



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](#)

2024년 2월  
석사학위 논문

무산소동의 레이저 용접시  
피치변화에 따른 용접성 및 전기저항 특성

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 충 국

무산소동의 레이저 용접시  
피치변화에 따른 용접성 및 전기저항 특성

Characteristic of Weldability and Electric Resistance  
according to Pitch Change in Laser Welding of  
Oxygen-Free Copper

2024년 2월 일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 충 국

무산소동의 레이저 용접시  
피치변화에 따른 용접성 및 전기저항 특성

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 12월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 충 국

# 김충국의 석사학위논문을 인증함

위원장 박철호 (인)

위 원 방희선 (인)

위 원 손윤철 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

# CONTENTS

List of Figures .....	III
List of Tables .....	IV
Abstract .....	V
제 1 장. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 및 방법 .....	2
1.3 국내·외 기술동향 .....	3
1.4 Al 및 Cu 소재 특성 .....	6
1.5 레이저용접 특성 .....	8
1.5.1 레이저 원리 및 특징 .....	8
1.5.2 파이버 레이저 원리 및 특징 .....	10
제 2 장. 연구 방법 .....	12
2.1 실험 방법 및 용접 조건 .....	12
2.1.1 사용 소재 및 용접법 .....	12
2.1.2 실험 장비 및 용접 조건 .....	14
2.2 용접부 특성 평가 .....	16
2.2.1 비드 특성 .....	16

2.2.2 기계적 특성 .....	18
가. 인장-전단 강도 .....	16
나. 경도 분포 .....	16
2.2.3 전기전도도 특성 .....	18
제 3 장. 연구 결과 및 고찰 .....	19
3.1 비드 특성 .....	19
3.2 기계적 특성 .....	23
3.2.1 인장-전단 강도 .....	23
3.2.2 경도 분포 .....	25
3.3 전기전도도 특성 .....	27
제 4 장. 결론 .....	29
참고문헌 .....	31

# List of Figures

Fig. 1.1	Cu absorption by wavelength .....	7
Fig. 1.2	Excitation by absorption of electromagnetic waves and absorption of photons .....	9
Fig. 1.3	Schematic diagrams of beam oscillating pattern .....	9
Fig. 1.4	Configuration of fiber Laser .....	11
Fig. 1.5	Schematic design of active fiber .....	11
Fig. 2.1	Lap joint configuration .....	12
Fig. 2.2	Experimental set-up for laser welding .....	14
Fig. 2.3	Vickers hardness test .....	17
Fig. 2.4	Measurement position for electrical resistance test .....	18
Fig. 3.1	Tensile-shear load of welded joints with pitch .....	25
Fig. 3.2	Result of vickers hardness test .....	26
Fig. 3.3	Electrical resistance of welded joints with pitch .....	28



## List of Tables

Table. 1.1	Summary of battery joining technologies .....	5
Table. 2.1	Chemical composition of C1020-H02 .....	13
Table. 2.2	Mechanical properties of C1020-H02 .....	13
Table. 2.3	Specification of fiber laser welding system .....	15
Table. 2.4	Welding conditions .....	15
Table. 3.1	Surface of welded joints with pitch .....	20
Table. 3.2	Cross section of welded joints with pitch .....	22
Table. 3.3	Fractured location of welded joints with pitch .....	24

# ABSTRACT

## Characteristic of Weldability and Electric Resistance according to Pitch Change in Laser Welding of Oxygen-Free Copper

Kim Chung Guk

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 2.61 kN was secured in the multi-weld seam pitch 1 mm, and it increased by about 158% compared to the single-weld seam 1.65 kN. In addition, as a result of the electrical resistance test, the minimum electrical resistance of 79.5  $\mu\Omega$  was secured at the pitch 1 mm, and it was reduced by about 20% compared to the single-weld seam 99  $\mu\Omega$ .

# 제 1 장. 서 론

## 1.1 연구 배경

현대 산업사회에서 화석연료를 대량으로 사용하는 나라들은 원유나 천연가스 등을 보유하고 있는 국가에 의존할 수밖에 없다. 때문에 해당 국가의 정치나 경제적 상황에 따라 에너지 수급에 영향을 받을 위험이 높다. 대량의 화석연료 사용은 대기 중에 많은 오염물질을 배출하고, 각종 폐기물을 발생시켜 환경 및 기후, 특히 지구 온난화에 심각한 영향을 주고 있다. 세계적으로 지구 온난화를 유발하는 온실가스를 줄이기 위해 에너지를 절약하고 오염물질을 여과해 배출하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 에너지 절약과 환경 보호에 대한 경각심이 높아짐에 따라 친환경 자동차 개발 및 경량화와 관련된 연구도 함께 증가하고 있다. 대표적인 친환경 자동차인 전기 자동차와 하이브리드 자동차는 이차 전지(secondary battery)를 사용한다. 이차 전지는 충전을 통해 재사용이 가능하며 납, 수은 등의 유해 물질을 포함하지 않는다는 특징을 가진다. 이차 전지는 셀(cell) 단위, 모듈(module) 단위, 팩(pack) 단위의 접합을 통해 제작되는데, 이차 전지를 생산하기 위해서는 탭(tap)과 탭, 탭과 버스 바(bus bar) 사이의 접합이 필요하다(1). 일반적으로 탭과 버스 바의 양극(anode)과 음극(cathode)에는 내식성과 전도도가 우수하고 상대적으로 저렴한 구리(copper), 알루미늄(aluminum), 니켈(nickel) 등의 소재가 사용된다. 모듈 단위의 접합에는 상기한 소재의 동종 및 이종 접합이 쓰인다. 이차 전지의 용접 품질에 문제가 있을 경우 화재 발생과 같은 위험한 상황으로 이어질 수 있어 용접부의 고품질화를 달성하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 구리 동종소재 간의 레이저 용접 공정 최적화를 위해 두께 0.5t의 구리소재에 대하여 공정변수별 비드 외관과 단면 관찰 및 전기적·기계적 특성 평가를 바탕으로 용접부의 건전성을 확보하고자 하였다

## 1.2 연구 목적 및 방법

구리는 내식성, 연성과 같은 성질이 우수하고 열전도율과 전기전도율 등의 물리적 특성이 우수하여 통신, 전기·전자, 자동차, 항공 등의 다양한 산업에서 많이 사용되는 소재이다. 그러나 열전도율이 높아 용접 시 밀도가 높은 고열원이 필요해 고밀도 에너지를 사용하는 레이저 용접 활용이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 IR 파장대의 레이저를 사용할 경우, 해당 파장대에 대한 구리의 빛 흡수율이 낮아 용융풀이 불안정하거나 용접부에 결함이 발생하는 등의 문제가 발생할 수 있다. 이를 개선하기 위해 구리 및 구리합금 동종 및 이종 레이저 용접에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 구리는 비철 귀금속 전기 전도체 소재로서 전선 케이블, 발전기, 모터 및 변압기 등에 많이 사용되고, 전자 및 전기 부품 제조에 광범위하게 사용된다. 또한 실용적일 뿐만 아니라 장식성도 가지고 있어 주택과 건물 파이프와 배선, 인테리어 소품 등에도 많이 사용되고 있다. 구리 및 구리 합금은 우수한 전기전도성, 강한 가소성 및 내식성으로 인해 많은 산업 분야에서 사용되고 있다. 그러나 구리 소재는 열전도율이 높아 용접시 고밀도 열원이 필요하고, 산화에 의한 가스 흡수 가능성이 높아 기공이 형성되기 쉽다는 단점을 가진다.

