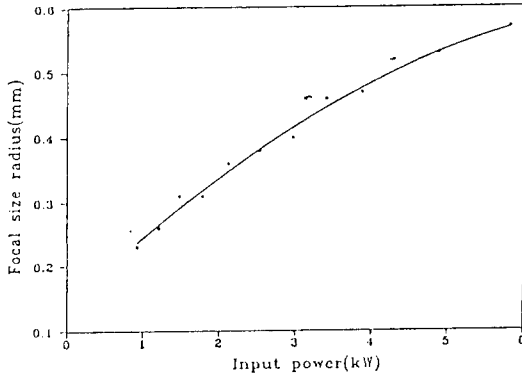


Fig. 2 Input power vs. spot size of laser.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Nd : YAG 레이저의 출력 변수와 용접변수

출력제어변수란 레이저출력 특성 즉 펄스에너지 및 첨두출력 등을 바꾸기 위하여 레이저 가공기에 operator가 제어할 수 있는 변수들을 말하고, 용접변수란 용접특성에 직접적인 영향을 주는 변수를 말한다.

일반적으로 레이저의 발산각이 커지면 레이저는 초점의 크기 뿐만 아니라, 집광렌즈로 입사되는 레이저의 빔의 크기를 바꾸어 시편을 가공할 수 있는 초점심도(focal depth)도 달라진다. 특히 레이저 가공에서 파워밀도는 레이저 에너지가 시편에 입사되는 효율을 결정하는데 중요한 역할을 하며, 반사도의 열전도도가 큰 알루미늄의 경우 레이저의 에너지를 시편에 효율적으로 에너지를 흡수시키기 위해 파워밀도를 적정 수준 이상으로 유지 시켜야 한다<sup>2,4)</sup>.

Fig. 3은 본 실험에 사용한 레이저 system에서 섬광등에 가하는 전압을 380 volt로 일정하게 하고 펄스폭만 변화시킬 때 펄스에너지와 파워밀도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 펄스폭의 증가에 따라 펄스에너지는 증가하나 파워밀도는 감소함을 알 수 있다.

Fig. 4는 충전전압을 일정하게 두고 펄스폭만 변화시키는 상태에서 용접부의 용입과 용융폭을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 용융 깊이는 펄스폭에

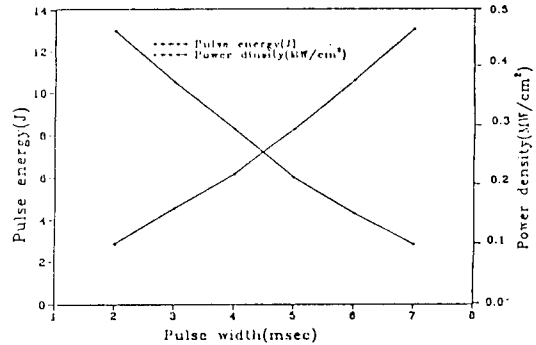
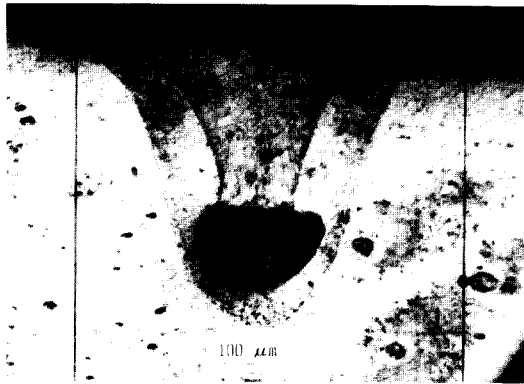


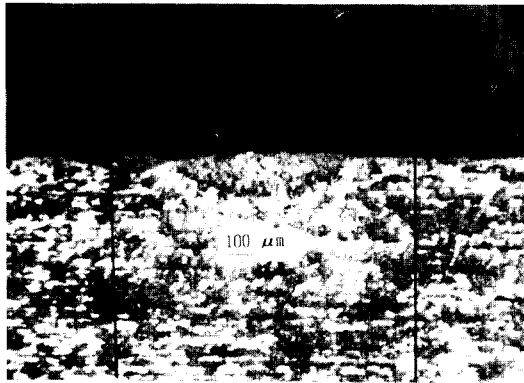
Fig. 3 Laser pulse energy and power density vs. pulse width

