

# 다파장 레이저빔을 이용한 알루미늄 합금의 용접특성

김인호, 김정목, 최병규  
(주)한빛레이저

## Welding properties of aluminum alloys by multi wavelength laser

I.H. Kim, J.M. Kim, B.K. Choi  
HBL corporation

### 1. 서론

자동차 및 전자산업에서 제품의 경량화는 효율의 극대화에 가장 중요한 과제로 인식되고 있으며, 경량화 구조의 품질, 신뢰성, 안전성 등을 고려할 때 알루미늄 및 그 합금의 적용 영역이 증가되고 있다. 알루미늄 합금은 높은 경량화율과 높은 비강도 그리고 높은 재활용성 및 공해문제의 저감 등을 해결할 수 있는 가장 유력한 금속으로 합금원소와 적절한 열처리를 통해 최적의 기계적 성질이 얻어지도록 되어 있다. 알루미늄 합금의 개발과 발전은 경량화와 고비강도의 측면에서 오늘날 산업사회가 요구하는 에너지 절감 및 고효율화를 동시에 만족시킬 수 있기 때문에 다양한 분야에서 그 활용을 넓히고 있다.

높은 열전도율과 높은 반사율을 갖는 재료 특성상 용접에 많은 어려움을 가지고 있는 알루미늄 및 알루미늄 합금에 대한 연구가 국내외로 활발히 진행되고 있으며, 레이저를 이용한 용접에 대한 연구도 점점 확대 되고 있다. 레이저를 이용한 알루미늄의 용접연구에서 단일파장의 레이저에 대한 다양한 알루미늄 재료의 용입특성, 결함, 기계적 성질 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 그 결과 알루미늄 합금은 레이저 용접성이 열악하고 균열 및 기공 등의 결함에 취약한 것으로 보고 되어지고 있다.<sup>(ref.1~3)</sup> 본 연구는 알루미늄이 800nm 부근의 파장대에서 특이하게 에너지 흡수가 높은 재료학적 특성(Fig. 1)과 예열작용으로 재료의 온도가 상승할수록 레이저광의 흡수가 증가하는 효과(Fig. 2)<sup>(ref.4~6)</sup>를 이용하여 808nm의 발진 파장을 갖는 연속발진형 다이오드 레이저광과 펄스형 Nd:YAG 레이저광을 혼합하는 용접장치를 통해 집속된 혼합 광으로 용접한 시료와 1064nm의 단일파장 펄스형 Nd:YAG 레이저 빔을 이용하여 용접한 시료의 단면형상 및 결함 등을 비교 관찰하였으며, 다양한 출력조건에서의 Al 4047과 Al 6061의 이음부가 가지는 강도 및 경도 특성, 그리고 밀봉 용접된 시료의 leak test를 수행하여 알루미늄 재료의 용접성 향상 및 그 사용범위 확대를 목표로 하였다.