최근 주목받는 전기차의 배터리 팩의 셀은 전기적으로 연결되므로 셀들 간 접합부의 특성에 따라 성능 및 품질에 큰 차이가 발생하게 된다. 이에 우수한 접합부와 함께 낮은 접촉저항 확보가 관건이 되고 있다.

따라서 본 연구를 통해 구리소재에 대해 Multi-seam 레이저 용접을 통해 접합면적을 확보하여 접합강도를 향상시키고, 아울러 전기저항을 감소시켜 접합부의 품질을 개선하고자 하였다. 레이저 용접 시 Multi-seam의 피치변화에 따른 레이저용접이 접합부에 미치는 영향을 알아보기 위해, 이에 대한 기계적 및 금속학적 특성과 전기저항 특성을 평가하였다.

### 1.3 국내 · 외 기술동향

현재 환경규제가 국내외에서 엄격해지면서 친환경차의 생산이 늘어나는 것과 비례해 배터리 공급도 증가하고 있다. 친환경차 수요가 크게 늘어남에 맞춰 배터리 팩을 공급하기 위해서 많은 배터리 회사들이 대량으로 생산할 수 있는 생산성과 함께 높은 신뢰성을 가지는 용접공정을 필요로 하고 있다. 이에 다수의 현장 기술자 및 연구원들은 다양한 용접공정에 따른 용접 특성을 비교하여 효율적이며 신뢰성 높은 방안을 제시하고 있다.

배터리 용접 과정에 있어 핵심 공정별로 용접 특성을 비교해 Table. 1.1에 나타냈다[1,5,6,7]. 초음파용접은 소노트로드(Snotrode)를 통해 고주파 진동을 이중 소재 용접 재료에 국부적으로 주어 마찰열을 발생시켜 소재에서 변형과 용융이 발생, 확산하여 상호 기계적으로 체결되도록 해 용접부를 형성하는 공정이다. 구리 소재 용접에서 초음파용접은 고상용접으로 다층으로 얇은 박판 용접이 가능하다. 또한 에너지를 낮게 소비해 생산비용을 절감할 수 있다. 그러나 소재의 두께에 제한이 따르며, 재료에 따라 용접 품질 차이가 있고, 혼(Horn)과 소노트로드로 인해 압흔이 재료에 생성되고, 마찰에 따라 미세분진이 발생하고, 재료와 소노트로드의 Sticking 현상이 일어나 생산성에 영향을 준다. 저항용접은 전류를 재료에 인가해 저항이 용접계면에서 발생하도록 하여 소재를 용융시키고 압력을 주어 용착을 국부적으로 시키는 방식이다. 고전도성 및 열전도성 소재인 구리와 같은 소재에서는 열전달이 빠르게 이루어져 저항용접을 할 때 용접계면이 충분히 가열되지 않아 넓은 너깃 확보가 어렵다. 하지만 자동화 적용을 통해 대량 생산이 가능하고, 생산 비용이 저렴하고, 품질관리가 우수하다는 장점을 가지고 있다. 레이저용접은 고밀도 에너지인 레이저 빔을 이용해 재료를 용융시켜 접합하는 용접공정이다. 구리소재는 반사율이 높은 특성을 가지는 재료이기 때문에 용접이 어려운 소재로 분류되며, 용접을 할 때 형성되는 IMCs가 용접강도를 감소시키고, 용접면적을 넓게 확보하기 힘들다. 또한 비접촉식 용접공정으로 재료 표면에 건전한 용접부를 만들 수 있다. 그리고 저항용접, 초음파용접, 레이저용접 중 레이저용접이 가장 높은 용접강도와 가장 낮은 전기저항 특성을 보였다고 발표했으며, 이러한 소재에 대하여 레이저용접이 가장 효율적인 용접방식으로 평가되고 있는 것이다[8,9].

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

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

## 1.4 구리 소재 특성

구리는 합금 및 순금속 상태로 널리 이용되며 열전도율과 전기전도율, 내식성이 뛰어나고 가공이 용이하다. 또한 인장강도가 커서 용접이 용이하고 접합성이 좋아 산업과 실생활에 널리 이용되고 있다. 순금속 상태로 이용되는 비율은 약 80%로 건축 재료, 기계 부품, 전기 재료 등에 널리 이용된다.

면심입방정(FCC) 구조인 Cu는 단조성과 성형성이 좋다. Cu의 융점은  $1,083^{\circ}\text{C}$ , 비등점은  $2,310^{\circ}\text{C}$ 이다. 상온에서의 Cu의 밀도는 Al의 약 3배인  $8.96\text{ g/cm}^3$ 이고, 전기전도도와 열전도도는  $5.80 \times 10^7\text{ mhos/m}$ ,  $372.1\text{ W/m}\cdot\text{k}$ 로, Ag에 비해 낮지만, Al에 비해 전기전도도는 1.5배, 열전도도는 2배 정도 높다. 하지만 전기전도성과 열전도성은 합금화에 따라 크게 저하되기도 한다.

순동은 무산소동, 터프피치동, 인탈산동 등으로 산소함량에 따라 분류된다. 이 중에서 가장 산소함량이 적은 무산소동은 탈산제나  $\text{O}_2$ 를 함유하지 않은 Cu로, 0.001~0.002% 정도의 산소함유량을 보인다. 무산소동은 일산화탄소(CO)의 환원성 분위기나 진공에서 용해 주조하여 만든다. 전해정련된 음극 Cu를 용해하고, 질소가스와 CO의 환원성 분위기에서 Cu에  $\text{O}_2$ 가 침입하는 것을 막으며 주조하면 무산소 구리를 제조할 수 있다. 무산소동은 전기전도성이 저하되는 인탈산동과 수소취화성이 있는 터프피치동의 단점을 개선해 연성 및 전성이 우수하고, 반복굴곡특성이 우수하며, 수소취화를 일으키지 않는다. 그리고 RRR(Residual Resistivity Ratio, 잔류저항비) 300 이상이며, 전기전도도가 IACS 101% 이상이고, 가스 함량이 무척 적어 진공에서 가스 방출량이 적다[17, 18].

