

Disk Laser를 이용한 알루미늄 합금 AA6451과 AA6014 이중알루미늄 용접성

이수진^{1†} · 최광덕² · 안상수³ · 이창제⁴ · 서 정⁵

(Received August 10, 2017 ; Revised October 16, 2017 ; Accepted July 20, 2018)

Dissimilar laser welding of aluminum alloys AA6451 and AA6014 using disk laser system

Su-Jin Lee^{1†} · Kwang-Deok Choi² · Sang-Soo Ahn³ · Chang-Je Lee⁴ · Jeong Suh⁵

요약: 산업의 급속한 발전과 더불어 다양한 합금 및 신소재가 개발되고 있다. 에너지 절감 및 친환경적 소재의 개발 및 그 적용은 항공, 해양, 자동차, 기계 및 에너지 산업 전반에 걸쳐 주목받고 있다. 그 중에서도 경량특성을 가지는 알루미늄 합금은 내부식성 및 강도특성을 상승시키기 위하여 다양한 첨가물을 기반으로 연구 및 개발되고 있다. 더불어 철강 소재를 대체하는 친환경 소재로서의 역할이 요구되고 있으나 알루미늄 및 그 합금 소재의 재료적 특성으로 인해 용접이 어려워 그 적용에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금의 설계자유 및 다양한 적용을 위하여 고효율 디스크 레이저를 이용하여 제살 겹치기 용접을 진행하였다. 특히 AA6451과 AA6014의 이중재 겹치기 용접을 진행하였으며 변수에 따른 용접특성을 관찰하였다. 그 결과 AA6014시편이 상부에 있고, 레이저 출력 5 kW, 용접속도 45 mm/s에서 가장 양호한 용접부가 얻어졌다. 기존의 연구와 비교하여 실드가스로 표면산화를 방지하지 않은 조건에서도 비교적 양호한 용접 비드가 얻어질 수 있는 가능성이 확인되었다.

주제어: 알루미늄 합금, AA6451, AA6014, 레이저 용접, 디스크 레이저

Abstract: With the rapid industrialization, various alloys and new materials are being developed. The development and application of energy-saving and environmentally friendly materials are attracting attention in the aviation, marine, automobile, machinery, and energy industries. Various additives are added to aluminum alloys to increase their corrosion resistance and strength, while maintaining their light weight properties. In addition, aluminum alloys are potential eco-friendly alternatives to steel materials. However, their welding is difficult, which limits their applications. Therefore, in this study, to widen the application range of aluminum alloys, we proposed a method for their lap welding using a high power disk laser. The welding of AA6451 and AA6014 was carried out and the welding characteristics were observed. The AA6014 specimen was in the upper part. The best welding was obtained at a laser output of 5 kW and a welding speed of 45 mm/s. Unlike the previous studies, in this study, we obtained relatively good weld beads even when the surface oxidation of the alloys was not prevented by a shielding gas.

Keywords: Aluminum alloy, AA6451, AA6014, Laser welding, Disk laser

1. 서 론

환경과 에너지 문제가 심각하게 거론되고 있는 현대 기술에서, 친환경적이고 에너지절감과 관련된 소재 및 관련 기술 개발의 필요성은 계속 증가하고 있다. 경량이며 내하중소재인 알루미늄은 구조재료로서 중요한 역할을 하고 있다. 특히 철강 이후 두 번째로 많이 사용되는 구조용 알루

미늄의 필요성 증가는 이러한 사회적 변화를 따르고 있다 [1]-[4]. 최근, 알루미늄 압출재의 50 %는 운송용 산업에 사용된다는 보고도 있다[5].

그러나 알루미늄 및 그 합금에는 높은 반사율과 높은 열전도도 및 고온균열 등의 재료적 특성으로 용접이 어려운 단점이 있다. 따라서, 알루미늄의 용접은 재료학적 기구학

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0477-7568>): Korea Institute of Machinery & Materials, 48, Mieumsandan 5-ro 41beon-gil, Gangseo-Gu, Busan, 46744, Korea, E-mail: leesj@kimm.re.kr, Tel: 051-310-8133

2 Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: kdchoi@kimm.re.kr, Tel: 051-310-8137

3 R&D Center, Sungwoo Hitech., E-mail: asagshaj1@swhitech.com Tel: 070-7477-5513

4 R&D Institute, Best F. A., E-mail: lab@bestfa.co.kr, Tel: 055-286-6060

5 Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: jsuh@kimm.re.kr, Tel: 051-310-8110

