

알루미늄 합금의 레이저 용접

윤 종 원

Laser Welding of Aluminum Alloys

Jong Won Yoon

1. 서 언

질량 대비 강도비가 높고 내식성이 양호하여 구조재로서 널리 사용되는 알루미늄 합금의 용접을 위해서는 GMAW, GTAW 등 아크 용접이 일반적으로 적용되고 있으나 고출력 laser 용접이 철강 재료에 성공적으로 적용된 이래, 알루미늄 합금의 경우에도 연속파 CO₂ laser 및 펄스파 Nd:YAG laser를 이용한 용접이 실용화되고 있다¹⁾. 아크 용접의 경우 장치가격이 저렴하나, 용접부의 기계적 성질이 열화되는 영역이 넓고, 변형량이 큰 단점이 있다. 이에 반해 laser 용접은 장치비가 고가이며 정밀한 용접 이음부 준비가 필요하나, 빠른 용접속도와 적은 변형량, 급냉에 의한 용접부 조직 미세화, 폭이 좁은 열영향부 등 유리한 특성이 있으며, 이 결과 레이저 용접부의 기계적 성질은 아크 용접부에 비해 우수한 것으로 알려져 있다. 특히 Nd:YAG laser의 경우 광 fiber를 이용한 laser 비임 전송과 로보틱스를 이용한 광집속부의 3차원 이동에 의해 용접 이음 궤적이 평편하지 않거나 직선이 아닌 경우에도 자동화 용접이 가능한 것으로 알려져 있다. 본고에서는 그 사용이 증대하고 있는 알루미늄 합금의 레이저 용접에 관하여 기술하고자 한다.

2. 알루미늄 합금의 용접

2.1 알루미늄 합금의 분류

일반적으로 강도가 낮은 알루미늄 순금속을 용접 구조재로 사용하는 경우는 거의 없으며 알루미늄 순금속에 비해 기계적 성질이 개선된 알루미늄 합금이 용접 구조물 재료로 주로 사용된다. 알루미늄 합금을 주물

재 (casting products)와 가공재 (wrought products)로 분류할 때, 알루미늄 합금 주물재 (casting products)로서는 사형 주물, 영구 주형 주물 및 다이 캐스팅이 있으며 알루미늄 합금 가공재 (wrought products)로서는 압연재 (clad재 포함), 압출재 등이 있다. 주물재는 가공재에 비해 용접하는 경우가 많지 않으며, 용접에 사용되는 알루미늄 합금은 가공재가 대부분이다.

알루미늄 합금을 열처리형과 비열처리형으로 분류할 때 알루미늄 합금의 주요 강화 요인이 다르므로 이들의 용접성 및 용접후의 기계적 성질등도 열처리형과 비열처리형 알루미늄 합금에 따라 크게 다르다. 따라서 본고에서는 알루미늄 합금의 용접성을 열처리형 및 비열처리형으로 구분하여 기술한다.

한편, 알루미늄 합금 가공재는 Aluminum Association (AA) 분류 방법에 따라 Table 1에 보여진 바와 같이 주요 합금원소에 따라 분류된다.

Table 1 AA classification of aluminum alloys.

1xxx Pure Aluminum
2xxx Al-Cu
3xxx Al-Mn
4xxx Al-Si
5xxx Al-Mg
6xxx Al-Mg-Si
7xxx Al-Zn-Mg

이들 합금중 2000, 6000, 7000 계열의 열처리형 알루미늄 합금은 미세한 석출물이 전위의 이동을 방해하여 강도를 높이는 시효 경화 (석출 경화)가 주 강화 기구로 알려져 있으며, 1000, 3000, 5000 계열의 비열처리형 알루미늄 합금은 고용 경화 및 가공 경화에 의해 강화되는 것으로 알려져 있다. 알루미늄 합금의

AA 분류 4자리 수와 함께 알루미늄 합금의 가공 경화 정도, 열처리 상태등을 나타내는 temper 표시가 보통 이어진다.