무산소동은 각종 커넥터 재료와 반도체 리드프레임 재료 등 고전도 및 고강도, 소형화 및 집적화가 요구되는 여러 전자 소재 합금에 기본 소재로 이용되고 있다. 또한 최근에는 친환경차 버스바 및 배터리 탭 소재로 많이 이용되고 있다.



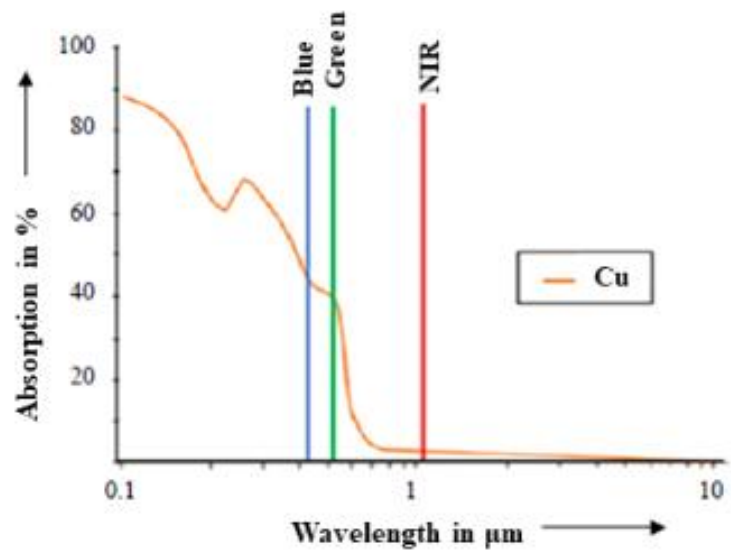


Fig. 1.1 Cu absorption by wavelength

## 1.5 레이저용접 특성

### 1.5.1 레이저 원리 및 특징

레이저(LASER)는 “유도방출에 의한 빛의 증폭”이라는 의미로 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 첫 스펠링을 딴 단어이다. Fig. 1.2와 같이 기저상태  $E_1$ 에 있던 원자가 외부 자극을 받으면  $E_2$ 로 여기되는데, 이때 에너지 준위  $E_2$ 는 불안정해지며 기저상태로 옮겨가게 된다. 이때 광자가 전자 파와 동일한 주파수로 발생하며 빛이 유도방출되며 공진기의 반사 거울에 의해 증폭된다. 레이저는 가간섭광, 평행광, 단색광 및 직진성을 갖는 품질이 상당히 우수한 빛 에너지로 집광이 용이한 특징을 보이기 때문에 높은 에너지 밀도를 가질 수 있다[8]. 일반적으로 레이저는 공진기, 매질, 펌핑소스로 구성되고 매질에 따라서 여러 가지 종류의 레이저로 나누어지며, 다양한 재료 가공과 용접에 이용되고 있다.

레이저용접은 레이저 빔을 증폭시켜 재료를 고밀도의 에너지로 용융하는 용접 방식이다. 용접 진행 과정에서 재료 표면에 도달한 레이저 집속광은 표면반사로 대부분 소실되지만, 흡수된 소량의 에너지는 급속하게 재료를 가열해 Fig. 1.3과 같이 키홀을 형성해 고온의 금속 증기와 용융금속이 내부에 존재하도록 한다. 키홀이 깊어지면 그 속에서 레이저광 다중반사가 일어나 에너지 전이효과가 증폭되게 된다. 키홀 주위의 용융금속은 키홀이 움직임에 따라 일부는 표면장력으로 인해 벽면에 부착되고 일부는 중력의 영향을 받아 응고되어 용접부(bead)를 생성하게 된다[19]. 이러한 레이저용접은 좁고 깊은 용접부를 얻기 용이하며, 용접되는 속도가 상대적으로 빨라서 매우 생산성이 높다. 또한 용접에 들어가는 에너지 총량이 매우 낮은 소입열 용접법으로, 열에 의한 소재의 변형을 크게 줄일 수 있기 때문에 용접에 따른 후처리 과정을 축소하거나 생략할 수 있다[20].

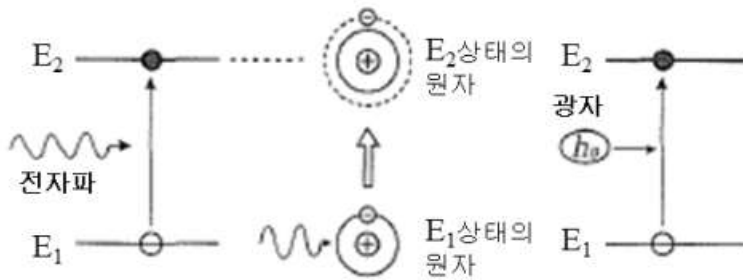


Fig. 1.2 Excitation by absorption of electromagnetic waves and absorption of photons[8]

