creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000264128

2014년2월 석사학위논문

연속파형 파이버 레이저 용접 특성 비교 2차전지 소재용 Al박판과 Ni박판의

이 가 람

2014년 2월
석사학위 논문

2차전지 소재용 Al박판과 Ni박판의 연속파형 파이버 레이저 용접 특성 비교

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

이 가 람

2차전지 소재용 Al박판과 Ni박판의 연속파형 파이버 레이저 용접 특성 비교

Comparison of Continuous Wave Fiber Laser Welding Characteristics of Thin Plate Based on Al and Ni for Secondary Battery Material

2014년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

이 가 람

2차전지 소재용 Al박판과 Ni박판의 연속파형 파이버 레이저 용접 특성 비교

지도교수 유 영 태

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

이 가 람

이가람의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 심 재 기 (인)

위 원 조선대학교 교 수 황 석 승 (인)

위 원 조선대학교 교 수 유 영 태 (인)

2013년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES ····· Ⅳ
LIST OF TABLE ····· Ⅵ
ABSTRACT ····· Ⅶ

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구배경 ····· 1
1.2 연구목적 ····· 3
1.3 연구동향 ····· 4

제 2 장 이론적 배경 ····· 7
2.1 리튬이온 전지 ····· 7
2.1.1 리튬이온 전지 구성 및 작동원리 ····· 7
2.1.2 양극활물질 ····· 9
2.1.3 음극활물질 ····· 10
2.1.4 분리막 ····· 11
2.1.4 전해질 ····· 12

2.2 소재별 특성 ····· 13
2.2.1 알루미늄 특성 ····· 13
2.2.2 니켈 특성 ····· 15
2.3 레이저빔을 이용한 용접 ····· 17
2.3.1 레이저빔 용접 원리 ····· 17
2.3.2 레이저 용접 결함 ····· 19

제 3 장 실험방법 및 장치 ····· 21
3.1 실험 재료 및 장치 ····· 21
3.2 실험 방법 ····· 25
3.3 실험 분석 장치 및 방법 ····· 26
3.3.1 실험시험편 제작 및 준비 ····· 26
3.3.2 용접부 단면 광학 현미경 분석 ····· 26
3.3.3 경도 시험 ····· 27
3.3.4 인장 시험 ····· 27

제 4 장 결과 및 고찰 ····· 32
4.1 순수 알루미늄 연속파형 파이버 레이저 용접특성 ····· 32
4.1.1 공정변수별 겹치기 용접특성 ····· 32

4.1.2 비드폭비와 입열량 특성 ····· 36
4.1.3 인장강도 및 경도 특성 ····· 39
4.2 순수 니켈 연속파형 파이버 레이저 용접특성 ····· 44
4.2.1 공정변수별 겹치기 용접특성 ····· 44
4.2.2 비드폭비와 입열량 특성 ····· 47
4.2.3 인장강도 및 경도 특성 ····· 51
4.3 연속파형과 펄스파형 파이버 레이저 용접특성 비교 ····· 56

제 5 장 결 론 ····· 58

참 고 문 헌 ····· 59

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Schematics of Li-ion rechargeable battery ····· 8

Fig. 2.2 Schematic cross section of the Full Penetration Keyhole Laser Welding process of a Thin Sheet ····· 18

Fig. 3.1 Fiber laser and Lap-Joint welding experiment equipment ····· 24

Fig. 3.2 Schematic of Fiber laser processing system ····· 24

Fig. 3.3 Tensile test Specimens ····· 25

Fig. 3.4 Hot mounting press ····· 28

Fig. 3.5 Automatic Grinder / Polisher ····· 29

Fig. 3.6 Micro Analysis System of Optic-Materials ····· 29

Fig. 3.7 Micro Vickers Hardness Tester ····· 30

Fig. 3.8 Tensile test Experiment Equipment of Lap-Joint Welding ····· 31

Fig. 4.1 Bead shape of Lap-Joint Welding of Al thin plate ····· 34

Fig. 4.2 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters [Al, (A) 1800W, (B) 2000W, (C) 2200W] ····· 34

Fig. 4.3 Influence of Welding speed on the width ratio (Al) ····· 37

Fig. 4.4 Influence of Welding speed on the Heat input (Al) ····· 37

Fig. 4.5 Stress-Strain curve of Laser Welding (Al, 1800W) ····· 40

Fig. 4.6 Stress-Strain curve of Laser Welding (Al, 2000W) ····· 40

Fig. 4.7 Stress-Strain curve of Laser Welding (Al, 2200W) ····· 41

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4.8 Welding width Hardness to variation of welding process parameters (Al, 2200W) ····· 42

Fig. 4.9 Welding depth Hardness to variation of welding process parameters (Al, 2200W) ····· 42

Fig. 4.10 Bead shape of Lap-Joint welding of Ni thin plate ····· 44

Fig. 4.11 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters [Ni, (A) 1800W, (B) 2000W, (C) 2200W] ····· 44

Fig. 4.12 Influence of Welding speed on the width ratio (Ni) ····· 48

Fig. 4.13 Influence of Welding speed on the width ratio (Al and Ni Comparison 2200W) ····· 48

Fig. 4.14 Influence of Welding speed on the Heat input (Ni) ····· 49

Fig. 4.15 Influence of Welding speed on the Heat input (Al and Ni Comparison 2200W) ····· 49

Fig. 4.16 Stress-Strain curve of Laser Welding (Ni, 1800W) ····· 52

Fig. 4.17 Stress-Strain curve of Laser Welding (Ni, 2000W) ····· 52

Fig. 4.18 Stress-Strain curve of Laser Welding (Ni, 2200W) ····· 53

Fig. 4.19 Welding width Hardness to variation of welding process parameters (Ni, 2200W) ····· 54

Fig. 4.20 Welding depth Hardness to variation of welding process parameters (Ni, 2200W) ····· 54

Fig. 4.21 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters (Al, 30㎛, Pulse Wave Fiber Laser Welding) ····· 56

LIST OF TABLES

Table 1.1 recent research of Aluminum alloys and Nickel alloys welding ····· 6

Table 2.1 Li-ion battery Anode material types and characteristics ····· 9

Table 2.2 Li-ion battery Cathode material types and characteristics ····· 10

Table 2.3 Li-ion battery Membrane types and characteristics ····· 11

Table 2.4 Li-ion battery Organic solvent types and characteristics ····· 12

Table 2.5 Li-ion battery Lithium salt types and characteristics ····· 12

Table 2.6 Physical properties of Aluminum ····· 14

Table 2.7 Physical properties of Nickel ····· 16

Table 3.1 Electrical conductivity and thermal conductivity of materials ····· 22

Table 3.2 Chemical composition of Pure Aluminum and Pure Nickel(wt%) ····· 23

Table 3.3 Mechanical properties of Aluminum and Nickel ····· 23

Table 3.4 Experimental processing parameters ····· 25

ABSTRACT

Comparison of Continuous Wave Fiber Laser Welding Characteristics of Thin Plate Based on Al and Ni for Secondary Battery Material

Lee, Ka-Ram

Advisor: Prof. Yoo, Young-Tae Ph.D.

