그린레이저를 이용한 Al-Cu 이종소재 레이저 용접 연구 및 딥러닝에 의한 품질판정

김 태 원* · 최 해 운***,†

*계명대학교 대학원 기계공학과

**계명대학교 기계공학전공

Study on Laser Welding of Al-Cu Dissimilar Material by Green Laser and Weld Quality Evaluation by Deep Learning

Tae Won Kim* and Hae Woon Choi***,†

*Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung Univ., Daegu, 42403, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung Univ., Daegu, 42403, Korea

†Corresponding author: hwchoi@kmu.ac.kr

(Received September 30, 2020; Revised November 9, 2020; Accepted December 7, 2020)

Abstract

This study reports on Al-6061 and oxygen-free copper C1020P joining results and analysis using cross-sectional metallography and a weld bead deep learning algorithm. The state-of-the-art green laser in the visible region ($\lambda = 515$ nm) was used as a welding heat source, and the reliability of the bonding interface was analyzed. Remarkable spatter reduction was achieved in the full scan-speed range of 180 - 220 mm/s and output of 800 - 1200 W. Using a green laser with 40% absorption, we achieved high-quality joining without employing any additional mechanical processes such as weaving, wobble, or oscillation. In the case of an IR laser, we determined that it was sensitive to the state of the surface (e.g., scratched or rough). By contrast, in the case of the green laser, it was relatively insensitive, and a homogeneous bead was formed. Over 98% accuracy was found for the welded parts, and 66% accuracy was observed for the failed welding parts. The welding quality was derived as a deterministic rather than stochastic result, and it was confirmed that image-based deep learning technology was effectively applied and could be used for non-destructive welding quality inspection.

Key Words: Dissimilar joining, Al welding, Copper welding, Green laser, Battery welding

1. 서 론

환경 자동차에 대한 시장의 요구에 대응하기 위해서 전기차 및 경량화에 대한 꾸준한 연구가 진행되어 왔다. 특히, 전기자동차의 급격한 시장 확대로 인해서 필요부품에 대한 신뢰도 높은 생산기술개발이 요구되고 있다.

자동차 배터리 및 동력계통에는 Al-6061 및 C1020P 등의 이종소재 용접에 대한 솔루션이 요구되고 있으며, 차량경량화와 높은 강도를 위해서는 Al-6061과 Mg

등의 이종소재의 용접기술이 화두가 되고 있다¹⁾.

차량 경량화는 연비와 동력성능, 조향 능력, 가속 성능에 직접적인 영향을 미친다. 또한, 제동거리 감소 및 충돌에너지가 감소 등으로 인한 안전성도 증대되게 된다. 차체경량화에는 주로 Al-Mg 계 합금인 5000계열과 Al-Mg-Si계 합금인 6000계열이 많이 사용되는데, 이는 합금의 높은 성형성과 내식성 때문이다²⁾.

전기차와 하이브리드 자동차의 핵심 부품은 배터리 팩으로서 배터리 셀 간의 접합부 신뢰도가 전체 성능과 품질에 영향을 미치게 되므로 이종소재에 대한 다양한 용접 기술이 연구되어 왔다³⁾.

레이저 기술은 고밀도 집속, 주변부 손상 최소화 그리고 높은 자동화의 장점으로 인해서 고정밀 및 고신뢰도 부품 제작에 많이 이용되어 왔다. Al-6061과 C1020P를 접합하기 위해서 이러한 레이저는 다양한 솔루션을 제공해 왔으며, 레이저의 허용성과 경제성 그리고 기술성의 이유로 IR(Infra Red, 적외선) 영역의 디스크 레이저 및 파이버 레이저가 많이 사용되어 왔다⁴⁻⁵⁾. 다만 레이저발전 효율 및 안정성의 이유로 인해서 주로 IR 영역 파장의 레이저가 산업적으로 많이 이용되어 왔으나, 알루미늄이나 구리 등의 소재에서는 흡수도가 높지 않아서 레이저 공정기술(위빙, 와블링 등)로 그 어려움을 해결해 왔다.

