

다파장 레이저빔을 이용한 알루미늄 합금의 자생용접 특성

김 정 목 · 김 인 호 · 최 병 규 · 김 종 도

Autogenous Welding Properties of Aluminum Alloys by Multi Wavelength Laser

Jeong-Mook Kim, In-Ho Kim, Byung-Kew Choi and Jong-Do Kim

1. 서 론

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 경량화율 및 재활용 특성 그리고 우수한 비강도 특성을 가지고 있는 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.

재료 특성상 높은 열전도율과 높은 반사율로 인해 용접시공시 많은 문제점을 가지고 있는 알루미늄 및 알루미늄 합금에 대한 용접연구가 국내외로 활발히 진행되고 있으며, 레이저를 용접열원으로 이용한 연구도 점점 확대 되고 있다. 레이저를 이용한 알루미늄의 용접은 주로 단일파장 레이저에 대한 다양한 알루미늄 재료의 용입특성, 결합, 기계적 성질 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 그 결과 알루미늄 합금은 레이저 용접성이 열악하고 균열 및 기공 등의 결함에 취약한 것으로 보고 되고 있다¹⁻³⁾.

본 연구는 알루미늄이 800nm 부근의 파장대에서 특이하게 에너지 흡수가 높은 재료학적 특성(Fig. 1)과 예열작용으로 재료의 온도가 상승할수록 레이저빔의 흡수가 증가하는 효과(Fig. 2)⁴⁻⁶⁾를 이용하여 808nm의 발진 파장을 갖는 연속발진형 다이오드 레이저빔과 펄스형 Nd:YAG 레이저빔을 혼합하는 용접장치를 통해 집속된 하이브리드빔과 1064nm의 단일파장 펄스형 Nd:YAG 레이저 빔을 이용하여 각각 용접한 시료의 단면형상 및 결합 등을 다양한 합금에 대하여 비교 관찰하였다. 또한 모재에 대해 불연속부인 용접부가 가지

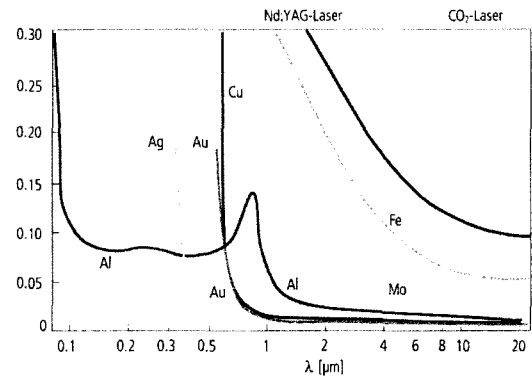


Fig. 1 Absorption of various materials at room temperature

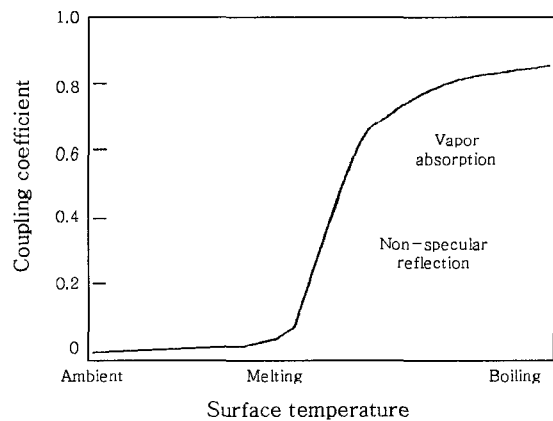


Fig. 2 Coupling coefficient according to material surface temperature

는 강도 및 경도 특성, 그리고 밀봉 용접된 시료의 밀봉시험을 수행하여 알루미늄 재료의 용접성 향상 및 그 사용범위 확대를 목표로 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용한 알루미늄 합금은 비열처리형 합금인 A1050, A3003, A4047, A5052와 열처리형 합금

인 A6061을 사용하였다. 각 합금들은 30(w)mm × 50(l)mm × 1~1.4(t)mm로 절단하여 다양한 이음부 형태로 구성하여 용접하였다. 시편의 화학적 조성은 아래의 Table 1과 같다.