따라 현저히 변하나 용융폭은 큰 차이를 보이지 않는다. 이것은 펄스폭이 큰 경우 시편으로 입사되는 레이저 초점크기가 크고, 펄스폭이 작은 경우 흡수 효율이 좋아 용융이 많이 일어났기 때문이다. 특히 펄스폭이 클 때는 용입이 현저히 줄어들어 있는 것인데, 이것은 파워밀도가 부족하기 때문이다. 이러한 용입의 감소는 Fig. 3과 비교할 때 파워밀도 0.3 MW/cm<sup>2</sup> 미만에서 급격히 나타난 것이다. 이것은 대부분의 레이저 빛이 시편에서 반사 되었기 때문이다. 반면에 펄스폭이 작을 때는 펄스에너지의 감소에도 불구하고 레이저의 반사는 크게 일어나지 않고 있음을 알 수 있으나 Fig. 3과 비교할 때 3 J 이상의 에너지가 필요하다. D. A. Cremers 등은 파워밀도 0.43 MW/cm<sup>2</sup> 이하에서 레이저의 에너지는 15% 흡수되고, 그 이상에서는 약 44% 정도의 에너지가 알루미늄 시편에 흡수된다고 보고하였다<sup>3)</sup>. 파워밀도가 높아 질수록 spattering 현상과 기공의 생성 및 프라즈마의 발생을 관찰할 수 있으며 실제 이러한 사실은 다른 재질에 대해서 연구되었으며<sup>1)</sup> 본 연구에서도 관찰되었다. Photo. 1은 펄스폭이 4 msec와 6 msec에서의 용융된 용접부의 형상을 나타낸 것인데, 파워밀도가 작을 때는 용접부에 기공을 관찰할 수 없다. Morgan<sup>19)</sup> 등의 기존 이론에 의하면 이것은 key hole의 생성 유무와도 관계가 있다. 즉 펄스폭이 4 msec일 때는 기공의 발생이 있으며 key hole의 생성이 있었음을 알 수 있으며, 그러므로 대부분의 공진기 구조에서 Nd : YAG 레이저 가공기의 입력 변수 중 펄스폭을 과다하게 크게 하는 것이 오히려 좋지 않는 결과를 가져올 수 있다.

섬광등에 입력되는 파워는 앞에서 밝힌듯이 집광렌즈에 입사되는 레이저의 크기를 변화시켜서 입사각을 바꾸는데, Fig. 5는 Fig. 3과 같은 방법으로 평균



a) 380 volt, 4 msec



b) 380 volt, 6 msec

Photo. 1 Bead shape with different laser parameter :

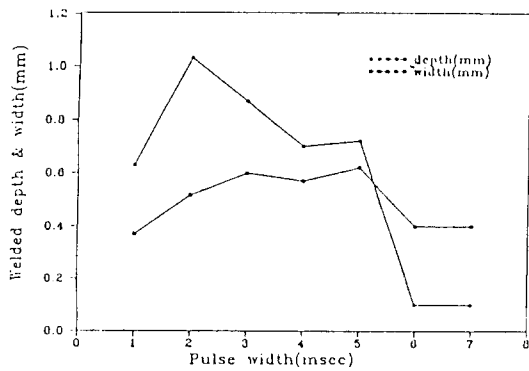


Fig. 4 Weld depth VS. pulse widths (380 volt)

입력 파워 즉 레이저 출력을 변화 시킬때 생기는 초점심도의 변화를 조사한 것이다. 본 실험에서 초점의 심도는 key hole 및 프라즈마의 형성으로 레이저 에너지가 효율적으로 전달될 수 있도록 초점범위를 조

사함으로써 얻을 수 있다. 이때 플라즈마의 발생은 육안으로, key hole은 절단면의 조사를 통하여 그 발생유무를 확인 하였다.

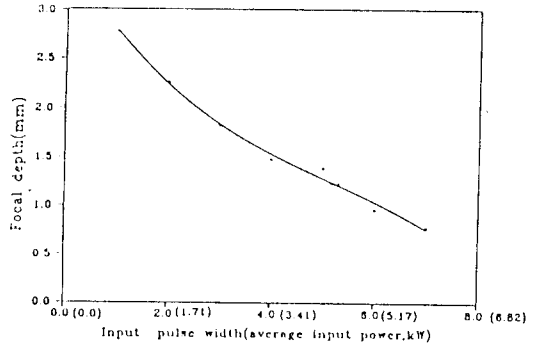


Fig. 5 Focal depth with different input parameter.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 저 입력에서는 빔 크기가 작아 F-Number가 크므로 초점심도가 크며, 시편이 원하는 초점면에 정확하게 위치하지 않아도 용입이 일어날 수 있으며, 레이저의 평균입력이 클 경우는 초점심도가 작아서 시편의 위치가 정확해야 한다. 실제로 유효 초점심도내에서 레이저를 시편에 조사시킨 경우와 그렇지 않은 경우 용입은 크게 차이가 나며, 초점심도 내에서 용접을 해야한다.

### 3.2 용접변수에 따른 용입특성

펄스형 Nd : YAG 레이저 용접에서 용입 형상에 영향을 줄 수 있는 변수는 펄스에너지, 파워밀도, 보호가스, 초점의 위치, 용접속도 등이 있다. 본 절에서는 이러한 여러가지 변수에 따라 용입 형상이 어떻게 변하는지 알아 보았다.

