



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 2월
석사학위 논문

머신러닝을 이용한 Al/Cu 레이저 용접부의 강도예측 모델링

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

권 순 일

머신러닝을 이용한 Al/Cu 레이저 용접부의 강도예측 모델링

Strength Prediction Modeling of Al/Cu Laser Welded
Joints Using Machine Learning

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

권 순 일

머신러닝을 이용한 Al/Cu 레이저 용접부의 강도예측 모델링

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

권 순 일

권순일의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 손윤철 (인)

위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 조교수 박철호 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

목차

List of Figures	III
List of Tables	V
Abstract	VI
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내외 기술 동향	3
1.3 연구내용	6
2장. 이론적 배경	8
2.1 레이저 용접공정	8
2.1.1 레이저 용접의 원리	8
2.1.2 파이버 레이저 용접공정 특성	11
2.2 레이저 빔 우블링 기법	13
2.2.1. 우블링 원리	13
2.2.2. 우블링 특징	14
3장. 연구 방법	16

3.1 실험재료 및 실험장비	16
3.1.1. 실험재료 및 용접법	16
3.1.2. 실험장비 및 조건	18
3.2 용접비드 특성평가	22
3.3 기계적 · 금속학적 특성평가	23
3.3.1. 인장-전단강도	23
3.3.2. SEM-EDS 분석	23
3.4 인공지능	24
3.4.1. 머신러닝	24
3.4.2. 인공신경망	25
4장. 연구결과 및 고찰	26
4.1 용접 비드 외관 및 단면 특성	26
4.2 기계적 · 금속학적 특성	31
4.2.1 인장-전단강도	31
4.2.2 금속간화합물	35
4.3 회귀분석을 이용한 용접강도 예측 모델링	40
4.4 인공신경망을 이용한 용접강도 예측 모델링	42
5장. 결론	46
참고문헌	48

List of Figures

Fig. 1.1	Annual growth rate of global EV market	2
Fig. 1.2	Al/Cu welded joints of EV Battery Pack	2
Fig. 2.1	Intermetallic compounds layer of Al/Cu laser welding joints	3
Fig. 2.2	Fractured specimen of Al/Cu FSW welded joints after bending test	4
Fig. 2.3	Tensile-shear strength of Al/Cu ultrasonic welded joints	5
Fig. 2.4	Al/Cu welding with green laser and deep learning system	5
Fig. 2.5	Schematic diagram of laser oscillation principle	8
Fig. 2.6	Schematic diagram of fiber laser system to structures	9
Fig. 2.7	Design of a fiber spacial coupler	10
Fig. 2.8	Design of a double clad fiber of light pumping	10
Fig. 2.9	Bead shape of line welding and wobbling welding	13
Fig. 2.10	Schematic of wobbling process	15
Fig. 3.1	Light absorption rate of metal by wavelength	17
Fig. 3.2	Schematic illustration of experiment specimen	18
Fig. 3.3	Single mode fiber laser equipment	19
Fig. 3.4	scanner	20
Fig. 3.5	Joint interface and penetration depth of welded joints	22
Fig. 4.1	Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 100~200mm/sec; bead appearance	27
Fig. 4.2	Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 100~200mm/sec; bead cross section	27
Fig. 4.3	Bead profiles with various welding speeds of 100~200mm/sec	28
Fig. 4.4	Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 400~600mm/sec; bead appearance	29
Fig. 4.5	Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 400~600mm/sec; bead cross section	29
Fig. 4.6	Bead profiles with various welding speeds of 400~600mm/sec	30

Fig. 4.7 Comparison of tensile–shear load of welded joints for line welding with various welding speed 31
 Fig. 4.8 Comparison of tensile–shear load of welded joints for wobbling mode Al/Al welding with various welding speed 32
 Fig. 4.9 Comparison of tensile–shear load for wobbling mode Cu/Cu welding with various welding speed 33
 Fig. 4.10 Comparison of tensile–shear load for wobbling mode Al/Cu welding with various welding speed 34
 Fig. 4.11 Fractured mode of Al/Cu welded joint 34
 Fig. 4.12 Al/Cu phase diagram 35
 Fig. 4.13 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0mm 36
 Fig. 4.14 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0.2mm 37
 Fig. 4.15 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0.4mm 38
 Fig. 4.16 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0.6mm 39
 Fig. 4.17 Residual plots of the tensile–shear load 40
 Fig. 4.18 Residual plots of the penetration depth 41
 Fig. 4.19 Comparison of the training and test model for tensile–shear load shallow neural network 43
 Fig. 4.20 Comparison of the training and test model for penetration depth shallow neural network 44
 Fig. 4.21 Predicted result of shallow neural network model 45

List of Tables

Table. 3.1	Chemical composition of Al1050-H18, OFC	16
Table. 3.2	Mechanical properties of Al1050-H18, OFC	17
Table. 3.3	The specification of fiber laser welding machine	19
Table. 3.4	Welding parameters	21
Table. 3.5	Wobbling mode frequency (Hz)	21
Table. 3.6	Input and output parameter for machine learning	24
Table. 4.1	SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0mm	36
Table. 4.2	SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0.2mm	37
Table. 4.3	SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0.4mm	38
Table. 4.4	SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0.6mm	39
Table. 4.5	Regression model of welded joints for tensile-shear load	40
Table. 4.6	Regression model welded joints for penetration depth	41
Table. 4.7	Comparison of regression model and shallow neural network analysis	45

ABSTRACT

Strength Prediction Modeling of Al and Cu Laser Welded Joints Using Machine Learning

Kwon Soon Il

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

In these days, the importance of EV battery stability has increased due to strict environmental regulations. Al and Cu, which have high reflectivity and low absorption during welding, are applied to the battery cell of an electric vehicle. In addition, it is difficult to obtain a high-quality joint due to the intermetallic compounds (IMCs) generated in the Al/Cu welding joint. It is necessary to derive a process variable road map through strength prediction modeling using machine learning.

In this study, machine learning models and shallow neural network models were developed by using 135 experimental welding data which were constructed for fiber laser with a maximum output of 2.5 kW for Al1050H and Cu1020-H0 materials with a thickness of 0.5 mm. The machine learning model Gaussian process regression (GPR) could be accurately predicted tensile-share load and penetration depth with the decision factor R^2 of 0.97, 0.95,

respectively. The shallow neural network model improved the accuracy to R^2 of 0.99, 0.98. It was confirmed that accurate prediction was possible as a result of comparison and evaluation with decision factor of optimized machine learning and shallow neural network model.

제 1 장. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

세계 4대 자동차 시장인 유럽, 미국, 중국, 일본을 중심으로 자동차 연비규제와 온난화가스 및 배기가스 배출량 등 환경규제 강화에 따른 친환경자동차 개발 중요성이 대두되고 있다. Fig. 1.1과 같이 고유가 및 환경규제 강화로 인한 기존 내연기관차 중심에서 친환경자동차(전기차, 하이브리드차, 수소차 등) 시장으로 무게중심이 급격히 이동하여 세계 각국은 정부 주도하 글로벌 완성차업체들의 탈 내연기관 선언과 함께 친환경차 개발 육성에 집중하고 있는 추세이다. 친환경자동차 개발이 본격화 되면서 내연기관에서 전기차 배터리로 변환되어가는 추세에 배터리 팩은 차종에 따라 수백 개에서 수천 개의 셀로 구성되어 있는데 각각의 셀은 서로 전기적으로 연결되므로 용접부의 특성이 배터리의 성능 및 품질에 영향을 미치게 되며, 용접부 강도와 함께 에너지 손실 저감을 위한 낮은 접촉저항의 확보 또한 매우 중요해지고 있다.

전기차 이차전지 파우치형 배터리의 구성요소 셀과 셀, 탭과 탭, 탭과 버스바에 적용되는 Fig 1.2와 같이 Al/Cu계 이종용접으로 소재 특성상 취성이 강하고 고반사소재이며 금속간화합물(IMCs)까지 생겨 우수한 용접 강도와 함께 낮은 접촉저항의 용접부 확보에 어려움이 있다. 또한 이 과정들을 상용화시키기 위하여 예측가능 하도록 머신러닝과 얇은 신경회로망을 이용하여 공정 최적화와 로드맵 제시가 필요한 상황이다.[1]

따라서 본 논문에서는 Al/Cu 이종재료 용접공정을 다양한 공정변수 하에 적정 강도 확보를 주목적으로 연구를 수행하였으며, 우블링 기법과 용입깊이, 금속간화합물(IMCs)등과 같은 변수가 강도에 미치는 영향을 파악하고자 했다. 이를 위해, 실험을 통한 용입깊이, 인장-전단강도와 금속간화합물 형성 특성을 고찰하였으며, 공정변수별 용접실험으로부터 확보한 실측값을 활용한 정도 높은 예측 값을 구현할 수 있는 머신러닝 및 인공지능망 모델을 구축하고자 하였다.

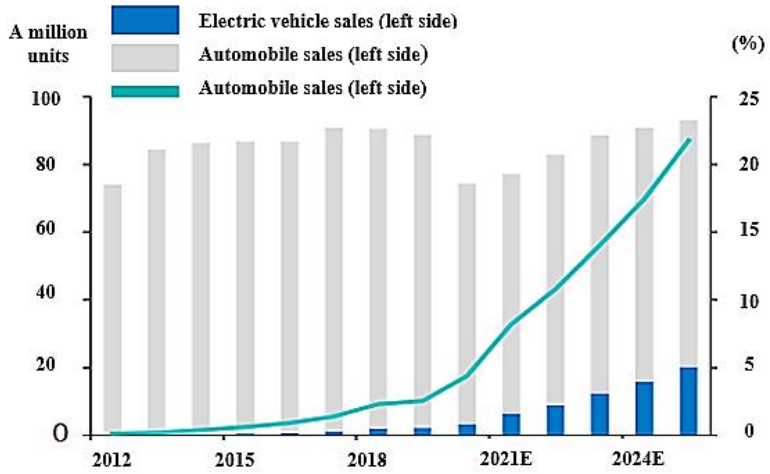


Fig. 1.1 Annual growth rate of global EV market

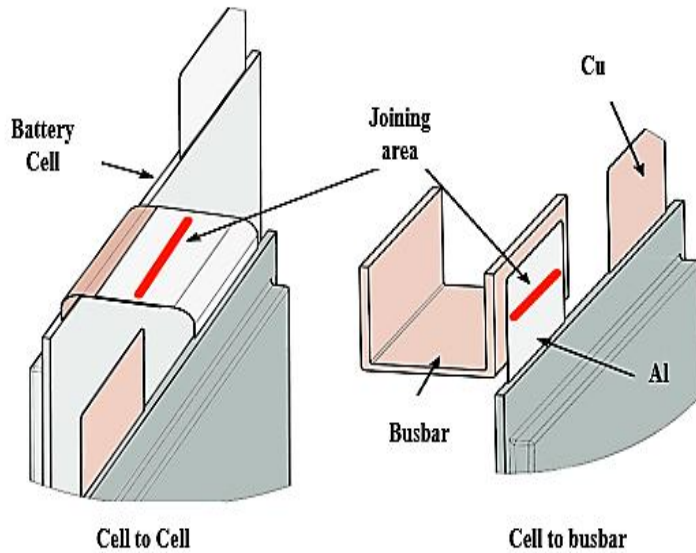


Fig. 1.2 Al/Cu welded joints of EV Battery Pack

1.2 국내외 기술 동향

현재 Al과 Cu간의 용접강도 확보 및 공정 최적화를 위해 초음파, 레이저, 마찰교반용접 (Friction Stir Welding; FSW)등을 적용한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 용접 공정 별 용접강도와 IMCs 형성간의 상관관계 규명에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.

그중 용접 강도를 저하시키는 취성이 강한 금속간화합물 방지에 관한 연구를 진행하고 있는데 Di Zu 등은 금속간화합물의 형성을 최소화하기 위하여 Nd:YAG 레이저 용접 부분 용입 조건으로 용접을 수행하였으며, 레이저 빔 출력은 1650W, 용접 속도는 95mm/s로 최적화된 조건 이었으며 용접 속도가 증가함에 따라 Fig. 2.1에 나와있는 금속간화합물 γ_2 - Cu_9Al_4 의 두께와 용접부의 전단 인장 강도가 감소하였다고 보고했다.[2]

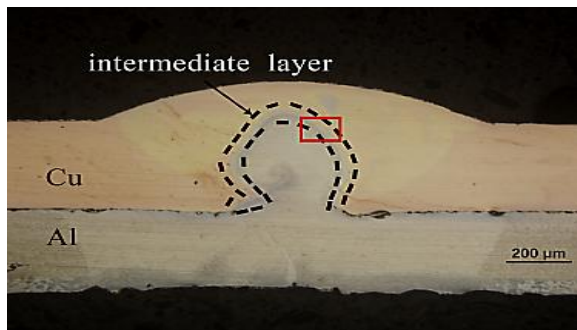


Fig. 2.1 Intermetallic compounds layer of Al/Cu laser welding joints

S. J. Lee등은 파이버 레이저를 이용하여 Al/Cu의 다양한 용접속도에 따른 금속간화합물 형성을 연구하였고 금속간화합물은 1kW 및 10min⁻¹에서 형성된 용접 용접 구역의 넓은 영역에서 쉽게 형성되는 반면, 50min⁻¹의 높은 용접 속도에서는 극도로 감소하는 것을 확인하였다.[3]

P. Xue 등은 Al/Cu 이종 마찰교반용접(FSW)의 고정 위치, 핀 오프셋 및 회전 속도가 에 미치는 영향, 미세구조 및 기계적 특성을 조사하였고 2mm 및 2.5mm의 높은 회전 속도 및 적절한 핀 오프셋에서 양호한 인장 특성이 달성되었고 2mm의 핀 오프셋을 갖는 600rpm에서 Fig. 2.2와 같이 생성된 조인트를 파단 없이 180° 로 구부릴 수 있음을 확인하였다 또 한 더 높은 회전율에서 Al/Cu 계면에서 적층 구조가 발달하였고, 이 경우 크랙이 쉽게 발생하며 역학적 특성이 좋지 않은 경향이 보인다고 보고하였다.[4]