Dept. of Precision Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

As the modern industrial society develops, the society which uses a large quantity of fossil fuel has a risk in social stability because it depends on crude oil in politically unstable regions. From this reason, Some countries in the world has reinforced a restriction on the mileage of a car to limit the emission of greenhouse gas caused by the use of fossil fuel. Since the price of fossil fuel has been increased and the environmental pollution may occur in a long term, the development of Green Car has been actively in progress focusing on people's concern on the discovery of a power source for replacing the fossil fuel. Especially, among Green Cars, Hybrid and Electric cars have been made for practical use as for a plan to resolve problems of the environmental pollution by fossil fuel and the depletion of resources. Since a driving motor and a high capacity battery are very important core elements of Hybrid and Electric cars, many concerns have focused on the development and its performance improvement of the secondary battery which is the power source in the battery industry.

In this study, by using 10kW continuous wave fiber laser, we conducted experiments in a laser overlap joint welding based on pure aluminum and nickel materials used in

the Lithium secondary battery. The laser overlap joint welding is conducted for ten sheets with thickness of each specimen as 100㎛ and beam travel speeds from 4m/min to 10m/min with the step of 2m/min, and experiments are conducted for the process variables with laser powers of 1800W, 2000W, and 2200W. As a result from experiments, ten sheets of both Aluminum and Nickel specimens go through a penetration welding at 2200W with beam travel speeds from 4m/min to 10m/min. For the process variable which shows the highest tensile strength in Aluminum, the highest tensile strength is obtained as 25.32MPa at 1800W with a beam travel speed of 10m/min, and for Nickel, among those process variables, the highest tensile strength is obtained as 189.34MPa at 2200W with a beam travel speed of 10m/min.

Although many blow holes occur at the welding part microstructure of Aluminum, the blow defects are decrease at the center of the welding part as the beam travel speed for each process variable is increased. The study should be proceeded further on methods for eliminating defects of Aluminum laser welding.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

현대 산업사회의 발전에 따라 화석연료를 대량으로 사용하는 사회는 정치적으로 불안정한 지역의 원유에 의존하기 때문에 사회 안정에 위험성을 가지고 있다. 화석연료는 무한정의 자원이 아니기 때문에 장기적으로 고갈될 잠재적 우려를 안고 있다. 뿐만 아니라 대량의 화석연료 사용은 온실가스 배출로 인하여 대기에 오염물질을 배출하고, 기후와 환경에 좋지 않은 결과를 만들어 내는 것으로 평가되고 있다. 이와 같은 이유로 세계 각국에서는 화석연료 사용에 따른 온실가스 배출량 억제를 위해 자동차의 연비규제가 강화되고 있다. 장기적으로는 화석연료의 가격상승과 환경오염이 발생할 수 있기 때문에 화석연료를 대체할 수 있는 동력원의 발굴을 위한 관심이 집중되면서 그린카 개발이 활발하게 진행되고 있다. 그린카란 CO_2와 유해물질의 배출이 적은 자동차이다. 자동차의 CO_2배출을 줄이려면 연료소비가 적거나 CO_2배출 자체가 적은 연료를 사용해야 한다. 유해물질 배출을 줄이기 위해서는 자동차의 생산에서부터 시작하여 주행과 폐차 과정에서 폐기물이나 배출가스의 유해성이 적어야 한다. 특히 그린카중에서도 하이브리드 자동차 및 전기자동차를 실용화함으로써 화석연료에 의한 환경오염과 자원고갈을 해결하는 방안으로 고려되고 있다. 하이브리드 자동차 및 전기자동차의 핵심요소는 구동모터와 대용량 전지가 경쟁력의 핵심으로 작용하고 있다. 하이브리드 자동차는 연소되는 화석연료를 극소화하고 있고, 전기자동차는 화석연료를 사용하지 않기 때문에 배기가스로 인한 대기오염 피해를 최소화 할 수 있기 때문이다. 이와 같은 이유로 전지 산업에서는 친환경자동차의 동력원인 이차전지개발과 이에 대한 성능향상에 많은 관심이 집중되고 있다. 또 이차전지의 성능향상은 노트북, 테블릿PC, 스마트폰 등의 경쟁력 향상에 매우 중요한 핵심요소이기도 한다. 이차전지의 종류는 다양한 제품이 많이 있지만, 전지 개발에 핵심이 되는 부분은 고용량화와 경량화이다. 이 중에서도 에너지밀도 측면에서 리튬이온전지에 대한 관심이 높아지고 있어, 성능개선 과 경량화에 연구가 집중되고 있다.

하지만 이차전지가 널리 사용되면서 발화 및 폭발사고가 빈번하여 이차전지의 안전성에 대한 신뢰도에 많은 문제점을 안고 있다. 특히 리튬이차전지는 하이브리드 자동차, 전기자동차 등의 핵심부품으로 배터리를 사용하고 있다. 이 배터리는

고용량, 고출력의 특성뿐만 아니라 외부 환경변화에 대한 열적 안정성에 대한 중요성이 더욱 커지고 있다. 따라서 하이브리드 자동차, 전기자동차 등에 사용되는 이차전지는 고에너지 밀도와 고출력 밀도, 수명뿐만 아니라 신뢰성과 안전성이 자동차용 전지를 결정하는데 중요한 요인이 되고 있다.