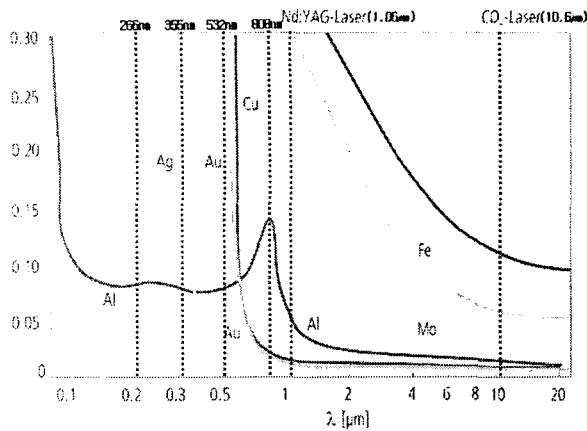


Fig. 1 Absorption of various materials at room temperature

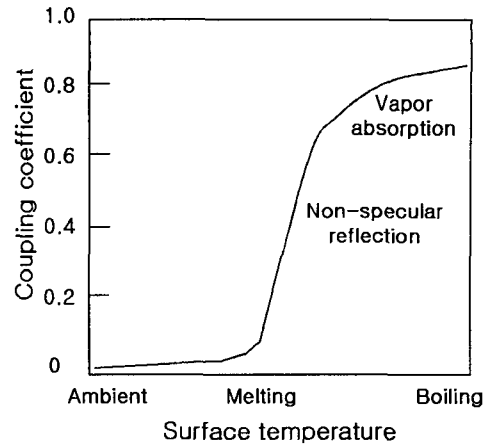


Fig. 2 Coupling coefficient according to material surface temperature

## 2. 실험방법

### 2-1. 시편의 준비

본 연구에서 사용한 알루미늄 합금은 비열처리형 합금인 Al 4047과 열처리형 합금인 Al 6061을 사용하였다. Al 4047과 Al 6061은 30(w)mm X 50(l)mm X 1~1.4(t)mm로 절단하여 Lap joint 및 Butt joint로 구성하여 용접하였다. 시편의 화학적 조성을 아래의 table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of aluminum alloys 4047 and 6061.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Aluminum 4047	12.0	0.6	0.30	0.15	0.10	-	0.20	0.15	bal.
Aluminum 6061	0.5	0.7	0.25	0.15	1.0	0.35	0.25	0.15	bal.

용접전 시편은 알코올을 이용하여 유분 등의 제거과정만 실시하여 용접을 수행하였다. 본 실험에 사용된 장비는 ① 발진파장 1064nm, 펄스형 Nd:YAG 레이저 : 본사의 HBLaser PF500을 사용하였으며, ② 발진파장 808nm, 다이오드 레이저 : laservall FDL50-M0102를 사용하였다. 레이저 발진기에서 발진된 각각의 빔은 FQSI 600mm의 광섬유를 통하여 전송되어, 최종적으로 100mm의 focal length를 갖는 집속렌즈를 통하여 재료의 가공 면으로 전송하였다. 본 실험은 알루미늄 합금이 가지는 펄스형 Nd:YAG 레이저에 대한 용접특성과 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저빔을 혼합하여 용접하였을 때의 용접 특성 비교 및 용접성 향상을 목표로 하였다. 용접시 사용된 장치는 펄스형 Nd:YAG 레이저와 808nm의 파장을 가지는 다이오드 레이저가 동일위치에서 조사될 수 있도록 Fig. 3과 같은 광학계의 구성을 갖으며, 용접에 사용된 각 레이저 빔의 출력형태는 아래의 Fig. 4와 같다. 모든 공정에서 CNC장비를 이용하여 용접속도 및 초점위

치 등의 변수를 정확하게 제어하였으며, 용접된 시편은 광학현미경, 전자주사현미경을 이용하여 용입형상, 미세조직 및 결함 등을 관찰하였고, 기계적 성질을 평가하기 위하여 인장강도 및 경도 시험을 행하였다. 용접부 특성시험의 일원으로 임의 크기의 사각용기를 제작하여 용접한 후 He detector를 이용하여 leak test를 실시하였다.