2.2 알루미늄 합금의 용접성

알루미늄 합금의 용접시 용접금속과 열영향부를 포함한 용접부의 기계적 성질은 일반적으로 모재에 비해 열화되는 것으로 알려져 있다. 알루미늄 합금 용접부 기계적 성질의 열화 정도는 일차적으로 모재의 강화 기구, 합금 조성, temper 상태등에 의존하며, 이차적으로 용접공정, 용접조건에 의한 용접부의 미세 조직 변화, 용접 결합등에 의존한다. 예를 들면, 석출경화가 주 강화 요인인 열처리형 알루미늄 합금의 경우 용접 열원에 의해 용융된 용접금속에서는 석출물이 용해되고, 열영향부에서는 석출물이 용접열에 의해 성장함으로써 강도가 저하되는 것으로 알려져 있다. 가공경화에 의해 강화되는 비열처리형 알루미늄 합금의 경우 용접 금속과 열영향부는 각각 응고조직 상태와 어닐링된 상태로 되므로 역시 모재에 비하여 강도가 저하된다.

알루미늄 합금의 용접전 temper 상태로 모재의 강도가 대부분 결정되므로 이들 알루미늄 합금의 temper 상태를 파악하는 것이 용접부 기계적 성질의 열화 정도를 예측하는데 도움이 된다. 일반적으로 최대 강도를 갖도록 시효 처리 또는 가공 경화된 알루미늄 합금을 용접할 경우 용접부의 강도는 모재에 비교하여 현저히 낮고, 어닐링 상태의 모재를 용접하는 경우 모재와 용접부의 강도 차이는 적게 된다.

위에서 기술한 바와 같이, 알루미늄 합금 용접부의 미세조직이 모재의 미세 조직과 다르게 되어 용접부의 강도가 열화됨과 아울러 용접부에 용접 결합이 존재하면 이 불연속부가 용접부 강도를 감소시키는 효과를 가져오게 된다. 즉, 알루미늄 합금 용접시 흔히 발생하는 기공, 응고균열, 열영향부 결정립계 액화균열등이 용접된 알루미늄 합금 구조물의 강도에 영향을 미치게 된다.

2.2.1 용접금속

열처리형 알루미늄 합금 용접금속에서는 석출물이 용해되어 석출경화 효과를 잃게 되고, 비열처리형 알루미늄 합금 용접금속은 가공경화 효과를 잃게 되어 두 경우 모두 용접 금속의 강도가 모재에 비해 저하된다. 특히 열처리형 알루미늄 합금 모재가 용접전에 높은 강도를 갖도록 시효 처리 (예, T3, T4, T6, T8 등) 된 경우 용접 금속의 강도는 모재에 비해 현저히 저하한다. 용접금속, 즉 용접중 용융되었던 구역은

Fig. 1에서 보듯이 알루미늄 합금의 액상선 (liquidus line) 온도 이상으로 가열되어 석출물들이 재용해되고, 이후 이어지는 응고 냉각중에는 용접 열 사이클에 의해 급냉되어 과포화 고용체 (super saturated solid solution) 상태로 되어, 원래의 모재가 가지고 있었던 석출물에 의한 강화 효과를 잃기 때문이다²⁾. 그러나 Al-Zn-Mg의 7000계열 합금의 경우 용접후 상온에서의 자연시효에 의해 용접금속 및 열영향부의 강도가 비교적 신속히 복원되는 것으로 알려져 있어 Al-Cu의 2000 및 Al-Mg-Si의 6000계열 열처리형 알루미늄 합금에 비해 용접부의 강도 열화가 적은 것으로 보고되고 있다³⁾.

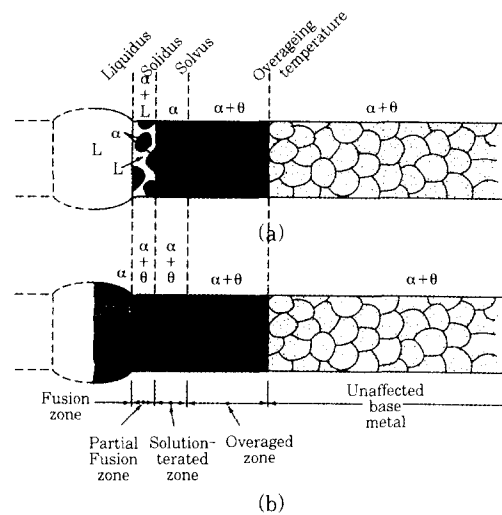


Fig. 1 Microstructural change of heat treatable aluminum alloy welds (a) at peak temperature and (b) at room temperature after slow cooling.

