



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

이종소재 Al/Cu의 레이저용접시 피치변화에 따른 용접 특성

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

은 영 진

이종소재 Al/Cu의 레이저용접시 피치변화에 따른 용접 특성

The characteristics of dissimilar Al and Cu welded
joints by laser welding with pitch

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

은 영 진

이종소재 Al/Cu의 레이저용접시 피치변화에 따른 용접 특성

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

은 영 진

은영진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 손윤철 (인)

위 원 조선대학교 교 수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 조교수 박철호 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
제 1 장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내·외 기술동향	4
1.3 Al 및 Cu 소재 특성	10
1.3.1 Al1050 소재 특성	10
1.3.2 C1020 소재 특성	12
1.4 레이저용접 특성	13
1.4.1 레이저 원리 및 특징	13
1.4.2 파이버 레이저 원리 및 특징	15
제 2 장. 연구 방법	17
2.1 실험 방법 및 용접 조건	17
2.1.1 사용 소재 및 용접법	17
2.1.2 실험 장비 및 용접 조건	19
2.2 용접부 특성 평가	21

2.2.1 비드 특성 평가	21
2.2.1 기계적 특성 평가	21
가. 인장-전단 강도	21
나. 경도 분포	22
2.2.1 금속학적 특성 평가	23
2.2.1 전기전도도 특성 평가	23
제 3 장. 연구 결과 및 고찰	24
3.1 공정변수별 비드 특성	24
3.2 기계적 특성	26
3.2.1 인장-전단 강도	26
3.2.2 경도 분포	29
3.3 금속학적 특성	34
3.3.1 SEM-EDS 분석	34
3.3.2 파단면 분석	39
3.4 전기전도도 특성	42
제 4 장. 결론	44
참고문헌	46

List of Figures

Fig. 1.1	Global annual sales of eco-friendly vehicles by 2030	3
Fig. 1.2	Battery pack system	3
Fig. 1.3	Al/Cu binary phase diagram	8
Fig. 1.4	Cu absorption by wavelength	9
Fig. 1.5	Schematic diagrams of beam oscillating pattern	9
Fig. 1.6	Annealing process according to temperature	11
Fig. 1.7	Excitation by absorption of electromagnetic waves and absorption of photons	14
Fig. 1.8	Schematic of laser keyhole welding	14
Fig. 1.9	Configuration of fiber Laser	16
Fig. 1.10	Schematic design of active fiber	16
Fig. 2.1	Dimensions of welded specimen	17
Fig. 2.2	Experimental set-up for laser welding	19
Fig. 2.3	Vickers hardness test	22
Fig. 2.4	Measurement position for electrical resistance test	23
Fig. 3.1	Tensile-shear load of welded joints with pitch	27
Fig. 3.2	SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with single-weld seam	35
Fig. 3.3	SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with multi-weld seam of pitch 1 mm	36
Fig. 3.4	SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with multi-weld seam of pitch 4 mm	37
Fig. 3.5	SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with multi-weld seam of pitch 8 mm	38
Fig. 3.6	Fractured surface of welded joints with single-weld seam after tensile-shear test	40
Fig. 3.7	Al side fractured surface welded specimen with multi-welded seam of pitch 1 and 8 mm after tensile-shear test	41
Fig. 3.8	Electrical resistance of welded joints with pitch	43

List of Tables

Table. 1.1	Summary of battery joining technologies	7
Table. 1.2	Physical and chemical properties of Al/Cu intermetallic phases ..	8
Table. 2.1	Chemical composition of Al1050-H18 and C1020-H02	18
Table. 2.2	Mechanical properties of Al1050-H18 and C1020-H02	18
Table. 2.3	Specification of fiber laser welding system	20
Table. 2.4	Welding conditions	20
Table. 3.1	Cross section of welded joints with pitch	25
Table. 3.2	Fractured location of welded joints with pitch	28
Table. 3.3	Longitudinal hardness distribution of welded joints with single-weld seam and multi-weld seam of pitch 1 mm	30
Table. 3.4	Longitudinal hardness distribution of welded joints with multi-weld seam of pitch 4 and 8 mm	31
Table. 3.5	Transverse hardness distribution of welded joints with single-weld seam and multi-weld seam of pitch 1 mm	32
Table. 3.6	Transverse hardness distribution of welded joints with multi-weld seam of pitch 4 and 8 mm	33
Table. 3.7	IMCs composition of marked points in welded joints with single-weld seam	35
Table. 3.8	IMCs composition of marked points in welded joints with multi-weld seam of pitch 1 mm	36
Table. 3.9	IMCs composition of marked points in welded joints with multi-weld seam of pitch 4 mm	37
Table. 3.10	IMCs composition of marked points in welded joints with multi-weld seam of pitch 8 mm	38
Table. 3.11	IMCs composition of marked points in welded joints with single-weld seam	40

ABSTRACT

The characteristics of dissimilar Al and Cu welded joints by laser welding with pitch

Eun Young Jin

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

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, the paradigm of the automobile market is changing to eco-friendly vehicles according to carbon emission regulations. As the demand for eco-friendly vehicles increases, the importance of battery productivity and joint quality is being highlighted. Accordingly, laser welding was adopted as the lithium battery joining. However, strength and electrical resistance problems are emerging during single-weld seam laser welding. In order to overcome this problem, there is a method of increasing the joint area to improve strength and reduce electrical resistance. Therefore, many researchers are actively conducting research to overcome this through the development of various technologies.

However, until now, the laser welding method according to the pitch variation of the weld seam and the weld seam has not been performed. Therefore, in this study, when welding dissimilar materials Al/Cu, the joint area was secured through multi-weld seam laser welding to improve the joint strength and reduce the electrical resistance to improve the quality of the welded part. In addition, in order to find out the characteristics of the welded part according to the pitch variation during laser welding, the

reliability of the welded part was evaluated by considering the bead characteristics, mechanical and metallurgical characteristics, and electrical conductivity characteristics.

As a result of the study, the maximum tensile-shear strength of 1.25 kN was secured in the multi-weld seam pitch 8 mm, and it increased by about 108% compared to the single-weld seam 0.6 kN. In addition, as a result of the electrical resistance test, the minimum electrical resistance of 77 $\mu\Omega$ was secured at the pitch 8 mm, and it was reduced by about 49% compared to the single-weld seam 115 $\mu\Omega$.

제 1 장. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 지구온난화로 인해 지구 온도가 상승하여 기후가 급변하고 있다. 전 세계적으로 지구 평균 온도 상승 폭을 1.5°C 이내로 제한하기 위한 목표를 세웠으며, 온실가스에서 약 80% 차지하는 탄소량에 대응하기 위해 전 세계 국가들은 2050년까지 탄소중립을 선언하여 탄소 배출 규제가 엄격해졌다. 탄소 배출의 주원인인 화석연료 사용량을 줄이기 위해 Fig. 1.1과 같이 자동차 시장의 패러다임은 지속 가능한 성장을 위해 기존 내연기관차에서 친환경차로 바뀌고 있으며, 이에 따라 대한민국 정부는 2019~2030년까지 수소차 85만대, 전기차 300만대를 판매하여 친환경차의 점유율을 높일 것이라고 선언했다. 이에 따라 친환경차의 수요가 증가함과 동시에 배터리의 중요성이 부각되고 있다.

친환경차의 배터리는 주행거리, 성능, 효율, 가격에 큰 영향을 미친다. 친환경차의 배터리 팩(Pack)은 형태 및 차종에 따라 수백 개의 셀(Cell)로 구성되어 있다. 배터리는 셀 단위로 셀과 셀이 결합하여 모듈로 구성되고, 모듈(Module)과 모듈이 모여 Fig. 1.2에 나타낸 바와 같이 배터리 팩으로 구성된다. 각 셀의 연결부는 탭(Tab)과 탭, 탭과 버스바(Busbar)가 전기적으로 연결되어 있으며, 용접부는 배터리의 충·방전으로 인해 전류가 발생하므로 전류 흐름에 있어 자유로워야 하며, 저항이 생기면 온도상승을 야기한다. 또한, 차량 충돌 시 배터리의 폭발 사고로 인해 안전상 위험을 초래할 수 있다. 따라서 용접부에 열적 스트레스를 줄이고 용접면적을 확보해 기계적 강도뿐만 아니라 전기저항을 감소시켜 용접부의 신뢰성을 확보해야 한다[1]. 아울러 이차전지의 종류와 극성에 따라 선택되는 소재가 다르기 때문에 동종 및 이종소재의 용접기술 개발이 요구되어진다.

이차전지의 이종소재로 은(Ag)>구리(Cu)>금(Au)>알루미늄(Al)>텅스텐(W)>아연(Zn) 순으로 전기전도율이 우수하다. 하지만 은과 금 같은 경우 전기전도율은 우수하지만 가격적인 측면에서 경제적이지 않아 상대적으로 저렴하고 전기전도율이 우수한 구리와 알루미늄이 이차전지의 탭과 버스바의 이종소재로 채택되었다. 특

히, 예전부터 구리는 기계적, 전기적 특성이 우수하여 전기전도성이 요구되는 물체에 많이 사용되어왔다. 하지만 최근 친환경차 배터리 제작으로 구리 사용량이 급격히 증가하여 원자재 가격이 상승할 뿐만 아니라 구리의 무게를 고려하여 알루미늄과 함께 사용해 친환경차 배터리의 가격 경제력과 경량화 효과를 얻을 수 있다[2]. 따라서 이차전지에 사용되는 이종소재로 구리, 알루미늄에 대한 다양한 용접 방법 및 기술개발 등으로 용접부의 신뢰성 확보를 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

현재까지 수행되고 있는 이종소재 Al/Cu의 용접에 있어 국내·외 기술 동향은 레이저용접 공정을 통해 Single-weld seam 용접시 좁은 용접면적으로 인한 기계적 강도와 전기저항을 개선시키기 위해 워블링, 워빙, 그린레이저 및 ARM 레이저용접 등 다양한 기술개발들이 진행되고 있으나, Weld seam과 Weld seam 간에 피치변화에 따른 레이저용접 기법은 아직까지 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 이종소재 Al/Cu의 용접시 Multi-weld seam 레이저용접을 통해 용접면적을 확보하여 기계적 강도 향상과 전기저항을 감소시켜 용접부에 품질을 개선시키고자 하였다. 아울러 레이저용접시 피치변화에 따른 용접부의 특성을 알아보기 위해 용접부 비드 특성과 기계적, 금속학적 특성 및 전기전도도 특성을 고찰하여 용접부에 대한 신뢰성을 평가하고자 하였다.

2030년까지 전세계 연간 승용차 및 경차 판매량 전망

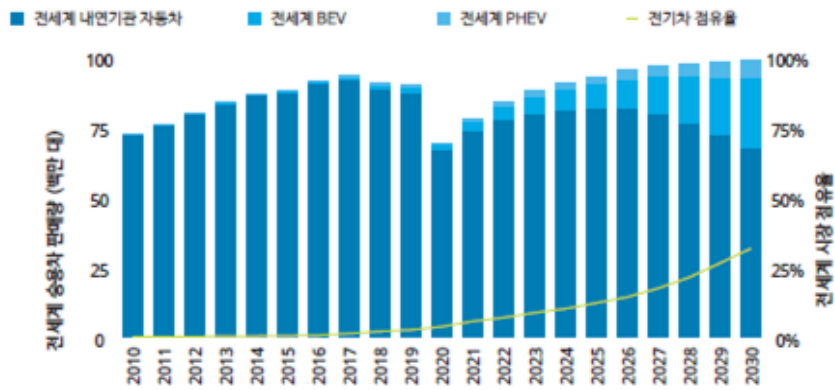


Fig. 1.1 Global annual sales of eco-friendly vehicles by 2030[3]

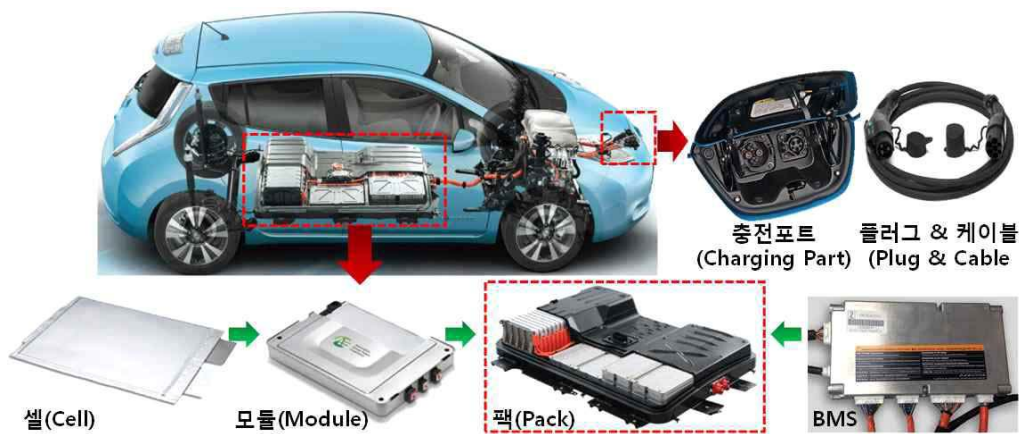


Fig. 1.2 Battery pack system[4]

1.2 국내 · 외 기술동향

현재 국 · 내외적으로 환경규제가 강화되면서 친환경차의 생산과 더불어 배터리 공급도 비례하며 증가하고 있다. 많은 배터리 회사들은 요구되는 친환경차의 수요에 맞춰 배터리 팩을 공급하기 위해 대량 생산 및 높은 신뢰성을 가지는 용접공정을 요구하고 있어 많은 연구원은 다양한 용접공정을 통해 각 공정별 용접 특성을 비교하여 타당성을 제시하고 있다.