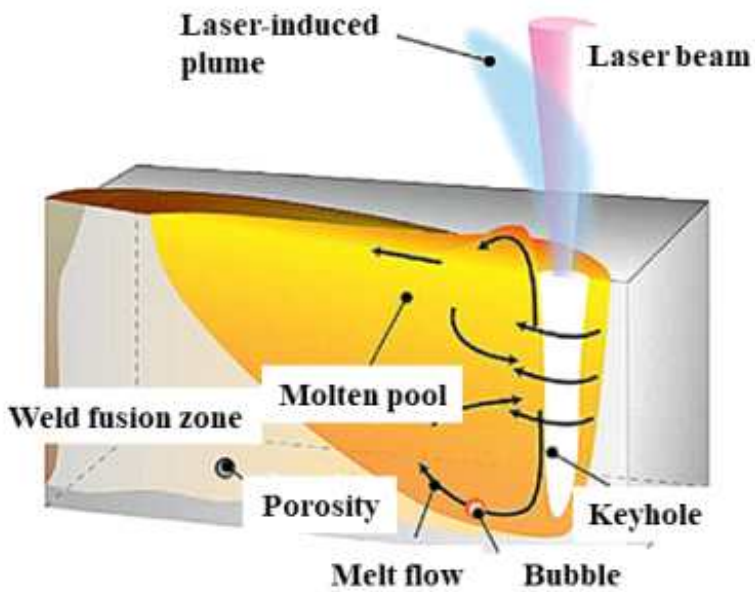


Fig. 1.3 Schematic of laser keyhole welding

## 1.5.2 파이버 레이저 원리 및 특징

고체레이저로 분류되는 파이버(fiber) 레이저는 Fig. 1.4에서 볼 수 있는 것처럼 펌프 다이오드 레이저(Pump Diode Laser), 이터븀(Yb)이 도핑된 Yb:YAG의 광섬유, FBG(Fiber Bragg Gratings)로 구성되어 있고, Fig. 1.5에서 볼 수 있는 것과 같이 외측 polymer 클래딩 및 active fiber 내측 glass 클래딩으로 이중 클래드 구조를 지닌다. 빛이 펌핑 다이오드 레이저에서 조사되어 glass 클래딩 층에 들어오면 매질 양쪽에서 광섬유격자(FBG, Fiber Bragg Grating)가 레이저를 반복적으로 증폭 및 공진시키게 된다. 이때 한쪽에는 전반사 거울, 다른 한쪽에는 부분반사 거울이 위치해 연속적으로 반사되며 클래드 층을 투과해 레이저 매질을 여기서 1,070nm 파장의 빛을 방출한다[21].

기존 로드 타입보다 냉각 효율이 우수한 파이버 레이저는 펌핑 양의 증가에 따른 다이오드 발열 문제를 효과적으로 제어할 수 있다. 외부와 내부의 온도차이로 인해 로드 타입 레이저는 외부 표면에서 로드 핵까지 온도편차가 냉각률에 따라 발생한다. 이러한 열적 특성으로 인해 레이저 빔이 왜곡되는 열렌즈(thermal lens)효과를 레이저매개체가 발생시켜 레이저 출력과 빔 품질에 한계를 갖는다 [8]. 반면, 긴 형태의 직경이 가능 레이저 매질을 사용하는 파이버 레이저는 우수한 빔 품질과 쉬운 출력 증가, 효율이 높다는 장점이 있다. 파이버 레이저는 single emitter diode를 여기 광원으로 이용하는데 이는 적층 다이오드와 비교해 열 발생이 적기 때문에 수명이 길고 냉각판을 micro cooling channel 대신에 사용하므로 냉각수의 온도 및 순도 의존성이 적다. 또한 snowball 효과가 없기 때문에 한 개의 셀이 파손되는 경우에도 인접한 셀이 연속적으로 파손되는 일이 없어 균일한 출력을 보인다[22]. 고출력, 고효율, 우수한 빔 품질, 고집속화 및 경제성 등의 이유로 파이버 레이저는 다양한 산업군에서 널리 이용되고 있다.

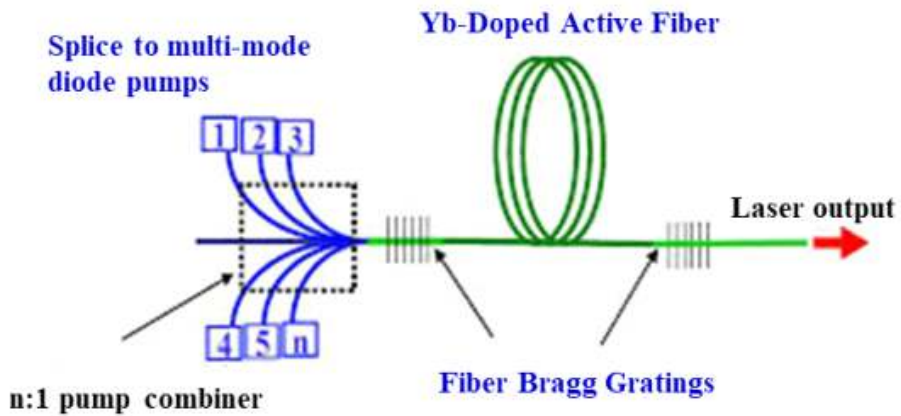


Fig. 1.4 Configuration of fiber Laser

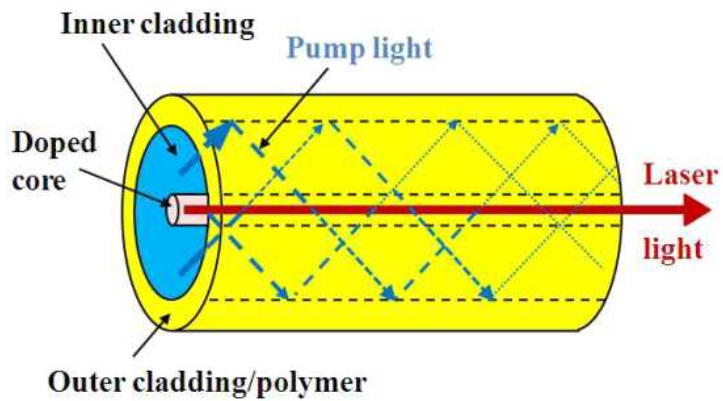


Fig. 1.5 Schematic design of active fiber

## 제 2 장. 연구 방법

### 2.1 실험 방법 및 용접 조건

#### 2.1.1 사용 소재 및 용접법

본 연구에 사용된 소재는 무산소동 C1020-H02이다. Fig. 2.1과 같이, 상판과 하판을 동일하게 길이 25mm, 두께 0.5t, 폭 100mm의 크기로 자른 다음 30mm를 겹쳐 첫 번째에 위치한 First-weld seam과 두 번째에 위치한 Second-weld seam에 차례대로 Multi-weld seam 레이저 용접을 실시하였다. 또한 Single-weld seam 용접 시는 상판과 하판이 겹쳐지는 곳 중앙에 용접법을 실시하였다. Table. 2.1과 2.2는 구리소재의 화학적 조성 및 기계적 물성을 나타낸 것이다.

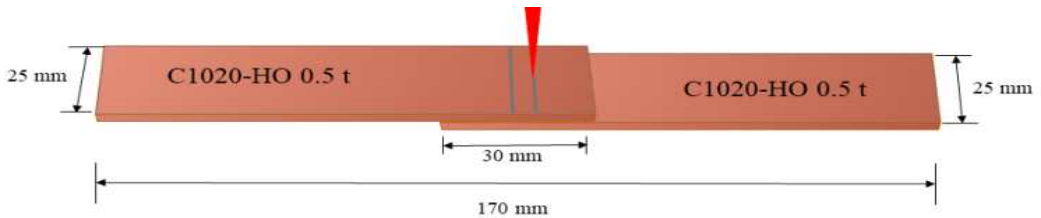


Fig. 2.1 Lap joint configuration

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

Chemical compositions (wt.%)								
Material	Cu	Fe	Si	Mg	Zn	Ti	O	Al
C1020-H02	99.95	-	-	-	-	-	0.001	-