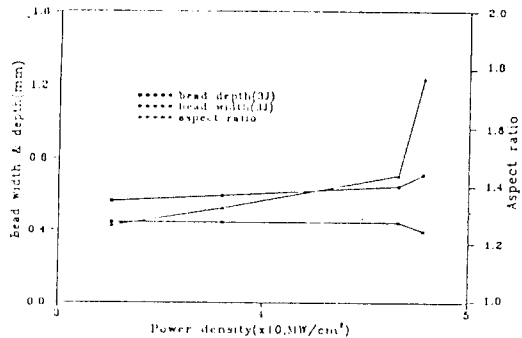


Fig. 6 Bead shape vs. power density

Fig. 6은 파워밀도에 따른 용입 형상을 나타낸 것으로 파워밀도가 높을 수록 용입과 비이드폭의 비가 커짐을 알 수 있다. 그리고 육안 관찰에서는 용접부의 spattering 현상과 용접부의 표면도 거칠고 내부 key hole 흔적이 크게 잔류함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 펄스에너지에 따른 용입상태를 나타낸 것이다. 용입비는 펄스에너지에 관계없이 비슷한 경향을 보이며 spattering 현상과 표면의 상태도 펄스에너지에 관계없이 비슷한 경향을 나타내었다.

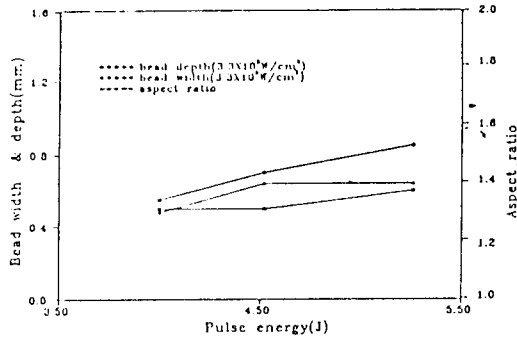


Fig. 7 Bead shape vs. pulse energy.

레이저 용접은 보호가스의 이온과 시편에서 생긴 금속 이온 및 전자들에 의하여 시편의 표면에 발생한 플라즈마 때문에 레이저의 입사 효율이 크게 달라진다. 이러한 플라즈마의 발생위치, 온도, 밀도, 발달 특성 등은 레이저의 파워밀도 보호가스 등에 따라 복잡하게 작용하여 용접특성에 중요한 영향을 미친다<sup>5,6)</sup>.

Hettche 등은 Nd : YAG 레이저 용접에서 발생하는 플라즈마가 레이저의 입사 효율을 높인다고 보고하고 있으며<sup>3)</sup>, 반면에 Yoshiaki Arata 등은 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 플라즈마의 발생이 레이저의 입사 효율을 저하시킨다고 보고하고 있다<sup>7)</sup>.

Fig. 8은 보호가스에 따른 용입시편의 깊이를 나타낸 것이다. 그림에서 x축은 용입이 가장 잘 일어나는 위치에서 시편의 표면쪽으로 촛점을 defocusing 시킨 정도로 나타낸다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 공기중에서 용입이 가장 깊어 일어났다. 이것은 공기 중에 존재하는 산소가 쉽게 알루미늄과 화합하면서 408 Kcal/mol<sup>8)</sup>의 산화열을 제공하고 공기 중의 질소가 쉽게 플라즈마를 형성하기 때문인 것으로 생각된다. 헬륨 상태에서 용입이 작은 것은 열전도도가 큰 헬륨이 펄스 초기에 시편에 흡수되어 생긴 열을 대류작용으로 시편의 냉각효과를 유발하고 key hole 생성 및 프라

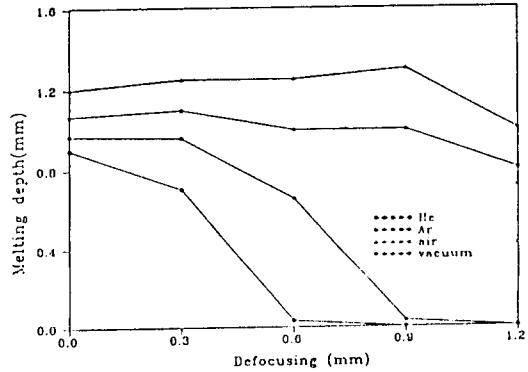


Fig. 8 Weld depth according to shielding gas.

즈마의 source인 전자와 이온의 방출을 어렵게 하기 때문으로 생각된다. 그리고 0.1 torr 정도의 진공상태에서는 펄스 초기에 입사된 에너지는 대류에 의한 손실이 적어지므로 쉽게 key hole을 형성하여 큰 용입비를 얻을 수 있었다. 이러한 관점에서 파워밀도 1MW/cm<sup>2</sup> 이하인 본 실험의 경우, 시편의 용입은 초기 key hole 및 플라즈마 생성에 밀접한 관계가 있으며 이것은 펄스초기의 열발출과 밀접한 관계가 있다. 플라즈마의 분광학적 분석과 그에 따른 레이저의 흡수, 산란, defocusing 등의 역할은 더 연구되어야 할 것이다.