Al-6061과 C1020P는 소재의 특성상 레이저 용접 시 다양한 물리적 한계에 직면하게 되는데, 그 첫 번째 난제가 높은 반사율이다. 통상적으로 IR 영역의 레이저 빔을 사용하여 용접을 할 때 C1020P의 레이저 빔 흡수율이 약 4%로 이하로서, 에너지 낭비가 많고 균일한 용접품질을 얻는데에 한계가 있었다.

일반적으로 IR 영역의 파장으로 구리 소재를 용접할 시, 5% 미만의 낮은 흡수도로 인해서 스퍼터 형성, 표면 상태에 따른 흡수도 변화 등은 생산공정에서 균일한 제품 생산에 치명적인 약점으로 인식되어왔다. VIS(Visible, 가시광) 영역 파장의 레이저는 IR 영역보다는 5배 이상의 흡수도로 물체에 조사되기 때문에 에너지 효율도 높지만, 안정된 공정환경이 큰 장점이다. Fig. 1과 같이 그린레이저의 C1020P 소재 흡수율은 약 40%로 이러한 난제를 극복할 수 있는 해결책으로 기대가 된다⁶⁾.

그린레이저의 높은 장점으로 인해서 IR 파장을 SHG(Second-harmonic generation)을 통한 주파수 변조로 그린레이저를 Pulsed 방식으로 시도되기도 하였으나, Pulsed 방식이 가지는 한계성으로 인해서 그 응용의 범위가 제한적이었다. 최근 VIS 영역의 레이저 특히 515 nm 파장의 연속 그린레이저가 상용화되면서 이러한 기술적 난제가 빠르게 해결되고 있다. 특히 전

기차 시장에서 고부가가치 부품이지만 구리 및 알루미늄 등의 접합에 어려움을 겪고 있는 배터리 생산에서 그 역할이 기대되고 있다.

본 논문에서는 가시영역($\lambda=515$ nm)에 있는 그린레이저를 사용하여 Al-6061과 무산소동 C1020P 이종소재의 접합을 수행하고 접합계면의 신뢰성을 분석한 연구결과를 수록하였다. 또한 비파괴검사를 통한 용접품질을 위해서 딥러닝을 사용하여 용접비드를 외관을 통한 연구방법도 소개하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험조건

실험에 사용된 소재는 Al-6061과 무산소동 C1020P이며, 두 소재의 물성치는 Table 1에서 나타난 바와 같이 일반적으로 많이 사용하는 구리와 알루미늄 소재를 이용하였다. 시편으로 사용된 소재의 크기는 Al-6061, C1020P 모두 두께 0.4 mm, 폭 50 mm 그리고 길이 100 mm의 박판이며 정밀 전단기를 사용하여 준비하였다.

실험에 사용한 레이저는 독일 Trumpf 사의 그린 레이저(TruDisk 2021)를 사용하였고, 발진되는 레이저 파장 $\lambda=1030$ nm이 SHG를 통해서 $\lambda=515$ nm 파장으로 변조되었으며, 최대 출력은 2,000 W 이다. 발진된 레이저는 그린 레이저용 스캐너를 통해서 샘플에 조사되도록 실험장치를 구성 하였다.

선행 실험의 결과에서 대략적인 레이저 출력범위를 600 W에서 1,200 W로 설정하고, 초점보정 2차원 스캐너(PFO)를 사용하여 레이저 빔을 소재에 스캔하였다. 이때 스캐너와 소재간의 거리는 330 mm 내외이고, 초점크기는 200 μ m이다. 스캔 속도 또한 180~220 mm/s 범위에서 설정 하였으며, 보호가스는 질소가스를 사용 하였다.