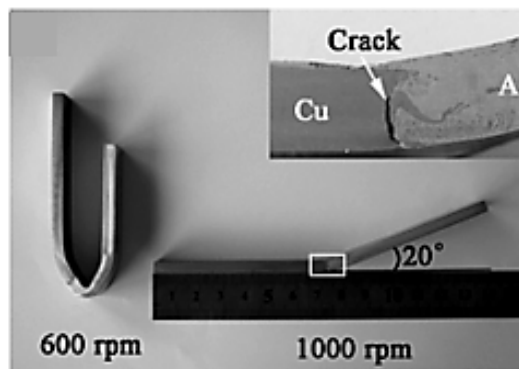


Fig. 2.2 Fractured specimen of Al/Cu FSW welded joints after bending test

Y. Y. Zhao등은 Al/Cu 초음파 용접 용접부의 용접강도, 고장 거동 및 미세 구조에 대한 용접 에너지의 영향을 연구하였고 그 결과 용접강도는 용접 에너지에 따라 Fig. 2.3과 같이 처음에는 증가하다가 1000J에서 최대치에 도달했다가 그 대신 크게 떨어지는 것으로 나타났으며 케비티(cavity) 결함과 금속간화합물(IMC)가 지나치게 높은 에너지 하에서 형성될 가능성이 더 높았다. 2000J 용접부에서 Al_4Cu_9 의 지배적인 상을 가진 0.5mm 두께의 IMCs층이 형성 되는걸 파악하였다.[5]

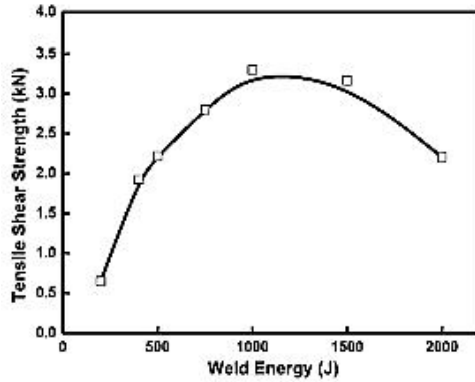
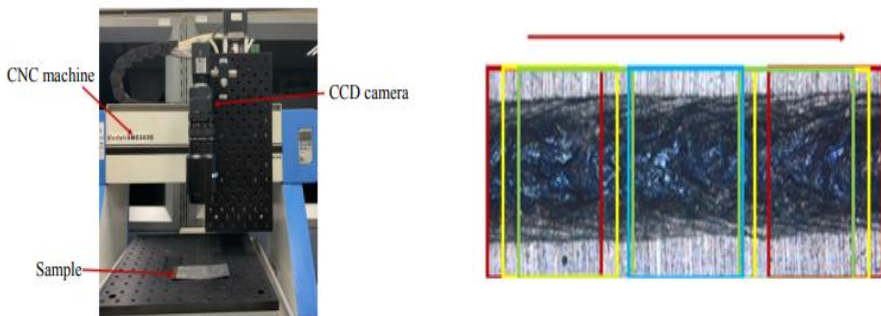


Fig. 2.3 Tensile-shear strength of Al/Cu ultrasonic welded joints

김태원 등은 Al/Cu 이종재를 가시영역 $\lambda = 515\text{nm}$ 의 녹색 레이저를 사용하여 180~220mm/s의 최대 스캔 속도 범위와 800 ~ 1200W의 출력에서 현저히 스퍼터가 감소되고, Fig. 2.4처럼 CCD 카메라를 이용한 이미지 기반 딥러닝 기술로 비파괴 용접품질 검사에 활용할 수 있음을 보고하였다. [6]



(a) Experimental setup for deep learning (b) Image acquisition for deep learning

Fig. 2.4 Al/Cu welding with green laser and deep learning system

1.3 연구내용

본 연구는 파이버 레이저를 이용하여 Al/Cu 이종재료 용접시 용접 공정변수별 용접 특성을 고찰하고자 하였다. 특히 우블링 기법 적용에 따른 조건별 용입깊이, 금속간화합물(IMCs)형성이 강도 값에 미치는 영향을 파악하고자 했다. 아울러 공정변수 최적화를 위해 머신러닝 및 인공신경망 모델 분석을 실시하였다.

(1) 이종재료 Al, Cu의 용접부 비드 특성 고찰

본 연구에서는 우블링 기법 유무에 따른 용저부 특성을 비교 평가하기 위해 파이버 레이저를 사용하여 알루미늄(Al 1050-H18), 구리(OFc) 동종소재 겹치기이음부에 직선용접과 우블링 기법을 이용해 용접하여 비드형상과 단면분석을 통한 두 공정의 차이를 고찰하고자 하였다.

특히 우블링 기법에 의한 증가한 용접면적, 용접속도와 진폭간의 상관관계를 통한 최적 조건 파악을 위해 초점 위치와 출력을 고정하고 용접속도와 진폭의 변화에 따른 용접 비드 특성을 고찰하는 것으로 주안점을 두고 실험을 실시하였다.

(4) 인장-전단강도 평가

Al/Cu 이종재료 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 최대 인장-전단실험을 시험 속도 3mm/min으로 실시하였고, 파단부 위치 파악 및 허용응력 범위 내 인장-전단강도 조건과 최대 인장-전단강도 조건을 파악하였다.

(5) SEM-EDS를 통한 금속간화합물(IMCs) 고찰

Al/Cu 이종재료 용접부의 금속학적 특성을 평가하기 위해 SEM-EDS분석을 실시하였으며 용접부 전체는 100 μm , 금속간화합물 촬영은 50 μm 배율로 실시하였으며,

형성되는 금속간화합물의 종류와 두께 파락을 통해 금속간화합물과 인장-전단강도 간의 상관관계를 고찰하고자 하였다.

(6) 레이저용접 공정변수 최적화를 위한 딥러닝 도입

레이저용접 후 파괴검사를 시행하지 않고 용접부의 상태를 검사할 수 있는 레이저 모니터링 시스템이 존재하지만 장비가 매우 고비용이라는 단점이 있어서 본 실험에서는 딥러닝 알고리즘을 통해 실측값과 예측값 비교를 통한 공정변수 최적화를 시도하였다.

총 135개의 실험 데이터를 이용하여 19개의 회귀모델을 통해 실측값과 예측값의 차이를 확인하였으며 이에 타당성 파악을 위하여 노드 수 별 인공신경망분석을 실시하였다. 얇은 신경망분석은 훈련(Training), 검증(Validation), 테스트(Testing) 데이터를 각각 70%, 15%, 15%로 나눠 정확도를 검증하고자 하였다.

제 2 장. 이론적 배경

2.1 레이저 용접 공정

2.1.1 레이저 용접의 원리

레이저(Light Amplification Stimulated Emission Radiation)는 Fig. 2.5와 같이 외부의 자극에 의해 매질로부터 빛을 방출하게 하고 공진기에 의해 증폭된 빛을 말한다. 펌핑소스는 매질에 빛을 공급하고 외부 자극에 의해 매질로부터 유도 방출된 빛은 공진기의 반사미러에 의해 증폭된다. 일반적으로 레이저는 매질, 공진기, 펌핑소스로 구성되고 매질의 종류에 따라 여러 종류의 레이저로 분류된다 [7][8].

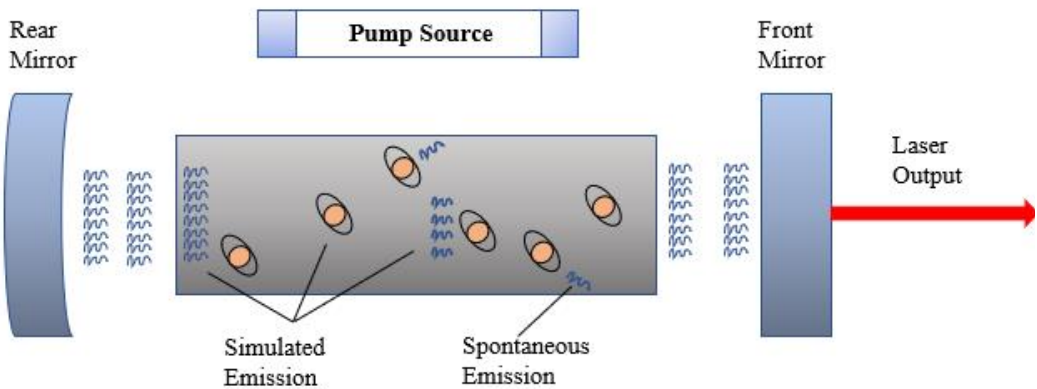


Fig. 2.5 Schematic diagram of laser oscillation principle

파이버 레이저는 Fig. 2.6과 같이 펌프 다이오드 레이저(Pump Diode Laser), 이터븀 액티브 파이버(Ytterbium Active Fiber)로 구성되어 있다.

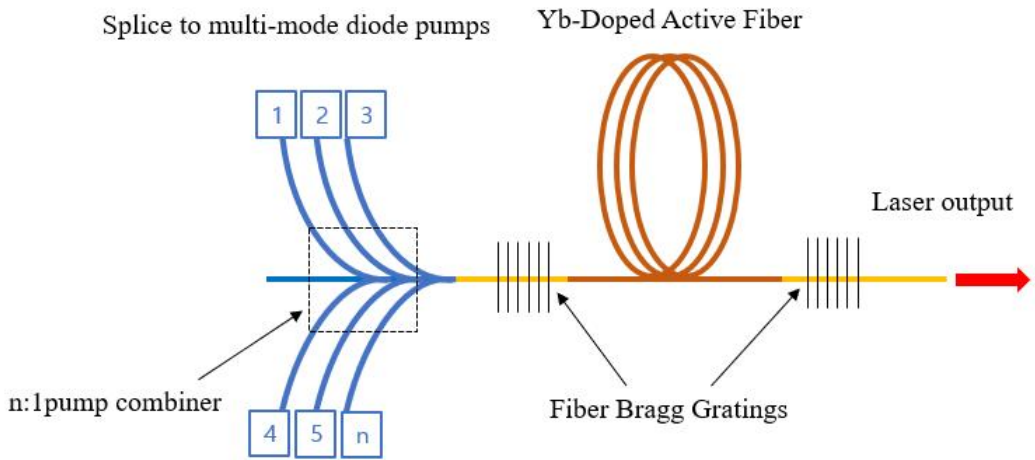


Fig. 2.6 Schematic diagram of fiber laser system to structures

펌프 다이오드에서 방출된 빛은 Fig. 2.7과 같이 레이저 다이오드 광섬유(Laser Diode Pigtail : LDP이하)를 따라 전송되며, 스페셜 커플러를 통해 이중 클래딩 구조로 제작된 이터븀 액티브 파이버 클래드를 통해 전반사하면서 Fig. 2.8와 같이 파이버 코어에 흡수된다. 이 흡수된 빔은 빛을 방출하고, 공진기 역할을 하는 FGB(Fiber Bragg Gratings)에 의해 빔이 증폭된다. 빛의 펌핑 에서부터 레이저출력의 모든 과정이 파이버 내부에서 이루어지기 때문에 외부 충격에 강하고 광학계의 정렬이 필요 없는 것이 특징이다.

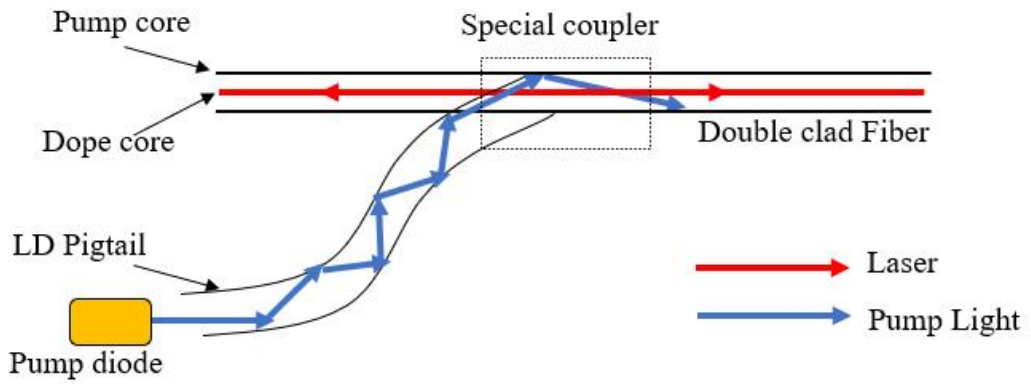


Fig. 2.7 Design of a fiber spacial coupler

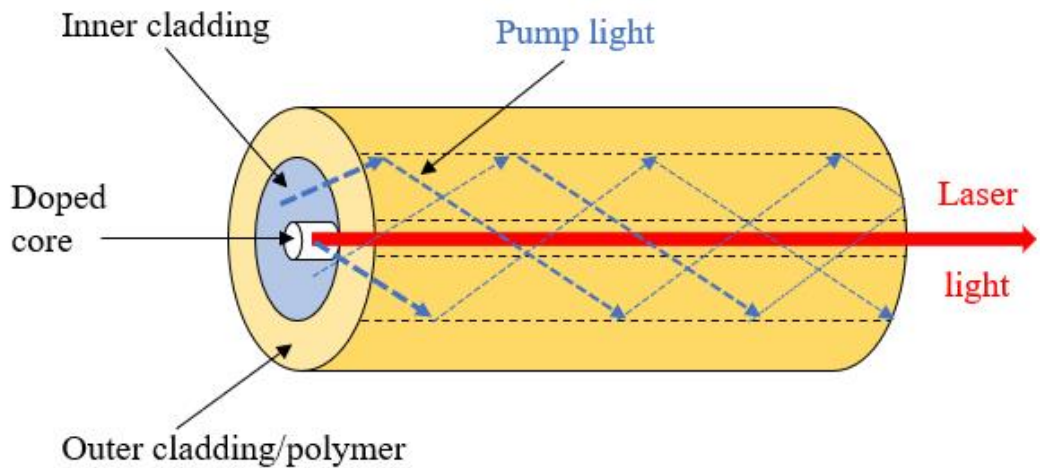


Fig. 2.8 Design of a double clad fiber of light pumping

2.1.2 파이버 레이저 용접의 특성

레이저용접에 흔히 사용되는 레이저 가운데 Nd:YAG레이저와 CO₂ 레이저가 가장 널리 이용되어 왔고 현재는 파이버 레이저가 주도적으로 많이 활용되고 있다. 파이버 레이저의 특성을 재료가공 관점에서 볼 때 레이저의 빔 품질, 유연성, 경제성 및 유지보수 면에서 설명하려고 한다.[7]

가. 레이저 빔 품질

레이저의 품질을 정의하기 위해 BPP(Beam Parameter Product)가 사용된다. 파이버 레이저는 월등한 빔 품질을 나타내기 때문에 실제 가공에서 생산성과 유연성을 갖는다. 빔의 품질은 가공에서 초점크기와 깊이에 직접적인 영향을 보이며 가공효율을 결정한다. 빔 품질이 레이저가공의 효율을 결정하며, 빔 품질이 좋은 파이버 레이저는 초점크기가 작고 용접의 깊이(penetration depth)가 크게 된다. 따라서 초점을 작게 하고 용접을 깊게 하기 위해서는 빔 품질이 좋은 레이저를 선택하는 것이 필수적이다.