비열처리형 알루미늄 합금의 경우 용접금속, 즉 용접중 용융되었던 구역은 액상선 이상의 온도 영역으로부터 냉각되면 응고 조직 상태로 존재하고 이곳에서는 용접전 모재가 가지고 있었던 가공경화 효과가 소멸된다. 따라서 용접전 알루미늄 합금의 가공 경화 정도가 클수록 용접금속에서의 강도 저하가 뚜렷하다. 반면 용접전 알루미늄 합금이 어닐링된 상태에 있다면 용접부의 강도 저하는 현저하지 않게 된다.

이상에서 기술한 바와 같이 일반적으로 비열처리형 및 열처리형 알루미늄 합금 모두 용접금속의 강도는 모재의 강도에 비해 저하하나, 그 열화 정도는 용접전 알루미늄 합금의 템퍼 상태, 즉 가공경화 정도 및 열처리 상태에 의존한다.

2.2.2 열영향부

열처리형 및 비열처리형 알루미늄 합금 열영향부의

강도 역시 모재에 비해 저하하는 것으로 알려져 있다. 열처리형 알루미늄 합금의 경우 용접금속 바로 주위의 fusion boundary에 가까운 영역에서는 Fig. 1에서 보듯이 액상선(liquidus line)과 고상선(solidus line) 사이의 고상과 액상의 공존온도 영역까지 가열되어, 결정립계에 존재하는 저융점 성분들이 일부 용융되는 부분용융구역(partial fusion zone)이 형성된다. 이 구역에 용접 열사이클에 의한 가열, 냉각에 의해 발생하는 국부적인 응력이 작용하면 결정립계에서 액화 균열(grain boundary liquation crack)이 발생하는 경우가 있어 용접 금속에서 발생하는 응고균열(solidification crack)과 함께 용접부에서 발생하는 주요 용접 결함으로 알려져 있다.

한편 Fig. 1의 고상선(solidus line)과 solvus line 사이, 즉 단상(single phase) 영역 온도까지 가열된 열영향부중 용접금속쪽에 가까운 영역은 용체화 처리(solution treatment)되고 용접 열사이클에 의해 급냉되므로 과포화 고용체 상태에 있게 된다. 따라서 이 구역의 용접후 강도는 저하되나 시효처리(ageing)하면 강도를 다시 향상시킬 수 있다. 열영향부중 solvus line 이하의 용접금속에서 멀리 떨어진 구역은 석출물이 조대하게 성장하는 과시효 상태(overageing)에 놓이게 된다. 따라서 열처리형 알루미늄 합금 열영향부의 강도 또한 모재에 비해 열화되는 것을 알 수 있다.

주로 가공경화에 의해 강도를 향상시키는 비열처리형 알루미늄 합금의 경우, 열영향부는 용접열에 의해 어닐링 효과를 받게 되어 재결정 및 결정립 성장이 일어나게 되고, 따라서 가공경화 효과가 소멸되어 열영향부의 강도가 모재에 비해 열화된다.

이상에서 기술한 바와 같이 열처리형 및 비열처리형 알루미늄 합금 모두 열영향부의 강도 또한 모재에 비해 열화되는 것을 알 수 있다.

2.3 알루미늄 합금 용접시 주요 용접 결함

알루미늄 합금의 레이저 용접시 아크 용접의 경우와 마찬가지로 주요 용접 결함으로서 고온균열(hot crack)과 기공(porosity)의 발생이 현저한 것으로 알려져 있다. 각 용접 결함의 발생원인, 발생기구, 방지책을 다음에 기술한다.

2.3.1 고온균열

용접후 냉각이 완료된 후 수시간, 수일, 수주 경과후 낮은 온도에서 발생하는 저온 균열(cold crack)에 대비하여 용접시 응고과정중 높은 온도 영역에서 발생하는 균열을 고온 균열(hot crack)이라 정의한다. 용융

금속의 응고단계에서 고상과 액상 공존온도 영역에서 응고 마지막 단계에 발생하는 것으로 알려진 응고 균열(solidification crack)과⁴⁾ 용접 열사이클에 의해 액상선과 고상선 사이의 고상 액상 공존 온도 영역으로 가열된 열영향부에서는 결정립계에 존재하는 저융점 성분이 용융되고 여기에 국부적인 응력이 작용하여 발생하는 것으로 알려진 열영향부 결정립계 액화 균열(Heat affected zone grain boundary liquation crack)이 고온균열에 속한다.