적으로 당면된 주요한 과제중 하나이다. 혁신적인 알루미늄 용접기술의 개발은 알루미늄 적용 구조물 및 제품의 설계자유도를 높이고 더욱더 다양한 분야에서 활용되어 환경문제 해결에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다. 현재 알루미늄 용접에 적용 가능한 대표적인 용접방법들로는 마찰교반용접(friction stir welding, FSW), 불활성 가스 메탈 아크 용접 (MIG), 가스 텅스텐 아크 용접(TIG), 플라즈마 아크용접(PAW), 서브 머지드 아크 용접(SAW), 레이저 용접(LBW) 및 하이브리드 레이저 용접(HLBW) 등이 있다. 산업에서 알루미늄 TIG 용접공정은 전반적으로 안정되었다고 인정되는 용접 공법으로 여겨 왔으나 최근 TIG 용접과 비교하여 MIG와 HLBW 용접법이 더 유리하다는 연구 결과가 있다[1][4]. 본 연구에서는 HLBW 용접법에 비하여 공정 변수가 적고, 용접속도가 빠른 레이저 키홀 용접법(LBW)에 대하여 연구하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

본 연구에 사용된 시험편은 알루미늄 합금 6000계열인 AA6451과 AA6014로 각 합금 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 6000계열의 알루미늄 합금은 Mg와 Si를 주첨가 성분으로 하는 열처리 합금으로 용접성 및 내식성이 비교적 양호하며 형재, 관 등의 구조물로 제작되어 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에 적용된 판재는 현재 해외의 고급 차체에 많이 적용되는 대표적인 6000계열 소재이다. 레이저 이종 알루미늄 합금소재의 실험을 진행하기 위해 판재 알루미늄 합금을 사용하였다. 사용된 시험편의 크기는 150 mm × 50 mm 이며 두께는 각각 AA6451 2 mm와 AA6014 1.2 mm 이다.

Table 1: Chemical composition of AA6451 and AA6014

Component Elements	AA6451	AA6014
Al	96.5 - 98.95 %	<= 97 %
Cr	<= 0.10 %	<= 0.20 %
Cu	<= 0.40 %	<= 0.25 %
Fe	<= 0.40 %	<= 0.35 %
Mg	0.40 - 0.80 %	0.40 - 0.80 %
Mn	0.05 - 0.40 %	0.05 - 0.20 %
Other, each	<= 0.05 %	<= 0.05 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Si	0.60 - 1.00 %	0.30 - 0.60 %
Ti	-	<= 0.10 %
V	<= 0.10 %	0.05 - 0.20 %
Zn	<= 0.15 %	<= 0.10 %

Figure 1에서는 레이저를 이용한 이종 알루미늄 합금소재 겹치기 연구에 사용된 실험 장비의 사진을 개시하였다. 사용된 레이저는 최대출력 8 kW의 Disk laser로 레이저 파장은 1030 nm, 빔품질 8 mm·mrad이며, 사용된 광학계는 스캐너 타입으로 빔직경은 초점위치에서 약 900 μm이다. 스캐너 시스템은 용접속도를 빠르게 제어할 수 있으며 다양한 형상의 용접이 가능하다는 장점을 가지고 있는 장비이다. 레이저 스캐너 헤드는 6축 로봇에 설치되었으며 레이저빔의 반사광에 의한 장비의 손상방지를 위하여 레이저빔의 조사각을 10°로 고정하여 Al 합금의 이종재료 겹치기 용접을 진행하였다. 레이저 출력은 5~5.5 kW 에 고정하고 용접속도 및 소재의 겹치기 위치에 변화를 주었다. 본 실험의 목적은 산업에 사용될 수 있는 알루미늄 합금의 레이저 용접법 개발을 위한 기초연구로써, 실드가스를 최대한 이용하지 않고 소재의 위치 및 용접속도에 따른 레이저 용접부 특성을 연구하였다. 알루미늄 용접에 중요한 인자중 하나인 실드가스를 최소화 한 이유는, 리모트 용접에 있어서 실드가스의 유무가 공정 개발 및 자동화에 고려되어야 하는 대상 중 하나이므로 최대한 가스를 사용하지 않는 공정개발을 목표로 두었기 때문이다.