기존에 사용하고 있는 리튬이온전지의 폭발 위험은 여러 가지 원인이 있겠으나, 대표적인 것이 방전 메커니즘 상에서 발생되는 발열과 배터리 자체가 고온에 노출되면 내부의 유기 전해질이 기화되면서 가스가 발생되고, 양극재료의 결정구조중 메탈이온의 용해도를 증가시키므로 결정의 붕괴를 촉진시켜 산소가 일부 발생되면 배터리에 변형이 오면서 동시에 양극과 음극을 분리하는 분리막이 제기능을 못해 접촉이 일어나면 열폭주 현상을 일으키게 된다. 이것이 리튬이온전지의 폭발 원인 중 대표적인 이유이다. 그 중에서도 양극제로 폭발 위험이 없는 리튬인산철전지는 어느 양극 물질과 비교해도 저렴한 가격과 뛰어난 안정성, 성능 그리고 안정적인 작동성능을 보이고 있다. 또한 리튬인산철전지는 전기자동차용 배터리와 같이 대용량과 안전성을 동시에 요구하는 에너지 저장 장치로서 적합하다. 리튬인산철전지는 리튬이온전지 중 양극을 구성하는 화학물질에 리튬인산철을 사용한 것으로 분자식은 $LiFePO_4$ 라고 하며 이는 결정 구조학적인 측면에서 올리빈 구조를 가지고 있다. 올리빈 구조는 구조적인 안정성 때문에 리튬 코발트 옥사이드와 같은 층상구조 양극재료보다 안전성이 우수하고 에너지밀도가 150mAh/g 정도이다. 또 리튬인산철전지는 매장량이 풍부한 철을 주원료로 하기 때문에 니켈, 코발트, 망간 등을 쓰는 리튬이온 배터리에 비해 가격이 30 ~ 40% 저렴하다. 하지만 기존의 리튬이온전지에 비해 에너지밀도 및 전기전도성이 낮은 단점이 있다.

이차전지의 성능을 높이기 위해서 극주 및 탭에 사용되는 소재도 다양한데 그 중 전기전도도 및 경량화 특성이 뛰어난 알루미늄, 니켈, 구리 소재를 많이 사용하고 있다. 위의 소재는 자동차 및 리튬이온계열 이차전지에 효율을 극대화하고 제품을 경량화하면서 각종 기기를 소형화함은 물론 고기능화 설계의 최적화에 사용된다. 전지 또한 용량을 크게 함과 동시에 소형·경량화를 추구하기 위해서는 극판의 박판화가 요구되고 그 사용재료 또한 가벼워야 하므로 이에 적합한 소재로 알루미늄, 니켈, 구리 등을 사용하는 것에 대한 연구가 관심의 집중이 되고 있다.[1~15]

1.2 연구목적

현재 이차전지용 비철금속소재를 용접하는 방법으로는 초음파 용접과 마찰교반 용접이 사용되고 있다. 초음파 용접은 초음파 진동을 주어 진동에너지에 의해 발생되는 열을 이용하여 접합하는 방법으로 용접부의 변형이 거의 없다. 하지만 초음파 용접은 가공물질의 재질, 형상, 치수에 제약을 받고, 기하학적 형상에 따라 제약을 받기 때문에 용접이 어렵고, 혼 설계의 한계에 의해 용접부의 면적을 정밀화하기 어려울 뿐만 아니라 혼의 수명이 짧아 소모성이 매우 높다는 단점이 있다.

마찰교반 용접은 회전하는 공구를 소재에 회전시켜 발생하는 마찰열을 이용하여 용접하는 방법이다. 재료의 마찰열에 발생하는 소성유동을 응용한 접합방법이기 때문에 동종 혹은 이종 소재간의 접합이 소재의 용융점 이하에서 고형상태로 이루어지는 대표적인 고상접합방법이다. 용접결함, 잔류응력이 적고, 우수한 피로강도를 가질 수 있으나 접합하는 소재의 재질, 형상 그리고 임계 두께가 제한이 있어 초박판을 용접하는 데는 어려움이 있다.[16~20]

따라서 본 연구에서는 중용량 리튬이온전지의 소재인 순수 알루미늄과 순수 니켈을 파이버 레이저를 이용하여 다층 박판 겹치기 용접을 하고자 한다. 이차전지용 소재인 박판을 레이저로 겹치기용접 후 용접단면 분석하여 용접단면의 미세조직 관찰, 경도측정 및 인장강도를 시험하여 용접의 건전성을 평가하고자 한다.

1.3 연구동향

본 연구의 목표는 두께가 100㎛인 순수 알루미늄과 순수 니켈 10장을 한꺼번에 겹치기 용접하는 것이다. 본 연구 수행을 위해 알루미늄 및 알루미늄 합금 용접, 니켈 및 니켈합금 용접과 박판 용접에 대한 선행연구를 조사하였다.

Song. K. H.는 니켈기 초합금의 하이브리드 마찰교반접합된 미세조직과 기계적 특성에 대해 연구하였다. 니켈기 초합금은 고온에서 고강도와 내산화성이 우수한 금속으로 전력발전설비, 가스터빈과 해양시스템분야 등에 널리 쓰이며, 구축과 보수작업의 방법으로 용융용접을 사용하지만 니켈기초합금은 용융용접을 도입할 경우 높은 입열량에 의해 접합재의 기계적인 물성향상에 제한적인 작용을 한다. 따라서 낮은 입열량으로 접합이 가능한 마찰교반접합과 YAG 레이저를 사용하여 두께가 2mm인 니켈기 초합금 인코넬 600을 접합하여, 경도, 강도 및 기계적 물성의 향상에 탁월한 효과를 나타내었다.[21]

Ventrella. V. A.는 니켈기 합금 박판 헤스텔로이를 펄스파형 Nd:YAG 레이저 용접 특성에 대해 연구하였다. 100㎛인 박판 헤스텔로이를 입열량 및 반복 속도 등의 공정변수를 변화시키면서 겹치기 용접하였고, 인장시험, 미세 경도, 미세조직을 관찰 하여 용접성을 평가하였다.[22]

Hwang. C. Y.는 순수 니켈 박판과 다공질니켈박판의 샌드위치 판넬 용접 특성에 대해 연구하였다. Ni-MH 이차전지 내에 극판으로 사용되는 순수 니켈은 저항 점용접을 이용하여 수작업으로 용접하고 있는데, 가공 후 후열처리가 필요하다는 단점이 있다. 이와 같은 이유로 Nd:YAG 레이저를 사용하여 순수 니켈과 다공질 니켈을 용접한 결과 저항 점용접에 비해 레이저 용접이 저항 측정값이 33 ~ 37% 감소된 것을 확인하였다.[23]