Lee et al. 등은 배터리 용접에 있어 주요 공정별 용접 특성을 비교하여 Table. 1.10에 나타냈다[1,5,6,7]. 초음파용접은 이종소재간 고주파 진동을 소노트로드(Snotrode)를 통해 용접 재료에 국부적으로 가해 상호 기계적 체결, 확산, 마찰열로 인해 변형과 용융이 작용하여 용접부를 형성하는 공정이다. 또한 초음파용접은 Al/Cu 용접에서 고상용접으로 용접부의 IMCs를 최소화할 수 있으며, 얇은 박판을 다층 용접이 가능하고, 낮은 에너지 소비로 생산비용을 절감할 수 있다. 하지만 소재의 두께가 제한적이며, 재료에 대한 의존성과 소노트로드와 혼(Horn)으로 인해 재료에 압흔이 생성되고, 마찰에 의한 미세분진 발생 및 소노트로드와 재료의 Sticking 현상이 발생하여 생산성의 영향을 준다. 저항용접은 재료에 전류를 인가하면 용접계면에서 저항이 발생해 용융시키고 압력을 가해 국부적으로 용착시키는 공정이다. 저항용접은 Al/Cu와 같은 고전도성 및 열전도성 소재에 대해 열전달이 매우 빠르게 이루어져 용접계면이 충분한 가열이 이루어지지 않아 넓은 너깃 확보가 어려워 전도성 높은 다층 재료와 이종소재에 대해 용접성 저하를 야기시킨다. 하지만 저렴한 생산 비용과 자동화를 통한 대량 생산이 가능하며, 품질관리에 있어 우수한 특징을 가지고 있다. 레이저용접은 레이저 빔을 이용해 고밀도 에너지로 재료를 용융시켜 용접하는 용접공정이다. Al/Cu는 재료 특성상 반사율이 높아 난 용접 소재로 분류되며, 용접 시 IMCs가 형성되어 용접강도 감소를 야기시키고, 넓은 용접면적을 확보하기 어렵다. 하지만 레이저용접은 이종소재 간 입열량을 제어할 수 있어 높은 유연성 및 빠른 용접 속도와 자동화가 가능하여 대량 생산에 적합하며, 비접촉식 용접공정으로 재료 표면에 건전한 용접부를 형성할 수 있다. 레이저용접, 초음파용접, 저항용접 중 레이저용접이 높은 용접강도와 낮은 전기저항을 얻었다고 발표했다. 따라서 이 중 레이저용접 공정이 가장 효율적인

용접방법으로 평가되고 있다[8,9].

레이저용접 공정을 이용한 Al/Cu 이종소재 용접 시 응고 과정에서 재료의 물리적, 화학적, 열적 특성의 차이로 일정한 원자의 정수비로 용접계면에서 필연적으로 IMCs가 형성된다. 형성된 IMCs는 용접부에 불규칙적으로 분포되며, 취성이 높아 파단의 주요 원인이 된다. 또한, IMCs는 원자의 확산에 지배되고 온도와 시간에 따라 성장한다[10]. Al/Cu 용접 시 IMCs는 Fig. 1.3, Table. 1.2에 나타난 바와 같이 대표적으로 $Al_2Cu(\theta)$, $AlCu(\eta_2)$, $Al_3Cu_4(\xi_2)$, $Al_2Cu_3(\delta)$, $Al_4Cu_9(\gamma_1)$ 5가지의 IMCs가 형성된다[2]. 이러한 IMCs는 각각의 경도를 가지며, 두 금속 간에 전기저항 및 취성파괴에 원인이 되어 전기전도도와 강도에 악영향을 미친다. Zuo et al. 등은 IMCs 중 $Al_2Cu(\theta)$ 가 취성파괴의 주요 원인으로 강도를 감소시킬 수 있음을 입증하였고 $Al_4Cu_9(\gamma_1)$ 가 용접강도의 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였다[11]. Solchenbach et al. 등은 Al/Cu 레이저 빔 납땜 용접에서 IMCs 두께가 증가할수록 전기저항 증가 및 강도 감소에 원인이 된다고 발표하였다[12]. 또한, ABBASI et al. 등은 Al/Cu 냉간압연 용접공정을 통해 IMCs 두께가 $2.5\mu m$ 이상 증가하면 용접부의 강도 및 전기전도도가 크게 저하된다고 보고하였다[10]. 따라서 레이저용접 공정을 이용한 배터리 용접 시 금속간화합물을 최소화해 강도 확보와 전기전도도에 대한 용접부에 대한 신뢰성을 확보해야 한다.

Al/Cu 레이저용접 공정에서 난 용접 소재로 인한 빛 반사율과 용접 시 형성되는 IMCs와 Single-weld seam으로 인한 좁은 용접면적으로 용접강도 감소와 전기저항 증가와 같은 단점을 극복하기 위해 다양한 기술개발 연구가 진행중이다. 현재 IR(Infrared) 파장대 영역에서 Al/Cu 소재는 4%, 2%의 낮은 빛 흡수율을 극복하기 위해 Fig. 1.4에 나타난 바와 같이 40%의 빛 흡수율을 가지는 녹색(Green) 파장대 영역의 레이저를 이용하여 KAISER, Eike, et al. 등은 Cu 동종재 겹치기 이음 레이저용접 공정에서 펄스(Pulsed) 녹색 레이저를 사용해 녹색 파장대 영역과 IR 파장대 영역을 비교한 결과 펄스 녹색 레이저용접의 경우 우수한 빔 품질로 안정적인 용융풀을 만들어 스패터 및 기공 발생을 제어할 수 있으며, 균일한 비드 직경 및 용입깊이를 가진다고 증명했다[13]. 또한, Kim은 레이저 빔 모듈레이션(위블링, 위빙)을 이용하여 용접속도와 주파수와 의 조합으로 중첩률을 큰 변수를 두고, Fig. 1.5에 나타난 바와 같이 오실레이션에 따라 용융풀의 교반으로 인한 용접면

적 확보와 기공 감소, 미세조직 제어 및 온도구배를 효과적으로 제어할 수 있다고 보고되었다[14]. KRAETZSCH, Mathias, et al. 등은 Al/Cu 레이저용접에서 위빙을 통해 용접면적을 증가시키고 균열을 억제하였으며, Al 모재 대비 80%의 용접강도를 달성했다고 발표하였다[15]. 아울러, ARM(Adjustable Ring Mode)레이저와 같은 다중 빔 레이저용접 및 용접기술은 오실레이션과 같이 유사한 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다[14]. 따라서 연구자들은 Al/Cu 이종소재를 레이저용접 공정을 통해 Single-weld seam 용접 시 문제되는 용접 품질을 개선하기 위해 다양한 기술개발을 토대로 용접면적을 증가시켜 용접부 강도 증가와 함께 전기저항을 감소시킬 수 있는 건전한 용접부를 확보하기 위한 연구가 요구되어진다.

Table. 1.1 Summary of battery joining technologies[1,5,6,7]

Joining methods	Advantage	Disadvantage
<p>Laser Welding</p>	<ul style="list-style-type: none"> - High speed - Less thermal input - Very high precision - Non-contact process - Easy automation 	<ul style="list-style-type: none"> - Material reflectivity - Need good joint fit-up - Hard to produce a large joint area - high initial cost
<p>Ultrasonic Welding</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Solid state process - Excellent for highly conductive materials - Multi-layered sheet - Low energy consumption 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited joining thickness (<3 mm) - Challenging on high strength and hard materials - Sonotrode sticking - Sensitive to surface condition
<p>Friction Stir Welding</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Solid state process - Non-consumable tool - No filler metals - Different process variants available 	<ul style="list-style-type: none"> - Exit hole left unfilled - Clamping required - Sensitive to joint clamping - Expensive machine technology
<p>Resistance Welding</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Low cost - Efficient and fully automation - Good quality control - Fast process 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficult to produce large nuggets - Difficult for highly conductive materials - Electrode sticking/ wear - Possible expulsion

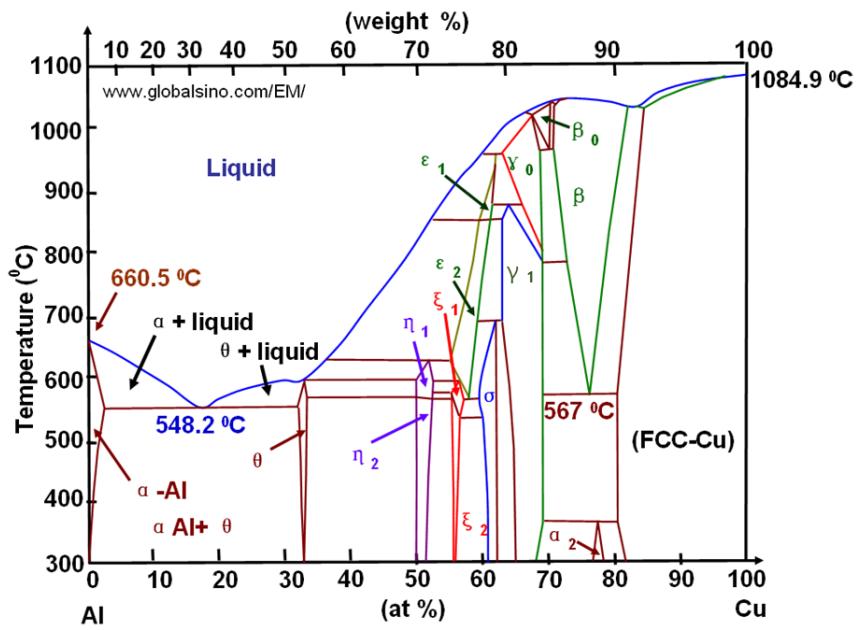


Fig. 1.3 Al/Cu binary phase diagram[2]

Table. 1.2 Physical and chemical properties of Al/Cu intermetallic phases[2]

Phase	Nominal composition	Chemical composition (at.% Al)	Spec. Electrical resistance ($\mu\Omega$ cm)	Hardness (HV)
θ	Al ₂ Cu	67~68.1	8,0	413
η_2	AlCu	47.7~50.2	11,4	648
ξ_2	Al ₃ Cu ₄	43.7~44.8	12,2	624
δ	Al ₂ Cu ₃	38.1~40.7	13,4	180
γ_1	Al ₄ Cu ₉	31~37.5	14,2	35

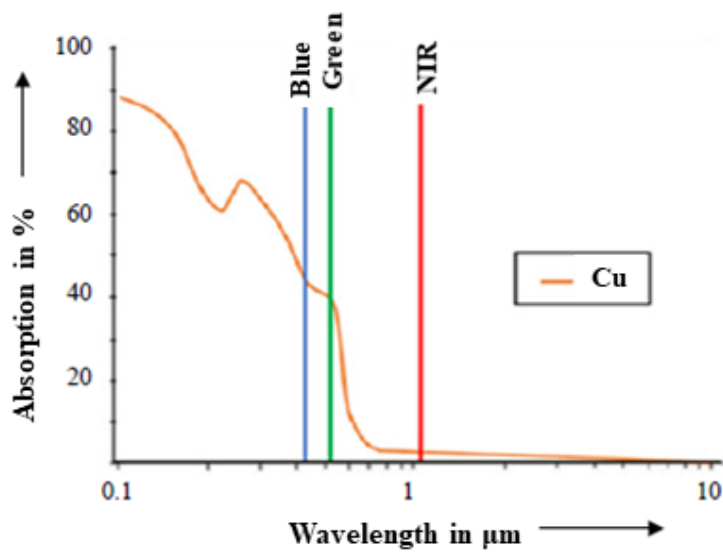


Fig. 1.4 Cu absorption by wavelength

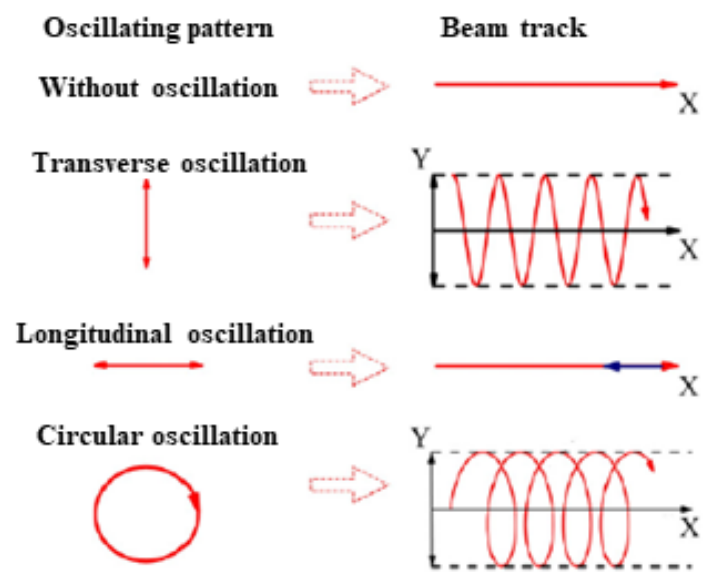


Fig. 1.5 Schematic diagrams of beam oscillating pattern[14]

1.3 Al 및 Cu 소재 특성

1.3.1 Al1050 소재 특성

Al은 순금속 및 합금 상태로 광범위하게 사용되며 가벼워 경량 소재 및 제품에 많이 사용되고 전기전도율 및 열전도율, 내식성이 우수하고 가공성이 좋다. 또한, 재활용성이 높아 경제적이고 파괴 인성 높으며 강도가 좋아 상업 및 군사 장비, 기계 부품, 전기 재료 등으로 널리 사용된다.