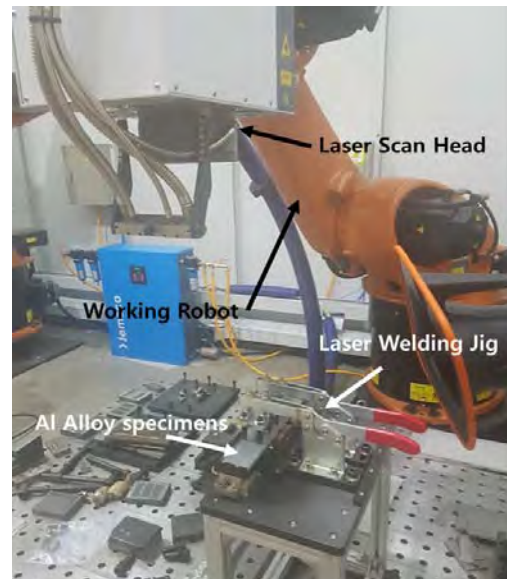


Figure 1: Photographs of experimental equipment set-up

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 AA6451(상)-AA6014(하) 겹치기 레이저 용접결과

일반적으로 알루미늄 합금의 용접은 기공 및 균열이 쉽게 생성되어 용접부 불량을 일으키는 특성과 높은 빛에 대한 반사율로 인하여 레이저 용접이 어려운 소재 중 하나이다. 하지만 본 연구에서는 빔품질이 매우 우수하며 높은 출력으로 발진할 수 있는 디스크 레이저를 활용하여 산업용 알루미늄 합금인 AA6451 2 mm 판재와 AA6014 1.2 mm 판재의 이종알루미늄합금 레이저 겹치기 용접을 진행하였다.

상부에 AA6451을 두고 그 아래에 AA6014를 겹쳐 지그로 고정 후 레이저를 조사하였다. 두 소재 모두 Mg 과 Si가 포함되어 있어 레이저를 이용한 직접 용접시 기공을 쉽게 생성할 수 있다.

Figure 2는 AA6451이 상부에 위치하는 경우, 레이저 출력 5 kW 조건에서 용접속도 변화에 따른 용접비드 상하부를 관찰한 사진이다. 용접속도가 빨라짐에 따라 상·하부 용접 비드폭이 감소하며 용접속도에 따른 비드형상 변화도는 이면비드쪽이 더 컸다. 특히 용접속도 50 mm/s의 조건에서는 부분관통 용접이 진행되었으며 45 mm/s 에서는 일부 부분관통이 발견된다. 45 mm/s 용접속도 조건에 비하여 40 mm/s의 조건이 조사되는 레이저로부터 공급받는 에너지량이 증가하기 때문에 부분관통 영역이 증가한다. 모든 조건에서 용접이 진행될수록 아래 소재부의 이면비드 생성량이 증가한다. 이와 같이 용접이 진행될수록 관통영역이 상승하는 것이 확인되는 이유는 알루미늄 소재의 높은 반사도와 열전도도 특성으로 레이저 빔이 조사되는 초기 공정에서는 소재에 전달되는 에너지 즉, 입열량이 비교적 적기 때문이다. 또한, 레이저 조사가 진행됨에 따라 소재에 열이 축적되고 알루미늄 소재의 표면온도가 상승하여 레이저 빔의 흡수율이 상승하기 때문에 공정이 진행됨에 따라 동일 레이저 조사 조건에서도 소재에 전달되는 에너지 량이 증가되면서 이면까지 관통되는 조건이 관찰된다고 사료된다.

Figure 3은 Figure 2에서 관찰된 소재의 단면 중 대표적인 단면부를 나타낸다. 거의 모든 조건에서 기공이 관찰되며 용접속도 30 mm/s와 40 mm/s에서 비교적 기공의 양이 적은 것이 확인 되나 두 소재의 겹침부 위주로 발생된 기공으로 용접강도에 취약한 특성을 가진다. 더불어 관통용접 조건에서 용융금속이 하부로 밀려난 것이 확인되며 이러한 경향은 용접속도가 빠를수록 줄어드는 것이 확인된다. 용접속도 50 mm/s의 조건에서 직경 1 mm가 넘는 기공이 관찰되었다.

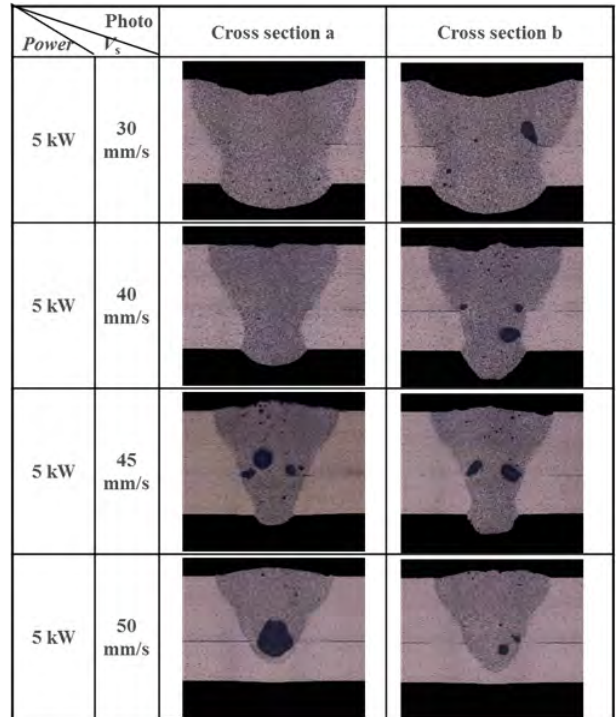


Figure 3: Cross-sectional images of AA6451-AA6014 laser lap dissimilar welding by change welding speed at 5 kW laser power