특히 열처리형 알루미늄 합금은 고온균열 감수성이 높은 경우가 많아 용접 금속에서는 응고균열(solidification crack)이, 열영향부에서는 결정립계 액화 균열(grain boundary liquation crack)이 발생할 가능성이 큰 것으로 알려져 있다⁵⁾. 이들 고온 균열 감수성은 특히 석출경화형 2000, 6000, 7000계열 합금의 경우 높은 것으로 알려져 있다. 이들 균열은 용접부 기계적 성질 열화의 주요한 원인으로도 작용한다. Fig. 2 및 Fig. 3에 각각 Al-Mg-Si 6000 계열 알루미늄 합금 레이저 용접부에서 발생한 응고균열 및 결정립계 액화 균열의 예를 보여주고 있다.

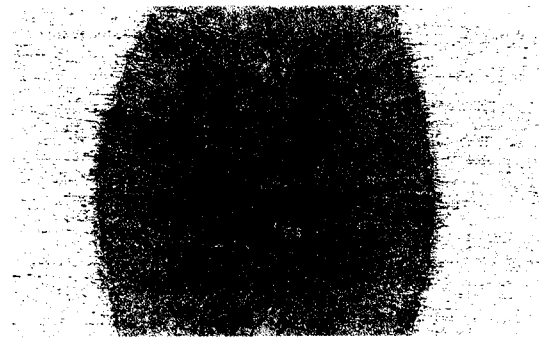


Fig. 2 Typical weld metal solidification crack observed in laser weld cross-sections of 6.4 mm thick 6061 alloy.



Fig. 3 Typical HAZ grain boundary liquation cracking in the laser welded 6061 alloy.

한편 2원계 및 3원계 알루미늄 합금의 주조 또는 아크 용접시 조성에 따른 고온균열 감수성의 변화가 많은 연구자에 의해 조사되어 Fig. 4에 보여진 바와 같이 주요 합금 원소 조성 증가에 따라 고온 균열 감수성이 증가하여 최대치에 이르고, 이보다 합금원소 조성이 증가하면 고온 균열 감수성이 감소되기 시작하는 것이 일반적인 경향으로 알려져 있다⁶⁾.

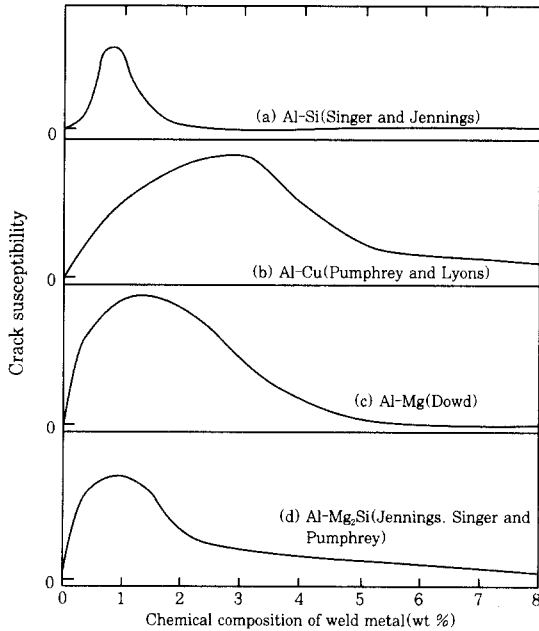


Fig. 4 Effect of alloying content of weld metal on crack susceptibility in binary aluminum alloys.