Fig. 9는 레이저의 촛점면의 시편의 위치에 따른 용입 상태를 나타낸다. 용입이 가장 깊게 일어나는 촛점위치는 시편의 표면에서 아래로 존재하며, 용입 비가 최대인 지점도 비슷하게 위치한다. 이것은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 다른 연구가들과 비슷한 경향을 보이고 있는 것으로 보고된 바 있다<sup>9)</sup>. 레이저의 촛점을 용입이 가장 깊이 일어난 위치로부터 시편 안쪽으로

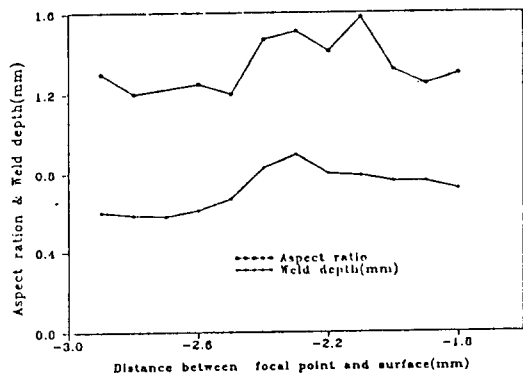


Fig. 9 Bead shape vs. defocusing

위치 시킬때 spattering 현상이 많이 나타났으며 비이드 표면도 거칠었다. 그러므로 실제 레이저 용접시 촛점을 약간 뒷쪽으로 defocusing 시킬 때 더 유리한 것으로 관찰되었다.

### 3.3 Crack 발생

알루미늄 펄스형 Nd : YAG 레이저로 용접할 때 생기는 결합은 다른 CW형 레이저를 이용한 용접과는 달리 응고균열<sup>10)</sup>과 기공의 발생이 용이하다. 특히 1000 계열에서 생기는 응고 균열에 관한 연구는 Lees 등에 의하여 일찍부터 연구되었다<sup>11)</sup>. 기존의 다른 연구들에 의하면 응고균열의 생성 원인은 순수 알루미늄에 용해된 저융점을 형성하는 원소들 때문인 것으로 밝혀졌다. 1000 계열의 순수 알루미늄은 합금과는 달리 저융점 형성물의 원소가 일정하지 않으나 99.7%에서 균열이 가장 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.

이러한 알루미늄 합금의 용접에서 응고 균열을 방지하기 위해서 많은 연구가 있었는데, 크게 3가지로 나눌 수 있다.

첫째로 알루미늄에 용해된 원소의 함량을 조절하여 일정한 온도에서 응고되는 합금의 양을 증대시킴으로써, 응고 초기에 형성된 응고물의 수축 응력을 줄이거나, crack이 발생하였을때 액상의 잔류물이 crack에 의하여 생긴 공간을 채움으로써 응고균열을 없애는 방법<sup>12, 13)</sup>.

둘째로 입열량 및 용접속도를 조절하여 G/R 비(온도 경사/결정의 성장속도) 혹은 GR 값을 조절하거나, Ti, Zr 등을 첨가하여 결정의 크기를 작게하는 방법, 그리고 용접방향에 대하여 열원을 직각방향으로 oscillation 시킴으로써 dendrite의 방향으로 수축 응력에 대하여 저항력이 생기도록 함으로써 응고균열을 감소시키는 방법<sup>14, 15)</sup>.

셋째로 Fig. 10과 같은 용접부의 형상에 따라 bead 모양을 적절히 조절하여 수축 응력이 작용하더라도 응고 균열에 영향을 주지 않도록 용융지의 형상을 조절하는 방법<sup>16)</sup>.

그 밖에 예열처리를 하거나 수축 응력에 반대되는 외부 응력을 가하거나 용융지에 초음파를 계속적으로 가하거나<sup>17)</sup>, 용접 열원을 바꾸어 열응력을 감소시키는 방법 등이 이용되고 있다.

본 연구는 재료의 성분 및 용접 열원이 주어진 KMRR 핵연료 봉단 마개를 균열 없이 용접하기 위하여 2번째와 3번째 방법을 택하여 실험하였다.

Photo. 2는 두장의 알루미늄 판재를 lap joint 용접한 것이다. 같은 재질의 판재 이더라도 lap joint 용접한 것은 bead on plate 용접한 것과 달리 균열이 발생하고 있음을 보여준다. Bead on plate 용접에서는 균열이 발생하지 않으나 plate의 lap joint 용접에서는 균열이 발생하는데, 이것은 저융점을 형성하는 원소의 결정 입계 석출에 의한 연성의 저하 뿐만 아니라, 두 모재에 접하는 용융지(weld pool)의 용액이 용융후 응고할 때 작용하는 수축응력이 두 시편이 만나는 지점에 집중되어 crack 이 계속 dendrite의 경계면 사이로 전파되어 가는 것으로 생각할 수 있다.