나. 유연성

Fig. 2.7과 같이 파이버 커플러를 사용함으로써 피딩 파이버를 보호하고 실제 작업에서는 프로세스 파이버를 사용하게 된다. 프로세스 파이버가 손상을 받았을 경우 커플링 손실 없이 빠르게 교체할 수 있는 것이 큰 특징이다. 또한 광학계의 빔 스위치를 사용함으로써 피딩 파이버를 보호하고 빔 스위치에 의해 레이저의 사용시간을 증가시켜서 작업 속도를 향상 시킬 수 있고 한 대의 레이저로 다양한 가공을 한꺼번에 진행할 수 있는 이점이 있다. 실제 작업에서는 프로세스 파이버가 사용되므로 손상을 받았을 경우 손실이 없이 쉽고 빠르게 교환할 수 있다.

다. 경제성

파이버 레이저는 소모품이 없는 구조로 설계되었기 때문에 전기료 등과 같은 최소의 부대비용이 발생한다. 이것은 기존의 레이저에서 소모품이 발생하지 않고 30%이상의 효율(wall plug efficiency)을 보장하기 때문에 전기료가 적고 시스템의 크기가 작기 때문에 공간적 이점이 있으며 10만 시간 이상의 다이오드 수명을 갖고 있으며, 유지 및 보수가 필요 없는 개념으로 설계되었기 때문에 최소의 비용으로 운영할 수 있는 장점을 가지고 있다.

라. 유지보수

파이버 레이저는 유지 보수가 필요 없는 개념으로 설계되어 최소의 항목을 갖는다. 파이버 레이저는 여러 개의 모듈로 구성되어 있으며, 특정 모듈의 고장 발생 시 예비 모듈로 자동적으로 교체되기 때문에 레이저 출력저하 없이 용접시스템을 사용할 수 있다. 수리는 용접시스템 휴식 중 모듈을 점검하고 필요에 따라 새로운 모듈로 교체할 수 있다. 로봇 등과 같은 동적인 환경에서 사용되기 때문에 프로세스 파이버가 손상을 입을 수 있으며 정렬이 필요 없는 구조의 광 커플러와 파이버를 사용하기 때문에 예비 파이버로 쉽고 빠르게 교체할 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 파이버 레이저는 크기가 작기 때문에 레이저 자체의 고장일 경우 백업 레이저를 보유하고 있다가 대체할 수 있는 장점을 가지고 있다.

마. 빔 흡수율

Al/Cu 특성상 레이저 용접 시 레이저 반사율이 크고 에너지 흡수율이 낮은 특성이 있기 때문에 흡수율이 우수한 레이저로 용접을 해야 한다. 금속 소재의 경우에 레이저 빔 흡수율이 높아 CO2 레이저에 비해 적은 출력으로 동일 두께 소재의 용접이 가능하다.

2.2 우블링 기법

2.2.1 우블링 원리

우블링 기법 용접은 용융 풀에 레이저 빔이 진동을 가지고 조사될 때 레이저 빔을 우블링 이라고 하며, 레이저 빔을 선형 또는 곡선형의 진동을 이용해 주요 용접 경로를 따라서 이송시킨다. 이때 레이저 빔은 고속 반복적인 진동을 통해서 이동하면서 모재를 용융시키는데, 용융부의 일부를 재용융 하면서 용접 경로를 따라 진행해 나간다. 이때의 비드 형상은 Fig. 2.9와 같으며, 직선용접에 의한 비드 형상보다 넓은 용접면적을 볼 수 있다.

특히, 매우 작은 스폿 사이즈로 초점을 맞출 수 있는 고품질의 파이버 레이저 빔을 사용하는 진동 기법은 갭의 문제가 있을 때 특히 유효하며, 직선 용접에서 용입깊이가 낮은 문제점도 이러한 진동 기법(우블링)을 통해 해결할 수 있다. 따라서 레이저 빔의 이송 속도 와 진동 주파수는 우블링 기법의 중요 변수이다. 이 두 변수의 조합 비율에 따라 레이저 빔(이송 운동)의 주요 용접 경로에 불연속 또는 연속 비드가 나타날 수 있다.

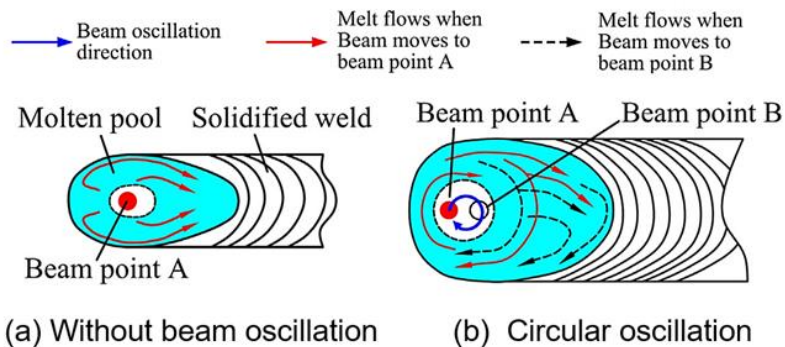


Fig. 2.9 Bead shape of line welding and wobbling welding

2.2.2 우블링 특징

레이저 빔의 이송 속도 와 진동 주파수는 우블링 기법의 중요 변수이다. 이 두 변수의 조합 비율에 따라 레이저 빔(이송 운동)의 주요 용접 경로에 불연속 또는 연속 비드가 나타날 수 있다.

높은 진동 주파수 값은 진동하는 동안에 레이저 빔의 중첩을 일으켜서, 재료 일부분을 재용융을 일으키며, 용접의 주요 경로의 진행 축을 따라 연속비드를 생성시킨다. 높은 용접 속도는 레이저 빔의 통로로부터 용융된 재료 부분 사이에 큰 갭이 형성되어 레이저로 용융시킨 재료의 일부를 재용융 시키는데 제한이 있기 때문에, 레이저의 주요 용접 경로를 따라서 불완전한 연속 비드가 발생할 위험이 있다.

이러한 우블링 기법은 좁고 얇은 고밀도 레이저 빔을 이용해 선형의 경로 따라 완벽한 원형 모션으로 빔을 이동시킴으로써 Fig. 2.10과 같은 용접부 형상을 만들 수 있다. 이러한 주요 변수들을 통해 우블링 기법 회전 주파수와 용접 속도를 구할 수 있는 식이 아래 식 (2.1)과 (2.2)와 같다. 이 변수들을 이용하여 각각 용접에 환경에 맞는 주파수와 속도를 고려하여 우블링 기법 용접을 실시해야한다.[9] 여기서 f 는 회전주파수 A 는 진폭 V_t 는 회전속도 V_f 는 용접속도를 나타낸다.

$$f = \frac{V_t}{\pi A} \tag{2.1}$$

$$V_f = f(A - (\frac{A \cdot \text{Overlap}}{100})) \tag{2.2}$$

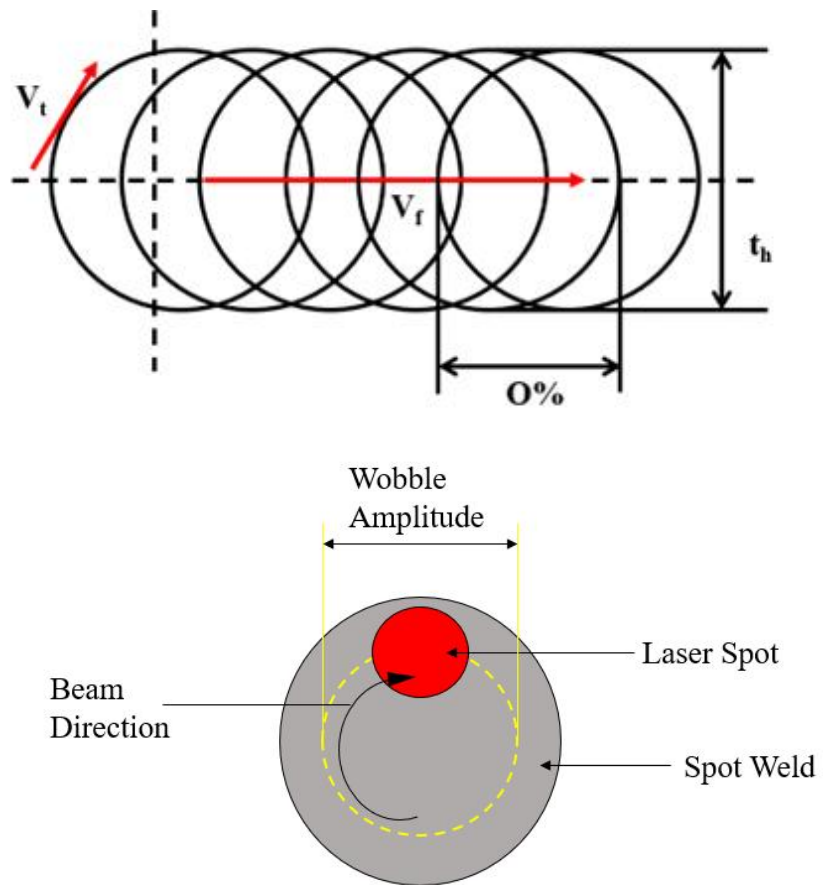


Fig. 2.10 Schematic of wobbling process

제 3 장. 연구방법

3.1 실험재료 및 실험장비

3.1.1 실험재료 및 용접법

본 연구에서는 이종재 Al과 Cu를 파이버 레이저 용접을 이용하여 겹침 이음 용접 시 직선용접과 우블링 기법 용접의 각 공정변수별 용접부 특성과 인장-전단강도 및 금속간화합물 형성특성을 고찰하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 Al과 Cu는 Al1050-H18과 OFC로, 실험에 사용된 소재의 화학적 조성과 기계적 물성은 Table. 3.1, Table. 3.2에 명시되어있다. 또한 레이저별 Al, Cu 레이저별 빛 흡수율을 Fig. 3.1에 나타내었다. Fig. 3.1를 보면 블루·그린 레이저가 가장 흡수율이 높지만 고가 이고, IR 레이저인 YAG 레이저에 비해 파이버 레이저가 빛 흡수율이 높다. 본 연구에서는 파이버 레이저를 선정하였다. 또한 IR 레이저의 한계인 높은 열전도율로 인한 안정성 저해와 블루 그린레이저보다 낮은 빛 흡수율을 해결하기 위하여 우블링 기법을 채택하여 이를 해결하고자 하였다.

Table. 3.1 Chemical composition of Al1050-H18, OFC

Al 1050-H18 (%)	Si	Zn	Fe	Ti	Cu	Mn	Mg	Al
	0.25	0.05	0.40	0.03	0.05	0.05	0.05	99.50
OFC	Cu				O ₂			
	>99.56				<10 ppm			

Table. 3.2 Mechanical properties of Al 1050-H18, OFC

Materials	Mechanical Properties		
	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Yield Strength (MPa)
Al 1050-H18	165	4	150
OFC	282	18	-

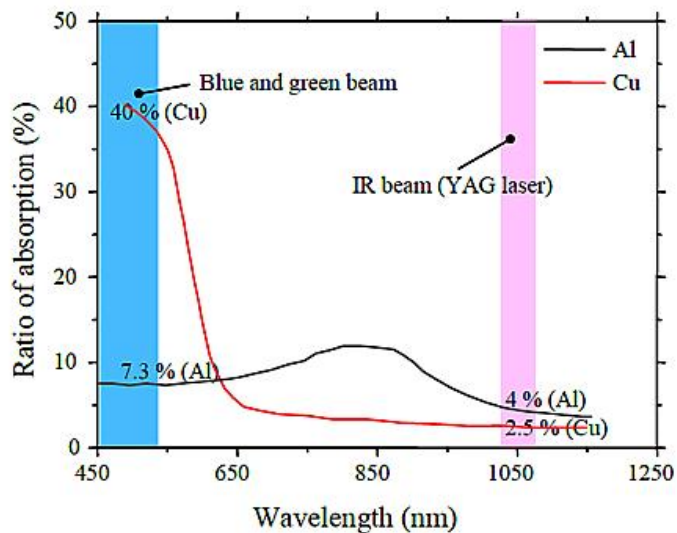


Fig. 3.1 Light absorption rate of metal by wavelength

본 실험에 사용된 시험편은 Al(Al1050-H18)와 Cu(OFC)의 재원은 모두 길이 (L)=100mm, 폭(W)=25mm, 두께(t)=0.5mm이다. Fig. 3.2에 나타낸 모식도와 같이 용접 진행은 상판을 Al 1050-H18로, 하판은 OFC로 30 mm 겹쳐 파이버 레이저 용접을 실시하였다.