2.2 실험 장치 구성

이종소재의 용접성 검토를 위해서 0.4 mm 두께의 Al-6061과 C1020P 소재를 겹치기 용접(Lap joint) 하였다 (Fig. 2b). 이때 Fig. 2a과 같이 가압 지그를 사

Fig. 1 Laser absorption on C1020P⁷⁾

Table 1 Chemical composition of material

Al6061 (wt%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
	0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	Bal.
C1020P	Cu					O ₂			
	>99.56					<10 ppm

Fig. 2 Experimental setup

용하였으며, 사용한 토클 클램프의 가압력은 각 90 kgf 내외이며, 보호가스는 전 용접구간에 걸쳐서 분사되도록 실험 장치를 구성하였다. 겹침의 구간은 용접결과에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되지만, 균질한 시편제작을 위해서 겹침량을 충분히 (45 mm) 하였다. 또한 박판용접의 특성상 전단-인장력 시험시 발생할 수 있는 뒤틀림의 가능성이 적어서, 추가적 겹침은 수행하지 않았다.

3. 실험 결과

3.1 레이저 용접 결과

Al-6061과 C1020P 시편을 지그에 장착 하였는데, 이때 Al-6061 소재를 상부에 위치시키고 C1020P 소재는 아래쪽에 위치시켜서 겹치기 용접을 진행 하였다. 용접조건으로 레이저빔 스캔 속도를 200 mm/s로 고정하고, 출력을 변수로 설정하였다. 출력에 따른 비드폭 변화를 관찰하는 정량적인 분석과 용접속도에 따른 용접 품질분석을 위해 초기 실험 후 동일조건에서 총 2 회의 용접을 진행하였다.

Fig. 3은 스캔 속도 200 mm/s, 출력을 600 W 부터 1,200 W 까지 용접을 진행한 결과를 단면과 비드상면을 통해서 보여주고 있다. 실험결과에 따르면 600 W 를 제외한 전 출력에서 용접됨이 육안으로 확인되었다.

특히, 600 W 에서는 Al-6061 소재도 녹지 않았으며 상부에 입열로 인한 표면 용융(Skin melting)흔적만 관찰 되었다. 800 W 부터는 Al-6061이 용융 및 관

Fig. 3 Cross sectional view of weld joints

통되고 C1020P에까지 레이저 빔이 도달하여 C1020P가 용해되어 접합이 이루어 졌다. 800 W에서 1,100 W의 전 범위에서 양호한 용접이 이루어 졌으며, 스패터도 거의 발견되지 않았다. 다만, 최대입열 조건인 1,200 W에서는 스패터가 일부 발생하였다.

Fig. 3에서 요약 정리된 바와 같이 접합부 단면을 분석한 결과, 900 W 이상에서 하부 C1020P가 완전 용융 되어 상부 알루미늄 영역으로 침투되어 융착되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 출력에 증가 됨에 따라 Al-6061과 C1020P가 융착 영역은 더 활발히 관찰되었으며, 최고출력 1,200 W 조건에서의 단면을 분석한 결과 표면층부터 계면층 전영역에 걸쳐서 C1020P와 Al-6061이 완전 혼합융착되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 4는 1,200 W 조건에서의 용접부 단면을 확대하여 분석한 것으로, 구리와 알루미늄이 난류 형태로 섞이어서 혼재되어 있는 것이 관찰 되었다. 앞서 제시된 바와 같이 최고 입열이 이루어진 1,200 W에서는 외관상 스패터가 일부 발견되었으며, 이는 내부적으로 난류 형태의 용융풀 대류가 일어나면서 격렬한 교반현상(Stirling)이 발생한 것으로 추정된다. 이러한 교반현상은 비철금속 용접에서 이상적으로 관찰되는 것으로서

Fig. 4 Dissimilar material mixture at $P=1,200$ W, $s=200$ mm/s

용접부 신뢰성 향상에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 다만, 과도한 난류교반은 내부기공이나 결함으로 잔류할 수 있어 연구가 필요할 것으로 판단된다.

용접 외관 비드면을 관찰한 결과 1,100 W와 1,200 W에서 계면의 너비와 용접부의 형상은 큰 차이는 없지만 1,200 W에서 스파터가 일부 발생하였다. 하지만, 1,100 W에서 스파터 없이 비드면이 균일하고 Al-6061과 C1020P가 용융이 잘 되어 가장 적합한 출력으로 결정되었다.