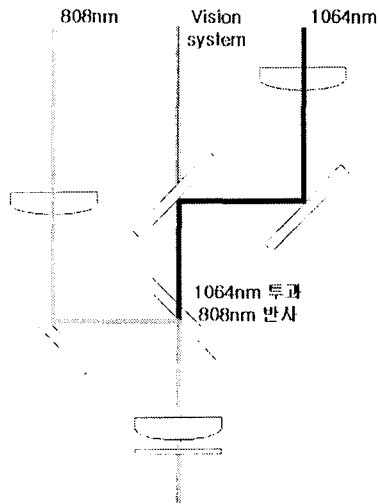


Fig. 3 Configuration of optics

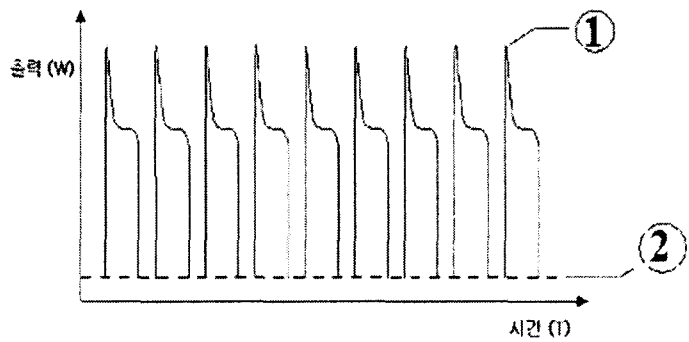


Fig. 4 Output power pattern of mixed laser beam

① ; Output pattern of 1064nm laser beam

② ; Output pattern of 808nm laser beam

### 3. 실험결과

#### 3-1. 808nm 다이오드 레이저의 예열 효과에 대한 검증

레이저 광에 대한 반사도와 열전도도가 큰 알루미늄의 경우 용입형상 및 깊이를 증가시키는데 큰 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 알루미늄이 808nm 부근의 파장대에서 특이하게 흡수가 증가하는 재료학적 특성과 재료의 온도가 상승할수록 레이저빔의 흡수가 증가하는 현상을 이용하여 주용접 열원으로 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하고, 예열처리 효과를 통한 용접성 향상을 기대하여 보조용접 열원으로 다이오드 레이저를 사용하였다. 아래의 Fig. 5에 펄스형 Nd:YAG 레이저를 단독으로 bead on plate 용접한 결과와 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저의 혼합빔으로 용접한 결과, 그리고 모재를 예열한 다음 용접한 결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저의 혼합빔을 사용한 경우 중횡비가 약 0.92로 가장 높은 값을 나타내었으며, 이는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 단독으로 이용한 경우에 비해 약 25%의 중횡비 향상결과를 가진다. 예열을 통해 모재 온도를 상승 시킨 결과 50~150℃의 온도 사이에서는 오차범위내에서 용입깊이의 변화를 관찰할 수 있었으며, 약 200℃ 정도로 예열한 경우 용입깊이의 뚜렷한 증가를 관찰할 수 있었다. 다파장 혼합빔을 사용하였을 경우, 용입깊이는 모재를 200℃로 예열한 조건과 유사한 용입깊이를 나타내었으며, 이러한 결과는 연속출력을 갖는 다이오드 레이저 빔이 국부적인 영역에 대해 예열에 의한 재료의 온도 상승 및 재료의 온도 상승에 따른 레이저 빔의 흡수를 가속화 시킨 결과로 판단된다.

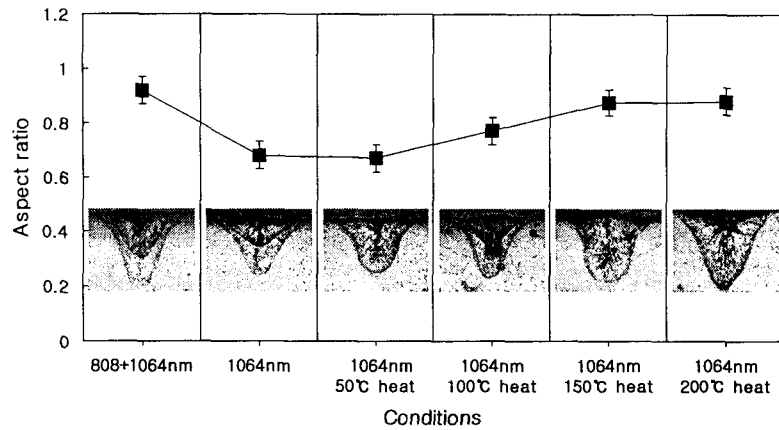


Fig. 5 Transition of aspect ratio for preheating temperature

### 3-2. 이음부에 따른 용입형상

1차적인 알루미늄 합금의 용접특성 평가를 위해 각각의 재료에 bead on plate 용접한 결과를 아래의 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보듯이 Al 4047의 경우(좌) 양호한 표면 비드가 형성되었다. 그러나 Al 6061의 경우(우) 형성된 표면비드에서는 여러 형태의 균열을 확인할 수 있었다. 이러한 두 합금을 butt joint 하였을 경우(중) 형성된 표면비드에서는 Al 6061에서 발생한 균열 등은 관찰되지 않은 양호한 표면비드를 얻을 수 있었다.