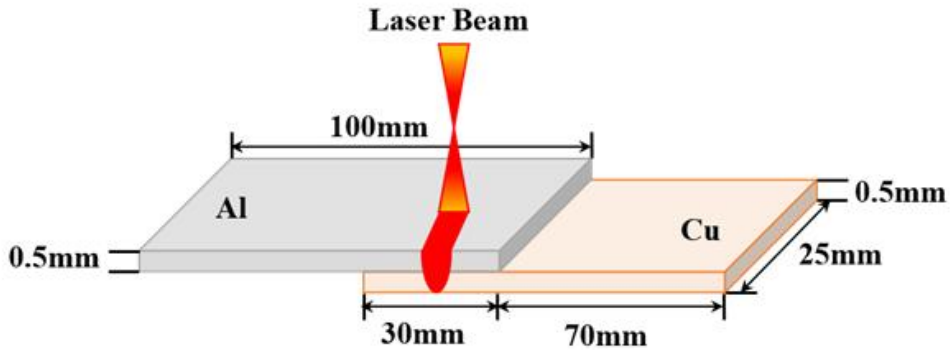


Fig. 3.2 Schematic illustration of experiment specimen

3.1.2 실험장비 및 조건

본 연구에서 사용된 실험용 용접 장비는 LMS社의 MAT-025H이며 2.5kW급 레이저 용접기이고 발진기는 Fig. 3.3에 명시한 LMS社의 MAT-025H이며 연속파(CONTINUOUS WAVE) 타입의 파이버 레이저로 구체적인 사양은 다음의 Table 3.3과 같다. MAT-025H의 주요사항으로는 싱글모드 파이버 레이저로 초점거리가 255mm이고 최대출력 2.5kW 파이버코어 20 μ m이다.

스캐너는 Fig. 3.4의 RAYLASE社의 SS-11E-20 [Y]-QU-[W]-RA-D2를 사용하였으며, F-theta 렌즈를 사용하였다. BPP(Beam Parameter Product) 4mm \cdot rad, 콜리메이터 렌즈 100 μ m, 지그 압력은 0.4MPa로 고정하여 실험을 진행하였다.

Table. 3.3 The specification of fiber laser welding machine

Model	MAT-025H
Type	Continuos Wave (CW Type)
Mode type	Single
Fiber core	20 μ m
Beam spot size	50 μ m
Laser power	2.5 kW
Focal length	255 mm

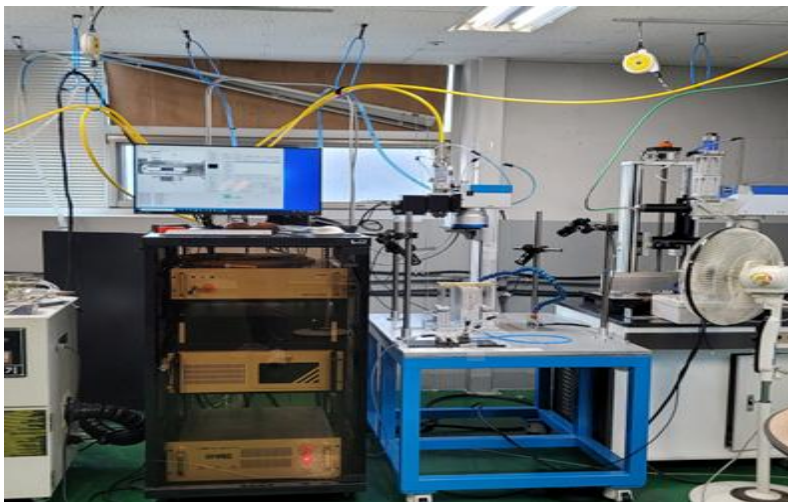


Fig. 3.3 Single mode fiber laser equipment

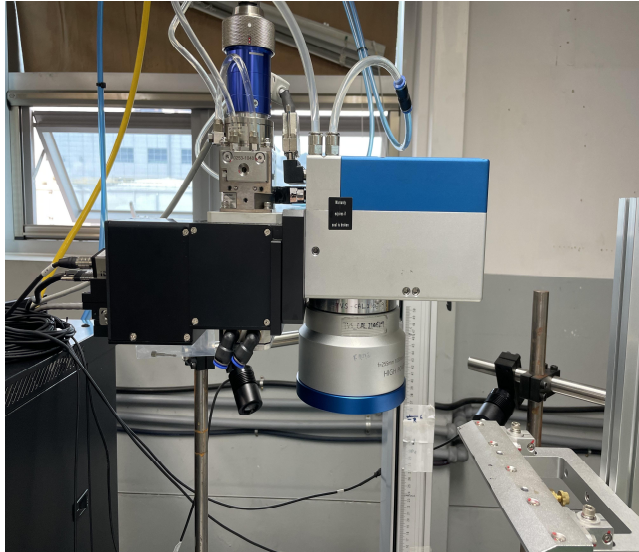


Fig. 3.4 Scanner

용접조건은 Table. 3.4와 같이 초점거리 255mm, 빔 크기 $50\ \mu\text{m}$, 레이저 출력 2kW로 고정하고 용접속도 50~600mm/sec, 진폭 0m~0.6mm 조건에서 바뀌가며 먼저, Al, Cu 동종재간 용접을 실시한 후 도출된 용접조건을 토대로 Cu가 Al에 비해 용융점이 높기 때문에 Cu 동종재료 용접조건을 고려하여 Al/Cu 이종재 용접을 실시하였다.

우블링 기법 적용을 하기 위해서 식(2.1)과 식(2.2)에 의거하여 용접속도, 진폭을 선정하고 각 조건에 해당하는 주파수를 도출하였으며, 오버랩은 30%로 고정하여 진행하였다. 공식을 이용한 각 조건별 주파수는 Table. 3.5에 나타내었다.

Table. 3.4 Welding parameters

Welding parameters	Variable
Focal length (mm)	255
Beam Size (μm)	50
Laser Power (kW)	2
Welding Speed (mm/sec)	50, 100, 150, 200, 400, 500, 600
Amplitude (mm)	0, 0.2, 0.4, 0.6

Table. 3.5 Wobbling mode frequency (Hz)

Materials		Welding Speed (mm/sec)	Amplitude (mm)		
			0.2	0.4	0.6
Similar welding	Al/Al Cu/Cu	50	357	179	119
		100	714	357	238
		150	1070	536	357
		200	1429	714	476
Dissimilar welding	Al/Cu	50	357	179	119
		100	714	357	238
		150	1070	536	357
		200	1429	714	476
		300	2143	1071	714
		400	2857	1429	952
		500	3571	1786	1190
		600	4286	2143	1429

3.2 용접 비드 특성 평가

용접부의 비드 특성을 고찰하기 위해, 용접공정변수별 용접속도(100~600mm/sec) 및 진폭 (0~0.6mm) 변화에 따른 용접부 외관 및 단면을 분석하였다. 이때 주안점으로 비드 폭과 용입깊이 간의 상관관계 측면에서 우블링 적용 유무에 따른 특성을 고찰하고자 하였다. 비드폭과 용입깊이 간의 측정은 Fig. 3.5에 나타내었다.

용접부 비드를 관찰하기 위해 용접부를 절단하여, 핫마운팅, 폴리싱을 실시하였다. 핫마운팅을 한 후 Sand paper를 사용하여 #400~#4000 순서로 폴리싱을 하였으며, 아울러 세밀한 연마를 위하여 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m를 이용하여 미세연마를 실시 후 알루미나 가루를 이용하여 잔여 Diamond paste를 제거 하였다. 이후, 광학현미경(OM)을 이용하여 용접부의 비드 특성을 고찰하였다.

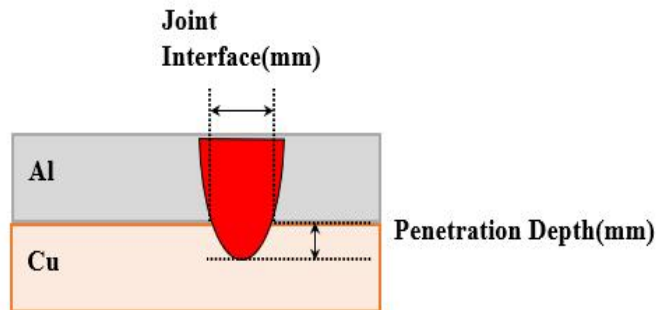


Fig. 3.5 Joint interface and penetration depth of welded joints

3.3 기계적 · 금속학적 특성평가

3.3.1 인장-전단강도

용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 용접부 인장-전단 강도 시험을 실시 하였다. 사용장비는 mtdi社의 UT-100F를 사용하였다. 물림부는 30mm로 하였고, 인장-전단강도 시험의 속도는 3mm/min으로 진행하였다. 시험편은 관련규격에 의거하여 제작하였고 강도값은 각 조건별 3개의 결과치를 평균값으로 나타내었다. 용접부 강도 평가시 파단부 위치와 허용범위내 강도 적합여부 측면을 고찰하였다.

3.3.2 SEM-EDS 분석

이종소재 간 용접시 금속간화합물(Intermetallic Compounds; IMCs)이 형성되고, 이 금속간화합물은 용접부 강도에 큰 영향을 미치는 인자이다. 용접부 금속간 화합물은 $Al_2Cu(\theta)$, $AlCu(\eta_2)$ 와 같은 취성이 강한 IMCs의 성장거동이 용접부 강도에 큰 영향을 보일 것으로 사료된다.

SEM-EDS분석을 위해 JEOL社의 JSM-7900F를 사용하였으며 100 μm 로 용접부를 전체적으로 용접부의 10 μm 로 용융부의 상판 Al 측 그리고 용접계면 측의 하판 Cu 측 IMCs를 고찰하고자 하였다.

3.4 인공지능

3.4.1 머신러닝

최근 데이터를 기반으로 하는 머신러닝에 대한 연구가 활발하다. 머신러닝은 물리적 인덱스에 기반하는 것이 아니라 입력된 데이터를 기반으로 하여 스스로 학습하여 법칙을 도출하는 방법으로 신경회로망이 가장 대표적이며, 비신경회로망에는 서포트 벡터머신(Support Vector Machine), GBT(Gradient Boosted Trees), 랜덤포레스트(Random Forest) 등이 있다.[10]

머신러닝 모델을 구축하기 위해 입력값에는 용접 속도, 진폭, 레이저 출력이 사용되었고, 출력값으로는 인장-전단강도와 용입깊이가 사용되었다. 자세한 내용은 Table. 3.6에 나타내었으며, 실험 데이터를 기반으로 총 135개의 조건에 대한 데이터를 수집하였다.

Table. 3.6 Input and output parameter for machine learning

Parameter \ No.	1	2	3
Input Parameter	Welding Speed	Amplitude	Laser Power
Output Parameter	1		2
	Tensile-shear load		Penetration depth

본 연구에서는 Al/Cu 이종재 용접의 인장-전단강도와 용입깊이 예측을 위한 모델 구축을 위하여 MATLAB® R2020a의 머신러닝 모델 및 인공신경망 모델을 사용하였다. 출력값에 사용된 데이터인 인장-전단강도와 용입깊이의 예측을 위하여 회귀학습을 진행하였으며, 회귀학습 모델은 총 19개의 모델을 사용하였다.

회귀학습의 결과 값 중 상위 3개의 모델인 Tree(트리), SVM(서포트 벡터 머신, Support Vector Machine), GPR(가우스 프로세스 회귀, Gaussian Process Regression)를 선정하였다. 트리는 상호 작용 모델을 사용했으며, 서포트 벡터 머신은 커널 함수가 3차로 이루어진 비선형 모델을, 가우스 프로세스 회귀 모델은 지수 커널 함수를 적용하였다.[11]

3.4.2 인공신경망

회귀학습 이후 모든 예측값에 대하여 인공신경망을 통해 머신러닝 모델을 구성하고, 회귀학습의 타당성을 확인하였다. 인공신경망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성된 모델로, 각 층은 노드(node)들로 이루어져있다. 인공신경망 모델은 입력값과 출력값이 주어졌을 때, 스스로 학습하는 지도학습을 통해 수행된다.