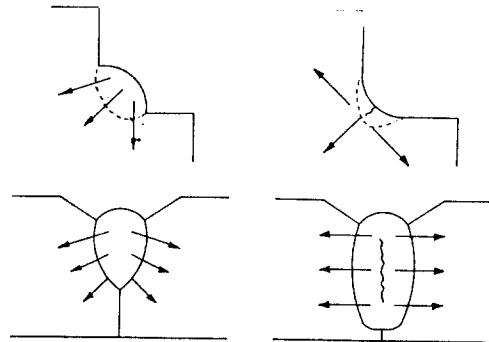


Fig. 10 Effect of weld bead shape on the state of stress.

- a) susceptible to cracking
- b) insusceptible to cracking

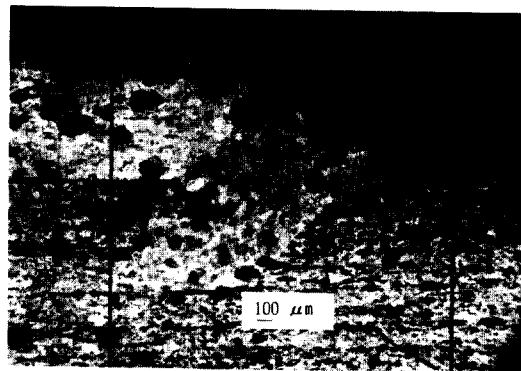
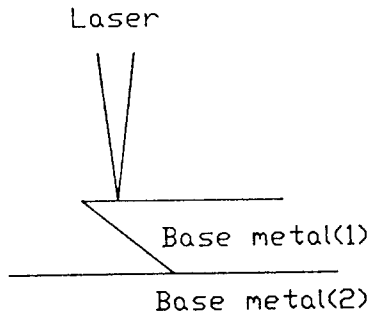


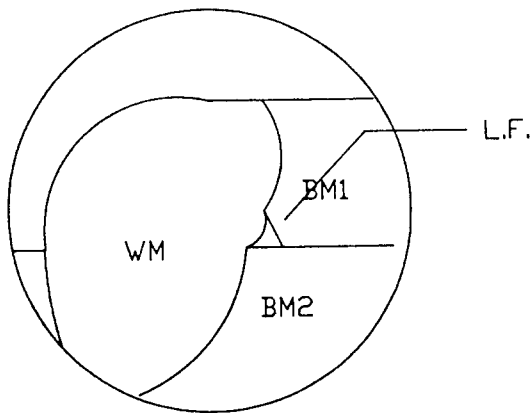
Photo. 2 Solidification cracking in lap joint welding.

균열억제를 위한 첫번째 실험에서는 용접 bead 모양을 변화 시킴으로써 수축 응력의 작용이 crack의 발생에 민감하지 않도록 하였다. 먼저 용융부의 수축응력이 lap joint 되는 곳에서 응력 집중이 일어나지 않도록 두 시편의 용접부 모양을 Fig. 11의 a)와 같이

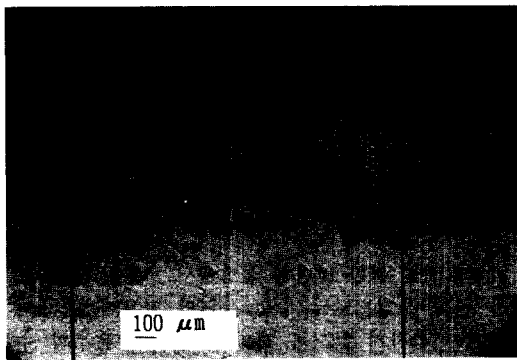
변경하였다. 그 결과 b), c)와 같은 용접부 형상을 얻을 수 있었으며 용접금속의 root부에서 LF(Lack of Fusion) 결함을 관찰할 수 있었으나 crack은 관찰되지 않았다. 그러나 보재가 완전히 응용되어 LF 현상이 없을 때에는 root 부에서 crack이 발생한 것을 관찰할 수 있었다.



a) New welding geometry of lap joint welding.



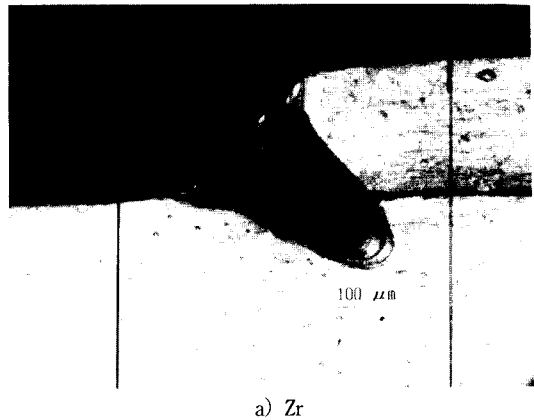
b) Weld cross section (figure).