3.2 AA6014(상)-AA6451(하) 겹치기 레이저 용접 결과

앞의 조건과는 달리 시편의 위치를 AA6014 상부로 한 경우 레이저 출력 5 kW의 조건에서 겹치기 용접을 진행한 용접결과를 Figure 4에 나타내었다. 용접속도의 증가에 따라 상·하부 용접비드의 폭이 감소하는 경향을 보인다. 용접속도 45 mm/s이상에서 일부 부분관통 영역이 존재하나 AA6451이 상부에 위치하는 조건과 비교하면 관통용접이 쉽게 일어나는 것이 확인 되었다. 이는 소재 표면처리 및

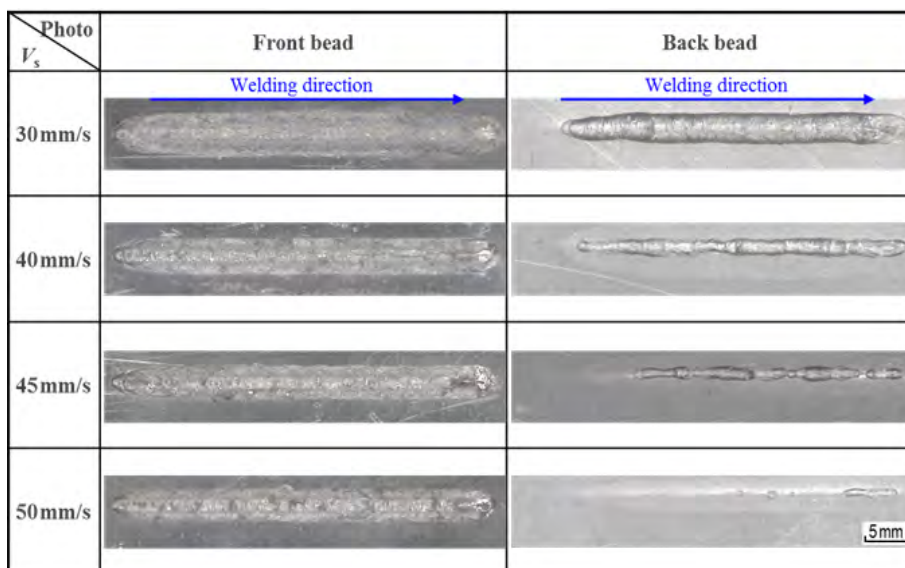


Figure 2: Weld bead appearance of AA6451-AA6014 laser lap dissimilar welding by change welding speed at 5 kW laser power

재료특성에 의한 미세한 레이저 빔 흡수율과 상부 소재에서의 열전도 특성이 소재 두께의 변화에 따른 영향에 의할 수 있다고 판단된다. 또 다른 변수로는 내부 기공생성 및 소재의 용융 메커니즘의 차이로 인하여 용접시 생성되는 기공의 움직임 및 용접금속 유동변화에 기인할 수 있어 이에 따른 심화 연구를 추후 더 진행하고자 한다.

Figure 5는 Figure 4의 용접비드를 단면으로 잘라 연마 및 에칭처리 하여 용융금속을 관찰한 대표사진을 열거하였다. AA6451상부의 조건(Figure 3)과 비교하여 비교적 저속의 용접속도인 30 mm/s 조건을 관찰해 보면 용접부 전반적으로 다량의 기공이 분포되어 있는 것이 확인된다. 기공이 분포하는 영역을 보면, AA6451상부의 조건에서는 두 소재의 맞닿는 경계부를 중심으로 기공이 형성되나, AA6014 소재가 상부에 위치하는 조건에서는 비드 전반적으로 기공이 분포되어 있으며 관찰된 기공 중 직경 0.5 mm를 넘는 기공이 모든 조건에서 관찰되지 않았다. 또한, 용접속도가 증가할수록 비드 상부에 미세한 기공이 밀집된다. 그러나 용접속도가 증가할수록 기공의 양은 점차 줄어든다. 용융금속이 용접속도가 느릴수록 아래로 처짐 현상이 두드러지게 나타나며 용접 속도가 증가됨에 따라 이면비드 넓이와 아래 처짐 현상이 줄어든다.