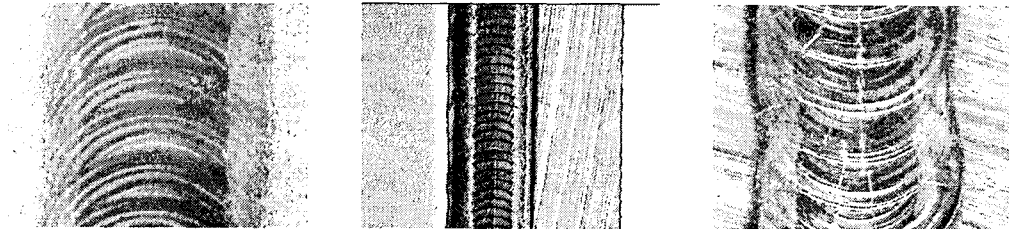


Fig. 6 Bead shapes of aluminum alloys

1차적인 재료특성을 근거로 Al 4047과 Al 6061의 butt joint 및 lap joint 형태의 이음부를 제작하여 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다파장 레이저빔(펄스형 Nd:YAG 레이저 + 808nm 다이오드 레이저)을 조사하여 용입형상 및 이음부가 가지는 미세조직 특성을 평가하였다. Fig. 7은 펄스형 Nd:YAG 레이저만을 사용하였을 경우 형성된 각 이음부의 용입형상이다. Fig. 7에서 보듯이 펄스형 Nd:YAG 레이저를 단독으로 사용하였을 경우, 용접금속에 기공이나 균열 등의 결함은 발생되지 않았으나, Al 4047과 Al6061의 접합면이 투입된 에너지에 비해 적은 접합면을 가진 융합분량의 접합부로 관찰되고 있다. Fig. 8은 동일 출력으로 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저를 동시에 조사하여 형성시킨 용접부의 단면이다. 본 조건의 경우 butt joint나 lap joint의 접합면에서 펄스형 Nd:YAG 레이저만을 조사한 경우와는 달리 융합분량의 형태는 상당 부분 감소하였으며, 이는 건전한 용접금속의 체적증가로 유도될 수 있었다. 이는 동일 출력조건이라 하여도 흡수도가 높은 연속발전형 다이오드 레이저를 동시 조사하므로써 투입된 에너지의 효율 증가에 의한 결과라고 사료된다.