따라서 이들 고온 균열 발생을 억제하기 위해서는 용가재를 사용하여 용접 금속의 조성을 조절하여 고온균열 감수성이 높은 조성 영역을 피하도록 하는 방법이 주로 사용되며, 한편으로는 결정립 미세에 의해 균열 감수성을 낮추기 위해 모재나 용가재에 Ti, Zr 등의 결정립 미세화 원소를 적정량 첨가하도록 하기도 한다. Al-Mg 합금 레이저 용접시 고온균열 감수성의 거동은 Fig. 5에서 보듯이 주조나 아크 용접에서와 비슷한 양상을 나타내는 것이 확인되었으며 이에 따라 레이저 용접시 고온 균열 발생을 제어하기 위한 방안으로서 용가재를 사용하는 레이저 용접 방법이 제안되었다⁴⁾.

2.3.2 용접 금속에서 발생하는 기공

기공은 용융금속의 응고중 용융금속내에 용해되었던 기체가 응고 단계에서 방출되지 못하고 응고금속 내에 갇혀 생성된 불연속부이다. 과열된 용융금속내에 용해된 가스는 냉각에 따라 용해도가 저하되고 응고온도에서의 급격한 용해도 차이에 의해 응고온도에서 기포가

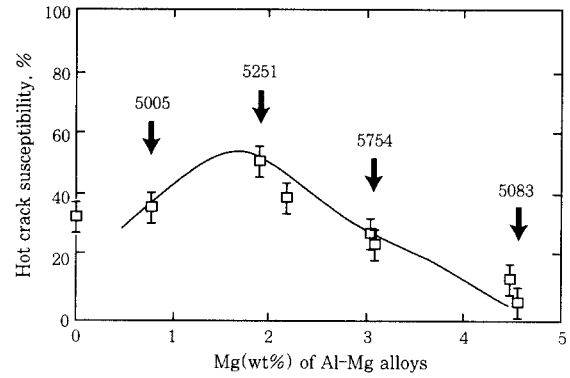


Fig. 5 Relationships between Mg content and crack susceptibility of laser welded Al-Mg alloys.

형성되며 이 기포가 방출되지 못하고 응고금속 내에 갇히게 되어 기공으로 남게된다. 기공이 용접부에 존재하면 기공의 크기, 형태, 분포, 량에 따라 용접부의 기계적 성질, 특히 연신율이 영향을 받으므로 용접금속내의 기공 발생을 제어하는 것이 중요하다.

알루미늄 합금 용접시의 기공 발생원이 여러 연구자에 의해 조사되어 수소가 알루미늄 합금 용접금속에서 발생하는 기공의 주요 원인임이 보고되어 있으며^{7,8)}, 이것은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 알루미늄 합금의 응고온도에서 수소의 용해도 차이가 매우 큰 때문인 것으로 알려져 있다. 알루미늄 합금 용접시 수소의 주요 발생원은 용접모재인 알루미늄 합금과 용가재인 용접 와이어, 용접봉등의 표면에 형성된 산화피막에 흡착되어 있는 수분, 보호가스중의 미량 수분, 용접중 난류에 의해 대기로부터 용접 분위기로 혼입되어 들어온 습기등이다. 이 수분은 용접중 용접열에 의해 다음과 같이 수소로 분해된다.



용융 알루미늄의 수소 용해도가 Fig. 6과 같이 높기 때문에 알루미늄 합금 용접시 수소는 용융금속에서 용이하게 용해된다. 용융금속이 응고 단계에 이르면 수소의 용해도가 응고온도 (약 660℃)에서 급격히 감소하므로 가스로 방출되게 되고 이중 응고된 금속내에 갇힌 수소가 기공으로 남게 된다.

Fig. 7에 6 mm 두께의 5083 Al-Mg 합금의 레이저 용접시 용접 조건에 따른 용접부 단면 형상과 아울러 용접금속에 존재하는 기공의 예를 보이고 있다. 알루미늄 합금 용접시 기공 발생을 억제하기 위해서는 모재 표면을 탈지, 세척하고 건조시켜 흡착 수분을 증발시키고, 용접 와이어의 보관시 수분이 접촉하지 않도록 하고, 보호가스의 공급중 용접 분위기에 대기중 습기가 혼입되지 않도록 한다.