AA6014 소재가 상부에 위치하는 조건에서는 비드 전반적으로 기공이 분포되어 있으며 용접속도가 증가할수록 비드 상부에 기공이 밀집된다. 그러나 용접속도가 증가할수록 기공의 양은 점차 줄어드는 것이 확인된다. 용융금속이 용접속도가 느릴수록 아래로 처짐 현상이 두드러지게 나타나며 용접 속도가 증가됨에 따라 이면비드 넓이와 아래 처짐 현상이 줄어든다. 레이저 출력 5 kW, 용접속도 40~45 mm/s의 용접조건에서는 생성된 기공이 조밀하여 인장 특성에 유리한 비교적 양호한 용접결과를 얻을 수 있다.

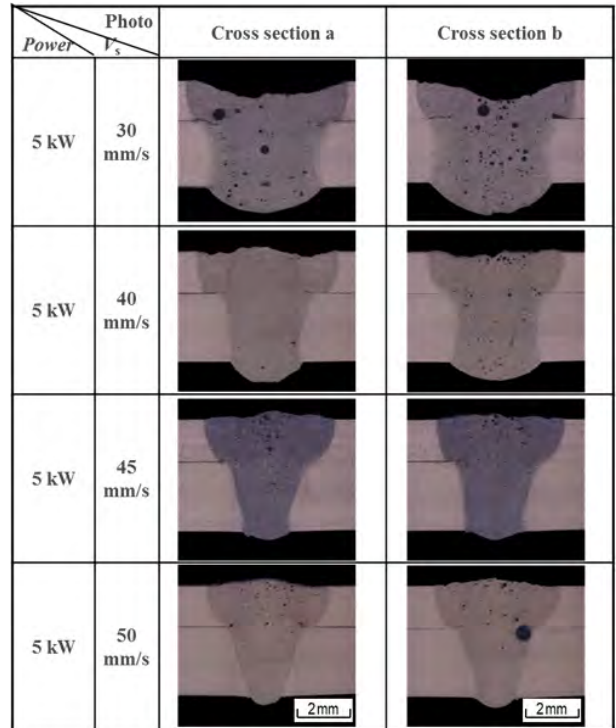


Figure 5: Cross-sectional images of AA6014-AA6451 laser lap dissimilar welding by change welding speed at 5 kW laser power

Figure 6은 AA6014상부 AA6451하부의 조건에서 Ar실드 가스를 시편 하부 즉, AA6451 표면 측에 5 l/min으로 공급하는 조건에서의 용접부 단면 비드사진을 정리하였다. 레이저 출력은 Ar 실딩에 따른 냉각을 고려하여 0.5 kW 상승시킨 5.5 kW조건에서 용접속도를 40 mm/s~60 mm/s범위에서 변화를 주며 용접을 진행한 결과이다. 전반적으로 Figure 5의 이면측 실드가스를 공급하지 않은 조건과 비교

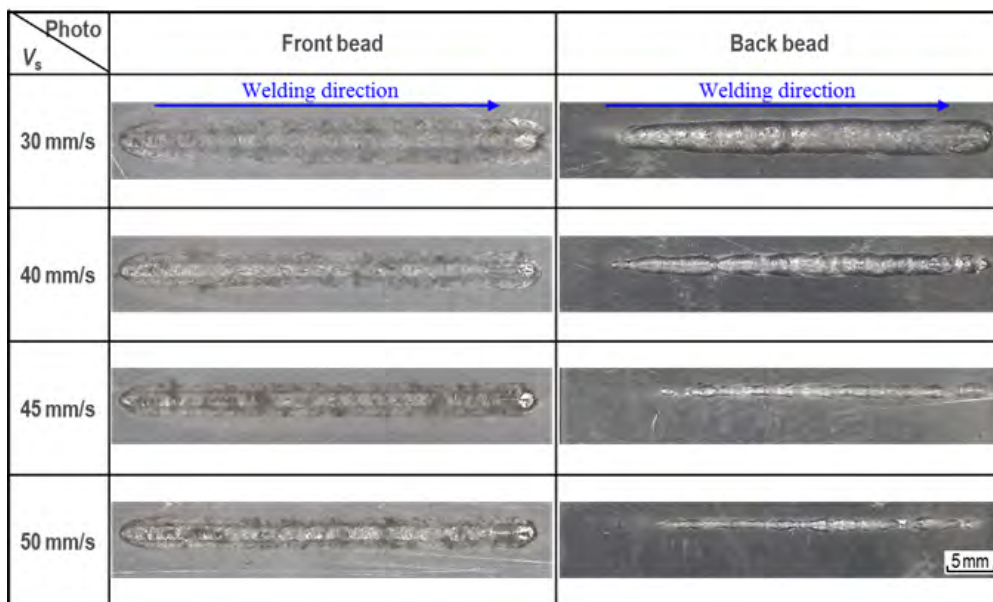


Figure 4: Weld bead appearance of AA6014-AA6451 laser lap dissimilar welding by change welding speed at 5 kW laser power