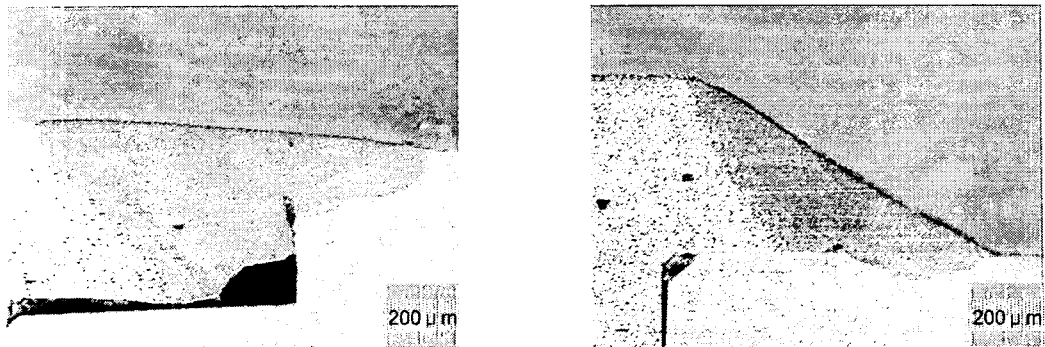


Fig. 7 Cross section of various weld joint by pulsed Nd:YAG laser

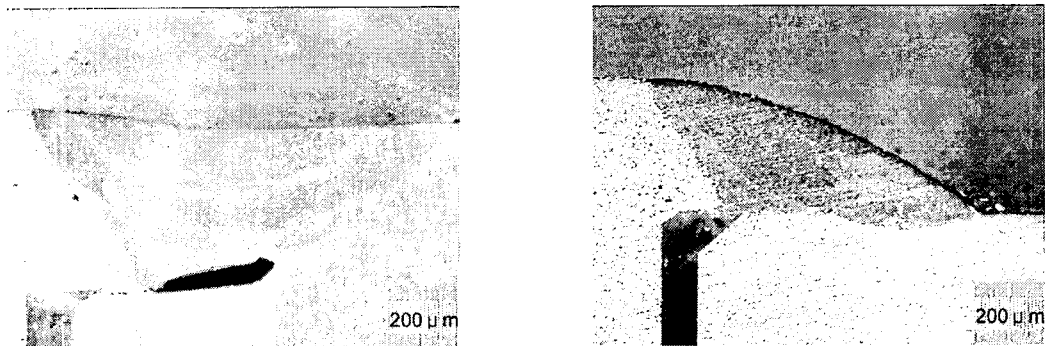


Fig. 8 Cross section of various weld joint by multi-wavelength laser

### 3-3. 용접부 성분 분석

Al 4047과 Al 6061의 butt joint 용접시 형성된 용접부에 대한 합금원소의 조성 분포 및 유동 경향을 관찰하기 위하여 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하여 선분석을 실시하였다. Table 1의 시편의 화학조성에 나타내었듯이 Al 4047과 Al 6061은 합금원소중 Mg과 Si에 대한 명확한 조성 차이를 보인다. 용접시 재분포된 Mg과 Si 성분의 조성변화 및 유동 경향을 아래의 Fig. 9에 나타내었다.

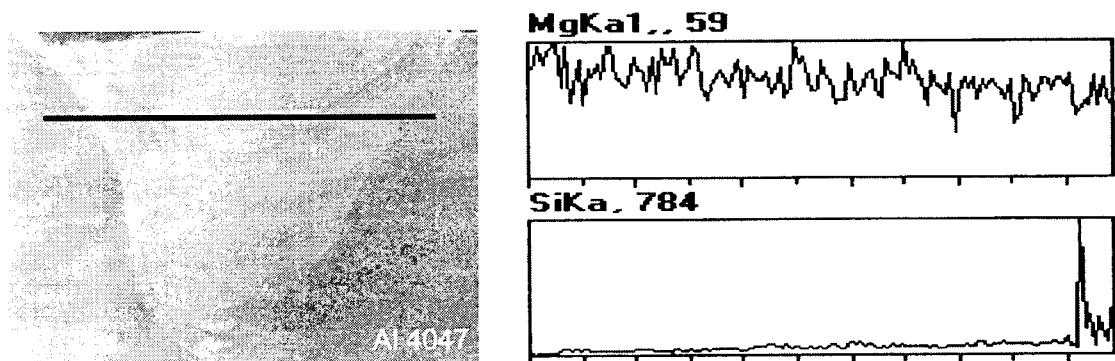


Fig. 9 EDS analysis results of weld metal

Fig. 9의 EDS 분석결과, Mg은 약 1.0%정도를 포함하고 있는 Al6061에서 Al 4047로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있으나 용접에 의해 거의 유사한 농도로 혼합되었음이 시험 결과 나타났

다. Si의 경우도 마찬가지로 약 0.5% 정도를 포함하고 있는 Al 6061의 모재보다 용접금속부분에서 많은 조성을 가지는 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 용접시 레이저빔의 조사위치와 용융금속내의 합금성분의 유동성에 관계된 부분으로서 레이저 용접시 형성된 molten pool의 turbulence flow에 의해 Al 4047에 다량 함유되어 있는 Si이 용접금속 내부로 재분포 되어 고온 균열을 발생시키기 쉬운 Al 6061 합금처럼 다른 조성을 가지는 이음부에서도 건전한 용접부 형성을 가능하게 해준 것으로 판단된다. 아래의 Fig. 10은 용접금속내에 존재하고 있는 초정도로 정출된 Si의 형태를 나타내고 있다. 이 부분에 대한 EDS 분석결과 Si임을 확인할 수 있었는데, 이는 용접시 형성된 것이 아니라 재료 제작공정에서 개량화 처리가 되지 않은 상태의 조대한 초정도로 정출된 것으로 판단되며, 용접 열원에 의해 분해 되지 않은 형태를 그대로 유지하여 용접금속과 모재에 걸쳐 존재하고 있다.