용접 외관 비드면의 정량적 분석을 위해서, 선행실험과 동일조건으로 스캔속도를 200 mm/s으로 고정하고 출력을 600~1,200 W의 범위에서 변화시켰다. Fig. 5에서 나타난 경향과 같이, 출력이 증가될수록 평균 비드의 폭은 증가하며 일정출력(1,000 W)이상에서는 비드폭의 증가 경향이 둔화됨이 관찰되었다.

용접속도에 따른 영향을 알아보기 위해서 1,100 W로 출력을 고정시킨 후 용접 속도를 180 ~ 220 mm/s로 증가시키며, 앞선 실험과 마찬가지로 Al-6061이 C1020P를 겹치기 용접하였다. 각 소재를 45 mm 겹쳤고 보호가스는 질소가스를 사용하였으며, 용접부 상부를 광학현미경으로 비드의 외관을 관찰하였다. 앞

Fig. 5 Weld bead width measurement (P = variable, $s=200$ mm/s)

Fig. 6 Weld quality inspection for variable weld speed

서 실험한 200 mm/s 기준으로 입열량이 상대적으로 많은 용접속도 $s=180$ mm/s 와 $s=190$ mm/s 에서는 스파터가 일부 발생하는 것이 관찰되었는데, 이는 과도한 입열에 기인 하는 것으로 추정된다.

전반적인 비드면의 상태는 연속파장 레이저의 특성이 나타나면서 균질하였으며, 보호가스가 충분히 적용되지 못한 구간에서는 일부 산화가 발생하기도 하였지만, 전반적으로 균일한 형태의 외관이 관찰되었다. 입열량이 상대적으로 적은 용접속도 200 ~ 220 mm/s 의 전 영역에서는 스파터 발생이 거의 없었다.

용접의 신뢰성을 알아보기 위해서 전단-인장시험을 동일 조건에서 제작하였고 인장시험을 수행하였다. Fig. 7에서 정리된 바와 같이, 용접구간 전 영역에서 최소 3 kgf/mm 이상의 용접 강도가 확인이 되었다. 유사 조건의 그린레이저를 이용한 용접강도 사례를 찾기 어려워 직접적인 비교는 어려우나, IR 레이저의 사례와

Fig. 7 Shear-tensile test results

비교하였을 때, 유사강도가 나옴을 확인 할 수 있었다. 용접부의 강도는 비드의 폭과 레이저 빔의 초점크기에 따라서 달라짐이 보고되었으며, 다양한 용접조건 실험을 통해서 최적의 용접결과가 도출 될 것으로 기대가 된다.

3.2 딥러닝을 사용한 용접 품질 판별

비파괴검사를 통한 용접품질을 간접적으로 판별하기 위해서 용접비드면을 빅데이터화 하여 딥러닝 기법을 사용하였다. 선행실험의 결과물인 $P=1,100\text{ W}$, $s=180\sim 220\text{ mm/s}$ 의 용접비드를 CCD 카메라로 촬영하였다. 딥러닝을 위해 MATLAB과 AlexNet 알고리즘을 사용하였으며, 비드면 촬영은 648×494 의 해상도와 90fps의 성능을 가진 CCD카메라(Sentech Inc., STC-SC-33POE)를 사용하여 수행하였다.

이미지 데이터를 얻기 위해 소형 CNC Machine에 CCD 카메라를 장착하여 용접 비드를 촬영하였다. 용접 비드의 길이는 80 mm로 준비하였고, 촬영속도는 20 ms 당 최대 한 장의 이미지를 촬영하며 샘플은 0.8 mm/s의 속도로 움직이며 이미지를 취득 하였다 (Fig. 8).