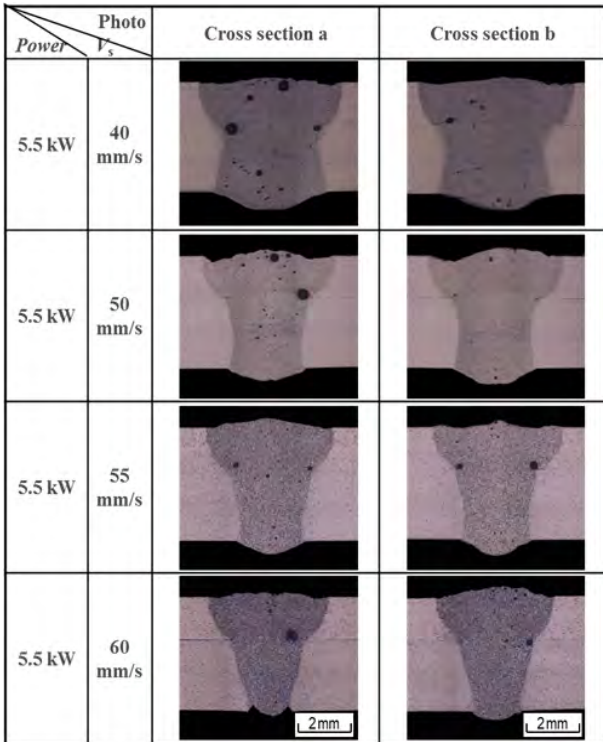


Figure 6: Cross-sectional images of AA6014-AA6451 laser lap dissimilar welding by change welding speed at 5.5 kW laser power with Ar shielding condition

하여 기공의 분포가 감소하였으며 비드 하부측 용융금속의 처짐 현상이 줄어드는 것이 확인 된다. 하지만 용접부의 건전성이 크게 상승되지 않았다.

3.3 이종 알루미늄 합금 레이저 겹치기 용접 특성

이종 알루미늄 합금 용접성과 비교하기 위하여 AA6014 1.2 mm 동종소재의 레이저 겹치기 용접을 진행하였으며, 그 결과를 **Figure 7**에 정리하였다. 레이저 출력은 5 kW로 고정하였으며 용접속도를 30~90 mm/s로 변화시키며 용접을 진행하였다. 상부와 하부 비드의 외관을 관찰하면 용접속도가 증가함에 따라 용접 비드의 폭이 좁아지며 90 mm/s의 용접속도에서는 겹치기 용접이 이루어지지 않았다. 70 mm/s 이상의 속도에서 부분관통 용접이 이루어졌다. 단면 사진을 관찰해 보면 용접금속의 형상 및 경향 변화가 용접속도 증가에 따라 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 특히, 와인컵 형상의 용접부는 비교적 두께가 얇은 AA6014가 상부에 있는 3.2챗터에 설명한 AA6014(1.2 mm/상) - AA6451(2 mm/하) 이종 용접특성과 유사하다.

Figure 8은 소재의 위치조건의 변경에 따라 생성된 용접부의 형상특성을 대표적 사례를 예를 들어 비교한 그림이다. AA6014 1.2 mm 소재가 상부에 존재할 경우 상부 소재가 먼저 넓은 면적으로 용융되며 하부의 AA6451이 비교적 적은 면적으로 용융되며 용접되는 형상을 나타낸다.