본 연구에서 사용된 인공신경망은 1개의 은닉층으로 구성된 얇은 신경망(Shallow Neural Network, SNN)으로, 은닉층의 노드 수는 노드 수 다변화를 통한 경향성 파악 후 7개로 수행하였다. 얇은 신경망 분석은 훈련(Training), 검증(Validation), 테스트(Testing) 데이터를 각각 70%, 15%, 15%로 나눠 정확도를 검증하였다.[12]

제 4 장. 연구결과 및 고찰

4.1 용접 비드 외관 및 단면 특성

Al/Cu 용접시 우블링 기법적용에 따른 용접부 특성을 고찰하기 위해, 용접공정 변수(용접속도, 진폭)에 따른 특성을 고찰해보았다. Fig. 4.1를 보면 용접 속도 100~200mm/sec 조건의 비드 표면에서 확인할 수 있듯이, 진폭이 0~0.6mm로 증가할수록 비드 폭이 증가하는 경향을 알 수 있었다. 이는 우블링 기법으로 인한 용접면적 증가와 입열량 증가의 원인으로 파악할 수 있다.[13]

Fig. 4.2는 용접속도 100~200mm/sec 조건의 비드단면을 나타내었다. 용접부 비드 단면을 보게 되면 특별한 내부결함이 발생 되지는 않았으며, 진폭이 0~0.6mm로 증가함에 따라 용접계면이 증가하고 용입깊이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 용접 속도 100mm~200mm/sec 조건에서는 완전용입이 발생하였는데, 이는 겹치기 용접에서 최대 인장-전단강도를 확보 할 수 있는 조건에 부합되지 않는 조건으로 사료된다.[13]

Fig. 4.3은 용접속도별 진폭 변화에 따른 용접속도 (100~200mm/sec) 진폭 (0~0.6mm)변화에 따른 용접계면 폭과 용입깊이를 비교한 것이다. 용접속도 100~200mm/sec 조건에서, 용접속도 증가 시 용접계면의 폭이 약 0.92mm에서 약 0.68mm로 감소하였고, 용입깊이는 약 0.46mm에서 약 0.35mm로 감소하였다. 또한 완전용입 조건에서의 최대 용접계면 폭은 용접속도 100mm/sec, 진폭 0.6mm 조건에서 약 1.23mm를 얻었을 수 있었다. 이는 우블링 기법 진폭이 증가함에 따라 레이저 진동 범위가 확대되어 용접계면 폭이 증가됨을 알 수 있었다.

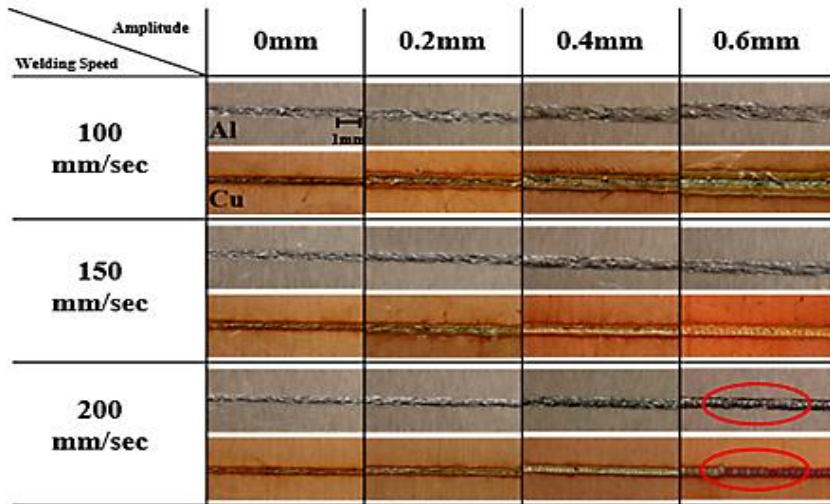


Fig. 4.1 Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 100~200mm/sec; bead appearance

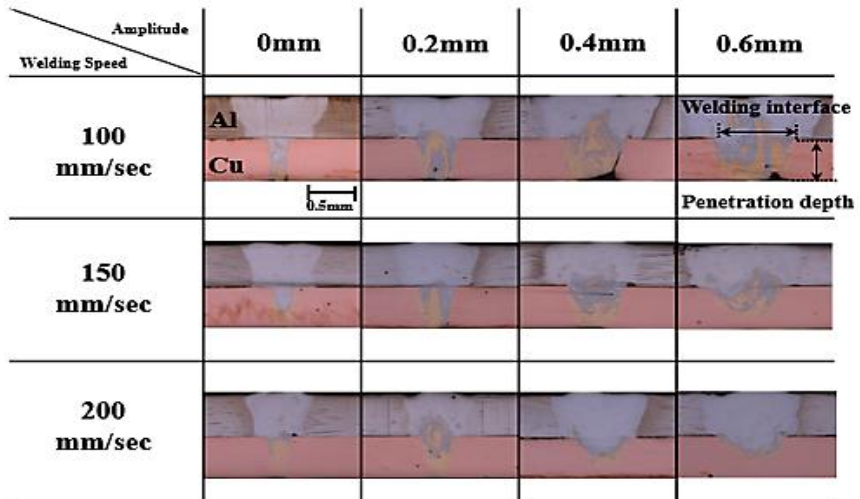


Fig. 4.2 Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 100~200mm/sec; bead cross section

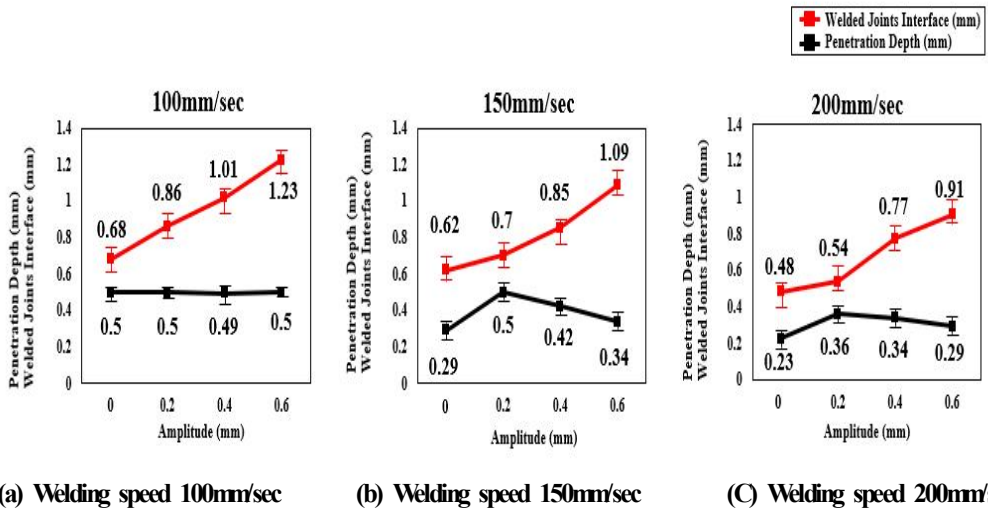


Fig. 4.3 Bead profiles with various welding speeds of 100~200mm/sec

Fig. 4.4와 Fig 4.5는 용접속도별(400~600mm/sec), 진폭 (0~0.6mm)변화에 따른 비드 외관 및 단면을 나타낸 것이다. 용접 속도 400~600mm/sec 조건의 비드 표면과 단면 확인할 수 있듯이, 100~200mm/sec 조건과 동일하게 진폭이 0mm~0.6mm로 증가할 수 록 비드 폭이 증가하고 용접계면이 증가하며 용입깊이가 감소하는 경향을 파악 할 수 있었다.

반면, 용접속도 600mm/sec 진폭 0.6mm 조건에서는 불충분한 입열로 용접이 이루어지지 않았다. 반면 나머지 조건 용접속도 400mm~600mm/sec 조건에서는 부분용입이 발생하는 것을 알 수 있다. 이렇게 겹치기 용접에서 부분용입이 이루어진 결과의 조건은 높은 인장-전단강도를 얻을 수 있는 조건이다.

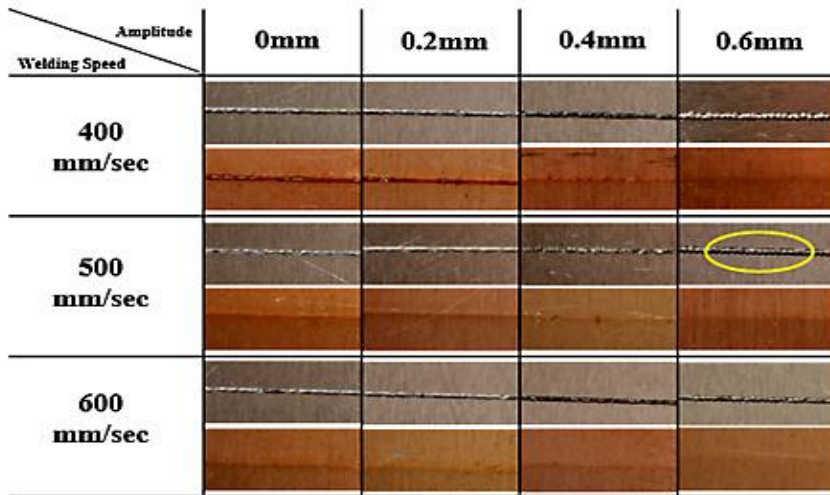


Fig. 4.4 Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 400~600mm/sec; bead appearance

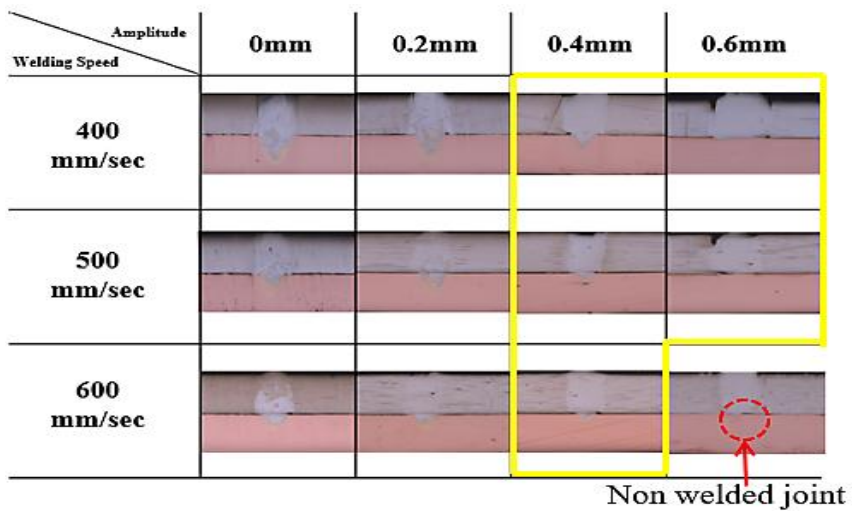


Fig. 4.5 Bead profiles analysis of welded joint with various welding speeds 400~600mm/sec; bead cross section

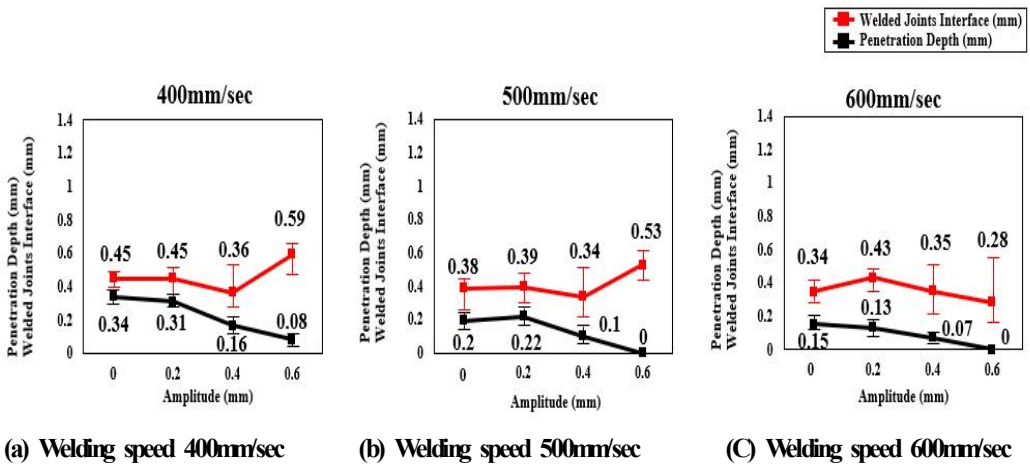


Fig. 4.6 Bead profiles with various welding speeds of 400~600mm/sec

Fig. 4.6은 용접속도별 (400~600mm/sec), 진폭 (0~0.6mm)변화에 따른 용접계면 폭과 용입깊이를 비교한 것이다. 용접속도 400~600mm/sec 조건에서, 용접속도 증가 시 용접계면의 폭은 약 0.46mm로 그다지 크게 변화하지 않았고, 용입깊이는 약 0.16mm에서 약 0.073mm로 감소하였다. 이러한 경향은 용접 속도가 증가함에 따라 입열량이 낮아지기 때문이라고 사료된다.

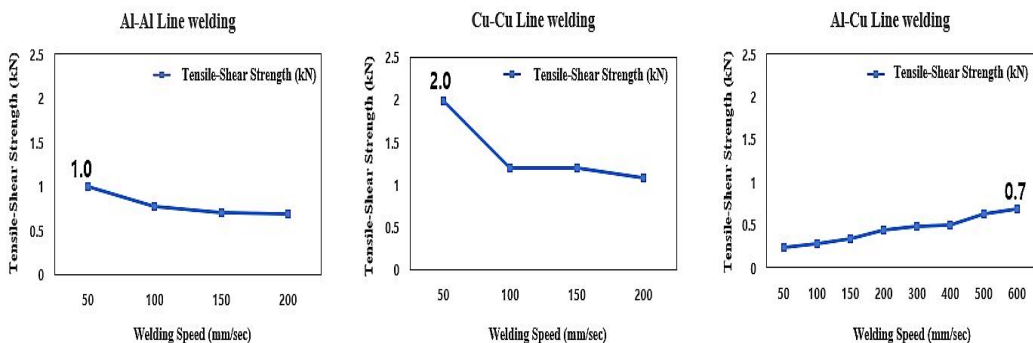
또한 부분용입 조건에서의 최대 용접계면 폭은 용접속도 400mm/sec, 진폭 0.6mm 조건에서 약 0.59mm를 얻었을 수 있었다. 이는 부분용입 조건 중 최대 용접계면을 용접속도 400mm/sec, 진폭 0.6mm 조건에서 상대적으로 높은 인장-전단강도 값을 나타낼것으로 사료된다.

4.2 기계적 · 금속학적 특성

4.2.1 인장-전단강도

용접부의 기계적 특성을 고찰하기 위해 용접부의 인장-전단강도 시험을 실시 하였다. 우블링 기법 적용 유무에 따른 용접부 특성을 Al, Cu에 대해 동종재간 직선 용접 및 우블링 기법 용접을 실시하고 이종재간 직선용접을 우블링 기법으로 실시 하여 비교 평가 하였다.