Kim. S. U.는 알루미늄 합금의 전자빔 용접에 대한 용입 깊이 및 합금원소의 영향에 대해 연구하였다. 알루미늄 합금은 금속재료에 사용되는 용접방법에 따라 용접이 가능하지만 합금의 종류에 따라 용접이 난이한 점이 있다. 아크용접 등의 열원에 비교해서 에너지 밀도가 높은 고밀도 전자빔 용접을 사용하여 3종류 알루미늄 합금의 용입 깊이에 대한 결과를 알루미늄 합금성분에 따라 특성을 나타내었다.[24]

Lee. K. D.는 레이저 아크 하이브리드 용접공정에 대해 연구하였다. 알루미늄은 대표적인 경량 금속으로 고급 금속제품에 널리 쓰이며 차체나 구조물의 경량화를

위해 많이 사용되지만 철강재료의 용접법에 비해 까다롭다는 단점이 있다. 따라서 Nd:YAG레이저-아크 하이브리드 용접을 사용하여 두께가 2mm인 6000계열 알루미늄 합금을 용접하여 기존 용접의 문제점인 열 변형과 낮은 생산성의 문제를 해결하였다.[25]

Kim. J. D.는 레이저를 이용한 알루미늄 도금강판의 용접성에 대해 연구하였다. 표면처리강판의 주류를 이루고 있는 아연 도금강판의 용접성 단점을 보완하기 위해 알루미늄 도금강판을 CW Nd:YAG 레이저를 사용하여 알루미늄 도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 기계적 특성에 미치는 영향 및 도금층 위치에 따른 용접성을 평가하였다. 알루미늄 도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 기계적인 강도에 미치는 영향을 평가하였으며, 인장전단시험 결과, 인장강도 값이 크게 나타났다.[26]

Paleocrassas. A. G.는 레이저를 사용하여 알루미늄 용접의 결함에 대해 연구하였다. 알루미늄의 경우 용융용접을 할 때 합금성분에 따라 기공, 균열 등의 결함이 발생한다. 따라서 Fiber 레이저를 사용하여 이송속도와 레이저 파형을 변화시키면서 레이저 용접하였을 때 알루미늄의 용접성을 평가하였다. 연속파형으로 용접하였을 때 고속의 경우 용접부 전면비드에 험핑현상이 나타나고, 저속의 경우 기공이 발생하였다. 또 펄스파형의 저속용접의 경우 크랙이 발생하였다.[27]

이상의 연구를 결과를 고찰해 보면 대부분 알루미늄 용접이 두께가 2mm 이상의 판재용접을 하였다. 그러나 이차전지에 사용되는 알루미늄은 전지의 고용량과 경량화라는 관점에서 1mm이하의 다층 박판 용접이 필요하다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 연속파형 파이버 레이저를 이용하여 두께가 100㎛인 순수 알루미늄과 순수 니켈의 10장을 겹치기 용접하여 공정특성에 대한 연구를 하고자 한다. Table 1.1은 최근 알루미늄 및 알루미늄 합금 용접과 니켈 및 니켈 합금 용접 및 박판 용접에 관해 연구된 자료를 정리한 것이다.

Table 1.1 recent research of Aluminum alloys and Nickel alloys welding

Writer/Year	Study Substance
Yoon. J. W. [2000]	알루미늄 합금의 종류와 용접시 용접성, 용접 결함의 종류와 생성원인 및 레이저 용접 특성에 관하여 고찰하였다.[28]
Kim. T. J. [2002]	펄스 MIG 용접기를 이용하여 두께 1.2mm, 3mm, 5mm인 알루미늄 합금 5052 용가와이어를 이용하여 극성비와 시편의 갭에 따른 용접성 테스트를 실시하였다.[29]
Yoon. J. W. [2003]	4kW급 연속파 Nd:YAG 레이저를 이용하여 두께가 2mm인 알루미늄 합금 5052-H32 판재를 맞대기 용접 후 결함 관찰을 위해 단면분석 및 인장시험을 통한 용접성을 비교 분석하였다.[30]
Na. G. D [2008]	2kW급 Nd:YAG 레이저를 이용하여 니켈기 합금 Hastelloy와 STS304를 출력, 이송속도를 변화시키면서 용접한 후 미세조직 분석, 경도 시험 및 인장시험을 통해 용접성을 평가하였다.[31]
Kwon. S. W. [2009]	니켈기 초내열합금인 Alloy 718을 마찰용접기를 이용하여 용접 후 단면분석, 경도측정, 비파괴 평가, 비틀림강도 및 피로강도 시험을 통해 용접성을 평가하였다.[32]
Bang. H. S. [2011]	알루미늄 합금의 경우 아크 용접법은 신뢰성 있는 용접부 얻기 어렵고, 레이저 용접법은 용입형상 및 깊이를 증가시키는데 한계가 있고 용접성 및 균열, 기공 등의 결함에 취약한 점을 보완하고자 하이브리드 용접법을 이용하여 알루미늄 합금의 용접특성에 대한 연구를 하였다.[33]
Kim. C. H. [2011]	두께가 10mm, 1mm인 여러 가지 알루미늄 합금을 장초점 광학계 레이저를 이용하여 BOP, 겹치기 용접시 이송속도에 따라 단면 분석 및 X-ray 분석을 통해 기공 및 균열의 향상에 대해 연구하였다.[34]
Choi. S. G. [2011]	Hastelloy를 아크 용접법인 TIG 용접 후 미세조직의 변화, 열화에 따른 기계적 특성, 용접부 비드 형상에 따른 기계적 특성을 통한 최적의 용접 공정조건을 선정하였다.[35]

제 2 장 이론적 배경

2.1 리튬이온 전지

2.1.1 리튬이온 전지 구성 및 작동원리

전지는 기본적으로 화학적에너지를 전기 화학적인 반응을 통해 전기적에너지로 변환시키는 장치를 말한다. 그러므로 전기화학반응에 의한 전자가 도선을 통해 외부로 빠져나갈 수 있도록 특별한 내부구조로 이루어져 있으며, 도선을 통해 흐르는 전자가 전기에너지의 원천이 된다. 모든 전지는 산화제인 양극 재료와 환원제인 음극 재료를 가지고 있다. 이들 사이에는 이온전도에 의해 산화반응과 환원반응을 일으키는 전해질이 담겨있고, 또한 양극과 음극이 직접 접촉하는 것을 막는 분리막이 있다.