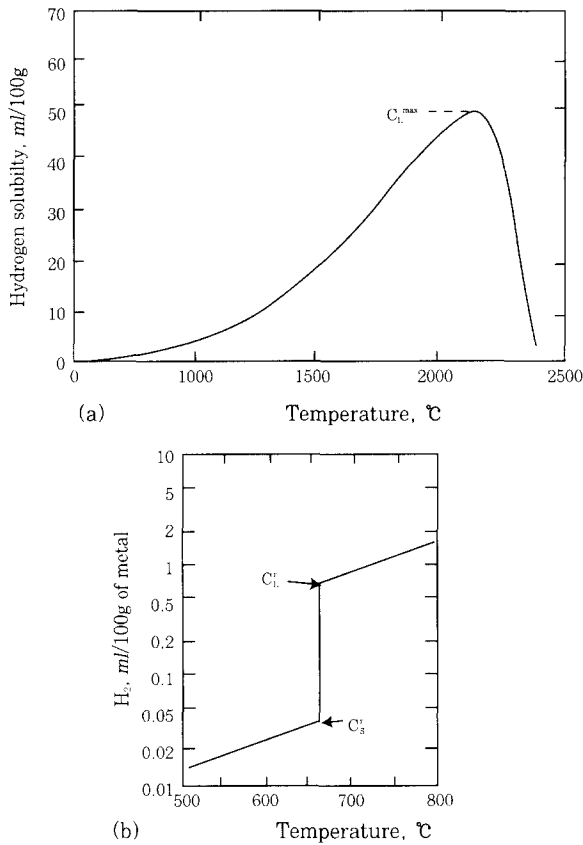
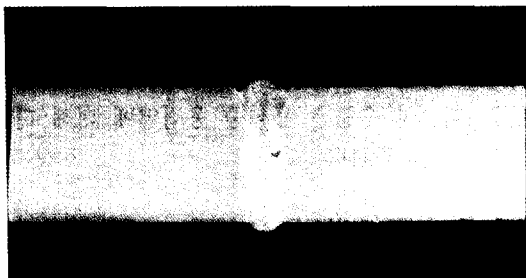


Fig. 6 Solubility of hydrogen in aluminum (a) as a function of temperature, and (b) at the melting point.



a) Laser power 10 kW, weld speed 5m/min



(b) Laser power 3.5 kW, weld speed 1m/min

Fig. 7 Variation of weld profiles and porosity morphology for 6 mm thick 5083 Al-Mg alloy laser welds made under different welding conditions.

3. 알루미늄 합금의 레이저 용접

3.1 레이저 용접 장치

알루미늄 합금 레이저 용접에 사용되는 산업용 고출력 레이저로 파장 10.6 μm 의 CO₂ laser 및 파장 1.06 μm 의 Nd:YAG laser가 주로 사용된다. CO₂ laser의 경우 수~십수 kW의 연속파 (continuous wave) laser를 Nd:YAG laser의 경우 수 kW의 pulse파 laser를 사용한다. 레이저 비임을 집속하기 위해 Plano-convex lens 또는 parabolic mirror 등의 광집속 장치를 laser 종류 및 출력에 따라 선정하여 사용하며, CO₂ laser의 경우에는 반사 미러에 의한 비임 전송이 일반적이나, Nd:YAG laser의 경우 광 fiber에 의한 laser 비임 전송이 일반적이다. 광집속 장치 주위에는 플라즈마를 제어하기 위하여 plasma jet gas를 공급하는 노즐과 용접부 주위에 보호가스를 공급하는 보호가스 공급노즐을 부착한다.

3.2 알루미늄 합금 레이저 용접 특성

레이저 용접은 일반적으로 아크용접에 비해 용접 속도가 10여배 이상 빠르고, 저입열과 빠른 냉각속도로 열영향부 및 용융부의 폭이 아크 용접부에 비하여 좁아 기계적 성질 열화부폭이 좁은 유리점이 있다. 또한 빠른 냉각속도로 인해 dendrite arm spacing이 좁아지므로 레이저 용접금속의 기계적 성질이 아크 용접금속에 비해 개선될 수 있다. 한편 그 용접 특성이 레이저 용접과 유사한 전자 비임 용접과 비교하면, 진공 중에서 용접하여 용접구조물의 크기에 제한을 받게 되는 전자비임용접에 비해 대기중에서 용접하는 레이저 용접은 큰 구조물의 용접시 유리하다.