Fig 4.7은 동종재 및 이종재 용접부의 직선용접시 용접부에 대한 인장-전단하중 을 비교한 것이다. 직선 용접 시 최대 인장-전단강도는 Al 동종재 용접부는 1.0kN, Cu 동종재 용접부는 2.0kN, Al/Cu 이종재 용접부는 0.7kN를 나타내었다. Fig. 4.8~4.10은 동종재 및 이종재 용접부의 우블링 기법 용접시 용접부에 대한 인장-전단하중을 비교한 것이다. 우블링 기법 용접 시 최대 인장-전단강도는 각각 Al 동종재 용접부는 1.2kN, Cu 동종재 용접부는 2.8kN, Al/Cu 이종재 용접부는 1.1kN를 나타내었다.



(a) Al/Al line welding (b) Cu/Cu line welding (c) Al/Cu line welding
 Fig. 4.7 Comparison of tensile-shear load of line welding with various welding speed (a) Al/Al, (b) Cu/Cu, (c) Al/Cu

이를 통해 우블링 기법을 사용 하였을 때 더 넓은 용접면적을 얻을 수 있었으며 이로 인해 직선용접보다 더 높은 인장-전단강도 값을 얻을 수 있다는 걸 알 수 있었다. 또한 동종재 용접시에는 용접속도가 증가함에 따라 입열량 감소로 인장-전단강도가 떨어지는 것을 확인하였다. 동종재 용접부의 강도가 떨어지는 반면 이종 용접은 강도가 증가함을 확인하였고 진폭이 증가함에 따라 인장-전단강도가 증가하였다. 이는 이종재 우블링 기법 겹치기 용접 특성상 입열량으로 인한 부분용입과 용접면적의 상관관계라고 사료된다.

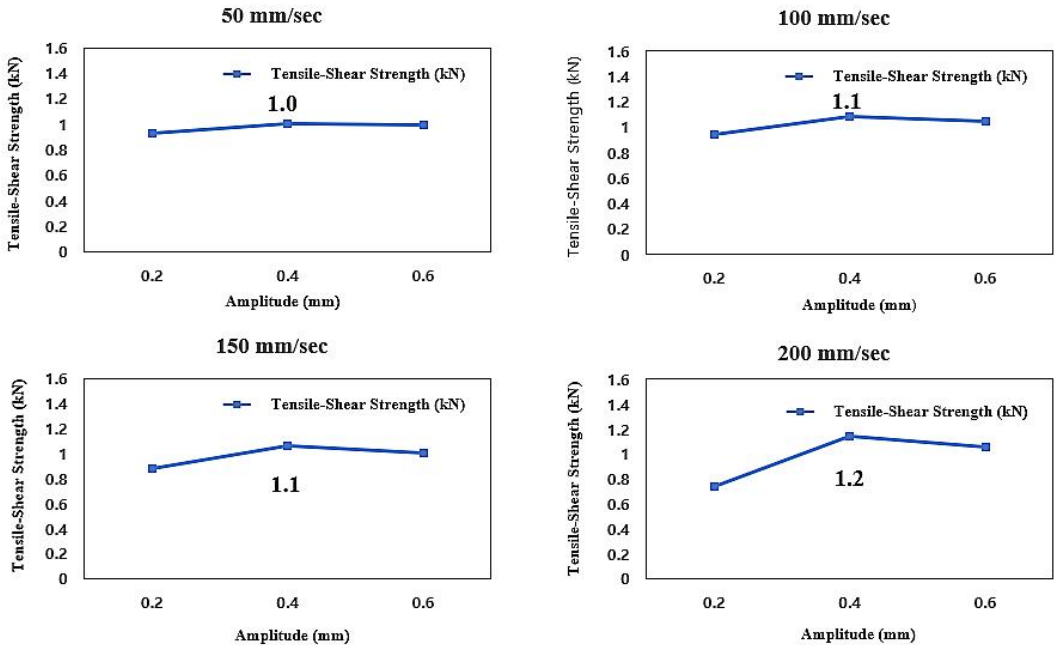


Fig. 4.8 Comparison of tensile-shear load of welded joints for wobbling mode Al/Al welding with various welding speed

Fig. 4.10에서 알 수 있듯이 나와 있듯이 용접속도 400mm/sec, 진폭 0.6mm조건에서 가장 높은 인장-전단강도 값을 얻을 수 있었다. 또한 진폭이 증가함에 따라 인장-전단강도가 늘어남을 확인하였고 600mm/sec 용접 속도에서는 진폭에 상관없이 하중범위(0.7~0.8kN)내에 해당하는 강도 값 들이 나왔다.

Fig. 4.11은 인장-전단 시험시 파단 된 시험편이다. 파단 특성을 고찰한 결과 결과 완전용입 조건의 용접속도 100-200 mm/sec에서는 용접부 파단, 부분용입 조건과 허용응력 범위 내의 용접속도 400-600 mm/sec조건에서는 계면파단이 발생함을 확인 할 수 있었다.

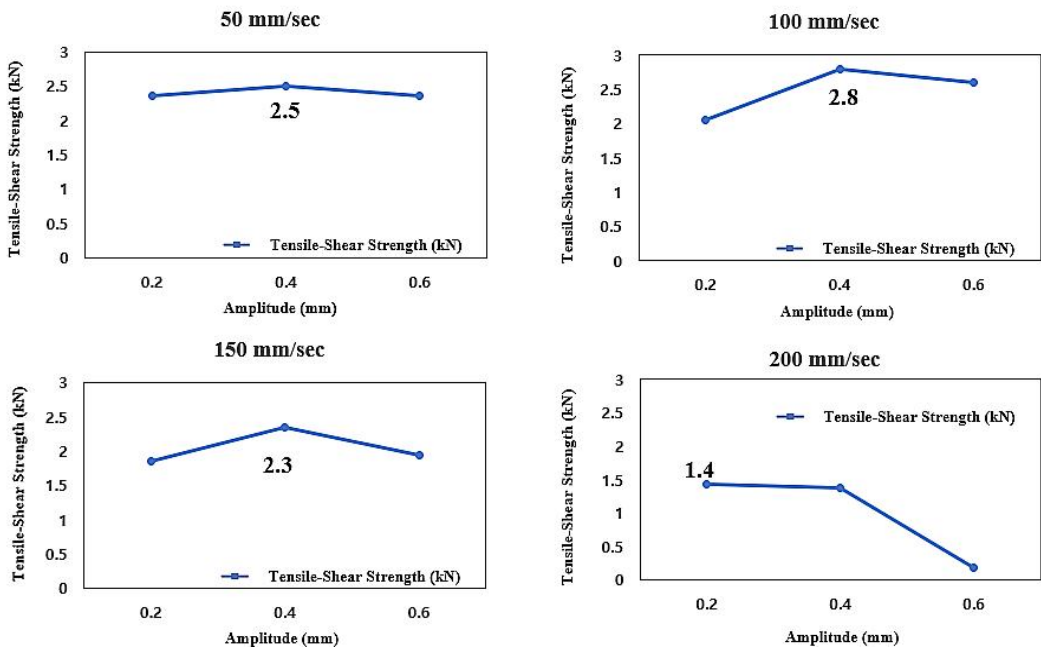


Fig. 4.9 Comparison of tensile-shear load for wobbling mode Cu/Cu welding with various welding speed

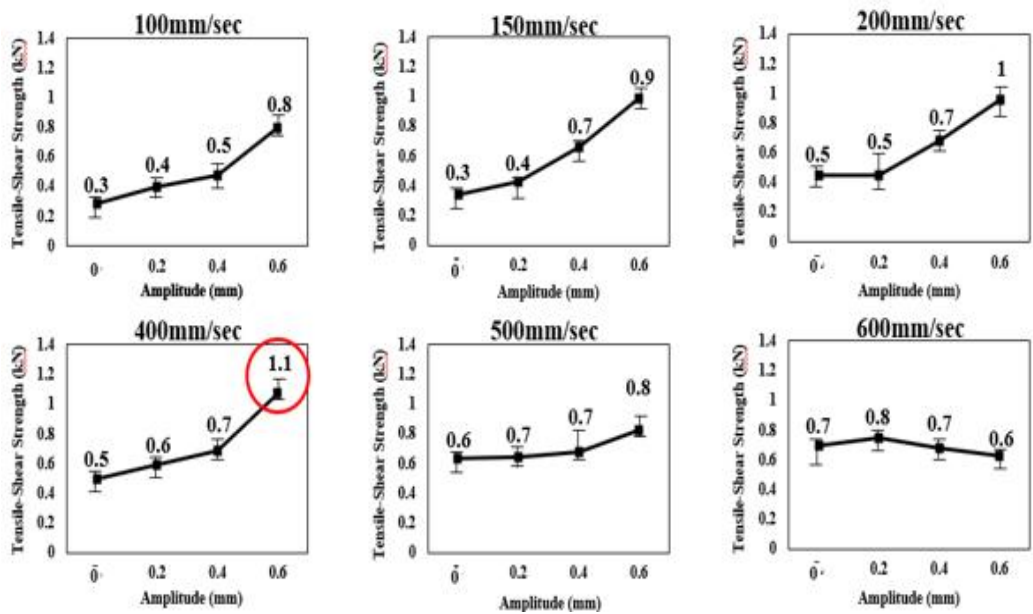
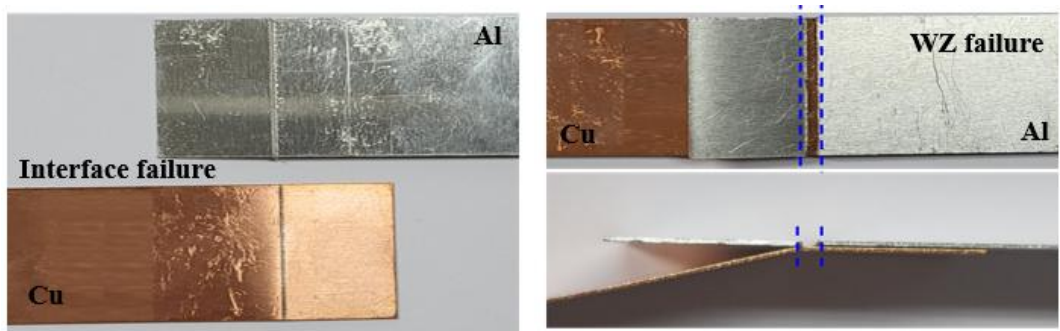


Fig. 4.10 Comparison of tensile-shear load for wobbling mode Al/Cu welding with various welding speed



(a) Interface failure (b) Welded zone failure

Fig. 4.11 Fractured mode of Al/Cu welded joint

4.2.2 금속간화합물

Al/Cu 이종재 용접부의 금속간 화합물 특성을 고찰하기 위해 SEM-EDS를 분석하였다. 이종재 용접 특성상 발생하는 IMCs 분석을 위해 Fig. 4.12의 Al/Cu 상태를 바탕으로 최대 인장-전단강도가 나온 용접속도 400mm/sec 조건의 진폭별 SEM-EDS 분석을 실시하였다.

Fig. 4.13.에서 알 수 있듯이 용접계면 측에서 SEM-EDS 측정 결과 Table. 4.1에서 나타낸 바와 같이 Al_3Cu_4 , Al/Cu eutectic 상이 공정반응 및 포정반응에 의하여 취성이 강한 IMCs가 형성되었으며 다른 조건에 비해 IMCs 두께가 가장 두꺼짐을 알 수 있다. 이는 진폭이 좁을수록 용접부에 들어가는 입열량이 늘어나 금속간 화합물이 증가함으로 사료된다.

Fig. 4.14,~4.16에 나타낸 바와 같이 용접속도 400mm/sec 진폭 0.2~0.6mm에서 SEM-EDS 측정 결과 Table. 4.2~4.4에서 나타낸 바와 같이 진폭 0mm 조건과 비슷하게 주로 Al_3Cu_4 , Al/Cu eutectic 상이 공정반응 및 포정반응에 의하여 형성되었으며, 취성이 강한 IMCs가 형성되었지만 진폭이 증가함에 따라서 IMCs 두께가 점차 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 진폭이 넓을수록 입열량의 감소로 금속간 화합물의 형성이 감소하여 이로 인한 강도 증가로 사료된다.[14][15]

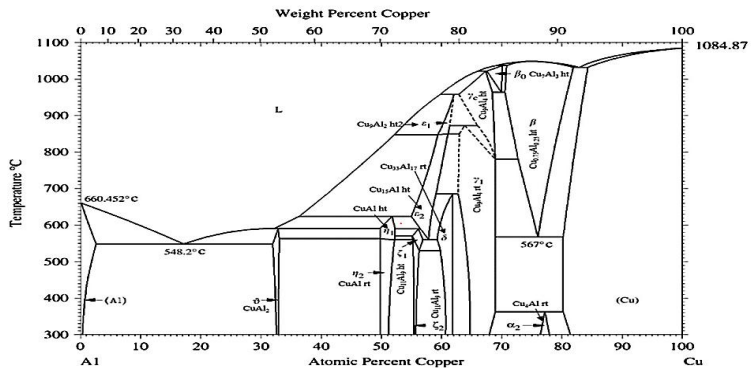


Fig. 4.12 Al/Cu phase diagram

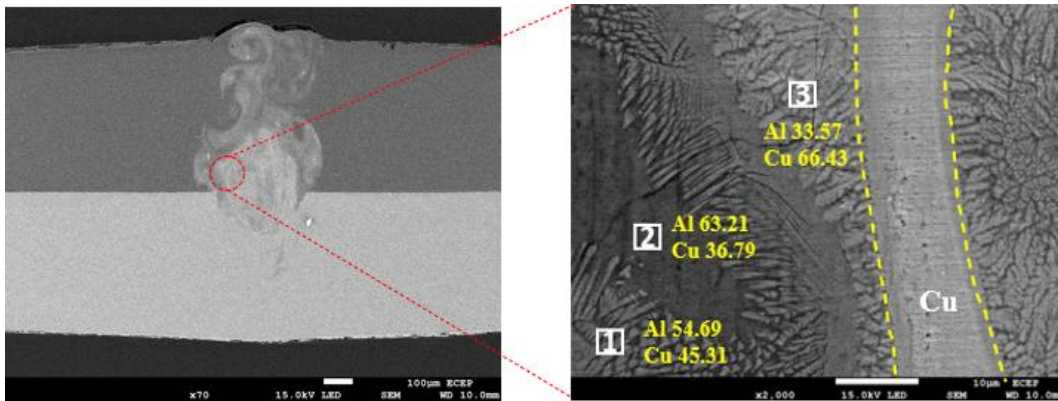


Fig. 4.13 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0mm

Table. 4.1 SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0mm

Spectrum \ (Wt.%)	Al (Wt.%)	Cu (Wt.%)
Spectrum 1	54.69	45.31
Spectrum 2	63.21	36.79
Spectrum 3	33.57	66.43
Total	100.00	
Amplitude	0mm	