리튬이온전지는 충•방전에 따라 재료의 결정구조가 변하지 않을 뿐만 아니라, 리튬이온의 삽입 탈리가 가능한 재료를 쓰기 때문에 수명 특성이 매우 우수하다. 리튬이온이라는 유한 크기의 이온이 전극으로 이동하기 때문에 그 재료에는 구조적으로 리튬이온이 이동될 위치와 확산 가능한 경로가 필요하다. 이 조건을 만족하는 양극재료로는 LiCoO2, LiNiO2 등의 층상 구조물이 대표적이고, 2차원적 확산경로를 가지고 있다. 스피넬형 LiMn2O4는 3차원 구조를 지니고 있으면서 또한 리튬의 3차원 확산경로를 가진다. 양극재료가 필요로 하는 제 2의 조건은 리튬이온의 삽입에 따라 전자가 재료 내부로 도입됨과 동시에 금속이온의 산화수가 감소되어야 한다. 따라서 금속이온으로는 주로 전이금속 이온이 대상이 되며, 재료는 전기전도성도 있어야 한다.

리튬이온전지의 구조는 양극활물질, 음극활물질, 분리막, 전해액 및 용기로 구성되어 있다. 양극활물질은 금속산화물(코발트, 니켈, 망간 및 티타늄 등의 산화물에 리튬이온이 도핑된 물질), 음극활물질은 흑연 분말로써 각각 알루미늄과 구리 박막에 코팅 후 건조하여 전극판을 형성한다. 분리막은 다공성 고분자 필름으로 양극과 음극의 물리적 접촉을 방지하는 전기적 절연체이며, 전해액은 리튬염을 유기용매에 용해시킨 용액이다. 리튬은 전자를 잃고 양이온이 되려는 경향이 강하므로, 리튬이온전지는 기존의 납축전지 및 니켈전지보다 우수한 작동전압 및 에너지 밀도를 구현할 수 있다. 리튬이차전지의 작동원리를 Fig. 2.1에 나타냈다. 이차전지의 충•방전 원리는 양극과 음극 간의 리튬이온의 상태에 따른 전위차에 의해 전압이 발생

하여 전류를 발생시키는 방법이다. 충전할 때는 충전기에 의해 양극의 리튬이온이 전자를 잃고 전해질을 통해 양극에서 음극으로 이동하여 음극 층구조 사이에 축적이 된다. 양극과 음극 사이의 전위차가 발생되고 리튬이차전지의 경우 4.2V가 될 때까지 충전한다. 방전할 때는 전위차에 의해 음극활물질 층구조에 저장되어 있던 리튬이온이 음극에서 양극으로 이동하여 양극의 결정구조로 재결합된다. 각각의 반응에 대한 화학식을 식(1)에 나타냈다.

$$Anode: LiCoO_2 \underset{D}{\overset{C}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^-$$

$$Cathod: C + xLi + e^- \underset{D}{\overset{C}{\rightleftharpoons}} Li_xC \qquad \cdots\cdots (1)$$

$$All: LiCoO_2 + C \underset{D}{\overset{C}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}CoO_2 + Li_xC$$

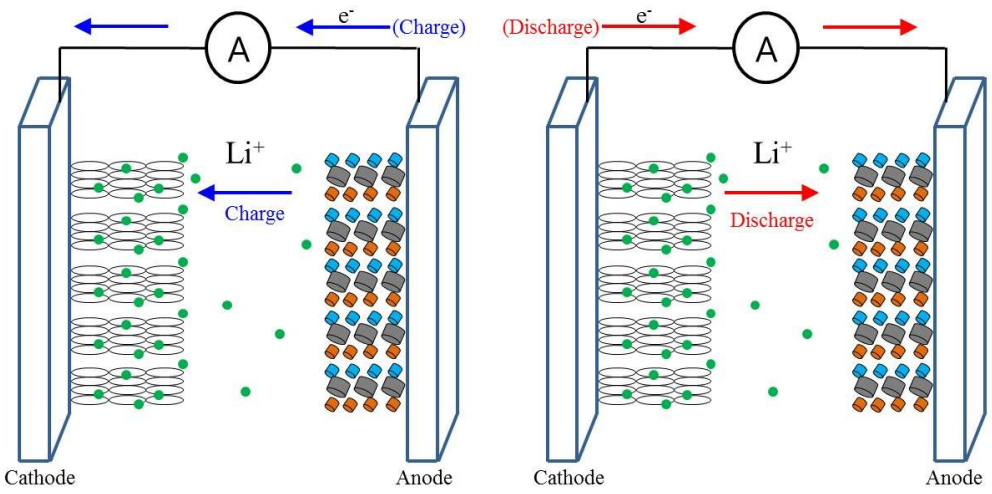
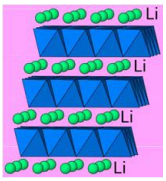
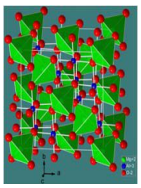
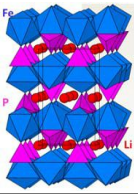
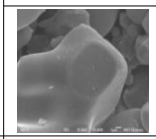
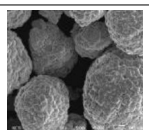
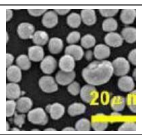
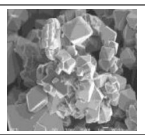
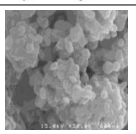


Fig. 2.1 Schematics of Li-ion rechargeable battery

2.1.2 양극활물질

양극활물질은 리튬전지 소재비의 35%를 차지하는 핵심소재로 금속염의 구성성분에 따라 LCO, NCM, NCA, LMO 및 LFP 등으로 구분된다. Table. 2.1에 양극활물질의 특성을 나타냈다. LCO는 에너지용량과 수명 특성이 양호하여 상업화 초기부터 광범위하게 사용되어 왔으나 원가절감과 안전성 강화를 위해 NCM으로 대체되는 추세이다. NCM과 NCA는 고가인 LCO의 코발트 성분 일부를 니켈, 망간 및 알루미늄으로 대체한 소재이다. NCM은 IT용 뿐만 아니라 전기차용 중대형 리튬전지에도 적용되고 있다. LMO와 LFP는 경제성과 안전성이 우수하여 전기차용 리튬전지에 일부 적용된다. LMO는 LCO에 비해 에너지 밀도는 낮으므로 NCM과 일정한 비율로 혼합되어 전동공구용 및 전기차용 리튬전지에 사용되나, 작동온도가 60℃ 이상으로 상승하면 전해액에 용해되서 구조적 불안정해진다는 단점이 있다. LFP는 원재료가 가장 저렴하고 안전성이 우수하나, 순도 및 전기전도도 개선이 필요한 시점이다.