본 실험에 사용된 장비는 ①발진파장 1064nm의 펄스형 Nd:YAG 레이저와 ②발진파장 808nm의 다이오드 레이저를 사용하였다. 레이저 발진기에서 발진된 각각의 빔은 FQSI 600 μ m의 광섬유를 통하여 전송되어, 최종적으로 100mm의 초점거리를 갖는 집속렌즈를 통하여 재료의 가공 면으로 전송하였다.

본 실험은 알루미늄 합금이 가지는 펄스형 Nd:YAG 레이저에 대한 용접특성과 다파장 레이저빔(펄스형 Nd:YAG 레이저 + 808nm 다이오드 레이저)을 사용하여 용접하였을 때의 용접 특성 비교 및 용접성 향상을 목표로 하였다. 용접장치는 펄스형 Nd:YAG 레이저와 808nm의 파장을 가지는 다이오드 레이저가 동일 위치에서 조사될 수 있도록 Fig. 3과 같은 광학계의 구성을 갖는 장치를 사용하였으며, 용접에 사용된 각 레이저 빔의 출력형태는 Fig. 4와 같다. 모든 공정에 CNC장비를 이용하여 용접속도 및 초점위치 등의 변수를 정확하게 제어하였으며, 용접된 시편의 표면 및 단면은 광학현미경, 전자주사현미경을 통하여 용입형상, 미세조직 및 결합 등을 관찰하였다. 기계적 성질을 평가하기 위하여 인장강도 및 경도시험을 행하였으며 용

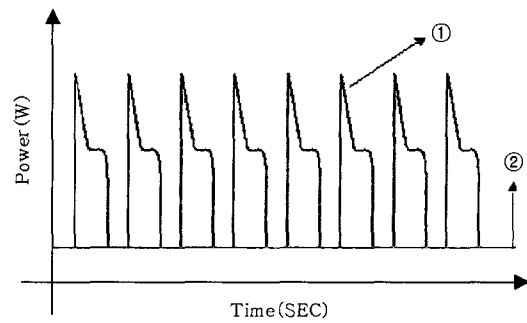


Fig. 4 Output power pattern of hybrid laser beam
① 1064nm laser ② 808nm laser

접부 특성실험의 일원으로 사각용기를 제작하여 용접한 후 He 탐지기를 이용한 밀봉시험을 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 808nm 다이오드 레이저의 예열 효과

레이저 빔에 대한 반사도와 열전도도가 뛰어난 알루미늄은 용입형상 및 깊이를 증가시키는데 큰 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 알루미늄이 808nm 부근의 파장대에서 특이하게 빔의 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. Fig. 5에 A1050에 대한 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 비드용접(bead welding) 단면과 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저의 하이브리드빔으로 용접한 단면, 그리고 모재를 예열한 다음 용접한 단면을 각각 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저의 하이

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
A1050	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	-	0.05	bal.
A3003	0.6	0.7	0.1	1.3	-	-	0.1	bal.
A4047	12.0	0.6	0.30	0.15	0.10	-	0.20	bal.
A5052	0.15	0.3	0.015	0.04	2.55	0.18	0.009	bal.
A6061	0.5	0.7	0.25	0.15	1.0	0.35	0.25	bal.