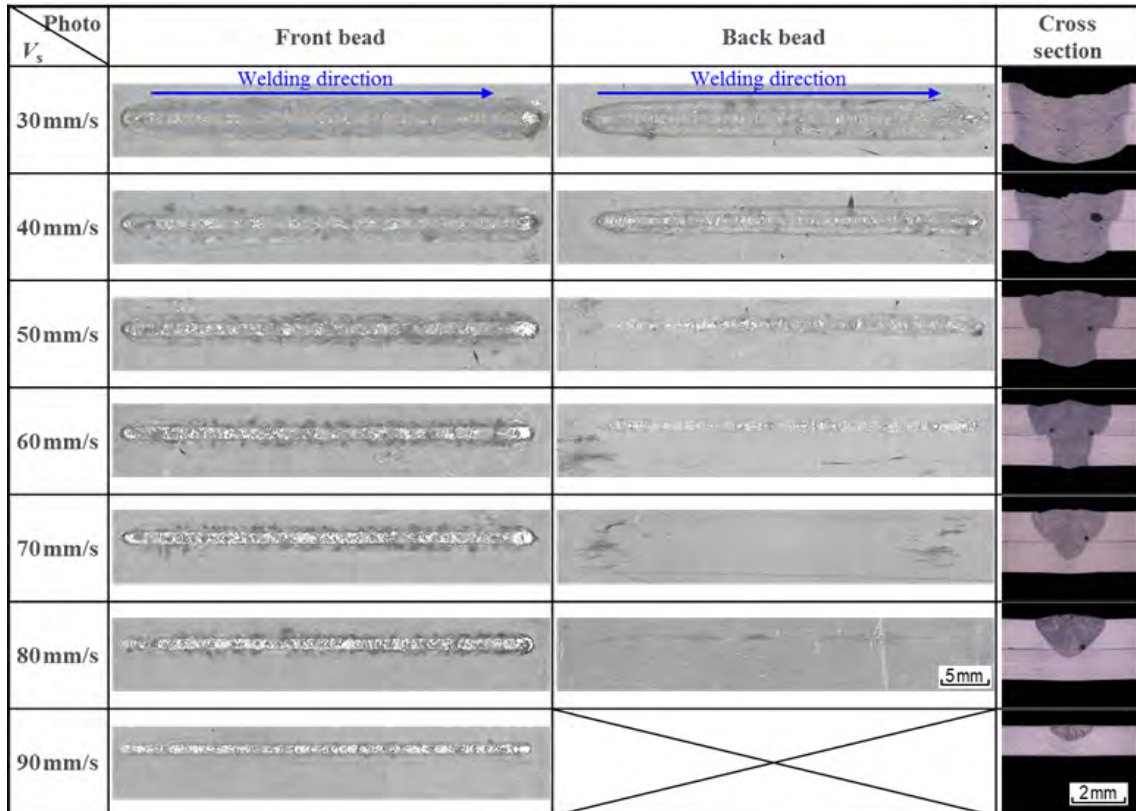


Figure 7: Weld bead appearance and cross-sectional images of AA6014-AA6014 laser lap dissimilar welding by change welding speed at 5 kW laser power

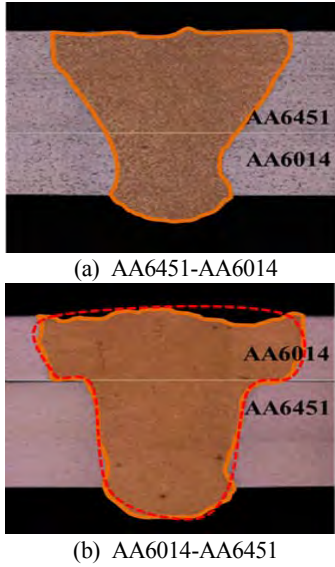
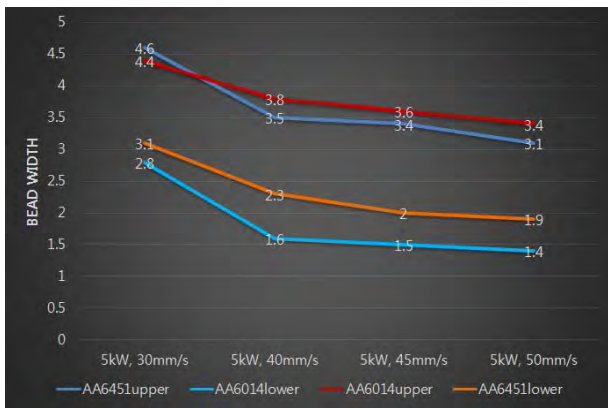
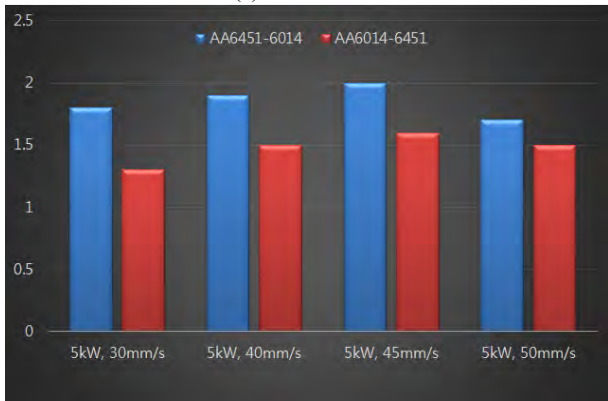