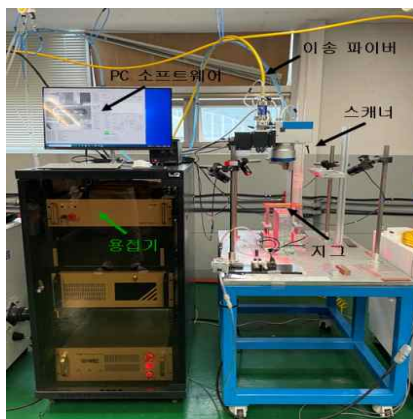
Table. 2.2 Mechanical properties of Al1050-H18 and C1020-H02

Mechanical properties			
Material	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation
C1020-H02	295 MPa	395 MPa	36.5%

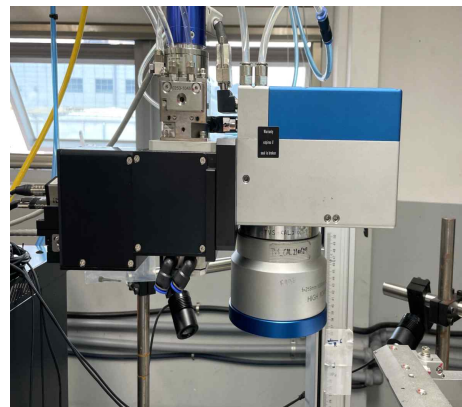
## 2.1.2 실험 장비 및 용접 조건

실험장비는 Fig. 2.2의, LMS 사의 MAT-025H 파이버 레이저 용접기를 사용하여 용접을 실시하였다. 실험장비는 1070nm의 파장대와 2.5kW의 최대 출력을 가지고 있으며 스캐너는 RAYLASE focus on laser 사의 SS-11E-20 [Y]-QU-[W]-RA-D2 제품을, 렌즈는 F-theta 제품을 사용하였다. 사양은 Beam parameter product(B.P.P) 4mm·rad, Focal distance(초점 거리) 255mm, Fiber diameter(파이버 직경) 20um, Collimator lens(콜리메이터 렌즈) 100um, Focal diameter(빔 직경) 50um 이며 Clamping pressure(지그 압력) 0.4MPa로 설정하고 용접을 실시하였다.

주요 공정변수는 레이저 출력, 용접 속도, 초점의 위치, 비드의 수, 피치이며 레이저 출력은 2.5kW, 용접 속도는 100mm/sec, 초점의 위치는 AI 상판 표면을 기준으로 0mm로 하였다. Multi-weld seam 방식의 Weld seam 수, 즉 비드의 수의 경우 2개로 고정하고 피치를 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8mm로 변화시켜 용접특성을 고찰하였다. 용접부의 특성을 평가하기 위해 비드 특성 평가, 기계적 특성 평가(인장-전단 강도, 경도 분포), 전기전도도 특성 평가를 실시하였다.



(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 ( $\mu\text{m}$ )	20
Collimator lens ( $\mu\text{m}$ )	100
Focal diameter ( $\mu\text{m}$ )	50
Clamping pressure (MPa)	0.4

Table. 2.4 Welding conditions

Welding parameters	Values
Focal position (mm)	255
Beam size( $\mu\text{m}$ )	50
Laser power (kW)	2.5
Welding speed (mm/min)	100
Pitch (mm)	0(Single),0.2, 0.4, 1, 2, 4, 6, 8



## 2.2 용접부 특성 평가

### 2.2.1 비드 특성

용접부의 비드 특성 평가를 고찰하기 위해, OLYMPUS 사의 BX51M 광학현미경을 활용하여 용접부의 외관 및 단면에 대한 용접결함 발생여부를 고찰하였다. 이를 위해 공정변수별 용접부에 대해 마운팅한 후에 사포 #600, #800으로 그라인딩 처리를 한 다음, 순서대로 #1000, #1200, #1500, #2400, #4000 사포를 사용하여 연마 작업을 실시하였다. 끝으로, Diamond paste 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m로 미세연마 처리를 하였다.

### 2.2.2 기계적 특성

#### 가. 인장-전단 강도

용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 공정변수별로 인장-전단 강도 실험을 실시하였다. 인장-전단 강도값은 공정변수별로 각 3회씩 인장-전단 강도 실험을 진행하여 평균값을 산출하였다. 인장-전단 강도 실험은 MTDI 사의 100kN 용량 만능재료시험기 UT-100F 사용하였고, 3mm/min으로 하중 인가 속도를 적용하였다.

#### 나. 경도 분포

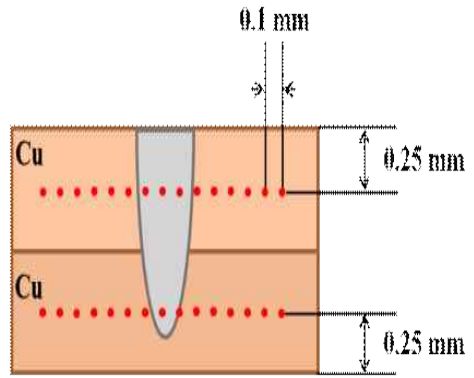
용접부의 경도분포를 WM(용착금속부), HAZ(열 영향부), BM(모재부) 용접부 영역에 대하여 고찰하였다.

Fig. 2.3의 Akashi 사의 HM-112 비커스 경도 시험기를 사용하여 경도 분포 측정하였다. 측정시 현미경을 50 $\mu$ m 배율로 설정하고 136° 다이아몬드 피라미드형 압입자를 사용하여 다음과 같은 방식으로 경도 분포를 측정하였다. 먼저, 용접부의 횡단면을 절단한 후 미세연마 처리를 하였으며 하중 0.05kgf, 하중 유지 시간 10sec를 측정 조건으로 설정하였다. 측정위치는 Fig. 2.3(b)처럼, 상,하편 시편의

중앙부에서 횡방향 0.1mm 간격으로 용접부에 대하여 경도 분포를 측정하였다.



(a) Vickers hardness equipment



(b) Measurement position for—  
—hardness distribution

Fig. 2.3 Vickers hardness test

### 2.2.3 전기전도도 특성 평가

용접부의 전기전도도 평가는 HIOKI 사의 RM3548 전기저항 시험기를 사용하여 공정변수별로 각 3회씩 전기저항 실험을 실시하여 도출된 평균 전기저항 값을 도출하였다. Fig. 2.4와 같이 전기저항 값 측정은 상온에서 4단자 법으로 실시하였는데, 즉 10sec 동안  $R_{Cu}$ ,  $R_{weld}$ ,  $R_{Cu}$ 에 각각 1A(암페어)씩 인가하고  $R_{Cu}$ ,  $R_{weld}$ ,  $R_{Cu}$ 에 모두 동일하게 40mm의 길이를 적용하여 측정하였다.