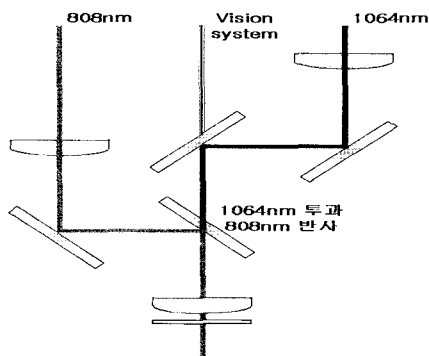


Fig. 3 Configuration of optics

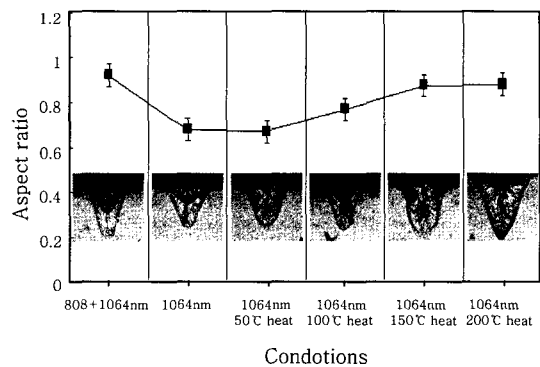


Fig. 5 Transition of aspect ratio for preheating temperature

브리드빔을 사용한 경우 어스펙트 비(aspect ratio)가 약 0.92로 가장 높은 값을 나타내었으며, 이는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 단독으로 이용한 경우에 비해 약 25%의 어스펙트 비 향상결과를 가진다. 예열을 통해 모재 온도를 상승 시킨 결과 50~150℃의 온도 사이에서는 유사한 범위 내에서 용입깊이의 변화를 관찰할 수 있었으며, 약 200℃ 정도로 예열한 경우 용입 깊이의 뚜렷한 증가를 관찰할 수 있었다. 다파장 하이브리드빔을 사용하였을 경우, 용입깊이는 모재를 200℃로 예열한 조건과 유사한 용입깊이를 나타내었으며, 이러한 결과는 연속출력을 갖는 다이오드 레이저 빔이 국부적인 영역에 대해 재료의 온도를 급상승시키고 이 현상에 의해 레이저 빔의 흡수가 가속화되어 나타난 결과로 판단된다.

3.2 합금 계열에 따른 자생용접 특성

3.2.1 알루미늄 합금 A3003의 자생용접 특성

펄스형 Nd:YAG 레이저의 출력변수를 펄스폭 3.5ms, 주파수 35Hz로 설정하고 평균출력을 약 200W 정도로 유지하여 준비된 A3003 합금의 이음부에 용접을 실시한 후 그 단면을 Fig. 6에 나타내었다. A3003 합금의 경우 단일파장의 레이저만 조사하였을 경우, 일부 단면에서는 결합이 없는 비교적 양호한 용접부(a)를 얻을 수 있었으나, 일부 단면에서는 불규칙한 형태의 기공과 고온 균열의 한 형태인 결정립계 액화균열이 복합적으로 발생한 용접부(b)를 관찰할 수 있었다. 이러한 용접부에서 기공은 수소에 의해 발생된 원형의 형태가 아닌 다방향의 불규칙한 형태로 생성 되었으며, 균열은 결정립계 내에 불순물의 편석과 저용점 개재물 등 다양한 화합물의 존재로 취약했던 부분이 열수축에 견디지 못하고 결정립계를 따라 균열이 생성되는 결정립계 액화균열로 판단된다. 이러한 기공 및 균열의 존재는 용접부 성능 저하의 주원인으로 작용하게 될 것이다.

다파장 레이저빔을 사용하여 제작된 용접부의 단면 (a) 및 루트부(root) 확대사진(b)를 Fig. 7에 나타내었다. 레이저 출력조건은, 주열원인 펄스형 Nd:YAG 레이저의 출력을 160W로 설정하고, 보조열원인 808nm

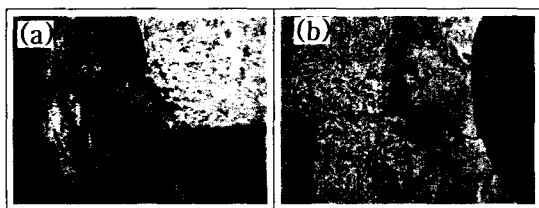


Fig. 6 The shapes of A3003 weldment by pulsed Nd:YAG Laser

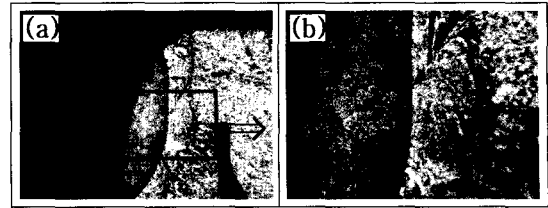


Fig. 7 The shapes of A3003 weldment by multi-wavelength Laser

파장의 다이오드 레이저 출력 40W를 혼합하여 합계 200W의 출력으로 조사하였다. 이것은 펄스형 Nd:YAG 레이저 단독으로 사용하였을때의 평균출력(200W)과 동일한 조건이다. 다파장 레이저빔을 사용한 경우, Fig. 7에서 보듯이 펄스형 Nd:YAG 레이저를 단독으로 사용하였을 경우에 비해 향상된 용접부 유효 단면적을 관찰 할 수 있으며, 균열 등의 결함이 존재하지 않는 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