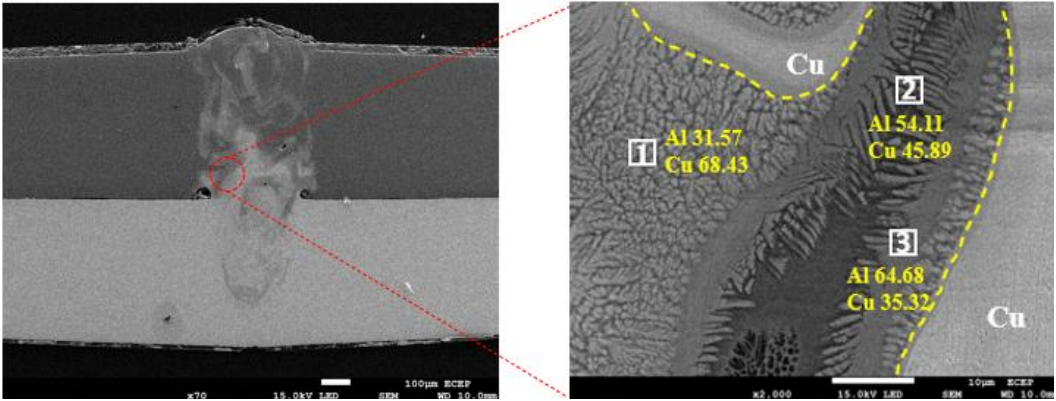


Fig. 4.14 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0.2mm

Table. 4.2 SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0.2mm

(Wt.%) Spectrum	Al (Wt.%)	Cu (Wt.%)
Spectrum 1	31.57	68.43
Spectrum 2	54.11	45.89
Spectrum 3	64.68	35.32
Total	100.00	
Amplitude	0.2mm	

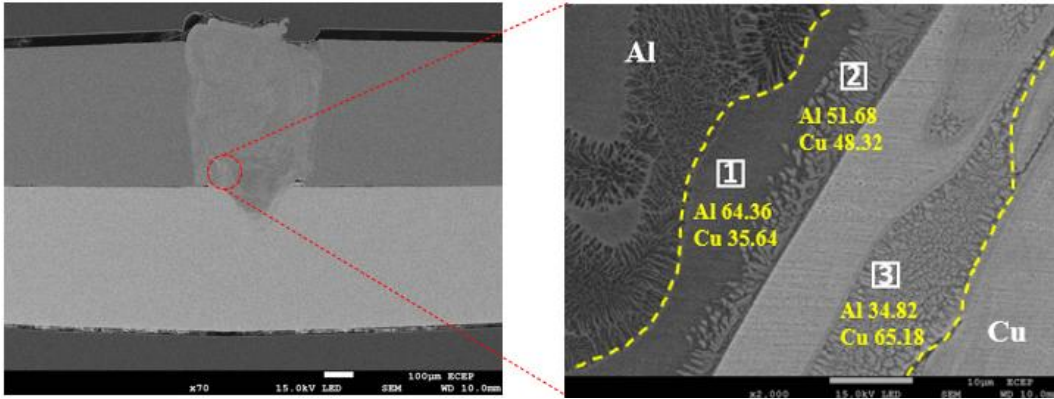


Fig. 4.15 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0.4mm

Table. 4.3 SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0.4mm

Spectrum \ (Wt.%)	Al (Wt.%)	Cu (Wt.%)
Spectrum 1	64.36	35.64
Spectrum 2	51.68	48.32
Spectrum 3	34.82	65.18
Total	100.00	
Amplitude	0.4mm	

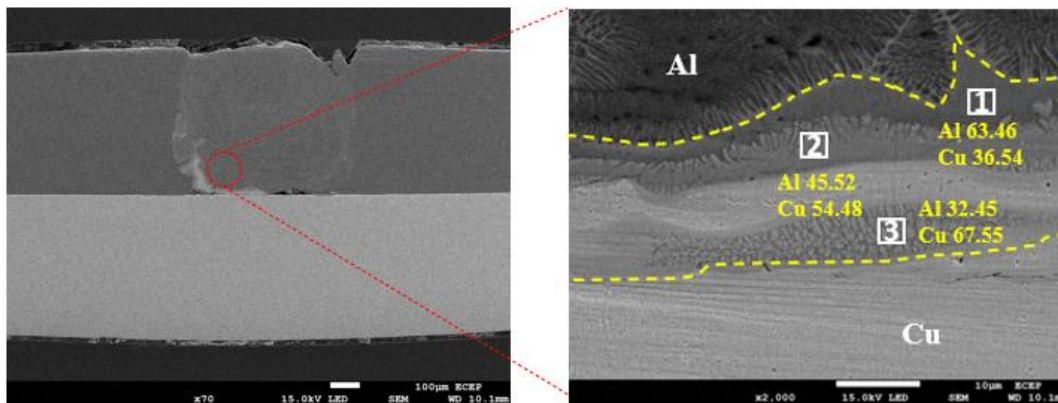


Fig. 4.16 SEM image at the joint interface with travel speed 400 mm/sec for amplitudes of 0.6mm

Table. 4.4 SEM-EDS analysis of welded joints with amplitude 0.6mm

Spectrum \ (Wt.%)	Al (Wt.%)	Cu (Wt.%)
Spectrum 1	63.46	36.54
Spectrum 2	45.52	54.48
Spectrum 3	32.45	67.55
Total	100.00	
Amplitude	0.6mm	

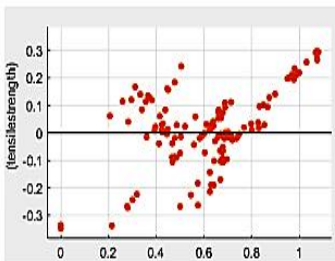
4.3 회귀분석을 이용한 용접강도 예측 모델링

Table 4.5는 MATLAB® R2020a를 활용한 인장-전단강도의 회귀 모델에 따른 예측 정확도를 확인한 것이다. 총 19개의 회귀학습 모델 중 평균적으로 결정계수의 값이 가장 높은 상위 3개의 모델인 상호작용 Tree 모델과 3차 서포트 벡터 머신 모델, 지수 GPR 모델을 선정하였다.

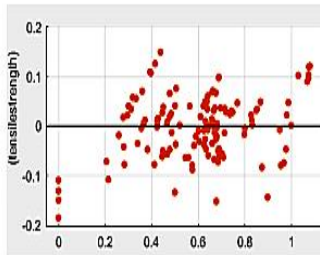
비드 폭에 대한 회귀 모델 분석결과는 전체적으로 높은 결과값을 보였는데, 이는 높은 예측도를 의미한다. 또한, 예측도의 높고 낮음의 척도는 결정계수 값 0.90을 기준으로 임의로 선정하였다.

Table. 4.5 Regression model analysis result of tensile-shear load

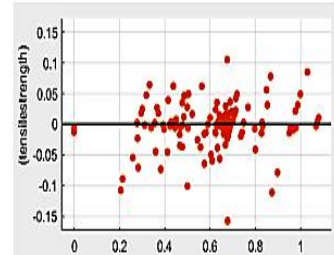
Model	MSE (mm ²)	RMSE (mm)	R ²
Tree	0.0064738	0.08046	0.88
SVM	0.0029146	0.053987	0.95
GPR	0.0013932	0.037325	0.97



(a) Tree Model



(b) SVM Model



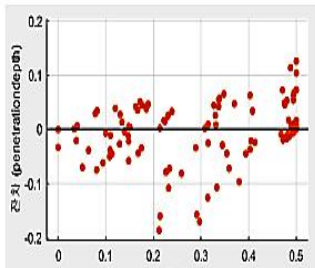
(c) GPR Model

Fig. 4.17 Residual plots of the tensile-shear load

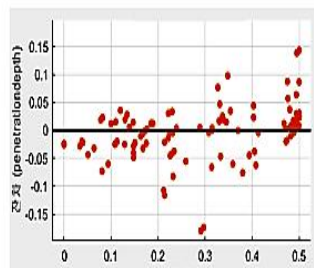
다음은 용입깊이의 회귀학습 모델에 대한 결과와 잔차 그래프를 Table. 4.6과 Fig. 4.18에 나타내었다. 용입깊이의 GPR 모델의 평균 제곱 오차와 평균 제곱근 오차는 각각 0.0016458 mm^2 , 0.040568 mm 로 나타났다. GPR 모델의 결정계수는 0.95로 정확한 용입깊이의 예측이 가능한 것으로 나타났으나, Tree 모델과 SVM 모델의 결정계수가 각각 0.92, 0.94로 나타난 것으로 보아 GPR 모델의 결과값의 신뢰도가 높은 것으로 추론된다.

Table. 4.6 Regression model of welded joints for tensile-shear load

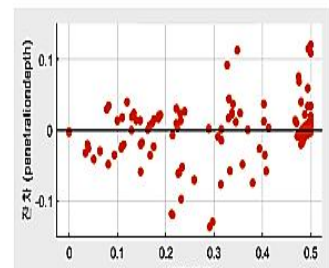
Model	MSE (mm^2)	RMSE (mm)	R^2
Tree	0.002452	0.049518	0.92
SVM	0.0019231	0.043853	0.94
GPR	0.0016458	0.040568	0.95



(a) Tree Model



(b) SVM Model



(c) GPR Model

Fig. 4.18 Residual plots of the penetration depth

4.4 인공신경망을 이용한 용접강도 예측 모델링

회귀학습 모델 예측 결과의 타당성 검증을 위하여 인장-전단강도와 용입깊이에 대한 SNN(Shallow Neural Network, 얇은 신경망) 분석을 하였다.

얇은 신경망 분석 같은 경우, 앞서 언급한 것처럼 은닉층 노드의 개수는 노드 수 다변화를 통해 노드 3개, 5개, 7개의 경향성을 파악한 뒤, 선정하여 수행하였다. 그래프의 45도의 직선은 실측값을 나타내며, 완벽한 피팅이 되려면 피팅 결과가 45도 직선에 위치해야 한다. 또한, Training 결과가 좋으나 Test 결과 값이 나쁜 경우, 이것은 모델의 과적합을 의미할 수 있으며, 노드 수를 줄임으로써 과적합을 방지할 수 있다.

Fig. 4.19과 Fig. 4.20은 노드 수 다변화에 따른 인장-전단강도와 용입깊이의 얇은 신경망 분석결과를 나타낸 것이다. Fig. 4.19에서 인장-전단강도의 인공신경망 분석의 경향성을 살펴보면, 7개의 노드 수로 갈수록 Training 값은 실측값과 유사하고 Test 값은 증가하는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, 5개 노드 일때 결정계수 0.96529로 다른 노드들에 비해 피팅 결과가 45도에서 3개의 노드 중 가장 크게 벗어나는 것으로 보이지만 유사도는 결정계수 0.90이상으로 높게 나타났다.

Fig. 4.20과 같이 용입깊이의 인공신경망 분석 경향성 또한 Training 값은 실측값과 비슷하며 노드수가 높아질수록 Test 값이 증가 하는 것으로 보이거나 용입깊이 또한 5개 노드일 때 3개와 7개 노드에 비해 피팅 결과가 떨어지는 것으로 보여진다. 하지만 유사도는 0.90이상으로 높은 것으로 판단된다. 타당성 검증을 위해서는 얇은 신경망 분석에서 Test 값과 Training 값이 가장 높은 노드 수로 지정해야 높은 신뢰도를 얻을 수 있다.