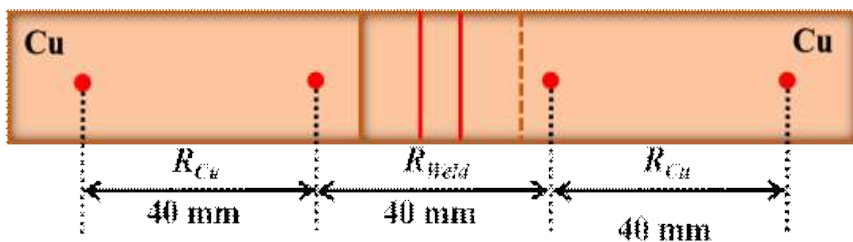


Fig. 2.4 Measurement position for electrical resistance test

## 3 장. 연구 결과 및 고찰

### 3.1 용접부 비드 특성









본 연구에서는 공정변수중 피치변화에 따른 용접부의 비드 특성을 평가하고자 하였다. Table 3.1과 같이 0.2~ 8mm로 피치 변화시 비드 외관 및 단면의 특성을 살펴보았다.

그 결과를 살펴보면, 첫째 용접부의 비드 단면 Pitch 1mm의 조건하에서 선행행 비드간의 비드폭이 미세하게 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 First-weld seam의 용접 시에 발생한 열의 영향을 받아 피치 1mm 두 번째 Weld seam의 용융영역이 피치 2~8mm 용융영역보다 더 넓게 용융된 것으로 보인다.

둘째, 용접부 비드 표면에 일부 기공이 발생된 것을 확인할 수 있다. 레이저 용접 시 용접 및 응고 속도가 빨라 생성된 수소가 원활히 배출되지 못하여 생성된 공극이다. 이는 레이저 용접공정의 급열, 급냉의 특성과 구리의 비교적 큰 열전도율로 인한 열전달이 빠른 소재의 특성이 복합적으로 작용하여 기공이 발생된 것으로 사료된다.

셋째, Pitch 2mm 이후 조건에서 선행비드의 열영향 감소로 인해 하판에서 두 번째 Weld seam의 부분용입이 관찰되었다. 이는 1mm 조건과는 다르게 2mm 조건부터는 비드간의 열영향이 그다지 미치지 않는 것으로 유추할 수 있다.

Table. 3.1 Surface of welded joints with pitch

Weld seam Pitch	Top	Bottom
0(single)		
0.2 mm		
0.5 mm		
1 mm		




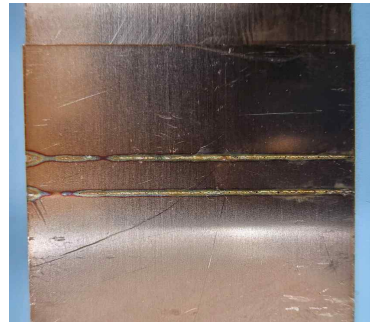

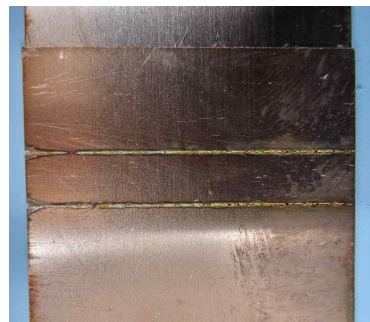

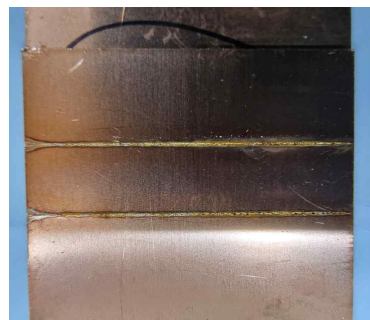
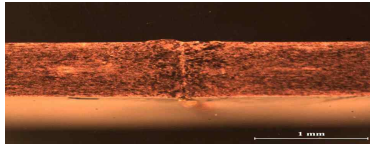

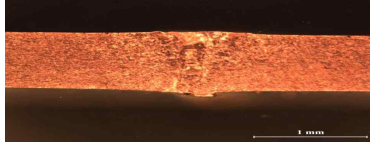

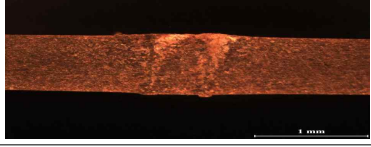

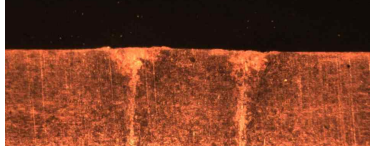


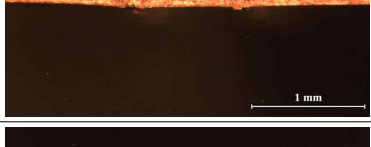





2 mm		
4 mm		
6 mm		
8 mm		

Table. 3.2 Cross section of welded joints with pitch

Pitch	Joints surface	Penetration
0(single)		
0.2 mm		
0.5 mm		
1 mm		 
2 mm		 
4 mm		 

## 3.2 기계적 특성

### 3.2.1 인장-전단 강도

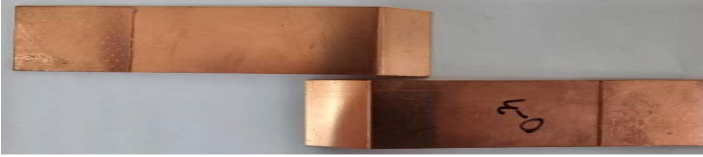







Fig. 3.1는 공정변수중 피치변화에 따른 용접부의 인장-전단 강도값은 각 조건의 3개의 시험편에 대한 인장-전단 강도 평균값이다. 이를 통해 인장-전단 강도와 파단 위치의 측면에서 피치가 변화에 따른 용접부의 기계적 특성을 비교, 평가하고자 하였다.

그 결과를 살펴보면, 첫째 Multi-weld seam 의 경우 피치가 1mm일 때 약 2.61kN의 최대 인장-전단 강도 값을 나타내었다. 이는 Single-weld seam의 경우 최대 1.65kN이 나타난 것에 비해 약 58% 증가한 값이다. 이러한 강도 상승은 피치가 1mm일 때 First-weld seam과 Second-weld seam 사이의 열 영향으로 입열이 향상되었기 때문으로 판단되며, 이는 Single-weld seam에 비해 Multi-weld seam이 용접면적이 증가하여 높은 인장-전단 강도가 나타난 것으로 사료된다.