3.2.2 알루미늄 합금 A5052의 자생용접 특성

A5052의 맞대기 이음부에 대해 펄스형 Nd:YAG 레이저의 자생용접 특성과 다파장 레이저빔을 사용하여 용접하였을 때의 자생용접 특성 및 결합 발생 정도를 관찰하여 Fig. 8에 나타내었다. 펄스형 Nd:YAG 레이저만을 사용한 경우 용접선 전체에 걸쳐 형성된 표면 균열을 확인할 수 있었으며, 이러한 균열은 용접금속의 단면 사진에서 보듯이 루트부까지 진행되었다. 따라서 이러한 균열의 발생으로 현저한 기계적 특성의 감소가 예상된다. 그러나 동일한 출력조건인 다파장 레이저빔을 사용하여 용접한 경우, 용접금속의 단면 및 표면에서 균열의 발생은 관찰되지 않았다. 용접부 중앙의 미

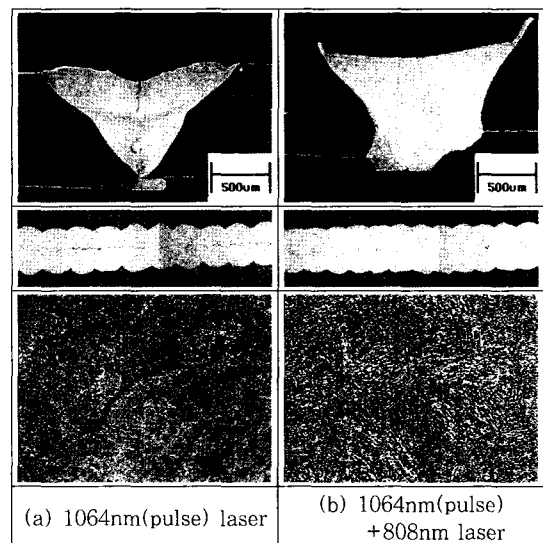


Fig. 8 The shapes of A5052 weldment surface, cross section & center structure

세조직 관찰 결과, 펄스형 Nd:YAG 레이저 단일파장을 사용하였을 경우 급격한 온도 구배 즉 급속용융, 급속냉각의 효과로 센터라인 균열을 포함하고 있는 치밀하고 미세한 조직을 가지고 있는 반면, 다파장 레이저빔으로 용접된 시편의 경우, 상대적으로 급속용융, 급속냉각의 효과가 감소하여 응고조직은 비교적 조밀하나 균열의 발생은 관찰되지 않았다.

3.2.3 알루미늄 합금 A4047과 A6061의 자생 용접 특성

알루미늄 합금의 레이저 열원 반응특성을 평가하기 위해 각각의 재료에 비드용접한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. (a)A4047의 경우 균열이 존재하지 않는 양호한 표면 비드가 형성됨을 확인할 수 있었으나, (c)A6061에서는 형성된 표면비드에서 여러 형태의 균열을 확인할 수 있었다. 이러한 두 합금을 맞대기 용접하였을 경우(b)에 형성된 표면비드에서는 A6061에서 발생했던 균열은 모두 제거된 양호한 표면비드를 얻을 수 있었다.

비드용접특성을 근거로 A4047과 A6061의 맞대기 이음부 및 접치기 이음부 형태로 이음부를 제작하여 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다파장 레이저빔을 조사하여 용입형상을 관찰하였다.