Al은 면심입방정(FCC) 구조로서 강과 같은 저온취성이 없으며, 성형성과 단조성이 좋다. Al의 융점은 660°C, 비등점은 2,470°C이다. Al은 상온에서의 밀도는 2.7 g/cm³이고, 전기전도도 및 열전도도는 3.82x10⁷mhos/m, 237W/m·k이며, Fe에 비해 3배 정도 크다. 또한, 모든 Al 합금은 재결정개시 온도는 Al 순도에 따라 다르며, Fig. 1.6에 나타낸 바와 같이 냉간가공에 의해서 경화된 금속을 가열하면 온도가 증가함에 따라 금속은 재결정하여 150°C 정도에서 연화되기 시작하여 300~350°C에서 완전히 연화하고 온도가 계속 높아짐에 따라 점차 강도가 감소되나 연신율은 400~500°C에서 극대치에 달한다. 이러한 특성으로 인해 고온에서 Al 합금을 가공할 수 있으나, 합금의 국부 용해나 결정립 성장 등으로 인해 소재가 열화될 수도 있으므로 주의해야 한다[16].

Al 합금은 열처리 합금(2000, 6000, 7000 계열)과 비열처리 합금(1000, 3000, 4000, 5000 계열)으로 나눈다. 1000 계열은 비열처리 합금으로 분류되며, 공업용 순금속 Al(순도 99.0~99.9%)와 고순도 Al(순도>99.9%)로 나눌 수 있다. 또한, 1000 계열은 용접성, 가공성, 내식성 뛰어나며, 강도 및 경도가 낮고 빛의 반사성, 열전도성 및 전기전도성 좋다. 순 알루미늄에 포함된 주요 불순물은 Fe, Si이고, 그 외에 Cu, Zn, Ti, Mn, V 등이 있다. 이러한 불순물들은 내식성을 저하하는 역할을 하며, 불순물이 적을수록 내식성이 향상되어 양극산화 처리를 하면 표면 상태가 좋아진다. 불순물 중에서도 Cr, Mn, V, Zr, Ti 등은 미량의 함유에 의해서 전기전도도 저하에 원인이 된다. 또한, Al은 전위가 높은 Fe, Cu 등과 접촉하면 Al에 접촉부식으로 인한 부식이 발생한다[17].

1000 계열은 강도를 요구하지 않는 가정용품, 일용품, 전기기구, 방열재료 등 사용되고 표면처리성이 좋아 화학, 식품, 공업용 탱크, 장식품, 명판, 반사판 등에 사용된다. 아울러 Si은 재료 특성상 가볍고 우수한 전기전도성으로 인해 최근 친환경차 배터리 탭 및 버스바 소재로 Cu와 함께 채택되어 사용되고 있다.

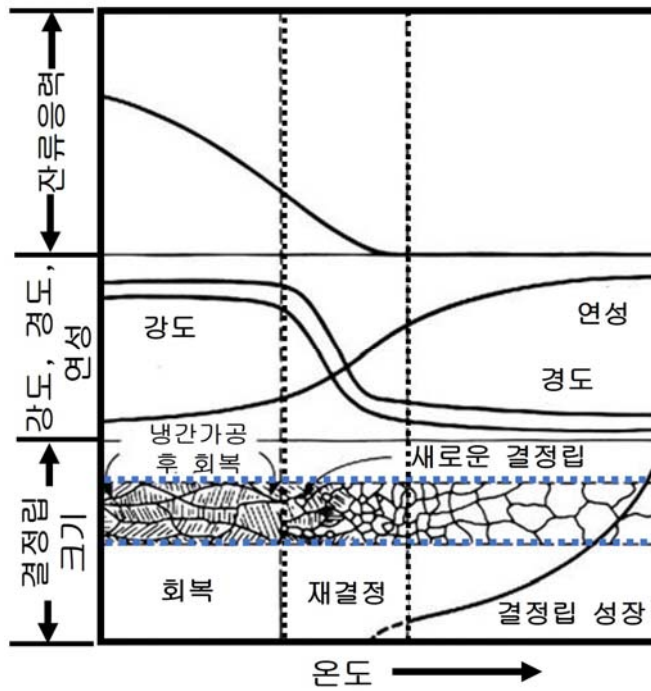


Fig. 1.6 Annealing process according to temperature

1.3.2 C1020 소재 특성

Cu는 순금속 및 합금 상태로 광범위하게 사용되며 전기전도율 및 열전도율, 내식성이 우수하고 가공성이 좋다. 인장강도가 크고 용접 및 접합성이 좋아 많이 사용되고 있으며 구리의 약 80% 정도는 순금속 상태로 전기 재료, 기계 부품, 건축 재료 등으로 널리 사용된다.

Cu는 면심입방정(FCC) 구조로서 성형성과 단조성이 좋다. Cu의 융점은 1,083°C, 비등점은 2,310°C이다. Cu의 상온에서의 밀도는 Al의 약 3배 정도인 8.96 g/cm³이고, 전기전도도 및 열전도도는 5.80 x 10⁷ mhos/m, 372.1W/m·k이며, Ag에 비해 낮지만, Al에 비해서 각각 1.5 및 2배 정도 크다. 그러나 열전도 및 전기전도성은 합금화에 따라 크게 저하된다.

순동은 산소함량에 따라 터프피치동, 인탈산동, 무산소동으로 분류된다. 이 중 산소함량이 가장 적은 무산소동은 O₂나 탈산제를 품지 않은 Cu이며, 산소함유량은 0.001~0.002% 정도이며, 진공 또는 일산화탄소(CO)의 환원성 분위기에서 용해 주조하여 만든다. 정해 정련된 음극 Cu를 용해하고 CO 및 질소가스의 환원성 분위기에서 O₂가 Cu에 들어오는 것을 방지하면서 주조하면 무산소 구리를 만들 수 있다. 무산소동은 수소취화성이 있는 터프피치동과 전기전도성이 저하되는 인탈산동의 단점을 개선한 재료로 전성 및 연성이 우수하고, 수소취화를 일으키지 않으며, 반복굴곡특성이 우수하다. 또한 전기전도도가 IACS 101% 이상이고 RRR(Residual Resistivity Ratio, 잔류저항비) 300 이상이며, 가스 성분이 매우 적어서 진공 중에서의 가스 방출량이 적다[17,18].

무산소동은 반도체 리드프레임재 및 각종 커넥터재 등 전자제품의 소형화, 집적화에 필수적인 고전도 및 고강도가 요구되는 각종 전자 소재 합금의 베이스 소재로 사용되고 있다. 아울러 최근 친환경차 배터리 탭 및 버스바 소재로 채택되어 사용되고 있다.

1.4 레이저용접 특성

1.4.1 레이저 원리 및 특징

레이저(LASER)는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 첫머리 글자를 딴 단어로 “유도방출에 의한 빛의 증폭”이라는 의미를 갖는다. 레이저는 Fig. 1.7와 같이 기저상태 E_1 에 있는 원자가 외부의 자극을 받아 E_2 로 여기되고, 에너지 준위 E_2 는 일반적으로 불안정하여 기저상태로 옮겨가며, 이때 전자파와 동일한 주파수의 광자가 발생하며 외부로부터 자극받아 빛이 유도방출하여 공진기의 반사 거울에 의해 빛이 증폭된다. 따라서 레이저는 단색광, 평행광, 직진성, 가간섭광을 갖는 품질이 매우 높은 빛 에너지로서 집광하기 쉬운 특성을 가지므로 높은 에너지 밀도를 가질 수 있다[8]. 또한, 일반적으로 레이저는 매질, 공진기, 펌핑소스로 구성되고 매질의 종류에 따라 여러 종류의 레이저로 분류되며, 용접을 비롯한 다양한 재료 가공에 사용되어지고 있다.

레이저용접은 증폭된 레이저 빔을 이용해 높은 밀도의 에너지로 재료를 용융시키는 용접방법이다. 용접과정에서 레이저 집속광이 재료 표면에 도달하여 대부분 표면반사로 손실되지만, 소량의 흡수 에너지는 재료를 급속하게 가열하여 Fig. 1.8과 같이 키홀을 형성하고 내부에 고온의 금속 증기와 용융금속이 존재한다. 키홀이 깊어지면 레이저광은 그 안에서 다중반사를 일으켜 에너지 전달효과를 증가시키며, 키홀이 움직이면 키홀 주위의 용융금속은 표면장력에 의해 일부는 벽면에 부착하고 일부는 중력의 영향으로 응고하여 용접부(bead)를 형성한다[19]. 따라서 레이저용접은 좁고 깊은 용접부를 얻을 수 있으며, 용접속도가 빠르기 때문에 생산성 매우 높다. 용접에서 사용되는 에너지의 총량이 매우 낮아서 기본적으로 소입열 용접법이므로 소재의 열변형을 최소화할 수 있어 용접 후처리 공정을 생략하거나 축소할 수 있다[20].

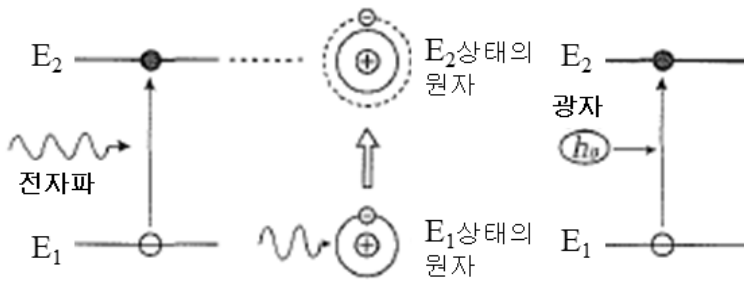


Fig. 1.7 Excitation by absorption of electromagnetic waves and absorption of photons[8]

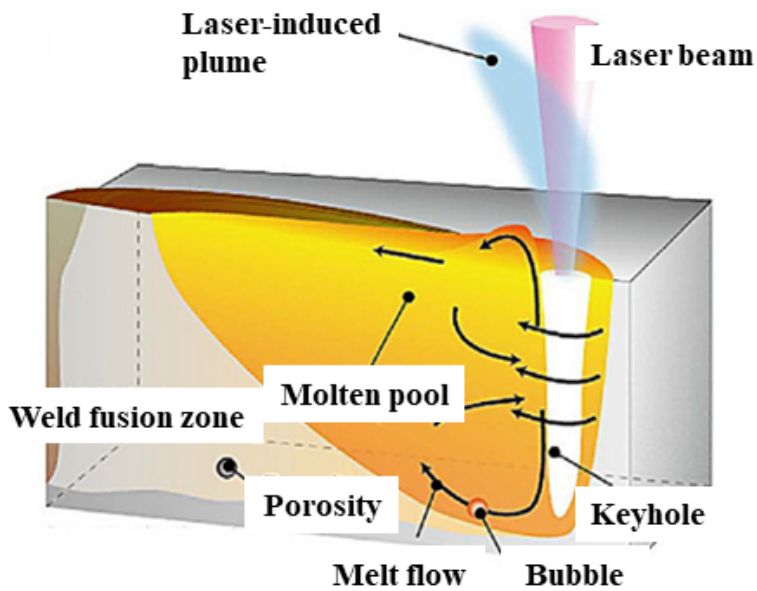


Fig. 1.8 Schematic of laser keyhole welding

1.4.2 파이버 레이저 원리 및 특징

파이버(fiber) 레이저는 고체레이저로 분류되고 Fig. 1.9에 나타낸 바와 같이 이터븀(Yb)이 도핑된 Yb:YAG의 광섬유, 펌프 다이오드 레이저(Pump Diode Laser), FBG(Fiber Bragg Gratings)로 이루어져 있으며, Fig. 1.10에 나타낸 바와 같이 active fiber 내측 glass 클래딩 및 외측 polymer 클래딩이 이중 클래딩 구조를 가진다. 펌핑 다이오드 레이저에서 빛이 조사되면 glass 클래딩 층에 입사되고 매질 양단에서 광섬유격자(FBG, Fiber Bragg Grating)에 의해 레이저를 반복적으로 공진 및 증폭되어 한쪽에서 전반사 거울 다른 한쪽에선 부분반사 거울을 통해 연속적인 반사로 클래딩 층을 투과하면서 레이저 매질을 여기시켜 1,070nm 파장의 빛을 방출한다[21].

파이버 레이저는 기존 로드 타입에 비해 냉각 효율을 극대화할 수 있어 다이오드 펌핑 양의 증가에 따른 열적 문제를 매우 효율적으로 제어할 수 있다. 로드 타입의 레이저는 내부와 외부의 온도차이로 인해 외부 표면에 로드 핵까지 냉각률에 따라 온도편차가 난다. 이러한 열적 특성은 레이저매개체가 레이저 빛이 왜곡되는 열렌즈(thermal lens)효과를 일으켜 빔 품질과 레이저 출력에 한계를 갖는다[8]. 반면, 파이버 레이저는 직경이 가늘고 긴 형태의 레이저 매질을 이용하여 빔 품질이 우수하고, 출력증가가 쉬우며, 효율이 높은 장점이 있다. 파이버 레이저의 여기 광원은 single emitter diode를 사용하는데 이것은 적층 다이오드에 비해 열발생이 적어 수명이 길고 micro cooling channel 대신에 냉각판을 사용하므로 냉각수의 순도 및 온도의존성이 적으며, 하나의 셀이 파손되는 경우 인접한 셀이 연쇄적으로 파손되는 snowball 효과가 없기 때문에 출력이 균일하다[22]. 따라서 파이버 레이저는 우수한 빔 품질, 고효율, 고출력, 고집속화 및 경제적인 이유로 인하여 종래의 다양한 산업군에 사용되고 있다.