그러나, 철강재료에 비하여 알루미늄 합금은 레이저 용접하기에 용이하지 않은 것으로 알려져 있다. 연강 표면에서의 레이저 비임 반사율은 약 25%이나, 알루미늄 합금 표면에서의 레이저 비임의 반사율은 80% 이상으로 알루미늄과 레이저 비임 사이의 커플링이 곤란하게 된다⁹⁾. 따라서 알루미늄 합금의 레이저 용접시 초기 용융이 일어나기 위해서는 약 $4 \sim 5 \times 10^6$ W/cm² 이상의 출력 강도가 필요한 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 알루미늄 합금에 이러한 임계 출력 강도 이상의 레이저 비임이 조사되어 일단 용융이 일어난 후에는 key hole 내벽에서의 다중 반사에 의해 레이저 비임의 에너지 흡수가 효과적으로 이뤄지는 것으로 알려지고 있다.

3.3 알루미늄 합금 레이저 용접 시공

laser 용접은 본질적으로 자동화 용접이며 용접자세는 아래보기 자세를 흔히 사용하나, 후판 알루미늄 합금을 아래보기 자세로 용접할 경우 때로는 용락 현상이 일어나 비드가 함몰하고, 언더비드에서는 응고금속이 밑으로 들출하는 경우가 있으므로 laser 비임을 수평으로 조사하는 수평자세로 용접하여 이 현상을 방지할 수 있다.

주요 용접 변수로서는 레이저 출력 (laser power), 용접 속도 (weld speed), 초점 위치 (focal position), 보호가스 종류 및 유량 (shielding gas and flow rate), 용접 와이어 송급속도 (wire feed speed) 등이 주요 공정 변수가 된다. pulse 파 Nd:YAG laser 용접의 경우 펄스 최대출력 (peak pulse power), 펄스 반복율 (pulse rate), 펄스 지속 시간 (pulse duration time) 등의 용접 변수를 제어하게 된다.

3.3.1 용접 이음부 준비

알루미늄 합금 용접 모재의 두께는 1~10 mm 정도 범위에 있으며 용접 이음부는 I square butt 이음부 및 lap 이음부가 주로 사용된다. 길로틴 절단으로 I square butt 이음부를 준비하는 경우 이음부 틈새 간격이 일정하지 않은 경우가 있다. 이 경우 레이저 비임 스폿 크기가 이음부 틈새 간격보다 작으면 용접 이음부를 용융 시키지 못하게 된다. 특히 후판재를 사용한 I square butt 이음부 용접의 경우 기계가공으로 용접 이음부를 준비한다. 용접할 알루미늄 합금을 대기중에 오랫동안 방치한 경우 표면산화피막에 흡착된 수분이 기공 발생의 원인이 되므로 용접 직전에 이음부는 청결하게 세척하고 습기를 제거하는 것이 필요하다.

3.3.2 레이저 용접 시공

용접중 스파터가 laser 비임 집속 렌즈 또는 미러에 비산 충돌하는 것을 방지하기 위하여 laser 비임과 수직인 방향으로 건조시킨 압축공기 cross jet을 고속으로 분사한다. 용접부에서의 plasma 제어와 용접부의 산화 방지를 위해 plasma jet gas 및 보호가스를 공급하며, 언더 비드 보호가스를 공급하여 언더 비드의 형상을 제어하고 용접부의 산화를 방지한다. 보호가스로서는 He이 Ar에 비하여 비임 커플링, 용입깊이, plasma 제어 등의 측면에서 훨씬 유리한 것으로 알려져 있으나 Ar에 비해 He의 가격이 비싼 불리점이 있다. 모재 및 이음부 두께에 따라 적절한 공정변수를 조합하여 최적 용접 조건에서 용접함으로써 비드가 곱고

결합없는 용접을 할 수 있다.

3.3.3 용접 와이어의 선택

용접와이어를 공급하여 용접금속의 화학조성을 제어함으로써 응고균열 발생을 제어하거나 용접부의 기계적 성질을 제어할 수 있으므로 용가재를 사용하여 용접하기도 한다. 보통 GMAW 용접용 와이어를 사용하며 6000계열 합금의 경우 Si이 5wt.% 함유된 AA4043, 12wt.% Si의 AA4047등을 사용할 수 있다. 5000계열 합금의 경우 일반적으로 모재 조성과의 유사한 용접 와이어를 선택하여 사용한다.