Fig. 10에 펄스형 Nd:YAG 레이저만을 사용하였을 경우 형성된 각 이음부의 용입형상을 나타내었다. 펄스형 Nd:YAG 레이저를 단독으로 사용하였을 경우, 용접금속에 기공이나 균열 등의 결함은 발생되지 않았으나, A4047과 A6061의 유효 접합면이 투입된 에너지에 비해 적은 용합불량 접합부 형태로 나타났다. Fig. 11은 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저를 동

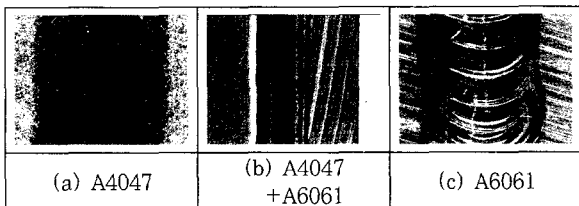


Fig. 9 Bead shapes of aluminum alloys

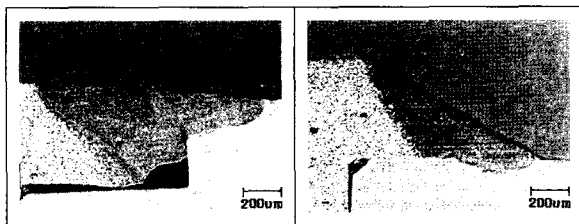


Fig. 10 Cross section of various weld joint by pulsed Nd:YAG laser

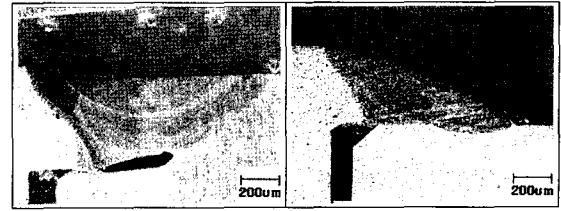
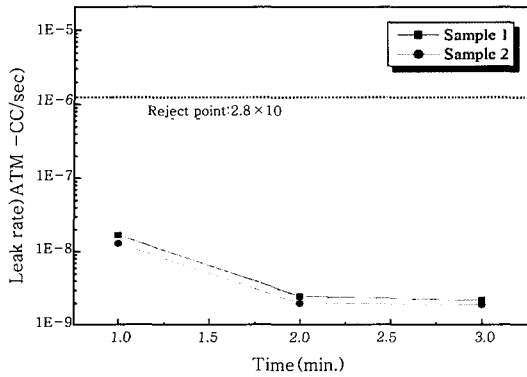


Fig. 11 Cross section of various weld joint by multi-wavelength laser

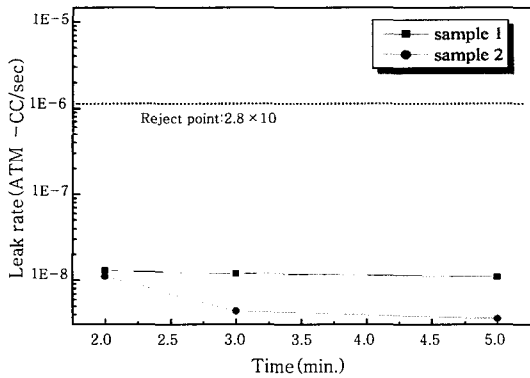
시에 조사하여 형성시킨 용접부의 단면형상이다. 본 조건의 경우 맞대기 이음부나 접치기 이음부의 접합면에서 펄스형 Nd:YAG 레이저만을 조사한 경우와는 달리 접합계면 등의 용합불량 부분이 용접됨으로써 용접부의 유효 단면적 증가로 유도될 수 있었다. 이는 동일 출력 조건이라 하여도 흡수도가 높은 연속발전형 다이오드 레이저를 동시 조사하므로써 투입된 에너지의 효율 증가에 의한 결과라고 사료된다.

3.3 밀봉특성 시험(He leak test)