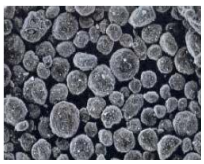
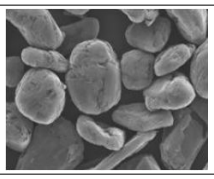
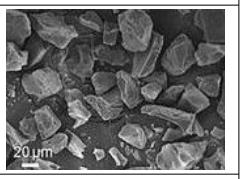
Table 2.1 Li-ion battery Anode material types and characteristics

구분	LCO	NCM	NCA	LMO	LFP
분자식	LiCoO2	Li[Ni,Co,Mn]O2	Li[Ni,Co,Al]O2	LiMn2O4	LiFePO4
구조	층상구조	층상구조	층상구조	스피넬 구조	올리빈 구조
					
					
전지용량	145 mAh/g	120 mAh/g	160 mAh/g	100 mAh/g	150 mAh/g
작동전압	3.7 V	3.6 V	3.6 V	4.0 V	3.2 V
안전성	높음	다소 높음	낮음	높음	매우 높음
수명	높음	중간	높음	낮음	높음
난이도	쉬움	다소 어려움	어려움	다소 어려움	어려움
용도	소형	소형, 중대형	중형	중대형	중대형

2.1.3 음극활물질

음극활물질은 인조흑연계, 천연흑연계, 저결정성 탄소계 및 금속계등으로 구분한다. Table 2.2는 음극활물질의 특성을 나타냈다. 탄소재료는 열처리온도에 따라 고결정성 탄소와 저결정성 탄소로 분류하며, 인조흑연은 2500℃ 이상의 고열을 가해서 흑연의 고결정 구조를 만들기 때문에 천연흑연보다 조직이 안정적이고 수명이 2~3배 정도 우수하다. 저결정성 탄소는 소프트카본과 하드카본으로 구성되며, 결정구조가 안정화 되어 있지 않기 때문에 수명은 짧으나 리튬이온의 출입이 빨라 고속 방전에 유리한 특성을 가지고 있다.

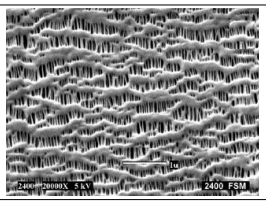
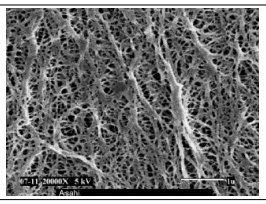
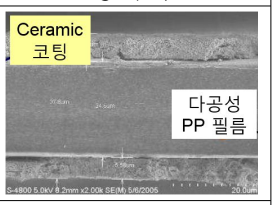
Table 2.2 Li-ion battery Cathode material types and characteristics

구분	인조흑연	천연흑연	저결정탄소	금속
구조				
용량	280~360 mAh/g	360~370 mAh/g	235~315 mAh/g	700~1000 mAh/g
표면적	1 m2/g 이하	3~8 m2/g	2~5 m2/g	-
수명	높음	낮음	중간	매우 낮음

2.1.4 분리막

분리막의 종류로는 다공성 폴리에틸렌(PE) 및 폴리프로필렌(PP) 필름으로 제조공정에 따라 습식과 건식으로 구분된다. Table 2.3은 분리막의 특성을 나타냈다. 습식막은 분리막의 성형과정에서 첨가한 가소제를 유기용매로 추출할 때 발생한 기공을 연신하여 확장한 것으로 강도, 탄성 및 두께•기공균일도 등이 매우 우수하다. 건식법은 압출 필름을 저온에서 연신하여 결정계면에서 미세 균열을 발생시키는 방식이며, PP/PE/PP의 삼층 구조를 표면에 무기물을 코팅하여 안전성을 향상시킨 강화막으로 저가격•고출력용에 사용된다. 강화막은 폴리올레핀 수지의 기계적•열적 특성을 보완하고자 다공성 고분자막의 표면에 세라믹 입자층을 형성시켜 고온에서도 분리막의 기계적 수축을 방지한 분리막이다.

Table 2.3 Li-ion battery Membrane types and characteristics

구분	건식막	습식막	강화막
구조			
수지	폴리프로플렌 폴리에틸렌	폴리에텔렌	폴리프로필렌 폴리에틸렌
두께	10 ~ 25 ㎛	10 ~ 25 ㎛	15 ~ 25 ㎛
연신	일축(Uni-axial)	이축(Bi-axial)	-

2.1.5 전해질

전지에 사용되는 전해질 재료는 현재 폭넓은 전위창을 가지는 유기용매를 전해액으로서, 전해액에 리튬염(LiPF6, LiBF4)을 용해시킨 것이 사용된다. 전해액에 요구되는 특성은 충분한 양의 리튬염을 용해시킬 수 있어야하며, 점도가 낮아야 된다. 또 충전-방전 과정에서 정·부극 표면에서 불활성이어야 하며, 광범위한 온도영역에서 사용할 수 있어야한다. 대표적인 전해액과 리튬염의 특성을 Table 2.4, 2.5에 나타냈다. 기본 용매는 유전율이 높아 리튬염을 녹여 양이온과 음이온을 쉽게 분리시킬 수 있으나, 점도가 높아 전해액 내에서 리튬양이온의 빠른 이동에 불리하다. 리튬염은 이온결합을 이루고 있기 때문에 유전상수가 큰 물에는 쉽게 녹지만 유기용매에서는 용해도가 급격히 저하된다. 음이온이 큰 경우에는 음이온의 이동도가 감소하므로 전지의 반응에 필수적인 리튬 양이온의 이동도가 향상된다. 산업체 요구특성에 가장 적합한 LiPF6를 상업용 전해액의 산업 표준으로 이용하고 있다. 전해액에는 전지의 수명 향상과 안정성 확보를 위해 다양한 종류의 유기 첨가제가 사용되는데, 최초 충전시에 음극에서 전해액이 분해되기 이전에 첨가제인 Vinylene carbonate 및 Propane sultone 등이 먼저 반응하므로 전지의 수명이 향상된다.[36~42]