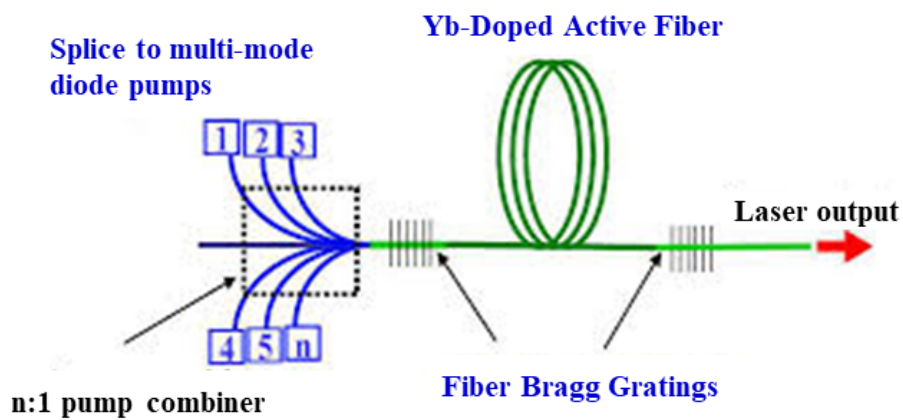


Fig. 1.9 Configuration of fiber Laser

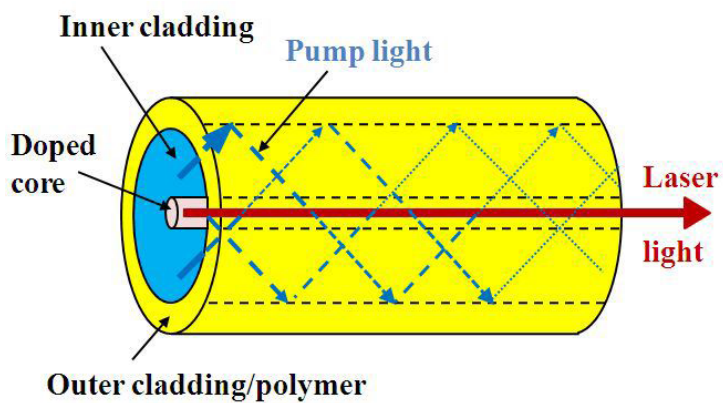


Fig. 1.10 Schematic design of active fiber

제 2 장. 연구 방법

2.1 실험 방법 및 용접 조건

2.1.1 사용 소재 및 용접법

본 연구에서 사용된 소재의 상판은 순 알루미늄 Al1050-H18과 하판 소재는 무산소동 C1020-H02를 사용하였다. 시험편의 제원으로는 Fig. 2.1에 나타낸 바와 같이 두께 0.5t, 길이 25mm, 폭 100mm의 동일한 크기로 30mm 겹쳐 레이저용접을 실시하였다. 사용된 소재의 화학적 조성과 기계적 물성은 Table. 2.1, 2.2에 각각 나타내었다.

Multi-weld seam 레이저용접은 Al 상판 왼쪽을 기준으로 첫 번째 Weld seam, 오른쪽을 두 번째 Weld seam 순으로 피치변화에 따라 레이저용접을 실시하였고, Single-weld seam은 겹침부 중앙에 용접을 실시하였다.

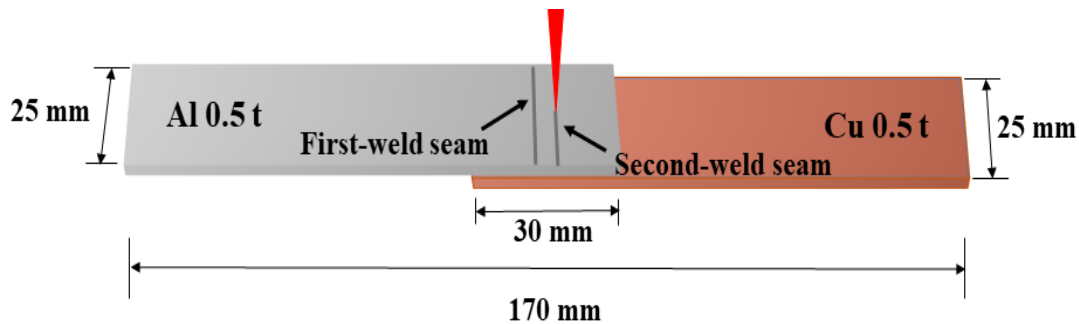


Fig. 2.1 Dimensions of welded specimen

Table. 2.1 Chemical composition of Al1050-H18 and C1020-H02

Chemical compositions (wt.%)								
Material	Cu	Fe	Si	Mg	Zn	Ti	O	Al
Al1050-H18	0.03	0.30	0.11	0.002	0.004	0.01	-	Bal.
C1020-H02	99.95	-	-	-	-	-	0.001	-

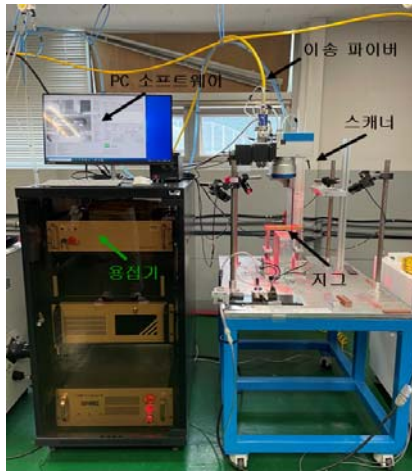
Table. 2.2 Mechanical properties of Al1050-H18 and C1020-H02

Mechanical properties			
Material	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation
Al1050-H18	74 MPa	105-145 MPa	12%
C1020-H02	295 MPa	395 MPa	36.5%

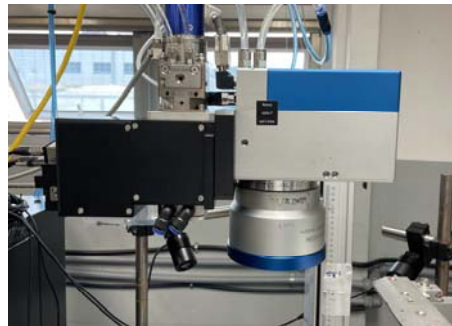
2.1.2 실험 장비 및 용접 조건

본 연구에서 레이저용접을 실시하기 위해 Fig. 2.2에 나타난 바와 같이 LMS 社의 MAT-025H 제품의 1070nm 파장대의 파이버 레이저용접 장비를 사용하였다. Table. 2.3에 용접기 조건을 나타내었으며, 용접기의 최대 출력은 2.5kW이다. 스캐너는 RAYLASE focus on laser 社의 SS-11E-20 [Y]-QU-[W]-RA-D2를 사용하였으며, F-theta 렌즈를 사용하였다. B.P.P (Beam Parameter Product) 4mm·rad, 초점 거리 255mm, 파이버 직경 20um, 콜리메이터 렌즈 100um, 빔 직경 50um이다. 또한 지그 압력은 0.4MPa로 고정하였다.

레이저용접의 주요 공정변수로 레이저 출력, 용접 속도, 초점 위치, 비드의 수 및 피치를 선정하였다. Table. 2.4에 나타난 바와 같이 레이저 출력 2kW, 용접속도 600mm/sec, Multi-weld seam의 Weld seam 수는 2개를 고정변수로 하고 초점 위치는 AI 상판 표면을 기준으로 설정하였다. 아울러 피치 0(Single-weld seam), 1, 2, 4, 6, 8mm로 피치변화에 따라 레이저용접을 실시하여 용접부의 비드 특성과 기계적, 금속학적 특성 및 전기전도도 특성을 평가하였다.



(a) Welding equipment



(b) Fiber laser welding scanner

Fig. 2.2 Experimental set-up for laser welding

Table. 2.3 Specification of fiber laser welding system

Parameters	Values
Wavelength (nm)	1070
Maximum power (kW)	2.5
B.P.P (mm · rad)	4
Focal distance (mm)	255
Fiber diameter (μm)	20
Collimator lens (μm)	100
Focal diameter (μm)	50
Clamping pressure (MPa)	0.4

Table. 2.4 Welding conditions

Welding parameters	Values
Laser power (kW)	2
Welding speed (mm/min)	600
Focal position (mm)	0
Number of weld seam	2
Pitch (mm)	0(Single-weld seam), 1, 2, 4, 6, 8

2.2 용접부 특성 평가

2.2.1 비드 특성 평가

용접부의 비드 특성을 평가하고자 용접부의 피치변화에 따른 용접부의 용융영역 및 결함 특성을 고찰하였다. 용접부의 비드 특성을 평가하기 위해 OLYMPUS 社の BX51M 광학현미경을 사용하여 공정변수별 용접부의 횡단면을 채취하여 마운팅한 후에 사포 #600, #800을 사용하여 그라인딩 후에 #1000, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000 순으로 연마하고 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m를 사용하여 미세 연마를 실시하였다.

2.2.2 기계적 특성 평가

가. 인장-전단 강도

용접부의 피치변화에 따라 인장-전단 강도 및 파단위치에 따른 특성을 고찰하고자 공정변수별 인장-전단 강도 실험을 실시하였다. 평균 인장-전단 강도값을 도출하기 위해 공정변수별 실험을 각각 3회씩 실시한 후에 평균값을 도출하였다. 인장-전단 강도 실험을 위해 100kN 용량의 만능재료시험기 MTDI 社の UT-100F 제품을 사용하였으며, 하중 인가 속도는 3mm/min으로 적용해 인장-전단 강도 실험을 실시하였다.

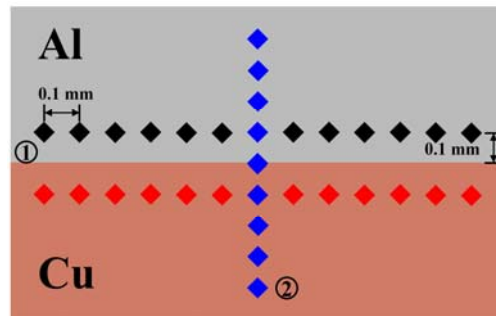
나. 경도 분포

용접부의 피치변화에 따라 파단위치에 따른 용접부의 용착금속부(WM), 열 영향부(HAZ), 모재부(BM) 영역의 경도 분포 특성을 평가하고자 종방향 및 횡방향 측면에서 Single-weld seam 및 Multi-weld seam 피치 1, 4, 8mm의 경도 분포 특성을 고찰하였다. 경도 분포 특성을 평가하기 위해 Fig. 2.3(a)와 같이 Akashi 社の HM-112 비커스 경도 시험기를 사용하였다.

현미경 배율은 50 μm , 136° 다이아몬드 피라미드형 압입자를 사용하였으며, 경도 분포를 측정하기 위해 횡단면을 절단하여 미세연마를 실시하였다. 경도 분포 측정은 하중 0.05kgf, 하중유지시간 10sec 조건으로 용접계면에서 Fig. 2.3(b)와 같이 횡방향으로 0.1mm 지점을 기준으로 종방향으로 0.1mm 간격으로 Al과 Cu를 각각 측정하였으며, 용접부 중앙에서 횡방향으로 0.1mm 간격으로 측정하였다.



(a) Vickers hardness equipment



(b) Measurement position for hardness distribution

Fig. 2.3 Vickers hardness test

2.2.3 금속학적 특성 평가

용접부의 금속학적 특성을 평가하고자 피치변화에 따른 용접부의 미세구조 및 파단면 특성을 고찰하였다. 금속학적 특성을 평가하기 위해 Hitachi 社の SU5000 제품 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)과 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)를 사용하였으며, 공정변수별 용접부의 횡단면을 채취하여 마운팅 한 후에 사포 #600, #800을 사용하여 그라인딩 후에 #1000, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000 순으로 연마하고 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m를 사용하여 미세연마를 실시하였다.

2.2.4 전기전도도 특성 평가

용접부의 피치변화에 따른 전기전도도를 평가하고자 용접부의 전기저항 특성을 고찰하였다. 평균 전기저항 값을 도출하기 위해 공정변수별 전기저항 실험을 각각 3회씩 실시하였고, 전기저항 실험을 위해 HIOKI 社の RM3548 전기저항 시험기를 사용하였다. 전기저항 실험은 상온에서 Fig. 2.4에 나타낸 바와 같이 4단자 법으로 측정하였다. 실험조건은 R_{Al} , R_{AlCu} , R_{Cu} 에 각각 1A를 인가하여 10sec 동안 저항을 측정하였으며, 측정 길이는 40mm씩 동일한 길이로 측정하였다.