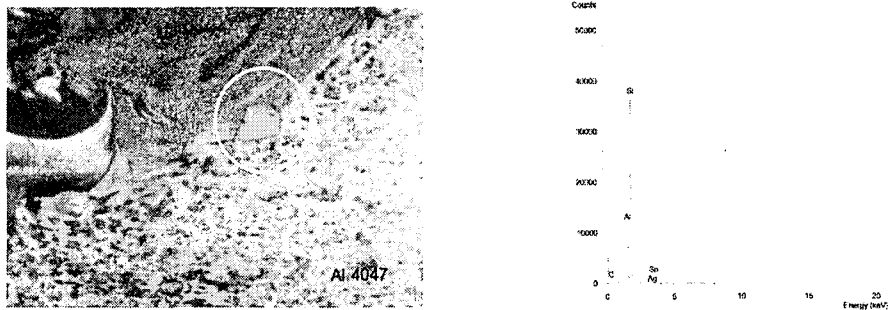


Fig. 10 The shape of Si between weld metal and base metal

### 3-4. 밀봉특성 시험(He leak test)

본 실험에서 용접부의 성능시험의 일부로 He leak detector를 이용한 leak test를 실시하였다. 전기·전자분야에도 그 활용도를 높이고 있는 알루미늄 합금은 외장재로의 사용은 일반화되어 있음에도 불구하고 밀봉특성을 요구하는 최종 마무리 단계에서 유기용매나 soldering등 여타의 방법에 의한 밀봉법이 현재 적용되고 있다. 그러나 이러한 방식들은 내파괴압이라든지, 내식성, 밀봉특성에 한계를 가지고 있으며, 밀봉 용기에서 leak 발생시 다양한 문제를 유발할 수 있다. 사용 분야에 따라 다르긴 하지만 leak 발생시 화재, 폭발, 경제적 손실등 치명적인 영향을 주는 경우가 발생하므로 이러한 문제점을 극복하기 위해 용기의 end cap이라든지, 밀봉 용기의 cover등으로 알루미늄 합금을 적용하고자 할 때, 그 성능을 극대화시킬 목적으로 레이저 용접부의 밀봉특성을 실험하였다. 본 실험을 위해 제작된 임의 형태의 사각용기는 Al 6061의 재료를 사용하였으며, 용기에 He gas를 충전 후 Al 4047 재료로 cover를 제작하여 용접을 실시하였다. leak test에 사용된 장비는 Aleatel ASM 122D 모델로 최소감지능력은  $1 \times 10^{12}$  mbar · L/sec (mbar · L/sec 단위는 1mbar에서 1L부피안에 들어있는 기체분자 개수만큼 1초에 빠져나갈 수 있는 양)이다. 용접된 시편은 별도의 시험용 챔버에 투입하고 leak detector와 연결하여 침투한 leak량을 검사하였으며 그 결과를 아래의 Fig. 11에 나타냈다. 시험은 총 2개의 시편에 대해 실시되었으며, 시험 시작시점에서 재료표면 등에 존재하고 있던 He은 약 2분정도 경과 후에 모두 검출되었으며, 검사 시작 5분 후에는 일정한 수준이상의 밀봉특성을 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 leak rate 값은 알루미늄의 밀도 등의 재료특성을 감안한다면 밀봉특성에 전혀 영향을 미치지 않는 용접부가 형

성된 것으로 판단된다.