3.3.4 알루미늄 합금 레이저 용접부의 기계적 성질
알루미늄 합금 laser 용접부는 아크 용접부와 유사하거나 개선된 용접부 강도와 연신율을 나타내는 것으로 보고되고 있다^{1,4,11,12}. 비열처리형 5000계열 알루미늄 합금 laser 용접부의 강도는 모재 강도의 약 80% 이상이나 연신율은 모재 연신율의 약 반으로 저하되는 것으로 보고되고 있다. 열처리형 6000계열 합금의 laser 용접부는 모재 강도의 60~70%를 유지하나 연신율은 현저하게 저하하는 것으로 알려져 있다.

4. 맺 음 말

알루미늄 합금은 철강 재료와 함께 용접 구조용 재료로 널리 사용되며, 그 사용 범위가 증대함에 따라 새로운 용접 공정이 요구되고 있다. 이에 알루미늄 합금의 유망한 용접 방법으로서 레이저 용접이 그간 시도되어왔으며 알루미늄 합금의 레이저 용접성이 아크 용접성과 유사하거나 개선되었음을 문헌을 통하여 확인하였다.

한편 앞으로 다음과 같은 분야에서 알루미늄 합금의 레이저 용접 적용이 전망되고 있다. 승용차의 경량화 추세와 더불어 알루미늄 합금이 승용차에 적용되면 강판의 laser 용접의 경우와 유사하게 차체 패널의 레이저 용접 (예, side panel과 roof panel의 laser 용접), door inner와 pillar등에서의 tailored blank laser 용접, 알루미늄 space frame car에서의 압출재 알루미늄 합금 frame의 laser 용접등이 고려될 수 있으며, 아울러 전기 전자 산업에서의 레이저 용접 적용 (예, 알루미늄 케이스의 기밀 용접) 도 고려될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Moon D W et al., " Laser beam welding of aluminum alloy 5456", WJ, Vol. 62, No. 2(1983), pp 53s-58s
2. Scott M H et al., "Tensile and toughness properties of

- arc welded 5083 and 6082 aluminum alloys", W. J. Vol. 62, No. 9(1983), pp243s-252s
3. Kou S, "Welding metallurgy and weldability of high strength aluminum alloys", WRC Bulletin 320, December(1986)
 4. Yoon J W et al., "Laser welding of aluminum alloys", TWI Report 517, TWI, Cambridge, UK(1995)
 5. Pumphrey W I et al., "A consideration of the nature of brittleness at temperature above the solidus in castings and welds in aluminum alloys" J. Inst. Metals, Vol. 75(1948/49), pp235-256
 6. Dudas J H et al., "Preventing weld cracks in high strength aluminum alloys", W.J., Vol. 45, No. 6(1966) pp241s-249s
 7. Terentev I M, "Means of reducing oxide flaws and porosity in welds made AlMg6 alloy" Weld. Prod. Vol. 15, Dec(1968), pp12-15
 8. Opie W R et al., "Hydrogen solubility in aluminum and some aluminum alloys", Trans. AIME, 188(1950), pp1237-1241
 9. Masumoto I et al., "Laser welding of A5083 aluminum alloys", IIW Doc. IV-566-91(1991)
 10. Nonhof C J et al., "Spot welding with Nd YAG lasers: A critical review", The Industrial Annual Handbook, Belforte D Ed., Pennwell Books, Tulsa, Oklahoma (1987), pp40-51
 11. Arata Y et al., "Effect of weld solidification mode on tensile properties of aluminum weld metal", Trans. of JWRI, Vol. 2, No. 2(1973), pp55-61
 12. Jones I A et al., "CO₂ laser welding of 5000 series aluminium alloys - un update", TWI Report, TWI, Cambridge, UK(1991)



- 윤종원 (尹鍾元)
- 1959년생
- 동의대학교 신소재공학과
- 철강재 및 비철금속의 용접야금, 레이저 및 전자비임을 이용한 고밀도 열원 공정
- e-mail : jwyoan@hyomin.dongdui.ac.kr