용접부 성능시험의 일부로 He 누출 탐지기를 이용한 밀봉특성을 평가하였다. 전기·전자분야에도 그 활용도를 높이고 있는 알루미늄 합금은 외장재료의 사용은 일반화되어 있음에도 불구하고 밀봉특성을 요구하는 최종 마무리 단계에서 유기용매나 솔더링 등 여타의 방법에 의한 밀봉법이 현재 적용되고 있다. 그러나 이러한 방식들은 내파괴압이라든지, 내식성, 밀봉특성에 한계를 가지고 있으며, 밀봉 용기에서 누출구 발생시 다양한 문제를 유발할 수 있다. 사용분야에 따라 다르긴 하지만 누출구 발생시 화재, 폭발, 경제적 손실등 치명적인 영향을 주는 경우가 발생하므로 이러한 문제점을 극복하기 위해 용기의 끝단마개라든지, 밀봉 용기의 덮개 등으로 알루미늄 합금을 적용하고자 할 때, 그 성능을 극대화시킬 목적으로 레이저 용접부의 밀봉특성을 실험하였다. 본 실험을 위해 제작된 임의 형태의 사각용기는 A3003, A6061의 재료를 사용하였으며, 용기에 He 가스를 충전 후 A3003, A4047 재료로 덮개를 제작하여 용접을 실시하였다. 밀봉시험에 사용된 장비는 Aleatel ASM 122D 모델로서 누출 최소감지능력은 1×10^{12} mbar·L/sec(mbar·L/sec 단위는 1mbar에서 1L부피 안에 들어있는 기체분자 개수만큼이 1초에 빠져나갈 수 있는 양)이다. 용접된 시편은 별도의 시험용 챔버에 투입하고 누출 탐지기와 연결하여 침투한 누출량을 검사하였으며, 그 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 시험 시작시점에서 재료표면 등에 존재하고 있던 He은 약 1~2분정도 경과 후에 모두 검출되었으며, 검사시작 3~5분 후에는 불합격점값을 밑도는 일정한 수준이상

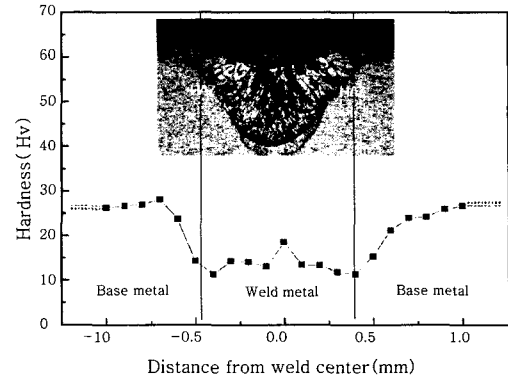


(a) A3003 + A3003

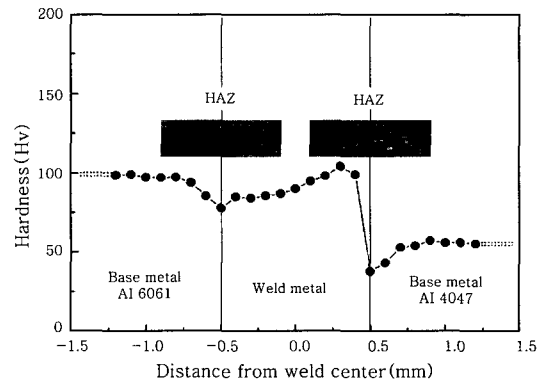


(b) A4047 + A6061

Fig. 12 Leak test results by He detector



(a) A3003



(b) A4047 + A6061

Fig. 13 Hardness tendency of laser weld

의 밀봉특성을 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 누출을 값은 알루미늄의 밀도 등의 재료특성을 감안한다면 밀봉특성에 전혀 영향을 미치지 않는 용접부가 형성된 것으로 판단된다.

3.4 기계적 성질의 평가

알루미늄합금의 기계적 성질 평가의 일환으로 용접부에 대한 경도 변화를 측정을 하였다. 경도 측정은 A3003의 맞대기 이음부와 A4047과 A6061의 맞대기 이음부 대해서 평가하였으며, Fig. 13에 용접부가 가지는 경도 경향을 나타내었다.

A3003의 경우 용접금속의 경도는 용융선 부근에서 가장 낮은 값을 가지고 있으며 용접금속의 중심부에서 모재 경도의 약 65%정도의 값을 갖는 것으로 확인되었다. A4047 + A6061의 경우 A6061의 모재에서 가장 높은 값을 나타내었으며, A4047 모재는 A6061 모재의 약 50% 정도 되는 경도 값을 가지는 것으로 확인되었다. 용접금속에서의 경도분포 특성 중 각각의 열영향부에서는 일반적으로 알려진 것과 같이 연화됨이 관찰되었으며, 특이하게 용접금속의 경도 값이 A6061

에 A4047 쪽으로 갈수록 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 14는 각 알루미늄 합금의 레이저 용접부에 대한 인장시험 결과이다. A3003의 경우 모재 항복강도의 약 74% 정도의 강도 값을 얻을 수 있었으며, A6061 + A4047의 경우 A6061의 모재 항복강도 대비 약 87%정도의 높은 값을 얻을 수 있었다. 파단 부위의 경우 A3003의 경우 용접금속의 중앙에서 파단 되었으며, A6061 + A4047의 경우 A4047의 열영향부 근처에서 파단 됨을 확인할 수 있었다.