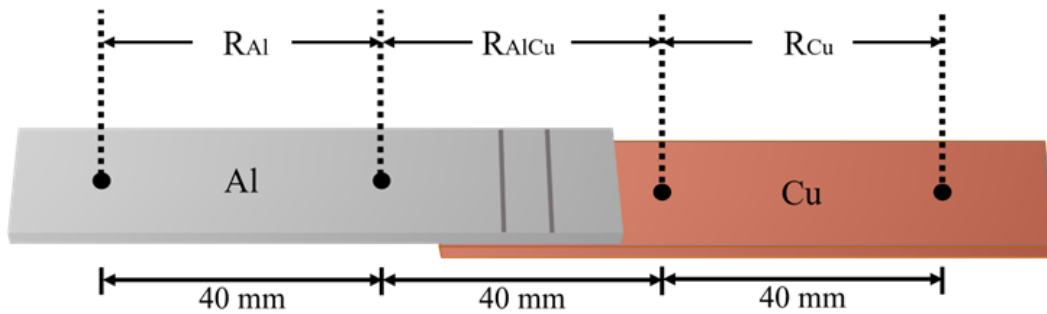


Fig. 2.4 Measurement position for electrical resistance test

제 3 장. 연구 결과 및 고찰

3.1 공정변수별 용접부 비드 특성

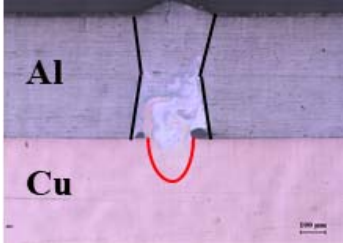

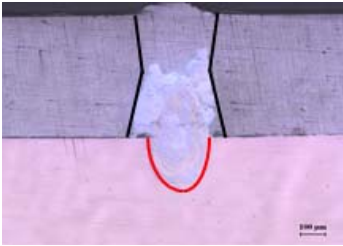
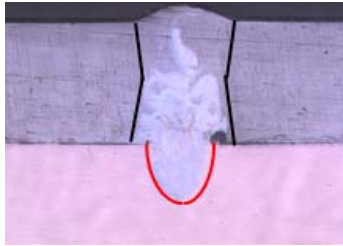
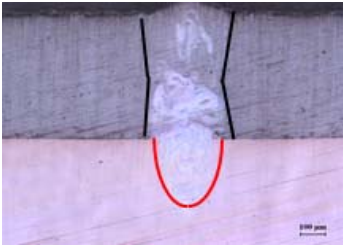
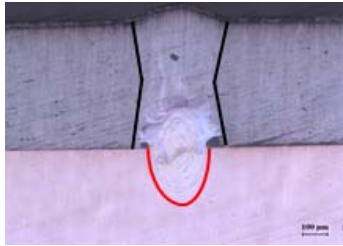
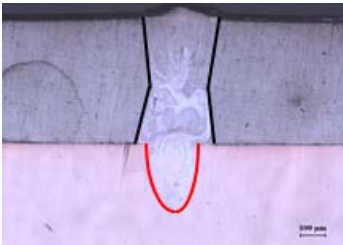
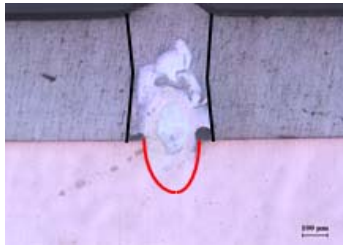

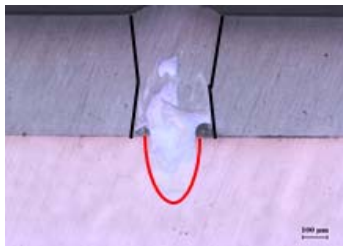
공정변수별 용접부의 비드 특성을 평가하고자 용접부의 피치변화에 따른 비드 단면을 첫 번째 Weld seam과 두 번째 Weld seam을 Table 3.1에 나타내어 용접부의 용융영역 및 결함 특성을 고찰하였다.

용접부의 비드 단면에서 Al의 용융영역이 Cu의 용융영역보다 더 넓게 용융되었다. 이는 Al 소재가 Cu 소재보다 더 낮은 열전도율, 용융점 및 점도 등으로 소재의 열적 특성으로 인해 Al이 넓게 용융된 것으로 사료된다[23,24].

피치 1, 2mm 두 번째 Weld seam의 Al 용융영역이 피치 4~8mm Al 용융영역보다 더 넓게 용융된 것으로 보인다. 이는 피치 1, 2mm에서 첫 번째 Weld seam 용접으로 인해 두 번째 Weld seam이 열 영향을 받아 Al의 용융영역이 더 넓게 용융된 것으로 사료된다.

용접부 비드 단면의 Al 측 용접계면에서 기공이 관찰되었다. 이는 Al은 일반적으로 액상에서 수소의 용해도가 높아 수소가 발생되고, 레이저용접시 빠른 용접속도 및 응고속도로 인해 수소가 배출되지 못해 기공이 발생된 것으로 사료된다. 또한, Al/Cu 레이저용접시 Al이 상판에 위치한 경우 대부분 Al 측 용접계면에서 기공이 발생되는데 이는 하판 Cu가 히트싱크로 작용하여 Al 측 용접계면에서 냉각이 빨라져 수소가 빠져나가지 못하고 그대로 응고되어 기공으로 발생한 것으로 사료된다[25]. 따라서 비드 단면에서 관찰된 기공은 레이저 용접공정의 급열, 급냉의 특성 및 Al/Cu 소재의 특성이 복합적으로 작용하여 용접계면에서 기공이 발생된 것으로 사료된다.

Table. 3.1 Cross section of welded joints with pitch

Weld seam Pitch	First-weld seam	Second-weld seam
1 mm		
2 mm		
4 mm		
6 mm		
8 mm		

3.2 기계적 특성

3.2.1 인장-전단 강도

용접부의 피치변화에 따른 기계적 특성을 평가하고자 인장-전단 강도 및 파단 위치의 특성을 고찰하였다. 기계적 특성을 평가하기 위해 공정변수별 인장-전단 강도 실험을 각각 3회씩 실시하여 평균값을 Fig. 3.1에 나타내었다.

인장-전단 강도 실험 결과 피치 8mm에서 최대 인장-전단 강도 1.25kN을 확보하였다. Single-weld seam 0.6kN과 비교하였을 때 약 108% 증가하였다. 또한, 피치가 증가할수록 인장-전단 강도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 Single-weld seam에 비해 Multi-weld seam이 용접면적이 증가하여 높은 인장-전단 강도가 나타난 것으로 사료된다.

피치 1~4mm까지 약 0.4kN의 강도가 급격히 증가하였다. 이러한 이유는 피치 1mm에서 첫 번째 Weld seam과 두 번째 Weld seam 간에 열 영향으로 인해 국소면적에 입열이 집중되어 강도 저하의 원인이 된 것으로 사료된다[26]. 또한, 피치 4mm 이상부터는 인장-전단 강도가 그다지 증가하지 않았으며, 이는 일정 피치 간격 이상부터 첫 번째 Weld seam과 두 번째 Weld seam 간에 열 영향이 그다지 미치지 않아 강도에 영향을 주지 않은 것으로 사료된다.

인장-전단 강도 실험 후 용접부의 피치에 따른 파단이 발생된 위치를 Table. 3.2에 나타내었다. Single-weld seam에서 계면 파단이 발생하였고, Multi-weld seam 모든 조건에서 첫 번째 Weld seam의 연화 현상에 의해 열 영향부가 연화되어 파단이 발생한 것으로 사료된다.

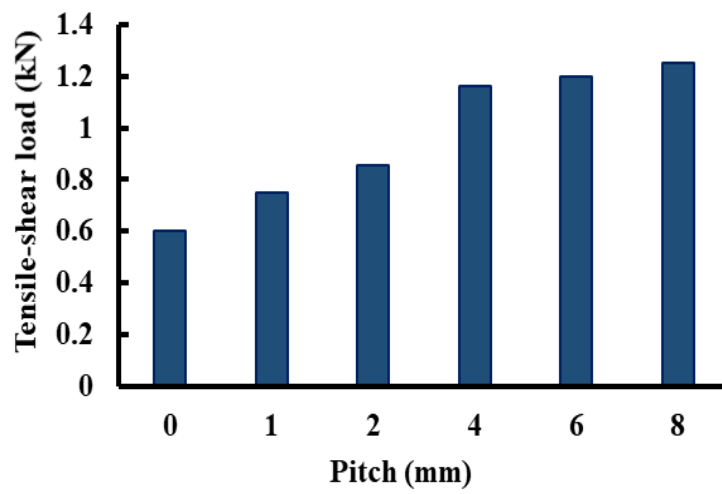

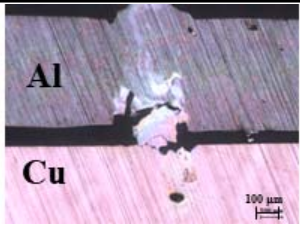












Fig. 3.1 Tensile-shear load of welded joints with pitch

Table. 3.2 Fractured location of welded joints with pitch

Fractured Pitch	Appearance	Cross section
0 mm		
1 mm		
2 mm		
4 mm		
6 mm		
8 mm		

3.2.2 경도 분포

앞 절 3.2.1 인장-전단 강도 실험 후 파단 위치에 따라 경도 분포 특성을 평가하고자 용접부의 피치변화에 따른 용접부(WM, HAZ, BM)의 영역을 종방향 및 횡방향 측면에서 Single-weld seam과 Multi-weld seam 피치 1, 4, 8mm의 경도 분포 특성을 고찰하였다.

Table. 3.3, 3.4에 나타난 바와 같이 모든 조건의 종방향 경도 분포를 살펴보면 용접부에 가까울수록 IMCs로 인해 경도가 증가하는 경향을 보이며, AI 측 용접부 중앙에서 $\pm 0.2\text{mm}$ 떨어진 지점인 열 영향부에서 AI 모재 48HV 대비 약 20HV 경도가 급격히 감소하여 파단이 발생하였다. 이러한 이유는 용접 중 AI 합금 소재의 특성상 열에 의해 재결정 및 결정립 성장 등으로 모재의 물성이 연화되어 열 영향부에서 파단이 발생한 것으로 사료된다[16,17]. 또한, Single-weld seam은 계면에서 파단이 발생하였으며, 취성이 강한 IMCs가 주요 파단의 원인으로 사료된다.

Table. 3.5, 3.6에 나타난 바와 같이 모든 조건 용접부의 횡방향 경도 분포를 살펴보면 용접계면에 가까울수록 경도가 증가하였다. 이는 앞 절 1.2에 Table. 1.2에 나타난 바와 같이 각각의 고유의 경도를 갖는 IMCs가 용접부에 분포되어 용접계면에서 경도가 증가한 것으로 사료된다. 또한, Single-weld seam과 피치 4, 8mm는 용접계면에서 $\pm 0.2\text{mm}$ 횡방향으로 경도가 증가하고 있는 경향을 보인다. 이는 Single-weld seam과 피치 4, 8mm와 비교하였을 때 일정 피치 간격 이상부터 Weld seam 간에 열 영향이 그다지 미치지 않아 유사한 경도 분포가 나타난 것으로 사료된다.

피치 1mm 용접부 횡방향 경도 분포를 살펴보면 두 번째 Weld seam이 첫 번째 Weld seam 용접으로 인해 열 영향을 받아 Single-weld seam과 피치 4, 8mm Weld seam보다 횡방향으로 경도가 증가하였다. 앞서 언급된 바와 같이 IMCs는 원자 확산에 지배되며, 온도와 시간에 따라 성장한다[10]. 따라서 피치 1mm와 Single-weld seam 및 피치 4, 8mm의 경도 분포를 비교하였을 때 Weld seam 간에 열 영향으로 인해 횡방향으로 IMCs가 성장 및 분포된 것으로 사료된다.

Table. 3.3 Longitudinal hardness distribution of welded joints with single-weld seam and multi-weld seam of pitch 1 mm

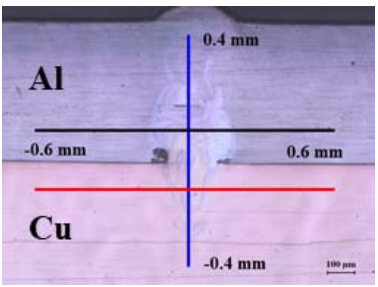
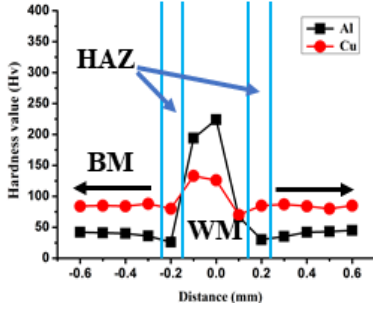
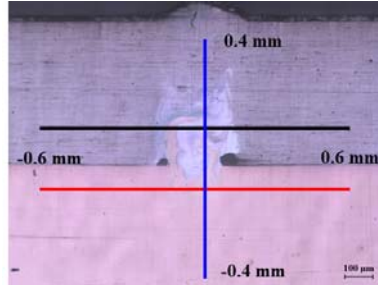
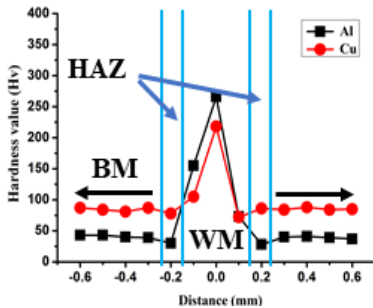
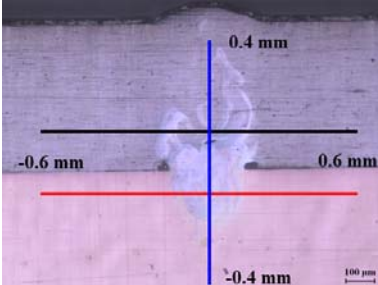
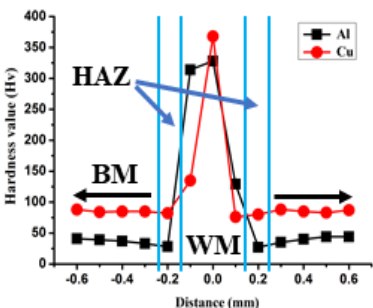


Hardness Pitch		Cross section	Hardness distribution
0 mm	First weld seam		
	Second weld seam		
1 mm	First weld seam		
	Second weld seam		

Table. 3.4 Longitudinal hardness distribution of welded joints with multi-weld seam of pitch 4 and 8 mm