각 조건당 이미지 데이터는 약 12,000개를 얻었으며, 데이터를 조건별 Good과 Fail로 분류하여, 구축된 프로그램을 통해서 딥러닝을 진행하였다. Deep Learning Toolbox는 MATLAB에서 딥러닝 알고리즘 및 사전 훈련된 모델을 사용하여 전이학습을 할 수 있는 툴박스이며, Parallel Computing Toolbox를 이용하여 GPU를 사용하여 병렬 구조로 처리 하였다.

연산가속을 위해서 NVIDIA의 GPU와 CUDA Toolkit

(a) Experimental setup for deep learning

(b) Image acquisition for deep learning

Fig. 8 Deep learning system setup

Fig. 9 Structure of deep learning by Alexnet for Al-Cu weld quality monitoring

을 사용하여 연산 속도를 향상시켰으며, RTX 2070을 Single-GPU로 사용하였으며 CUDA Toolkit은 10.2 Version을 사용하였으며, 신뢰도 향상을 위해서 동일한 조명 및 카메라 이미지 취득 각도를 유지하였다. 본 연구에 사용된 Pre-trained 된 데이터를 반복 업데이트하여서, 판별의 신뢰성을 높이도록 하였으며, 다양한 조건에서의 이미지를 반복하여 학습하여서 Big data를 구축하였다.

딥러닝을 알고리즘은 CNN(Convolutional Neural Network)의 AlexNet을 사용하며, Fig. 9과 같이 5개의 컨볼루션 층(Convolution Layer) 3개의 완전 연결 층(Fully-connected Layer)으로 설계가 되어 있다. 이미지 데이터로 취득된 11,786개의 샘플 중 80% (9,428개)는 학습 데이터로 분류하고 20% (2357개)는 검증데이터로 분류하였다.

그리고 이미지 데이터 증대를 하여 $0^\circ\sim 360^\circ$ 의 범위에서 무작위로 회전을 시켜 학습과 테스트를 진행하였다. 이렇게 함으로서 임의의 각도로 촬영된 용접 결과물도 판별할 수 있도록 하였으며, 검증을 통해서 판별의 신뢰성을 확인하였다.

Fig. 10과 같이 Epoch는 30회, Mini-batch는 128, 활성화함수는 SGDM, 초기학습률은 0.003으로 설정하였으며, 전 조건의 샘플을 대상으로 딥러닝을 수행하였다.

구축된 Deep learning 학습을 기반으로 무작위 샘플을 테스트한 결과, 스패터가 발생한 이미지가 입력되었을 때 98% 이상의 정확도로 Fail이 판정이 되었다. 스패터가 발생한 이미지의 경우 높은 확률로 결과

Epoch	Iteration	Time since start	Training accuracy	Base learn rate
1	1	0	60.94%	0.003
6	200	0 : 31	96.88%	0.003
11	400	01 : 00	99.22%	0.003
16	150	01 : 21	99.44%	0.003
21	800	01 : 58	96.88%	0.003
26	1000	02 : 27	98.44%	0.003
30	1150	02 : 50	100%	0.003

Fig. 10 Deep learning process

Fig. 11 Weld quality evaluation by DL

를 도출하지만, 양질의 이미지를 보여준 결과는 정확도가 상대적으로 낮은 결과를 보여 주어서 추가적인 학습이 필요한 것으로 판단된다. 이러한 결과의 한 요인으로 용접 비드면을 촬영할 때 조명 각도에 의한 그림자에 기인한 것으로 판단된다.

용접조건별 ($P=600\sim 1,200\text{ W}$ 및 $s=180\sim 220\text{ mm/s}$) 시편을 샘플로 하여 좀더 세부적인 판정을 하는 Deep learning 학습도 시행을 하였으나, 비드면으로만 세부 용접조건을 역으로 판별 성공률은 아직 66% 정도로 높지 못하였다. 이는 용접 비드면의 외형이 유사하여 좀더 많은 양의 데이터가 학습 되어야 신뢰도가 높아질 것으로 판단된다.