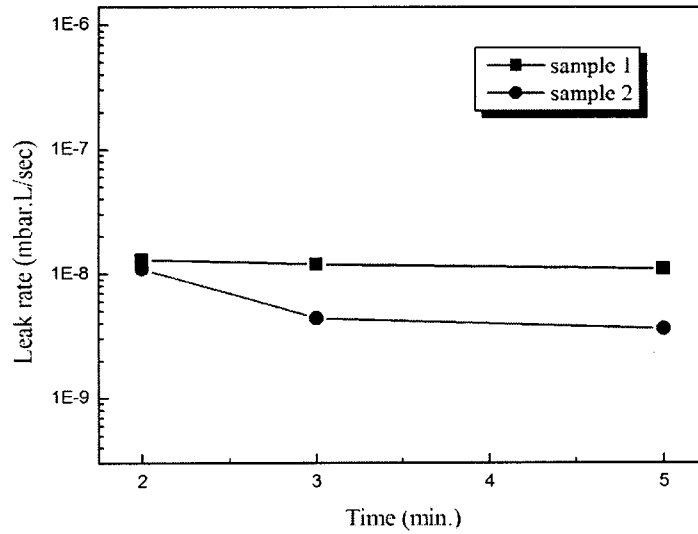


Fig. 11 Leak test result by He detector

### 3-5. 기계적 성질의 평가

알루미늄합금의 기계적 성질을 평가의 일환으로 용접부에 대한 경도 변화를 측정을 하였다. 경도 측정은 Al 6061과 Al 4047 합금의 모재 자체 경도 및 Al 4047과 Al 6061의 butt joint 형태의 용접부에 대해서 평가하였다. 아래의 Fig. 12에 용접부가 가지는 경도 경향을 나타내었다.

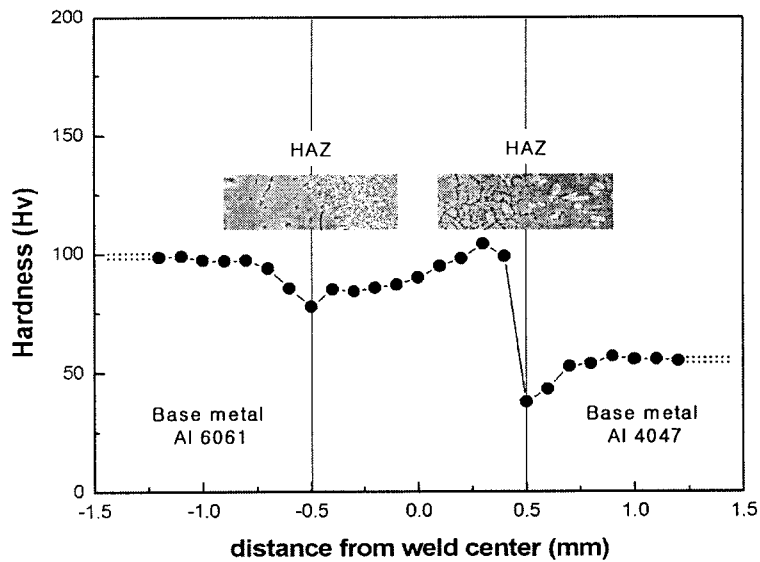


Fig. 12 Hardness tendency of laser weld

Fig. 12에서 보듯이 경도경향은 열처리형 합금인 Al 6061의 모재에서 가장 높은 값을 나타내었으며, Al 4047 모재는 Al 6061 모재의 약 50% 정도 되는 경도 값을 가지는 것으로 확인되었다. 용접금속에서의 경도분포 특성 중 각각의 열영향부에서는 일반적으로 알려진 것과 같이 연화

뒀이 관찰되었으며, 특이하게 용접금속의 경도값이 Al 6061에 Al 4047 쪽으로 갈수록 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다.