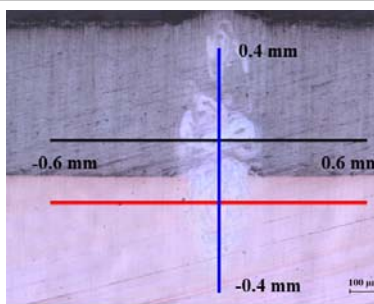
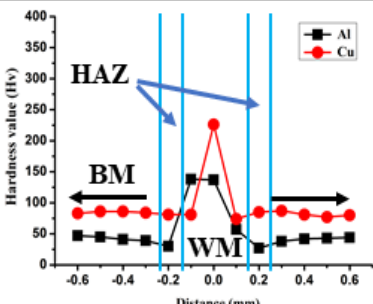
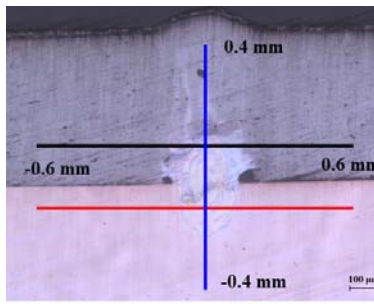
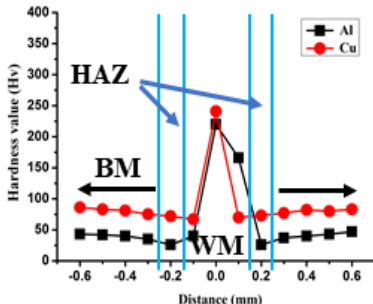
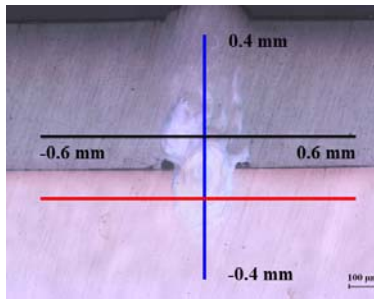
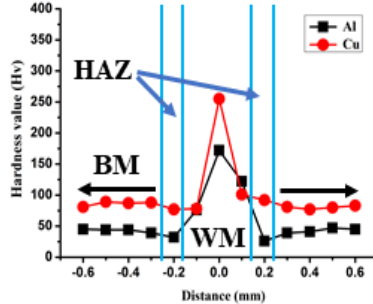
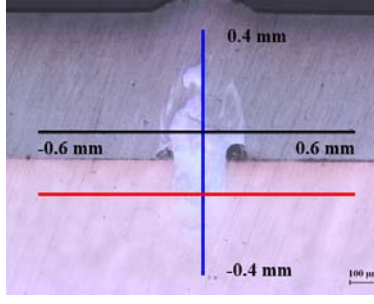
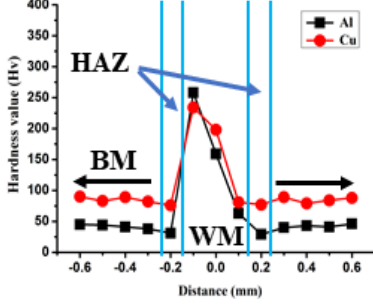
Hardness Pitch		Cross section	Hardness distribution
4 mm	First weld seam		
	Second weld seam		
8 mm	First weld seam		
	Second weld seam		

Table. 3.5 Transverse hardness distribution of welded joints with single-weld seam and multi-weld seam of pitch 1 mm

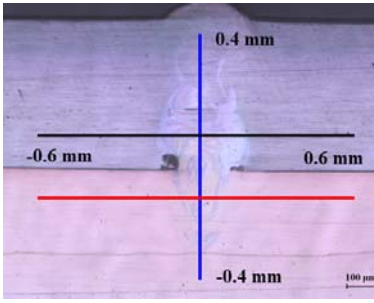
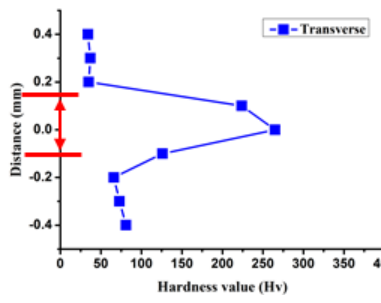
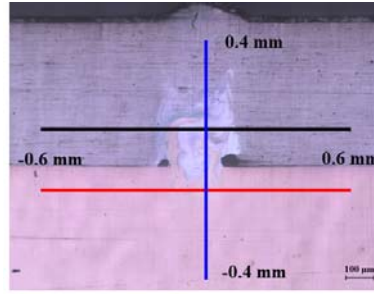
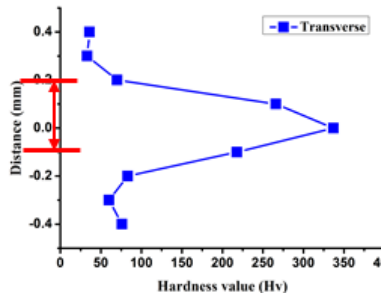
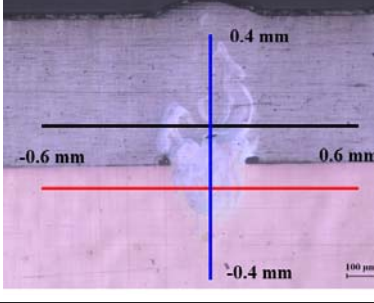
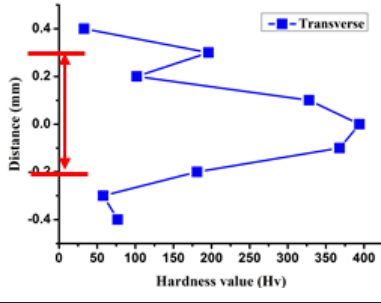
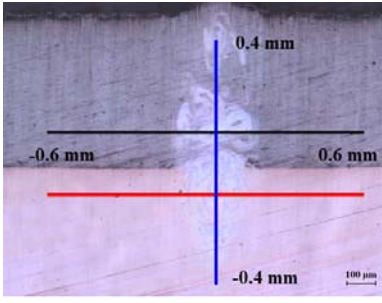
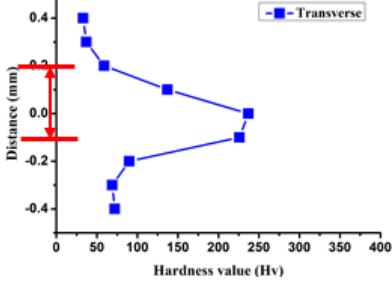
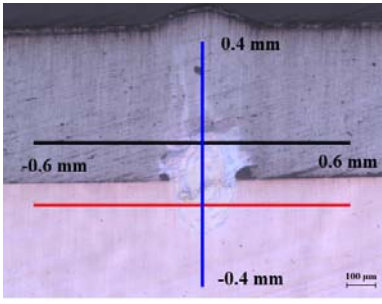
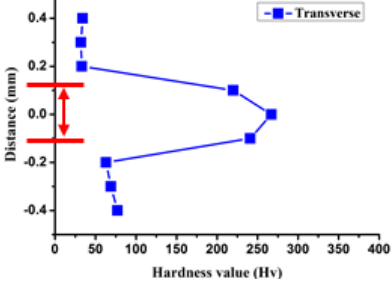
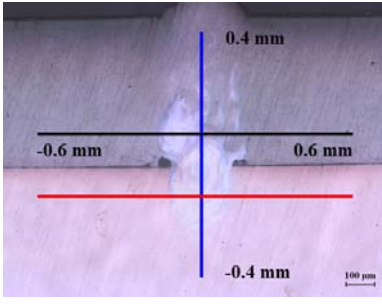
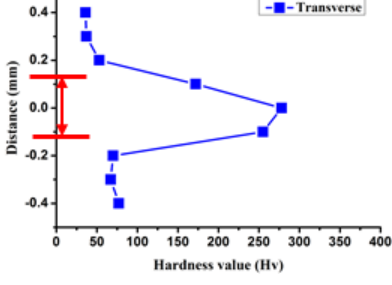
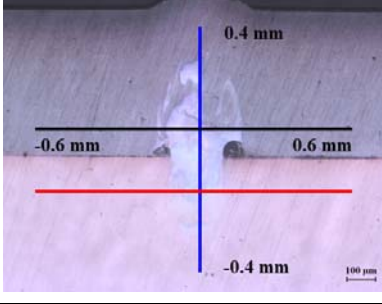
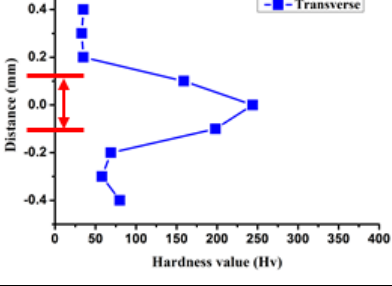
Hardness Pitch		Cross section	Hardness distribution
0 mm	First weld seam		
			
1 mm	Second weld seam		

Table. 3.6 Transverse hardness distribution of welded joints with multi-weld seam of pitch 4 and 8 mm

Hardness Pitch		Cross section	Hardness distribution
4 mm	First weld seam		
	Second weld seam		
8 mm	First weld seam		
	Second weld seam		

3.3 금속학적 특성

3.3.1 SEM-EDS 분석

앞 절 3.2.1 인장-전단 강도 실험 후 파단 위치에 따른 금속학적 특성을 평가하고자 용접부의 미세구조 특성을 고찰하였다. 계면 파단이 발생한 Single-weld seam을 제외한 모든 Multi-weld seam은 Al 측 열 영향부에서 파단이 발생하였다. 따라서 용접부의 피치변화에 따른 SEM-EDS 분석을 통해 파단이 발생한 Al 측 미세구조 특성을 고찰하였다.

Fig. 3.2에 나타낸 바와 같이 Single-weld seam의 Al 측에서 SEM-EDS 측정 결과 Table. 3.7에서 명시된 바와 같이 Al_3Cu_4 , Al/Cu eutectic 상이 공정반응 및 포정반응에 의하여 취성이 강한 IMCs가 형성되었다. 따라서 Single-weld seam의 주요 파단의 원인으로는 IMCs에 의한 계면 파단으로 사료된다.

Fig. 3.3, 3.4에 나타낸 바와 같이 피치 1, 4mm의 Al 측에서 SEM-EDS 측정 결과 Table. 3.8, 3.9에서 명시된 바와 같이 주로 $Al_2Cu+AlCu$, Al/Cu eutectic 상이 공정반응 및 포정반응에 의하여 형성되었으며, 취성이 강한 IMCs는 발견되지 않았다. 따라서 피치 1, 4mm는 용접 중 Al 합금 소재의 특성상 열에 의해 재결정 및 결정립 성장 등으로 모재에 비해 물성이 연화되어 열 영향부에서 파단이 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 3.5에 나타낸 바와 같이 피치 8mm의 Al 측에서 SEM-EDS 측정 결과 Table. 3.10에서 명시된 바와 같이 Al/Cu eutectic, Al_2Cu , Al_4Cu_9 상이 공정반응 및 포정반응에 의해 취성이 강한 IMCs가 형성되었으나, 용접 중 Al 합금 소재의 특성상 열에 의해 재결정 및 결정립 성장 등으로 모재에 비해 물성이 연화되어 열 영향부에서 파단이 발생한 것으로 사료된다.

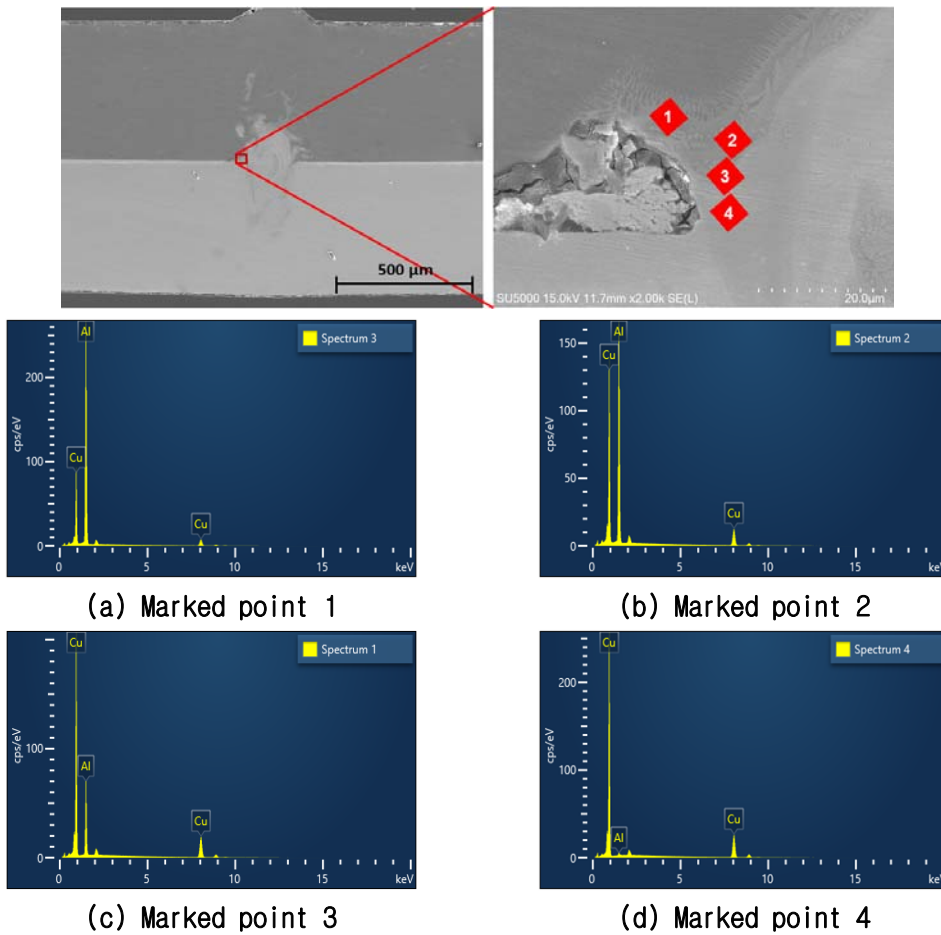


Fig. 3.2 SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with single-weld seam

Table. 3.7 IMCs composition of marked points in welded joints with single-weld seam

Marked points	Al (at.%)	Cu (at.%)	Phase
1	82.62	17.38	Al/Cu eutectic
2	69.65	30.35	Al/Cu eutectic
3	43.61	56.39	Al_3Cu_4
4	2.72	97.28	Cu