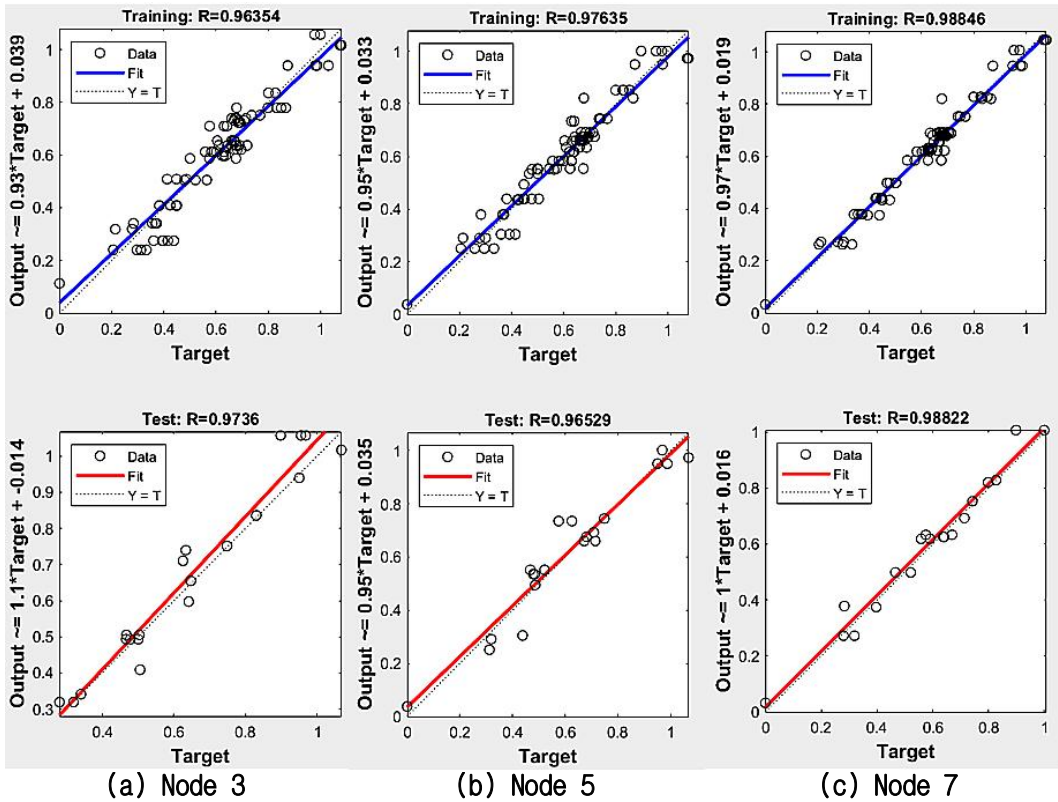


Fig. 4.19 Comparison of the training and test model for tensile-shear load shallow neural network

따라서, 회귀 모델 분석결과와 타당성 검증을 위한 얇은 신경망 분석에는 노드 수의 개수를 Test 값과 Training 값이 가장 높았던 7개로 지정했다. SNN 분석결과, 높은 차수와 자유도로 Test와 Validation에서 높은 결정계수로 높은 정확도를 보였으나, 오차의 크기 역시 크다. 이는 머신러닝에서의 GPR 모델과 유사하게 과적합이 발생하는 경향을 보였다.[11]

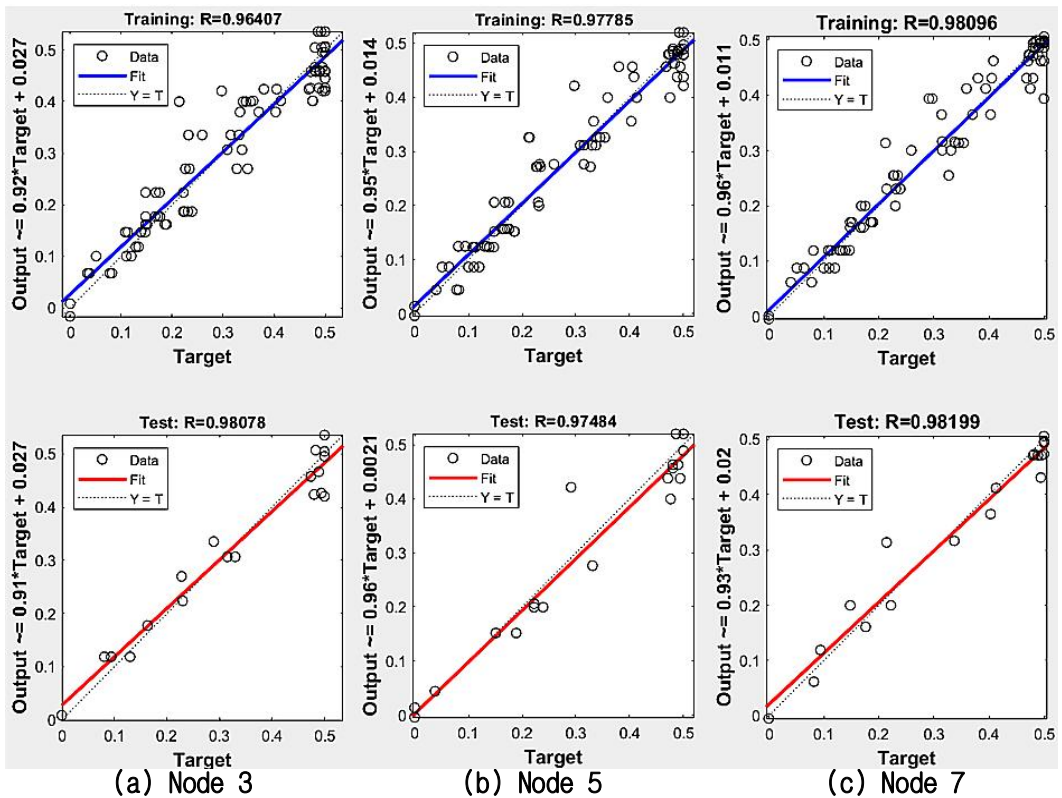
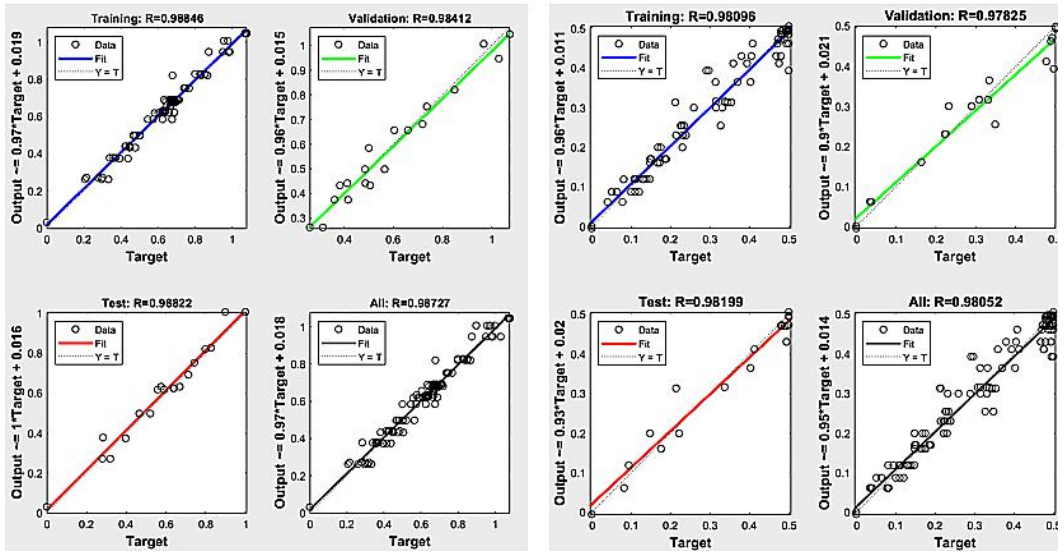


Fig. 4.20 Comparison of the training and test model for penetration depth shallow neural network

인장-전단강도, 용입깊이에 대한 얇은 신경망 분석결과, Fig. 4.21과 같이 결정 계수가 각각 0.98($R=0.99$), 0.98($R=0.98$)로 확인되었다. 두 항목 모두에서 0.90이 넘는 높은 결정계수를 보였으므로 유사도의 정확도 역시 높다고 사료된다.

Table. 4.7은 회귀학습 모델 분석결과와 얇은 신경망 분석결과를 비교한 것을 표로 나타내었다. 비교 결과, 회귀 모델의 결정계수에 비하여 약간 낮기는 하나 얇은 신경망 분석결과 모두에서 0.90 이상의 값을 보였으므로 머신러닝 결과의 신뢰도가 높다고 판단할 수 있었다.



(a) Tensile-shear load

(b) Penetration depth

Fig. 4.21 Predicted result of shallow neural network model

Table. 4.7 Comparison of regression model and shallow neural network analysis

Model	Regression (R^2)	SNN (R^2)
Tensile-shear load (GPR)	0.97	0.99
Penetration depth (GPR)	0.95	0.98

제 5 장. 결 론

본 연구는 파이버 레이저를 이용하여 Al/Cu 이종재료 용접시 용접 공정변수별 용접 특성을 고찰하고자 하였다. 특히 우블링 기법 적용에 따른 용접계면 폭, 용입깊이, 금속간화합물(IMCs)형성이 강도 값에 미치는 영향을 파악하고자 했다. 아울러 공정변수 최적화를 위해 머신러닝 및 인공신경망 모델 분석을 통해 용접부 강도 예측 모델링을 실시하였다..

1) 비드특성 고찰 결과, 비드 표면은 진폭이 증가함에 따라 비드 폭도 증가하였고 비드 단면 또한 진폭이 증가함에 따라 용접계면의 폭이 증가하고 용입깊이는 감소하였다. 이는 용접속도가 빠를수록 입열량이 줄어들기 때문으로 사료된다.

2) 최대 인장-전단강도는 용접 속도 400mm/sec에서 1.1kN, 진폭 0.6mm 조건으로 라인 용접에 비해 54% 향된 강도값을 나타내었다. 또한 용접 속도 600mm/sec 진폭 0.4mm조건은 허용 하중범위 0.7~0.8kN에 해당하므로 생산성 측면에서는 이점이 있는 조건으로 판단된다.

3) SEM-EDS 분석결과 높은 강도 값을 나타내는 조건 용접속도 400mm/sec 조건에서 Al/Cu 이종재 용접부에 취성이 강한 IMCs[Al₃Cu₄, Al/Cu eutectic] 층은 진폭이 증가할수록 감소하였다. 상대적으로 진폭이 넓을수록 입열량의 감소로 금속간화합물의 형성이 보다 더 감소하여 이로 인한 강도 증가로 사료된다.

4) Al/Cu 이종재 용접 실험 데이터 135개를 기반으로 한 회귀학습 결과, 머신러닝 모델인 지수 GPR 모델에서 인장-전단강도와 용입깊이에 대한 유사도가 결정계수 0.90 이상의 값인 0.97, 0.95로 나타났으므로 정확한 예측이 가능함을 확인하였다.

5) 회귀학습 분석결과에 대한 타당성 검증을 위해 수행된 얇은 신경망 분석결과 결정계수 값이 각각 0.99, 0.98로 두 항목 모두에서 0.90 이상으로 나타났기 때문에 정확한 예측이 가능하였다. 아울러 은닉층 노드 개수는 노드 수 7개에서의 결과 값에서 과적합 없이 Training과 Test 결과가 거의 완벽한 피팅을 보였으며, 가장 높은 결정계수 값을 확보할 수 있었다.

참고문헌

- [1] S. S. Lee, T. H. Kim, S. J. Hu, W. W. Cai and J. A. Abell, Joining Technology for Automotive Lithium- Ionbattery manufacturing - a Review, Proceedings the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2010), 2010, MSEC2010-34168
- [2] Di Zuo, Shengsun Hu, Junqi Shen, Intermediate layer characterization and fracture behavior of laser-welded copper/aluminum metal joints, Materials and Design 58 (2014) 357-362
- [3] S. J. Lee*, H. Nakamura, Y. Kawahito and S. Katayama, Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets, Science and Technology of Welding and Joining 2014 VOL 19 NO 2 pp111-118
- [4] P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints, Materials Science and Engineering A 528 (2011) 4683-4689
- [5] Y. Y. Zhao, D. Li and Y. S. Zhang, Effect of welding energy on interface zone of Al-Cu ultrasonic welded joint, Science and Technology of Welding and Joining 2013 VOL 18 NO 4 pp354-360
- [6] 김태원, 최해운, 그린레이저를 이용한 Al-Cu 이종소재 레이저 용접 연구 및 딥러닝에 의한 품질판정, Journal of Welding and Joining, Vol.39 No.1(2021) pp67-73
- [7] 정진호, Single mode fiber laser을 이용한 스테인리스강/인코넬의 wobble beam 용접 특성, 조선대학교 용접접합과학공학과, 석사학위논문 (2016)
- [8] 한국원자력 연구원 기술보고서, LVDT 제조용 파이버 레이저 용접장치개발 (2010)

- [9] Vincenzo Dimatteo, Alessandro Ascari, Alessandro Fortunato, Continuous laser welding with spatial beam oscillation of dissimilar thin sheet materials (Al-Cu and Cu-Al): Process optimization and characterization, Journal of Manufacturing Processes Volume 44, August 2019, pp158-165
- [10] 이기동, 강상훈, 강민정, 이성, 현승균, 김철희, 머신러닝을 이용한 레이저 용접부의 모델링 Part I: Al/Cu 이종재료 겹치기 레이저용접부의 용입깊이, J. Weld. Join. 39(1), 2021, pp27-35
- [11] 유현정, 강민정, 이성, 현승균, 김철희, 머신러닝을 이용한 레이저 용접부의 모델링 Part II: 고강도강 겹치기 레이저용접부의 형상 및 기계적 거동, Journal of Welding and Joining ; 39(1), 2021, pp36-44
- [12] 고범수, 유현정, 방희선, 김철희, 머신 러닝을 이용한 레이저 용접의 용입깊이 모델링 및 공정변수 맵, 대한용접접합학회지 39, no.4, 2021, pp392-401
- [13] Vincenzo Dimatteo, Alessandro Ascari, Erica Liverani, Alessandro Fortunato, Experimental investigation on the effect of spot diameter on continuous-wave laser welding of copper and aluminum thin sheets for battery manufacturing, Optics & Laser Technology Volume 145, January 2022, 107495
- [14] ONDREJ ZOBAC, ALES KROUPA, ADELA ZEMANOVA, KLAUS W. RICHTER, Experimental Description of the Al-Cu Binary Phase Diagram, Metallurgical and Materials Transactions A volume 50, pages3805-3815 (2019)
- [15] 김정익, 알루미늄-구리 이종 도체 접합부에서 금속간화합물의 성장 거동, 서울대학교 재료공학부 공학박사학위논문 (2017)