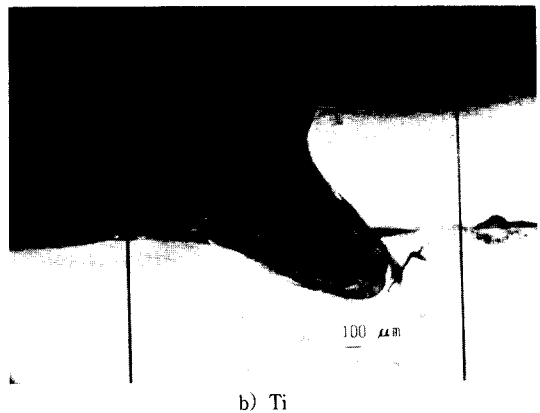
c) Weld cross section in new welding geometry.

Fig. 11 Cross section of the laser welding.

균열억제를 위한 두번째 실험에서는 용접부의 결정 구조를 미세화 시키기 위하여 Ti 혹은 Zr 금속분말을 용접부에 첨가시키는 방법을 선택하였다. Photo 3은 각각의 경우 용접부 절단면을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Ti이나 Zr 원소를 첨가한 경우 균열 현상을 관찰할 수 없다. 이때의 경도 분포는 그림 Fig. 12와 같다. 이것은 Ti와 Zr 원소가 용융된 알루미늄이 응고하는 과정에서 결정핵 역할을 하여 결정의 크기를 작게하고, 작은 결정은 수축응력을 다시 작게 하며, 이러한 미세한 결정 구조는 수축응력의 작용에도 불구하고 쉽게 균열을 발생하지 않기 때문이다. Zr이나 Ti를 첨가하지 않는 용접부는 0.5mm 판재를 bead on plate 용접하여 오히려 낮아짐을 볼 수 있다. 이것은 용접전에 냉각 압연한 시편을 열처리 과정 없이 용접하였기 때문이다.



a) Zr



b) Ti

Photo. 3 Cross section of the laser welding with Ti or Zr powder.

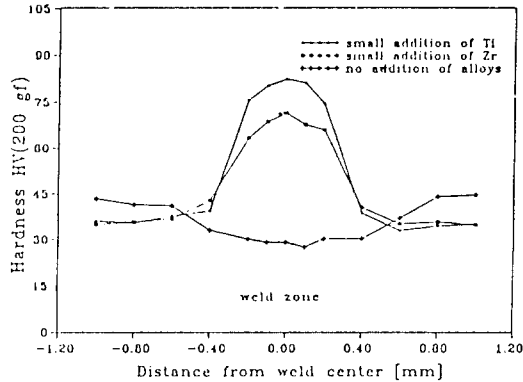


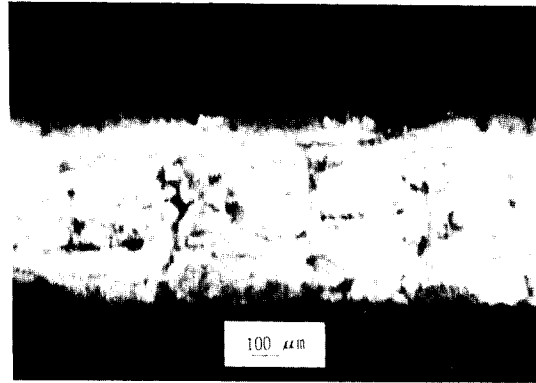
Fig. 12 Hardness traverse of Al 1060 laser weld. (load 200 gf)

### 3.4 기공의 생성

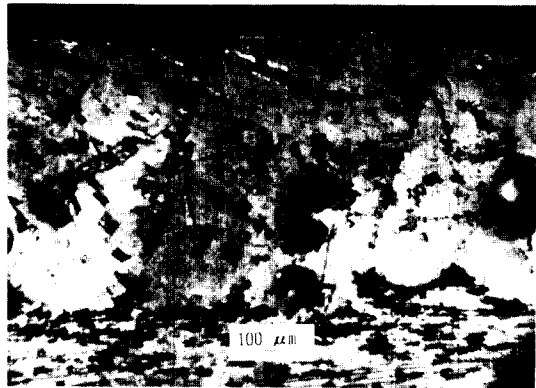
알루미늄은 액체상태의 수소 용해도( $C_L$ )와 고체상태에서의 수소용해도( $C_S$ )의 비 ( $C_S/C_L$ )가 구리나 철에 비하여 1/6배로 작기 때문에 용접부가 고화되면서 고체에 용융되지 못하고 액상에 모이게 되고 이러한 기체가 대기로 방출될 수 있는 충분한 시간과 공간을 만족하지 못하면 용융부에 기공을 형성하게 된다. 이러한 수소는 시편표면의 산화막과 부식된 표면, 시편표면에 붙어있는 오일, 물, 그리스유 등의 이물질, 시편 내부의 수소 등에서 발생한 것이다. EB 용접이나 레이저 용접에서도 이러한 이물질 들은 spattering을 증가시키나, EB 용접이나 레이저 용접에서 발생하는 기공은 레이저 용접중에 발생한 key hole이 함몰되는 과정에서 용접부의 root에 보호가스가 채워진 것으로 알려져 있다.<sup>19)</sup>

용접부 내부에 존재하는 기공은 모재의 물리적 성질 특히 항복점, 연신율, 인장강도, 피로강도 등에 영향을 미치므로<sup>20)</sup>, 용접후 기공의 유무와 용접변수와의 관계를 규명하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 알루미늄의 레이저 용접에서 생기는 기공의 발생이 어떤 용접변수와 관련되는지 살펴보았다.