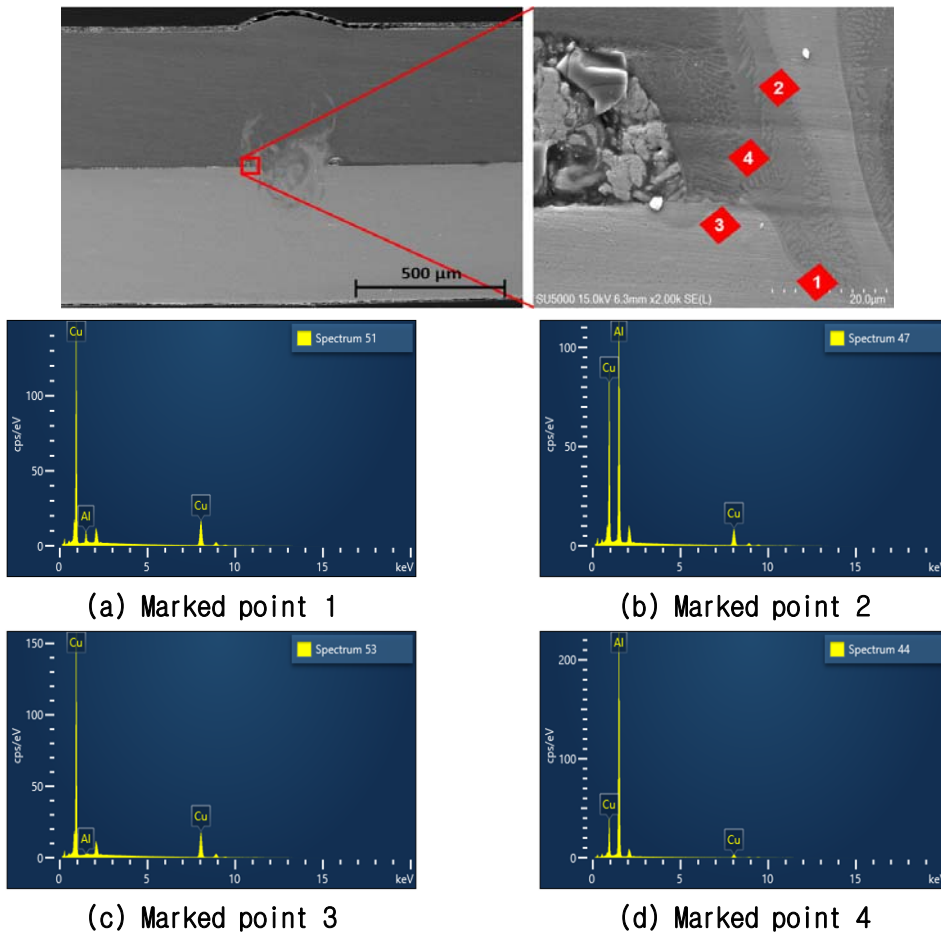


Fig. 3.3 SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with multi-weld seam of pitch 1 mm

Table. 3.8 IMCs composition of marked points in welded joints with multi-weld seam of pitch 1 mm

Marked points	Al (at.%)	Cu (at.%)	Phase
1	11.99	88.01	Cu
2	70.89	29.11	Al/Cu eutectic
3	99.38	0.62	Al
4	89.36	10.64	Al/Cu eutectic

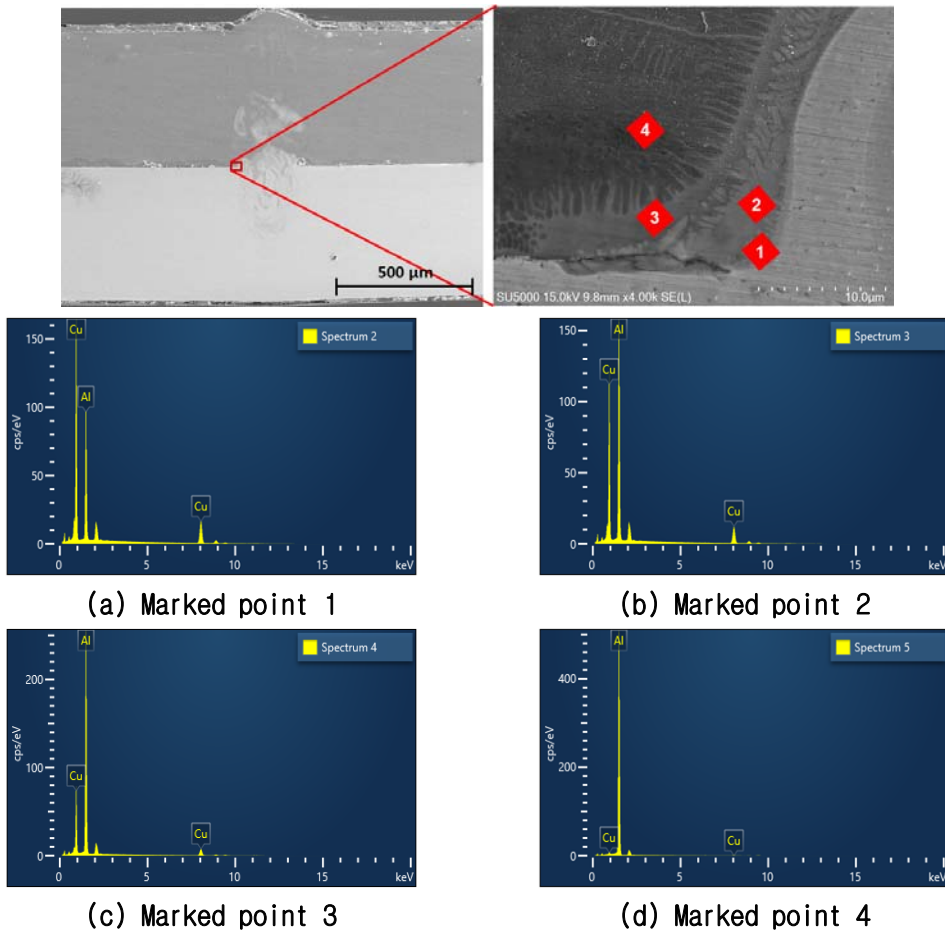


Fig. 3.4 SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with multi-weld seam of pitch 4 mm

Table. 3.9 IMCs composition of marked points in welded joints with multi-weld seam of pitch 4 mm

Marked points	Al (at.%)	Cu (at.%)	Phase
1	55.66	44.34	Al ₂ Cu-AlCu
2	71.25	28.75	Al/Cu eutectic
3	84.08	15.92	Al/Cu eutectic
4	99.33	0.67	Al

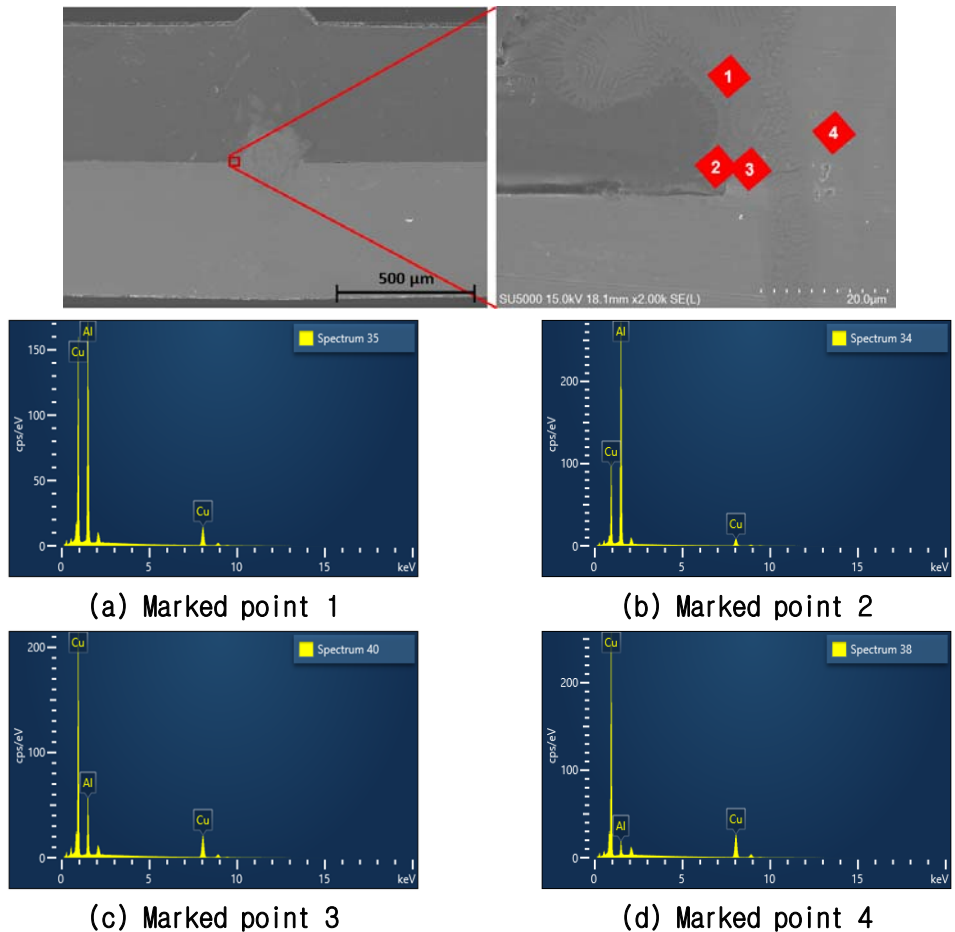


Fig. 3.5 SEM image of the measurement region and spectra in welded joints with multi-weld seam of pitch 8 mm

Table. 3.10 IMCs composition of marked points in welded joints with multi-weld seam of pitch 8 mm

Marked points	Al (at.%)	Cu (at.%)	Phase
1	67.81	32.19	Al ₂ Cu
2	81.66	18.34	Al/Cu eutectic
3	37.84	62.16	Al ₄ Cu ₉
4	13.91	86.09	Cu

3.3.2 파단면 분석

앞 절 3.2.1 인장-전단 강도 실험 후 파단 위치에 따른 금속학적 특성을 평가하고자 용접부의 피치변화에 따른 파단면을 분석하였다. 계면 파단이 발생한 Single-weld seam을 제외한 모든 Multi-weld seam은 AI 측 열 영향부에서 파단이 발생하였다. 따라서 SEM-EDS 분석을 통해 파단이 발생한 용접계면 및 AI 측 파단면을 분석하였다.

계면 파단이 발생한 Single-weld seam의 파단면을 Fig. 3.6에 나타내었다. 파단면의 SEM-EDS 측정 결과 Al/Cu 용접부의 IMCs 중 취성의 특성이 가장 강한 상으로 알려진 Al_2Cu 가[11] 아닌 Table. 3.11에 명시된 바와 같이 AlCu, Al_2Cu_3 , Al_3Cu_4 상들이 형성되어 파단이 발생된 것으로 사료된다.

Multi-weld seam의 모든 조건은 열 영향부에서 파단이 발생하였다. Multi-weld seam 피치 1mm와 8mm의 파단면을 Fig. 3.7에 나타내었으며, Fig. 3.7(a) 피치 1mm에 파단면은 주로 취성파단의 특징인 Cleavage 파단이 형성되었다. 또한, Fig. 3.7(b) 피치 8mm에 파단면을 살펴보면 연성파단의 특징인 Dimple이 다량으로 발견되었다. 따라서 피치 8mm에서 연성파단의 특징인 Dimple이 다량 발견되어 인장-전단 하중에 대한 저항이 증가했기 때문에 피치 1mm보다 높은 인장-전단 강도가 나타난 것으로 사료된다.

열 영향부에서 파단이 발생한 Multi-weld seam의 파단 경로는 앞 절 3.1 비드 단면을 살펴보면 용접계면에서 AI 레이저용접시 발생하는 수소가 빠른 용접속도 및 응고속도에 의해서 수소가 배출되지 못하고 Cu의 히트싱크 작용으로 인해 냉각이 빨라져 용접계면에서 응고되어 기공이 발생되었다. 발생한 기공은 인장-전단 하중이 작용하였을 때 응력이 집중되어 파단의 시발점이 되고, AI 모재가 열에 의해 재결정 및 결정립 성장 등으로 모재의 비해 물성이 연화된 지점인 열 영향부까지 균열이 성장하여 파단이 발생한 것으로 사료된다.