Table 2.4 Li-ion battery Organic solvent types and characteristics

용매	분자량 (Mw)	융점 (Tm)/℃	비점 (Tb)/℃	점도 (η)/cP	비유전율 (ε)
Ethylene Carbonate	88	36.4	248	1.90	89.8
Propylene Carbonate	102	-48.8	242	2.53	64.9
DiMethyl Carbonate	90	4.6	91	0.59	3.1
DiEthyl Cabonate	118	-74.3	126	0.75	2.8
EthylMethyl Cabonate	104	-53	110	0.65	3.0

Table 2.5 Li-ion battery Lithium salt types and characteristics

종류	분자량	녹는점	분해온도	이온전도도	
				in PC	in EC/DMC
LiPF6	151.9	200	80	5.8	10.7
LiBF4	93.9	293	100	3.4	4.9
LiAsF6	195.9	340	100	5.7	11.1
LiCIO4	106.4	236	100	5.6	8.4
LiCF3SO3	155.9	300	100	1.7	-

2.2 소재별 특성

2.2.1 알루미늄 특성

알루미늄과 알루미늄 합금은 항공 우주산업이나 가정용 기물 외에 일반 공업용 차량, 토목, 건축, 조선, 화학 및 식품 등 많은 공업 분야에 널리 사용된다. 무게가 가볍고 전기 및 열전도도가 우수하며 열과 빛에 대한 반사도가 높다. 또 높은 내식성과 무독성을 가지며 불꽃이 발생하지 않을 뿐만아니라 자성을 띄지 않아 넓은 범위에 있어서 다양한 기계적, 전기적, 화학적 성질을 갖춘 재료이다. 쉽게 주조, 압연, 형단조, 인발, 신장, 롤성형 등을 할 수 있으며, 매우 다양한 모양으로 헤밍, 단조, 압출 등을 할 수 있고 기계가공이 비교적 쉽다. 알루미늄의 일반적인 물리적 성질을 Table 2.6에 나타내었다.

알루미늄은 FCC 결정구조를 가지기 때문에 저온에서 노치인성 감소가 없으며 우수한 성형성을 가진다. 한편 철강은 BCC 결정구조를 가지며 특정 온도에서 결정구조의 변화 및 급냉으로 상변태(Phase transformations)하여 강화되나, 알루미늄은 가열과 냉각 후에도 결정구조 변화가 크게 발생하지 않는다.

알루미늄 표면은 산화막으로 매우 치밀하게 구성되어 있으며 표면과 매우 강하게 결합되어 있고 지속성이 있어 만약 산화막에 손상이 일어났을 경우 자체적으로 회복된다. 이러한 성질로 인해 알루미늄 및 알루미늄 합금은 우수한 내식성을 띠며 외부에 노출시켜 사용하는 곳에서도 표면처리를 하지 않고도 사용할 수 있다.

알루미늄의 열전도도는 구리보다는 낮지만, 강의 4~5 배가 되기 때문에 알루미늄 용접시 필요한 열원은 철강에 비해 더욱더 집적되어야 하며 고밀도화가 필요하다. 전기전도도는 구리에 비해 75%정도 가지지만 철강에 비해 약 6배 높기 때문에 저항 점 용접 할 때 철강에 비해 높은 에너지 손실이 발생하게 된다. 일반적으로 알루미늄 용접은 저항 점 용접을 활용하지만 높은 전기전도도가 중요한 변수로 작용할 때는 마찰교반용접을 활용하는 경우가 많다. 그리고 열팽창 계수는 대략 철강의 두 배이다. 철에 비해 열팽창 계수가 크기 때문에 열전도 용접을 할 경우 정밀한 부품을 용접하는 데는 많은 제약 요인이 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 열팽창의 영향을 작게 받는 급가열 급냉각이 가능한 레이저 용접이 훌륭한 대안으로 고려 할 수 있다.[43~45]

Table 2.6 Physical properties of Aluminum[48]

Properties	High purity Al (99.996%)
Atomic number	13
Atomic weight [g/mole]	26.98
Crystal lattice	FCC
Density (at 293K)[g·cm^{-3}]	2.7
Melting point [K]	933.47
Boiling point [K]	2792
Heat of fusion [kJ/mol]	10.71
Heat of vaporization [kJ/mol]	294
Heat capacity [J/(mol·K)]	24.2
Ionization energy [kJ/mol]	577.5
Electrical resistivity [nΩ·m]	26.5
Thermal conductivity [W/(m·K)]	237
Coefficient of expansion [㎛·m^{-1}·K^{-1}]	23.1

2.2.2 니켈 특성

순수한 니켈은 은백색의 단단한 금속으로, 다른 금속과 결합하여 합금을 만들기에 이상적인 특성을 가지고 있다. 니켈과 합금을 만들 수 있는 금속으로는 철, 구리, 크롬, 아연 등이 있다. 니켈의 대부분은 스테인레스강 제조에 사용되고 염소, 황, 산소 같은 원소와 화합물을 형성하기도 한다. 일반적으로 석출 경화형 합금은 용접 열에 의해 영향을 많이 받기 때문에 용접성은 고용 강화형 합금에 비해 나쁘다고 할 수 있다. 니켈은 가소성 소다 등 알칼리에 대한 내식성이 우수하며, 일반 탄소강에 비해 각종 산성 용액에 대한 내식성도 양호하다. 뛰어난 내식성과 고온 강도의 장점이 없었다면, 니켈은 높은 생산 단가로 인해 그 활용도가 극히 제한 되었을 것이다. 200 ~ 1090℃의 영역에서 뛰어난 내식성을 보이고 있으며 강도 또한 자유로이 조정이 가능하다. 대부분 쉽게 용접이 가능하지만, 적절한 용접재료 선택의 제약으로 인해 다양한 용접방법을 적용하기 어렵다. 석출 강화형 강종의 경우에는 용접 후 열처리가 요구되기도 하며, 불산 가스 및 가성소다 용액을 다루는 경우에는 응력부식 균열을 방지하기 위해 용접 후 응력강하를 위한 열처리를 실시한다. 니켈의 일반적인 물리적 성질을 Table 2.7에 나타내었다.