Photo. 4는 완전용입이 일어난 경우와 그렇지 않은 경우의 기공 발생상태를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 완전관통이 일어난 경우 기공을 관찰할 수 없는데 이것은 용접과정에서 생긴 key hole 이 윗쪽에서부터 함몰 되므로 key hole에 해당하는 공간이 아래쪽으로 밀려났기 때문이다. 고밀도 에너지를 이용한 용접에서 완전 관통이 이루어지면 기공의 생성은



a) Complete penetration



b) Incomplete penetration

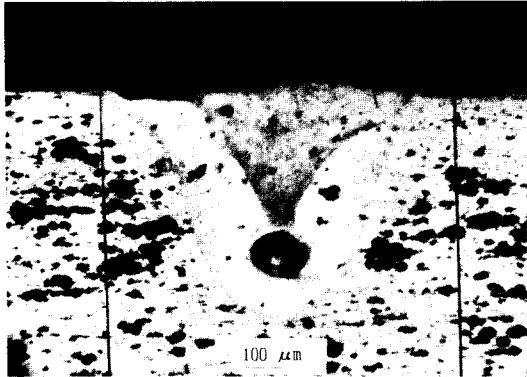
Photo. 4 Porosity generation according to complete or incomplete penetration.

급격히 감소한다.

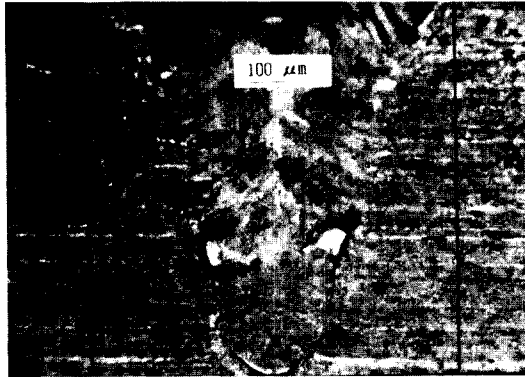
이러한 key hole에 의한 기공의 크기는 보호가스의 밀도에 무관한 것으로 알려져 있는데 Photo. 5는 진공상태에서 용접한 시편과 헬륨 분위기에서 용접한 시편의 기공을 나타낸다. 진공상태에서 용접한 시편은 공기의 압력 부족으로 원형의 모양을 지나지 못하고 key hole의 함몰도중 용융지(weld pool)가 응고 되었음을 알 수 있다. 반면에 헬륨 보호가스에서 용접한 시편은 공기의 압력과 용융액이 평형을 이루면서 응고되어 원형을 이루고 있다. c)는 용접부의 횡단면을 나타낸 것으로 질소를 보호가스로 사용한 것인데 기공의 크기와 밀도가 크게 감소하였다. 질소 분위기에 의한 실험은 N. Nakajima<sup>21)</sup> 등이 1kW급 Nd : YAG 레이저를 이용한 용접 실험에서도 발견되고 있다. 질소를 보호가스로 사용할 경우 기공이 생기지 않은



이유는 크게 두가지로 그 원인을 생각할 수 있다. 첫째로 질소는 헬륨에 비하여 열전도도가 적으므로 용융지의 냉각이 헬륨보다 천천히 일어나므로 용융지 상부의 용융 알루미늄이 key hole에 함몰될 시간적



a) He shielding gas



b) Vacuum(0.1 torr)

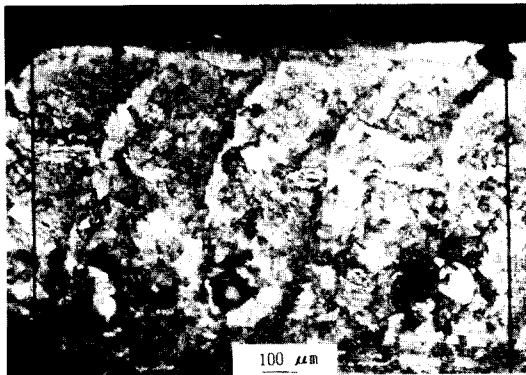


Photo. 5 Shape of porosity according to shielding gas conditions

여유를 가지고 있다. 둘째로 질소는 알루미늄과 쉽게 질화물을 형성하므로 기공의 생성이 쉽게 일어나지 않는다. 그러나 질소를 다량 포함하고 있는 알루미늄은 순수알루미늄과는 그 특성을 달리하므로 이에 대한 충분한 검토가 따라야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 Al-1060 재료를 Nd : YAG 레이저로 용접하기 위해서 수행된 것으로 다음의 결론을 얻었다.