다만, 이러한 판별 성공률은 용접구간 즉 저 입열구간, 중 입열구간, 고 입열구간에서 조금씩 다르게 나타났으며, 중 입열구간 보다는 상대적으로 입열량이 많은 고 입열구간에서 더 뚜렷이 나타났다. 이에 대한 추가적인 연구가 현재 진행 중이며, 90% 이상의 신뢰를

가지기 위한 조명 및 카메라 설정연구가 진행 중이다.

4. 결 론

515nm 그린레이저를 이용하여 Al-6061과 무산소동 C1020P를 이용하여 용접한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 실험조건으로 설정된 스캔속도 $180\sim 220\text{ mm/s}$ 와 출력 $800\sim 1,200\text{ W}$ 전 범위에서 현저한 스패터 저감이 이루어졌다. 단, 600 W에서는 상부 알루미늄 일부에서 입열흔적만 남았지만, 접합은 이루어지지 않았다.
- 2) 흡수도가 높은 그린레이저를 이용함으로써 별도의 기계적공적 예를들면, 위빙(waving)이나 와블(Wobble or oscillation) 없이도 접합이 이루어 졌다.
- 3) IR 레이저의 경우 표면의 상태 (스크래치나 표면 거칠기)에 민감하고 레이저 흡수율 또한 5%인 반면, 그린레이저의 경우 약 40% 이상의 높은 흡수율과 표면상태에 상대적으로 덜 민감하여 균질한 형태의 비드가 형성 되었다.
- 4) 딥러닝을 사용하여 용접의 품질을 판별한 결과 Fail 일 경우 98%의 정확성을 보였지만 Good인 경우 66%로 낮은 정확도를 보여서 추가적인 학습 및 데이터 확보가 필요할 것으로 판단되었다.
- 5) 용접품질이 통계적(stochastic)이기 보다는 결정적(deterministic) 결과로 도출이 되었으며, 이미지 기반 딥러닝 기술이 효과적으로 적용이 되어 비파괴 용접품질 검사에 이용이 될 수 있음도 확인 되었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 연구비지원 (2019R1F1A1-062594)과 한국 트림프의 장비지원으로 수행되었습니다.

ORCID:Tae Won Kim: <http://orcid.org/0000-0002-3809-8563>
ORCID:Hae Woon Choi: <http://orcid.org/0000-0001-8063-7586>

References

1. J. S. Lee and H. M. Ann, Characteristics of Dissimilar Copper - Aluminum Welding Using Friction Stir Welding, *J. Ind. Technol. Res.* 23(3) (2018) 63-69.
<https://dx.doi.org/10.29279/kostet.2018.23.3.63>
2. C. H. Kim, Y. N. Ahn and H. S. Lim, Laser Welding of Automotive Aluminum Alloys, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 29 (4) (2011) 52-59.
<https://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.4.383>
3. M. J. Kang, W. S. Choi and S. H. Kang, Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module

- Manufacturing, *J. Weld. Join.*, 37(2) (2019) 52-59.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.8>
4. M. J. Kang, T. S. Park, C. H. Kim and J. H. Kim, Laser Welding Characteristics of Aluminum and Copper Sheets for Lithium-ion Batteries, *J. Korean Weld. Join. Soc.*, 36 (6) (2013) 58-64.
<https://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.6.58>
 5. K. Y. Kim, I. C. Choi, K. Ito and M. H. Oh, Growth of Intermetallic Compounds by Heat Treatment at Interface of Friction Welded Al-Cu System, *J. Korean Soc. Heat Treat.*, 32(2) (2019) 1-7.
<https://doi.org/10.12656/jksht.2019.32.2.79>
 6. S. J. Hwang, T. W. Kim, W. S. Jeon and J. P. Jung, Al-Cu Electrode Laser Welding for Rechargeable Battery, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26 (4) (2019) 1-6.
<https://doi.org/10.6117/kmeps.2019.26.4.001>
 7. E. Kaisera, E. M. Dolda, A. Killia, S. Zaskeb and S. Prickinga, Application benefits of welding copper with a 1 kW, 515 nm continuous wave laser, 10th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2018), Fürth, Germany (2018).