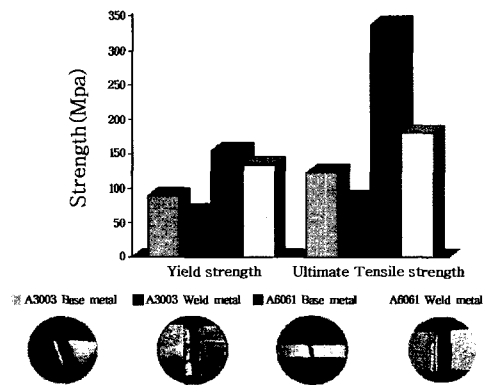


Fig. 14 Tensile strength results

4. 결 론

다양한 알루미늄 합금들을 펄스형 Nd:YAG 레이저와 다이오드 레이저를 동시 조사하여 자생 용접하여 단면 관찰 및 기계적 성질 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일출력, 동일 분위기에서 단일파장빔(1064nm)을 사용하여 알루미늄을 용접한 경우에 비해 다파장 하이브리드빔(1064nm+808nm)을 이용하였을 경우 용접부 유효 단면적의 증가를 확인 할 수 있었다. 이는 1064nm 단일파장이 반사율이 높아 손실이 많은 반면, 다파장 레이저빔을 이용하였을 경우 알루미늄의 재료 흡수율이 높은 808nm 파장 레이저빔이 국부적으로 재료의 온도를 급격히 상승시켜 1064nm의 흡수를 촉진시키는 작용을 한 것으로 사료된다.

2) 단일 파장을 사용하여 알루미늄을 용접하였을 경우, 균열 및 기공 등의 결함이 다수 관찰되었으나, 다 파장 레이저빔을 사용하였을 경우, 균열의 발생 빈도가 현저하게 감소됨을 확인할 수 있었다. 이는 연속 발전형 다이오드 레이저빔이 용접금속의 응고 속도를 감소시키고 응고 후 빠른 냉각 속도에 의해 발생된 내부 응력을 감소시키는 소둔 효과를 부여하여 균열을 억제한 것으로 판단된다.

3) 경도 및 강도, 밀봉특성의 평가 결과, 균열 등의 결함이 상당부분 감소된 용접금속의 형성으로 인해 비교적 양호한 기계적 특성을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Katoh, M. : Journal of Light Metal Welding and Construction, 1996 34(4), 42
2. Woods, R. A. : Hydrogen in Metals, ASM International Materials Park, Ohio 1974, 713-725
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), 241s-249s
5. Bramson, M.A. : 1968. Infrared Radiation, A handbook for Application, Plenum Press, NewYork, N.Y, 127
6. Duley, W.W. : 1983. Laser Processing and Analysis of Materials, Plenum Press, New York, N.Y., 71
7. 김철중 외 : KMRR 핵연료 봉단마개의 레이저 용접연구, KAERI/RR-8 (1989), 60
8. E. J. Morgan-Warren : The Application of Laser Welding to Overcome Joint Asymmetry, Welding Journal, 58 (1979), 76s-82s



- 김정묵(金正默)
- 1958년생
- (주) 한빛레이저
- 레이저 장치 개발
- e-mail: jmkim@hblaser.co.kr



- 최병규(崔秉圭)
- 1975년생
- (주) 한빛레이저
- 레이저응용실험
- e-mail : cbk1052@hblaser.co.kr



- 김인호(金仁鎬)
- 1974년생
- (주) 한빛레이저
- 레이저응용실험
- e-mail : kih2525@hblaser.co.kr



- 김종도(金鍾道)
- 1963년생
- 한국해양대학교, 기관시스템공학부
- 레이저용접, 플라즈마해석, 센싱과 가시화
- e-mail : jdkim@mail.hhu.ac.kr