1. 레이저의 출력이 커지면 초점의 크기는 커지고 초점심도는 작아짐으로 초점의 위치를 정확하게 제어하여야 한다.

2. 레이저 에너지를 알루미늄 금속면에 효율적으로 전달하기 위한 파워밀도는  $0.3 \text{ MW/cm}^2$  이상의 파워 밀도가 필요하며, 펄스에너지는  $3 \text{ J}$  이상이 되어야 한다.

3. 파워밀도와 펄스에너지 그리고 초점 위치를 조절함으로써 용입과 bead 모양을 조절할 수 있다.

4. Lap joint 용접에서 용접구조를 특수하게 바꾸거나 Zr 혹은 Ti 금속 분말을 도포하여 용융층에 첨가함으로써 균열이 없는 용접을 할 수 있었다.

5. 레이저용접에서 생기는 기공은 key hole의 함몰 과정에서 생기는 것으로 보호가스의 종류에 따라 크기와 모양이 달라진다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 김덕현, 정진만, 김철중 : 정밀용접용 Nd : YAG 레이저 가공기의 개발, 대한용접학회지, 제9권, 제1호, (1991), pp.32-39
- 2) R. D. Dixon, G. K. Lewis : The Influence of a Plasma during Laser Welding, LA-UR-83-004414, (1983)
- 3) L. R. Hettche, T. R. Tucker, J. T. Dchriempf, R. L. Stegman, S. A. Metz : Mechanical response and thermal coupling of metallic targets to high-intensity  $1.06\mu\text{m}$  laser radiation, J. Appl. Phys., Vol.47, (1976), pp.1415-1421
- 4) D. A. Cremes, G. K. Lewis, D. R. Korzekwa : Measurement of Energy Deposition during Pulsed Laser Welding, Welding J, Vol.70, (1991), pp.159s-167

- 5) G. Sepold : Pulsed solid state lasers for welding metals, *Welding research abroad*, Vol.31, (1985), pp.30-33
- 6) N. G. Basov : Physico-technological special features of laser welding in continuous and pulsed-periodic regimes, *Welding research abroad*, Vol.32, (1986), pp.39-41
- 7) Yoshiaki Arata, Nobuyuki Abe, Tatsuharu Oda : Fundamental phenomena in High power CO<sub>2</sub> Laser Welding, *Transaction of JWRI*, Vol.14, (1985), pp.5-11
- 8) CRC Handbook of Chemistry & Physics, 6-th Ed., printed USA, (1979), pp.d-45
- 9) E. Beyer, K. Behler, G. Herziger : Plasma absorption effects in welding with CO<sub>2</sub> lasers, *SPIE Vol. 1020*, (1988), pp.84-95
- 10) L. A. Weeter, C. E. Albright, W. H. Jones : Development of a Weldability Test for Pulsed Laser Beam Welding, *Welding J.*, Vol.65, (1986), pp.51s-62s
- 11) D. C. G. Less : The Hot-Cracking Tendencies of Aluminum casting alloys, *J. Ints. Metals*, Vol.72, (1946), pp.343-362
- 12) W. F. Savage, E. F. Nippes, J. D. Varsik : Hot-Cracking Susceptibility of 3004 aluminum, *Welding Journal*, Vol.58, (1979), pp.45s-53s
- 13) J. A. Liptak, F. R. Baysinger : Welding Dissimilar Aluminum Alloys, *Welding Journal*, Vol.47, (1968), pp.173s-180s
- 14) S. Kou, Y. Le : Grain Structure and Solidification Cracking in Oscillated Arc Welds of 5052 Aluminum Alloy, *Metallurgical Transactions A*, Vol.16A, (1985), pp.1345-1352
- 15) S. Kou, Y. Le : Nucleation Mechanisms and Grain Refining of Weld Metal, *Welding Journal*, Vol.65, (1986), pp.305s-313s
- 16) J. H. Dudas, F. R. Collius : Preventing Weld Cracks in High-Strength Aluminum Alloys, *Welding Journal*, Vol.45, (1966), pp.241s-249s
- 17) J. Powell, W. M. Steen : Vibro Laser Cladding, *Publication of The Metallurgical Society of AIME*, (1981)
- 18) 김철중 외 : KMRR 핵연료 봉단마개의 레이저 용접연구, *KAERI/RR-8* (1989), pp.60
- 19) E. J. Morgan-Warren : The Application of Laser Welding to Overcome joint asymmetry : *Welding Journal*, Vol.58, (1979), pp.76s-82s
- 20) J. H. Devletian, W. E. Wood : Factors Affecting Porosity in Aluminum Welds, *WRC Bulletin 290*, (1981)
- 21) N. Nakajima, Y. Shimokusu, S. Shono, T. Ishide : Fundamental study on 1 kW class YAG laser welding using optical fibre, *Welding in the World*, Vol.27, No. 5/6, (1989)