### 3-6. 결함발생과 그 방지책

일반적인 시편의 준비과정을 통하여 제작된 Al 4047과 Al 6061 합금의 butt joint 및 Lap joint에서는 용접금속내 기공의 발생은 관찰되지 않았다. 레이저 용접시 일반적으로 알려진 용접금속의 root 중심부에 형성되는 키홀 메커니즘에 의해 형성되는 원형의 기공 및 수소에 의한 수~수십 $\mu$ m의 작은 기공 등이<sup>(ref.7~8)</sup> 발생되지 않은 가장 커다란 요인은 우선 일정한 gap의 존재로 인해서 가스의 배출이 이음부의 하단으로 방출이 쉽게 되었으며, 다이오드 레이저에 의한 응고속도 지연 등 기공의 발생요소로 작용하는 불순물이나 기타 여러 가지 요소가 쉽게 통제되었다는 점에서 기공의 발생을 최대한 억제시킬 수 있었던 것으로 판단된다. 아래의 Fig. 13에 본 실험에 사용한 동일한 재질(Al 4047 + Al 6061)의 동일 이음부 형태에서 발생한 기공의 형태를 나타내었다. 본 실험에서 기공이 발생한 조건은 동종 재질에 표면처리층(gold plating)을 형성시킨 시편에서 얻을 수 있었으며, 모든 실험 조건 등이 동일한 점을 고려한다면 기공 발생의 주원인은 표면처리층(gold plating)이라는 것을 판단할 수 있게 된다. 본 연구에서 관찰할 수 있듯이 알루미늄 합금의 용접시 상이한 물성을 가지는 이종재질의 plating층이나 불순물의 포함은 용접금속내의 기공형성의 원인으로 작용할 수 있는 주요한 원인이 된다.

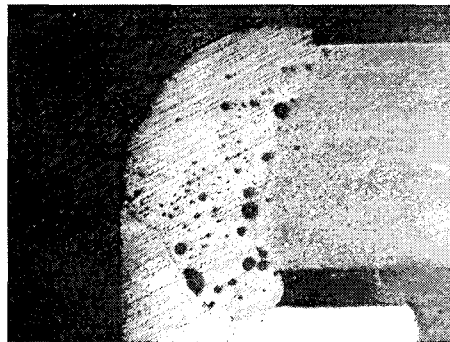


Fig. 13 Shapes of porosity in weld metal

## 4. 결론

열처리형 합금인 Al 6061과 비열처리형 합금인 Al 4047을 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저를 동시 조사하여 용접한 경우, 용입특성 및 다양한 형태의 이음부에 대한 용접부 형성 특성, 용접부가 가지는 밀봉특성 및 경도, 결함에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저를 동시에 조사할 경우, 재료의 온도 상승 및 재료 온도 상승에 따른 레이저 빔 흡수의 증가로 인해 용입깊이 향상을 얻을 수 있다.
2. 다양한 형태의 이음부에 대해 용접시 펄스형 Nd:YAG 레이저만을 사용하여 용접하였을 경우, 투입된 에너지에 비해 융합불량 형태의 접합면이 다수 관찰되었으나, 동일 출력의 다파장 혼합빔을 사용한 경우 융합불량이 상당부분 감소된 결과를 보인다.



3. Al 6061과 Al4047을 이용한 기밀 용기 제작시 우수한 밀봉특성을 갖는 용접부를 형성시킬 수 있었다.
4. 이종 합금 용접부의 경도 측정 결과, 두 합금의 열영향부는 각각의 모재 경도 보다 연화됨을 확인할 수 있었으며, 특이하게 용접금속 내부의 경도는 Al 6061과 유사한 경도값을 가지는 것으로 확인되었다.
5. 표면 처리한 용접부의 결함 특성중 재료의 표면처리층이 용융금속내부로 혼입되어 발생한 기공을 관찰할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) Katoh, M. 1996, Journal of light metal welding and construction 34(4): 42.
- 2) Woods, R. A. 1974. Hydrogen in metals. pp.713-725. ASM International, Materials park, Ohio.
- 3) Cieslak, M.J., and fuerschbach, P.W.1988. Metallurgical transaction 19B: 319-329
- 4) J. H. Dudas, F. R. Collius: Preventing Weld Crack in High-Strength Aluminum Alloys. Welding Journal, Vol.45 (1996), pp.241s-249s
- 5) Bramson, M.A. 1968. Infrared radiation: A handbook for application, p.127, Plenum press, NewYork, N.Y
- 6) Duley, W.W. 1983. Laser processing and analysis of materials, p.71, Plenum press, New York, N.Y.
- 7) 김철중 외: KMRR 핵연료 봉단마개의 레이저 용접연구, KAERI/RR-8 (1989), pp.60
- 8) E. J. Morgan-Warren: The Application of Laser Welding to Overcome joint asymmetry: Welding Journal, Vol.58, (1979), pp.76s-82s