둘째, 인장-전단 강도 값은 피치가 2mm로 이후부터는 다소 감소하였다. 또한 피치가 2mm 이상일 때부터는 인장-전단 강도 값이 크게 변함이 없는데, 그 이유는 First-weld seam과 Second-weld seam 사이의 열 영향이 특정 피치 값 즉, 2mm 이상일 때부터 거의 일어나지 않았기 때문이라 할 수 있으며, 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.

Table. 3.3와 같이 해당 실험 후에 발생한 피치의 변화에 따른 용접부의 파단 위치를 살펴본 결과, Single-weld seam 경우 계면 파단이 발생한 것으로 확인되었다. 그러나 Multi-weld seam 경우 용접금속부 및 모재에서 파단이 발생하였는데, 이러한 파단 발생은 모든 Multi-weld seam 경우에서 First-weld seam에 일어난 연화 작용으로 인해 HAZ(열 영향부) 영역이 연화되었기 때문으로 판단된다.

Table. 3.3 Fractured appearance of welded joints with pitch after tensile-shear test

Fractured specimen Pitch	Appearance
0(single)	
0.2 mm	
0.5 mm	
1 mm	
2 mm	
4 mm	
6 mm	
8 mm	



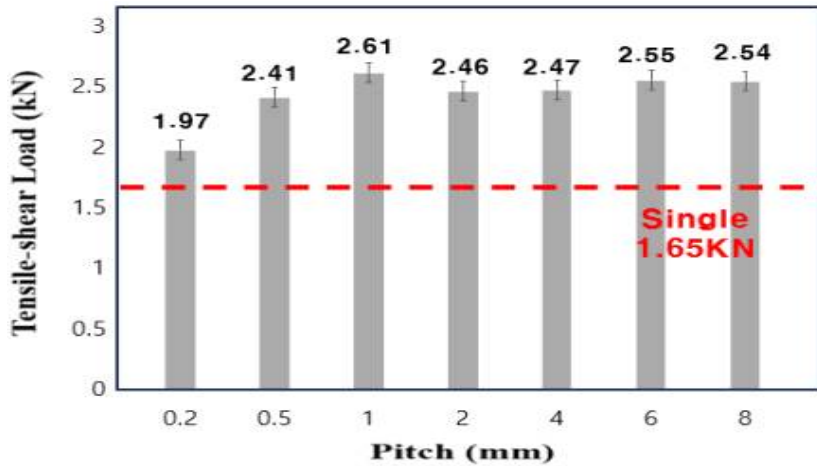


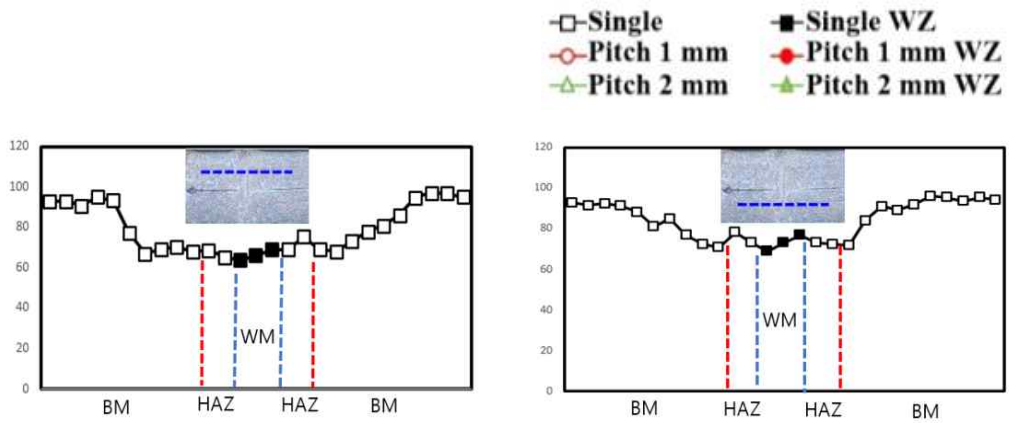
Fig. 3.1 Tensile-shear load of welded joints with pitch

### 3.2.2 경도 분포

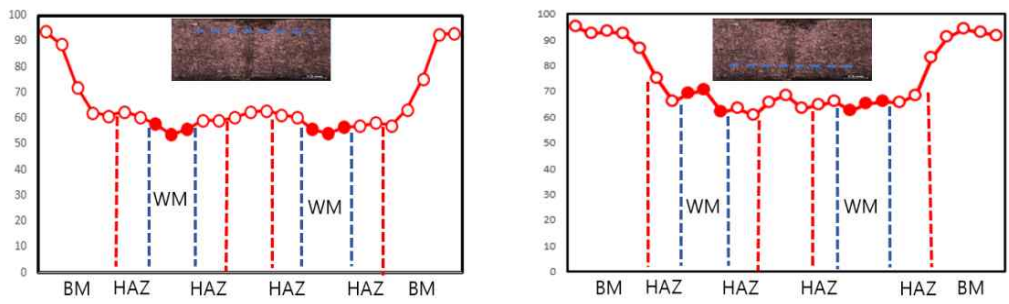
경도 분포 특성을 평가하고자 용접부의 피치변화에 따른 용접부(WM, HAZ, BM)의 영역에 대한 Single-weld seam과 Multi-weld seam 피치 1, 2mm의 경도 분포 특성을 고찰하였다.

경도 분포를 살펴보면 용착금속 및 열 영향부에서 경도가 감소하는데, 이러한 이유는 용접 중 재결정 및 결정립 성장 등으로 모재의 물성이 연화되어 발생한 것으로 사료된다[16,17].

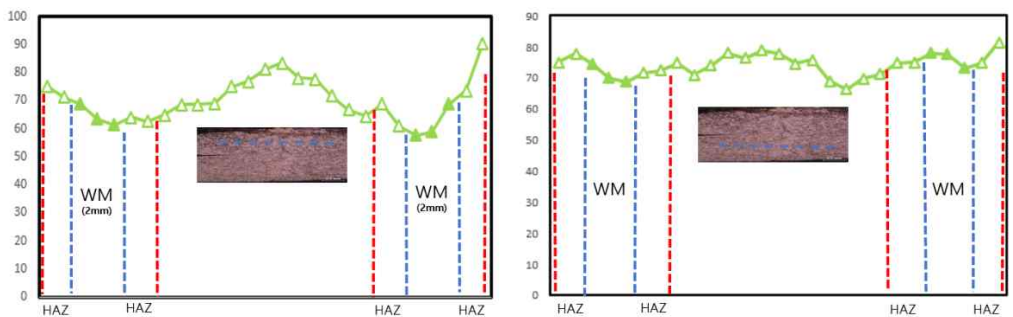
그리고 Multi-weld seam 조건의 용접부에서 Single-weld seam 조건 대비 Pitch 1mm조건에서 약 10Hv 감소하였으며, Pitch 2mm 조건에서는 Single-weld seam 과 유사한 경도 분포를 나타내었다. 이는 2mm 이후부터는 첫 번째 Weld seam과 두 번째 Weld seam 간에 열 영향이 그다지 미치지 않은 것으로 사료된다.