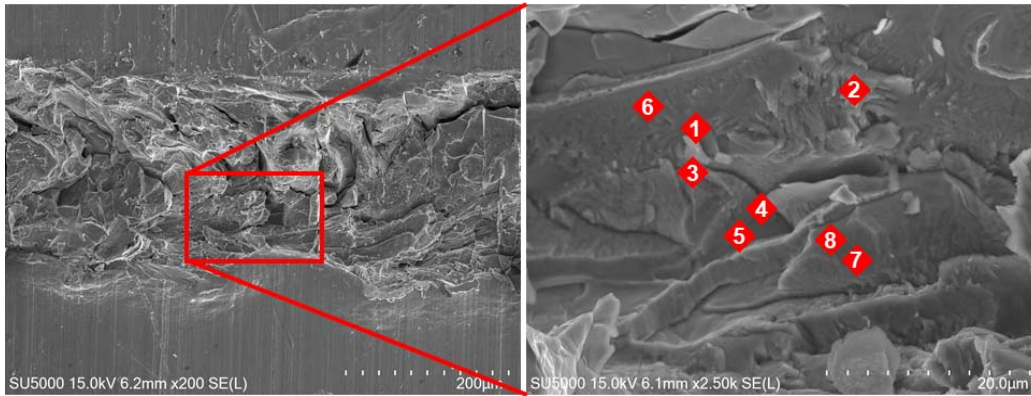
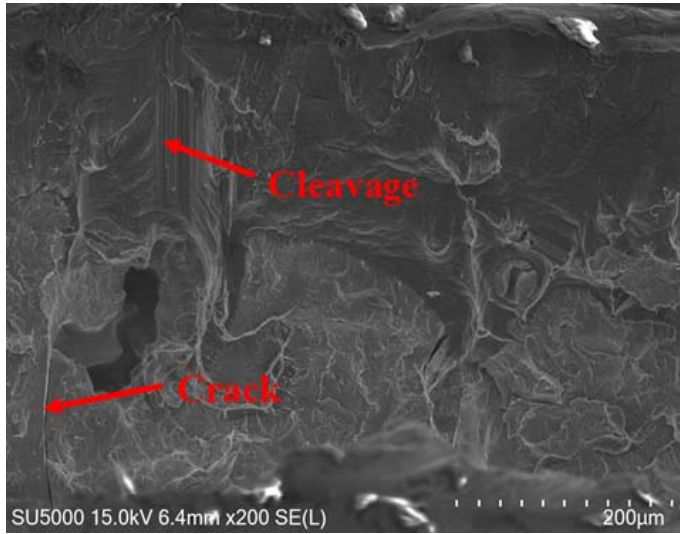


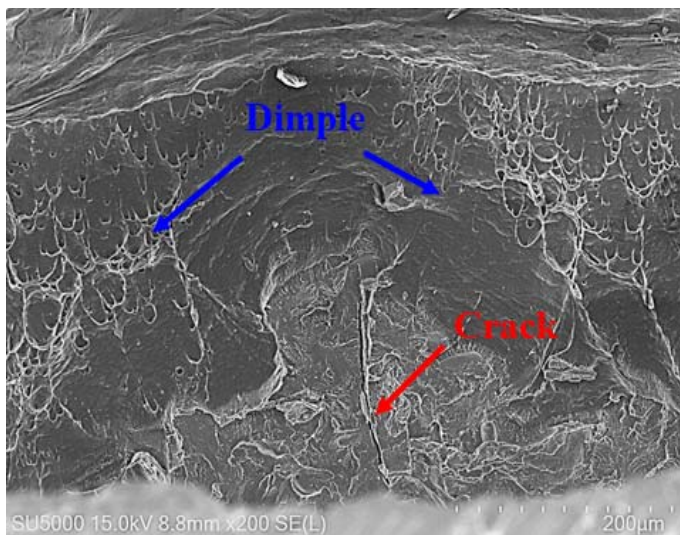
Fig. 3.6 Fractured surface of welded joints with single-weld seam after tensile-shear test

Table. 3.11 IMCs composition of marked points in welded joints with single-weld seam

Marked points	Al (at.%)	Cu (at.%)	Phase
1	53.22	46.78	Al ₂ Cu+AlCu
2	74.23	25.77	Al/Cu eutectic
3	47.89	52.11	AlCu
4	39.81	60.19	Al ₂ Cu ₃
5	34.59	65.41	Al ₄ Cu ₉
6	40.55	59.45	Al ₂ Cu ₃
7	48.71	51.29	AlCu
8	44.78	55.22	Al ₃ Cu ₄



(a) Pitch 1 mm



(b) Pitch 8 mm

Fig. 3.7 Al side fractured surface welded specimen with multi-welded seam of pitch 1 and 8 mm after tensile-shear test

3.4 전기전도도 특성

용접부의 피치변화에 따른 전기전도도 특성을 평가하고자 용접부의 전기저항 특성을 고찰하였다. 공정변수별 전기저항 실험을 각각 3회씩 실시하여 평균값을 Fig. 3.8에 나타내었다.

전기저항 실험 결과 R_{Al} , R_{Cu} 저항이 평균 117, 70 $\mu\Omega$ 으로 측정되었다. 피치 8mm R_{AlCu} 에서 최소 전기저항 77 $\mu\Omega$ 을 확보하였으며, Single-weld seam 115 $\mu\Omega$ 과 비교하였을 때 약 49% 감소하였고, R_{Al} , R_{Cu} 평균 저항 93.5 $\mu\Omega$ 대비 약 20%의 저항이 감소하였다. 이는 Single-weld seam에 비해 Multi-weld seam 레이저용접이 용접면적이 증가하였기 때문에 전기저항을 감소시켰다.

또한, 직렬회로구조인 Single-weld seam에서 전류의 흐름으로부터 와류가 형성되었고, Multi-weld seam으로 인해 병렬회로구조로 변환됨에 따라 전류의 와류 형성을 억제하였으며, 피치와 Weld seam의 길이가 증가할수록 저항이 감소한 것으로 사료된다[27].

따라서 피치가 증가할수록 전기저항이 감소하였고 피치 4mm 이상부터 전기저항이 그다지 감소하지 않았다. 이에 따라 피치 4mm 이상부터 Weld seam 간에 열 영향이 그다지 미치지 않은 것으로 사료된다. 아울러 피치 1, 2mm에서 첫 번째 Weld seam과 두 번째 Weld seam 간에 용접에 의한 열 영향으로 IMCs가 성장 및 증가하여 높은 전기저항이 나타난 것으로 사료된다.

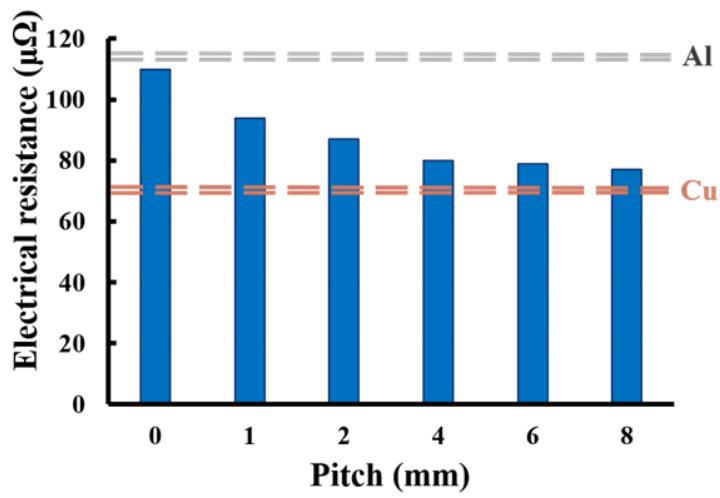


Fig. 3.8 Electrical resistance of welded joints with pitch

제 4 장. 결 론

본 연구에서는 이종소재 Al/Cu의 레이저용접시 피치변화에 따른 용접부의 특성을 알아보기 위해 비드 특성과 기계적, 금속학적 특성 및 전기전도도 특성을 고찰하여 용접부에 대한 신뢰성을 평가하고자 하였다.

1) 피치 1, 2mm 두 번째 Weld seam의 Al 용융영역이 피치 4~8mm Al 용융영역보다 더 넓게 용융되었으며, 피치 1, 2mm에서 첫 번째 Weld seam 용접으로 인해 두 번째 Weld seam이 열 영향을 받아 Al의 용융영역이 더 넓게 용융된 것으로 사료된다.

2) Multi-weld seam 레이저 용접부의 최대 인장-전단 강도 피치 8mm에서 1.25kN을 확보하였으며, Single-weld seam 0.6kN과 비교하였을 때 약 108% 증가하였고, 피치가 증가할수록 인장-전단 강도가 증가하는 경향을 보였다.

3) 모든 조건의 종방향 경도 분포에서 용접부 Al 측 $\pm 0.2\text{mm}$ 떨어진 지점인 열 영향부가 열에 의해 연화되어 경도가 급격히 감소하였으며, 피치 1mm 횡방향 경도 분포에서 두 번째 Weld seam이 첫 번째 Weld seam의 열 영향을 받아 IMCs가 성장 및 분포되어 횡방향으로 경도가 증가한 것으로 사료된다.

4) Single-weld seam은 Al_3Cu_4 , Al/Cu eutectic 상인 취성이 강한 IMCs가 형성되어 계면에서 파단이 발생된 것으로 사료된다. 열 영향부에서 파단이 발생한 Multi-weld seam의 피치 1, 4, 8mm의 Al 측에서 주로 $\text{Al}_2\text{Cu}+\text{AlCu}$, Al/Cu eutectic, Al_2Cu 와 같은 취성이 강한 IMCs가 형성되었으나, 용접 중 Al 합금 모재가 열 영향부에서 물성이 연화되어 파단이 발생된 것으로 사료된다.

5) 계면 파단이 발생한 Single-weld seam에서 Al/Cu 용접부의 IMCs 중 취성의 특성이 가장 강한 상으로 알려진 Al_2Cu 가 아닌 AlCu, Al_2Cu_3 , Al_3Cu_4 상들이 형성되어 파단이 발생된 것으로 사료된다. Multi-weld seam의 피치 1mm와 8mm를 비교하였을 때 피치 8mm에서 연성파단의 특징인 Dimple이 다량 발견되었으며, 이

는 용접강도 증가의 영향을 준 것으로 사료된다.

6) Multi-weld seam 레이저 용접부의 최소 전기저항 피치 8mm에서 $77\mu\Omega$ 을 확보하였으며, Single-weld seam $115\mu\Omega$ 과 비교하였을 때 약 49% 감소하였다. Al/Cu의 모재 평균 저항 $93.5\mu\Omega$ 대비 약 20%의 저항이 감소하였으며, 피치가 증가할수록 전기저항이 감소하는 경향을 보였다. 이는 일정 피치 간격 이상부터 Weld seam 간에 열 영향이 그다지 미치지 않은 것으로 사료된다.

7) 이종소재 Al/Cu의 레이저용접시 Multi-weld seam 중 피치 8mm가 인장-전단 강도 및 전기전도도 측면에서 Single-weld seam보다 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] LEE, S. Shawn, et al. Joining technologies for automotive lithium-ion battery manufacturing: A review. In: International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2010. p. 541-549.
- [2] SCHMIDT, Michael, et al. Laser micro welding of dissimilar metals. In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America, 2004. p. M502.
- [3] Dr. Jamie Hamilton, Dr. Bryn Walton 외 4인 전기차 시장 전망 2030년 대비하기 위한 전략
- [4] KOSME 산업분석 보고서(자동차)
- [5] ZWICKER, M. F. R., et al. Automotive battery pack manufacturing-a review of battery to tab joining. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 1: 100017.
- [6] DAS, Abhishek, et al. Joining technologies for automotive battery systems manufacturing. World Electric Vehicle Journal, 2018, 9.2: 22.
- [7] Kang, et al. Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing. Journal of Welding and Joining, 2019, 37.2: 52-59.
- [8] 용접·접합 편람 3 역학, 공정 및 열가공
- [9] BRAND, Martin J., et al. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances. Journal of Energy Storage, 2015, 1: 7-14.
- [10] ABBASI, M.; TAHERI, A. Karimi; SALEHI, M. T. Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. Journal of Alloys and Compounds, 2001, 319.1-2: 233-241.
- [11] ZUO, Di, et al. Intermediate layer characterization and fracture behavior of laser-welded copper/aluminum metal joints. Materials & Design, 2014, 58: 357-362.

- [12] SOLCHENBACH, Tobias; PLAPPER, Peter; CAI, Wayne. Electrical performance of laser braze-welded aluminum-copper interconnects. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16.2: 183-189.
- [13] KAISER, Elke, et al. Sputter-free and reproducible laser welding of electric or electronic copper contacts with green laser. In: *Lasers in Manufacturing Conference, Munich*. 2015.
- [14] Kim. Recent Trends about Modulation Technology of the Laser Beam Welding. *Journal of Welding and Joining*, 2018, 36.4: 47-57.
- [15] KRAETZSCH, Mathias, et al. Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. In: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Laser Institute of America, 2011. p. 169-178.
- [16] A&C. 1.알루미늄 재료기술
- [17] 조수연; 제창욱; 최병강. 최신 금속재료공학. 2014, 0.8
- [18] 김기영; 조형호. 무산소동 제조기술. 재료마당, 2008, 21.2: 4-11.
- [19] 김기철. 5. 레이저 용접기술의 개요와 산업 적용 현황-자동차, 철강, 전자 관련 산업 수요 커 부품산업 다양화, 정밀도에 대처가능. *광학세계*, 2001, 13.2: 49-55.
- [20] 김기철; 김재웅. 테일러드 블랭크 제조를 위한 용접기술 (Welding Technology for Tailored Blank Manufacturing). *대한용접·접합학회지*, 2000, 18.3: 12-19.
- [21] 이목영. 대출력 화이버 레이저 용접. *대한용접·접합학회지*, 2008, 26.4: 8-13.
- [22] SCHAD, Sven-Silvius, et al. Recent development of disk lasers at TRUMPF. In: *Solid State Lasers XXV: Technology and Devices*. SPIE, 2016. p. 216-221.
- [23] FORTUNATO, A.; ASCARI, A. Laser welding of thin copper and aluminum sheets: feasibility and challenges in continuous-wave welding of dissimilar metals. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 6.2: 136-157.

- LA, Wei-Jen, et al. Failure mode and fatigue behavior of dissimilar laser welds in lap-shear specimens of aluminum and copper sheets. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2014, 7.3: 706-710.
- [24]
- [25] KIM, Yong, et al. Study on Laser Welding of Dissimilar Materials between Aluminum and Copper (I)-Research Trend in Laser Welding Technology and Materials Testing Methods. Journal of Welding and Joining, 2022, 40.5: 416-437.
- [26] KIM. Laser welding characteristic of dissimilar metal for aluminum to steel. Journal of Welding and Joining, 2017, 35.5: 16-22.
- [27] SOLCHENBACH, Tobias; PLAPPER, Peter; CAI, Wayne. Electrical performance of laser braze-welded aluminum-copper interconnects. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16.2: 183-189.