Figure 8: Differences in weld geometry by changing welding conditions of AA6451 and AA6014



(a) Bead width



(b) Difference between upper and lower bead width

Figure 9: Differences in weld bead by changing welding conditions of AA6451 and AA6014

Figure 9는 소재 위치에 따른 비드의 변화를 수치화 한 그래프이다. Figure 9 (a)는 소재의 위치조건의 변경에 따른 비드의 상부와 하부 비드로 상판의 상부 0.5mm 위치

하판의 0.5mm 위치를 각기 측정하였다. 비드폭은 용접속도 40 mm/s 이상의 조건에서 AA6014(1.2mm)소재가 상부에 있는 경우 더 넓은 비드를 가지고 있는 것이 확인된다. 이는 상부 알루미늄합금 소재가 비교적 박판인 경우 상부에 열에너지가 비교적 쉽게 축적되어 레이저빔의 흡수율을 쉽게 높이고 너비방향으로 열이 쉽게 확산되기 때문이다. 상부비드와 하부비드의 측정된 폭의 차이를 Figure 9 (b)에 나타내었으며, AA6014소재가 상판인 경우 비드폭 차가 적으나 상부의 소재 두께가 비교적 얇아 Figure 8에서 보여주는 바와 같이 더욱 선명한 와인컵 형상의 용접부를 가진다.

4. 결 론

경량화 및 친환경 소재로 주목을 받고 있는 알루미늄 합금 중 AA6451(2 mm)과 AA6014(1.2 mm)소재의 레이저를 이용한 제살 용접법에 대한 연구를 진행하였다. 사용된 레이저는 고회도 고효율의 최대출력 8 kW급 Disk laser를 열원으로 사용하고 비교적 빠른 용접속도를 정확하게 공급할 수 있는 스캐너 헤드 장비를 활용하여 겹치기 용접을 진행하였다.

AA6451-AA6014 조건에 비교하여 AA6014-AA6451 용접의 경우가 보다 작은 크기의 기공이 생성되므로 본 연구에서는 AA6014(1.2 mm)소재가 상부에 있는 조건이 용접에 유리하다는 것을 확인하였다. AA6014-AA6451 겹치기 용접시 레이저 출력 5 kW, 용접속도 45 mm/s의 조건에서 비교적 양호한 용접 비드가 얻어졌다. 알루미늄 용접에 있어서 이면비드 측에 Ar 실딩가스를 이용하면 용융금속에 이면측으로 밀리는 현상을 줄일 수 있으며 용접 품질이 더 향상되는 것이 확인되나 그 정도가 크지는 않았다.

용접속도가 비교적 느린 조건에서 용접부에 기공이 비드 전반에 걸쳐 생성되었으며, 거의 모든 조건에서 두 소재가 겹치는 경계면 주변에 용접성에 영향을 크게 미치는 결함이 생성된 것을 알 수 있다. 이렇게 생성되는 기공은 알루미늄 합금소재 표면에 존재하는 산화막 및 겹친 소재 사이에서 접촉되는 외부 분위기에 의한 영향과 응고시 발생하는 응력에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 따라서, 용접되는 면적을 제어하고 외부와 접촉면을 최소화 하며 용접속도를 비교적 빠르게 유지하여 고품질의 레이저 열원을 활용한다면, 더욱더 우수한 용접부를 얻는 것이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 “자동차 메커니즘부품 고도화 협력기술개발 기반구축(R0004904)”사업 지원으로 수행된 연구 내용이다. 향후 조직 및 기계적 분석을 통한 용접 메커니즘을 확인하고 관련 내용을 공개할 예정이다.

References

- [1] M. Olabode, P. Kah, and A. Salminen, "Overview of alser systems and optics applicable to hybrid laser welding of Aluminium alloys," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 42, pp. 6-19, 2015.
- [2] G. Kopp and E. Beeg, *New Multi-Material Design Concepts and High Integration Light Metal Applications for Lightweight Body Structures*, *Materials Science Forum*, vol. 638-642, pp. 437-442, 2010.
- [3] F. Ostermann, *Anwendungstechnologie Aluminium*, Springer Verlag, 2007.
- [4] L. Quintino, R. Miranda, U. Dilthey, D. Iordachescu, M. Banasik, and S. Stano, "Laser welding of structural aluminium," *Advanced Structured Materials*, vol. 8, pp. 33-57, 2012.
- [5] T. Cock, *Aluminium - A Light Metal*, European Aluminium Association, 1999.