(a) Single-weld seam



(b) Multi-weld seam, pitch 1mm



(c) Multi-weld seam, pitch 2mm

Fig. 3.2 Result of vickers hardness test

### 3.3 전기전도도 특성

용접부 피치변화시 용접면적과 전기전도도와와의 상관관계 특성을 평가하기 위해 용접부의 전기저항값을 측정하였다. Fig. 3.3은 공정변수중 피치변화에 따른 용접부의 전기저항값을 나타내었다. 이 값은 각 조건별 3회씩 전기저항값을 측정하여 평균값을 나타낸 값이다.

그 결과를 살펴보면,  $R_{Cu}$ 의 전기저항의 평균값은  $110\mu\Omega$ 인 것으로 확인되었다. 또한 Multi-weld seam 방식에 피치가 1mm일 때  $R_{Cu}$ 에서  $79.5\mu\Omega$ 의 최소 전기저항값이 나타났는데, 이는 Single-weld seam 방식의  $99\mu\Omega$ 에 비해 약 20% 감소한 수치이다. 이와 같이 전기저항이 감소한 것은 Single-weld seam 방식보다 Multi-weld seam 방식에서 용접 면적이 더 증가했기 때문으로 판단된다.

피치의 길이가 증가할수록 전기저항이 증가하는 양상을 보였으며, 피치가 4mm 이상일 때부터는 전기저항이 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 접합면적과 전기저항이 밀접한 상관관계를 가지고 있으며, 접합계면 폭이 넓을수록 전기저항이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

또한, 직렬회로 구조로 이루어진 Single-weld seam 방식에서 전류가 흐를 때 와류가 형성된 것으로 생각할 수 있으며, 이후 레이저 용접 방식을 병렬회로 구조로 이루어진 Multi-weld seam 방식으로 전환하자, 더이상 전류의 와류 현상이 나타나지 않았기 때문이라고 판단할 수 있다. 이는 Weld seam과 피치의 길이가 증가할수록 전기저항이 감소하기 때문이라 할 수 있다[27].

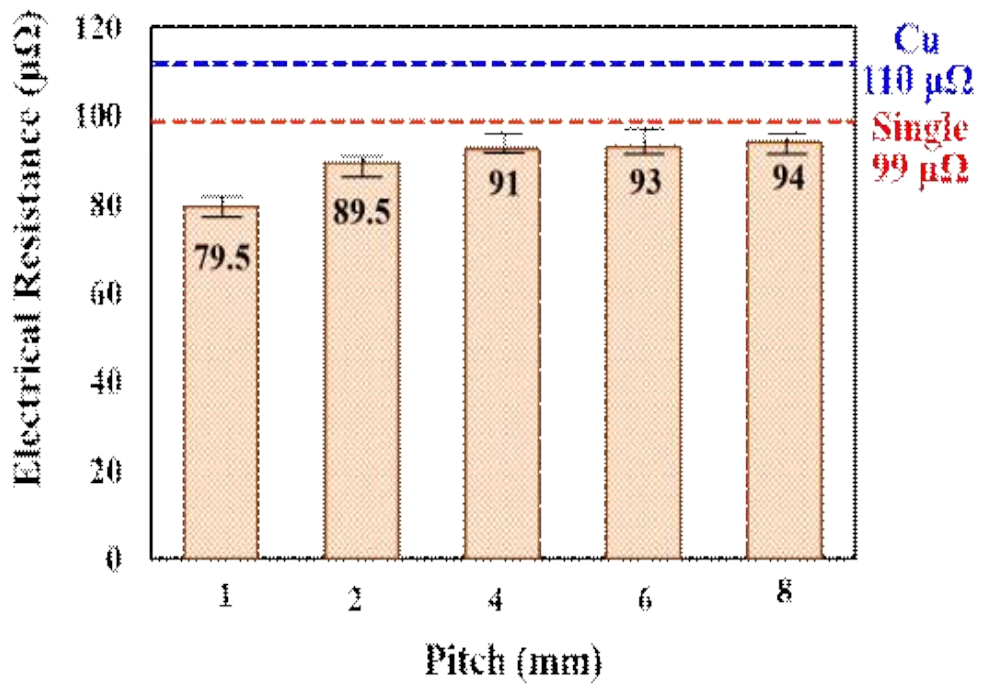


Fig. 3.3 Electrical resistance of welded joints with pitch

## 제 4 장. 결 론

본 연구에서는 무산소동 Oxygen Free Copper에 멀티 라인 레이저 용접을 실시할 때, 피치 변화에 따른 용접부의 특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위해 용접부의 비드 특성, 기계적 특성 및 전기전도도 특성 평가를 실시하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 용접부의 비드 특성 평가, 피치가 1~8mm로 증가함에 따라 선행 비드의 열 영향이 감소하여 미용접된 부분이 관찰되었다. 또한 피치가 1 mm일 때 후행 비드의 비드 폭과 용입 깊이가 증가한 데 비해, 피치가 2mm 이상부터는 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 피치가 2mm 이상부터는 거의 선행부의 열영향이 후행부 그다지 미치지 않음을 알 수 있었다.

2. 용접부의 인장-전단 강도는 피치의 길이가 짧을수록 후행 비드의 접합계면 폭과 용입 깊이가 증가하므로, 가장 짧은 피치 1mm의 조건에서 최대 인장전단 강도 값 약 2.61 kN이 확보할 수 있었다.

3. 용접부 경도 분포 특성은 Single-weld seam을 적용했을 때보다 Mingle-weld seam 적용시 피치 1mm의 경우 경도가 열영향으로 인해 연화가 발생하여 경도가 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 그 값은 약 10Hv 로 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

4. 용접부의 전기전도도 특성은 접합면적과 전기저항이 밀접한 상관관계를 가지고 있으므로, 접합계면 폭이 넓을수록 전기저항이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 최대 인장-전단 강도 값을 확보한 조건에서 최소 전기저항 값 79.5  $\mu\Omega$  을 확보할 수 있었다.

따라서 무산소동 Oxygen Free Copper의 피치 1mm로 적용 Multi-weld seam 레이저 용접 시, 강도 및 전기전도도 측면에서 건전한 용접부를 얻을수가 있었다. 즉, Multi-weld seam 경우 피치 1mm의 조건에서 최대 인장-전단 강도 값과 최소 전기저항 값을 갖는 안전성 있는 조건을 나타내었다.

## 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] 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.
- [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.