니켈은 알루미늄과 마찬가지로 FCC 결정구조를 가지며, 낮은 온도에서는 우수한 전성과 냉간 성형성을 나타낸다. 니켈은 강자성 금속이며 큐리 온도 이하에서는 자기적 원자 모우먼트의 강자성 배열 상태가 되어 바이스 영역 내에서 구역벽을 통하여 분리된다. 열전도도와 전기전도도는 구리와 알루미늄에 비해 낮지만, 두 소재에 비해 용접성이 좋고 손쉽게 용접이 가능하다는 장점이 있다. [46~47]

Table 2.7 Physical properties of Nickel[48]

Properties	High purity Ni (99.996%)
Atomic number	28
Atomic weight [g/mole]	58.69
Crystal lattice	FCC
Density (at 293K)[g·cm^{-3}]	8.908
Melting point [K]	1728
Boiling point [K]	3186
Heat of fusion [kJ/mol]	17.48
Heat of vaporization [kJ/mol]	377.5
Heat capacity [J/(mol·K)]	26.07
Ionization energy [kJ/mol]	737.1
Electrical resistivity [nΩ·m]	69.3
Thermal conductivity [W/(m·K)]	90.9
Coefficient of expansion [μm·m^{-1}·K^{-1}]	13.4

2.3 레이저빔을 이용한 용접

2.3.1 레이저빔 용접 원리

레이저 용접은 고밀도 에너지의 레이저빔이 접합하고자 하는 금속과 반응하여 열에너지로 전환되고 금속표면을 용융시킨 뒤 계속되는 레이저빔 조사에 의해 용융금속 내 키홀(Keyhole)을 형성하게 된다. 키홀 내에 레이저빔의 다중반사 및 흡수현상 때문에 에너지가 흡수되며 주위에 열에너지가 전달되어 벽면이 용융과 응고가 주기적으로 반복되면서 용접이 이루어진다.

일반적으로 초기 레이저 파워밀도 10^4W/cm^{2}에서 키홀이 수반되는 열전도 용접이 진행되고, 10^6W/cm^{2}이상의 파워밀도에서 깊은 용입(Deep Penetration)의 키홀 용접이 진행된다. 레이저빔 중심부 구역에서는 금속의 증발이 일어나고, 그 외곽지역에서는 용융이 일어나 중심부 구역의 큰 증기압은 용융금속을 레이저빔의 조사되는 중심부 구역으로부터 옆으로 밀어내므로 레이저빔은 더욱 내부로 침투되며, 중심부의 깊이를 더욱 크게 한다. 이때 금속증기가 분출하는 반동력에 의해서 용융금속면에 함몰과 용융풀이 채워지는 현상이 반복되어 용접비드가 생성되고, Fig. 2.2와 같이 키홀을 형성한다. 용융풀의 유동현상은 고점성 유체유동 현상으로 해석할 수 있으며, 키홀 발생시 증기제트(Vapour Jet)와 플라즈마 진동, 용융풀 내에선 모세관 파동(Capillary Waves)과 함께 기포, 기공, 다상유동(Multiphase Flow) 즉, 액상과 기체가 혼합된 형태로 존재하게 되어 용융풀 유동이 복잡해진다. 키홀 내의 유동풀에서 정수압이나 표면장력은 키홀을 함몰시키려 하지만, 내부의 증기압이 키홀을 유지하며 레이저빔이 통과한 공간을 주위의 용융물이 채워준다. 만약 키홀을 안정적으로 유지할 수 없게 되면, 용융금속이 키홀을 덮어 기포가 빠져 나가지 못하기 때문에 기공(Porosity)이 포획되어 기공결함이 발생한다. 키홀 형성시 발생한 금속증기는 용융금속의 응고전 일정한 주기를 가지고 외부로 방출되기도 하지만, 금속외부로 방출되지 못하고 용융부의 용접 비드에 잔류하여 기공을 형성하기도 한다.

레이저 용접은 키홀을 통하여 직접 가열되므로, 비드의 단면은 열전도형과는 다르게 폭이 좁고 깊게 용융풀이 형성된다. 또한 증발한 금속증기가 고온의 플라즈마로 되면 레이저빔은 플라즈마에 흡수되어 재료에 도달하는 빔 에너지가 감소하게 되어, 보호가스를 분사시켜 플라즈마를 제거해야 한다. 레이저빔을 금속재료에 조사하면 초기에는 반사손실은 크지만, 일단 키홀이 형성되면 레이저빔은 키홀 내를 다중반사하기 때문에 거의 반사손실이 일어나지 않는다.

레이저 용접은 고에너지 밀도의 빛을 사용하기 때문에 어떤 금속이라도 고속으로 변형없이 정밀 가공할 수 있다는 장점이 있다. 아크 용접과 비교하면 용가재가 필요 없으며, 한번에 심(Seam) 용접을 할 수 있을 뿐만아니라, 용접시 변형이 적게 발생하는 장점이 있다. 고밀도 에너지를 사용한다는 점에서 유사한 용접방식인 전자빔(Electric Beam) 용접과 비교하면 전자빔 용접의 필수 조건인 진공 유지가 레이저 용접의 경우 필요없기 때문에 전자빔 용접과 같이 진공 챔버 내에서 용접할 필요가 없다. 이는 가공물의 형상이나 크기에 제한이 없으며, 전자기장의 영향을 받거나 X-선을 방출할 염려가 없고 유지보수비용이 상대적으로 저렴한 이점이 있다. 레이저 용접은 집속된 빔을 사용함으로써 열영향부가 적고, 열원을 집중시켜 전도에 의한 열에너지 손실을 줄여 재료의 열 변형을 최소화 할 수 있다.[49~54]

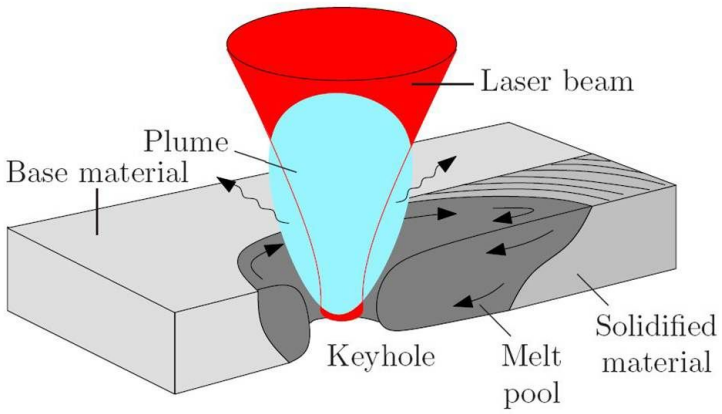


Fig. 2.2 Schematic cross section of the Full Penetration Keyhole Laser Welding process of a Thin Sheet

2.3.2 레이저 용접 결함

레이저빔을 이용한 용접시 용접금속에 발생되는 주된 문제로는 응력 부식 균열과 고온균열 및 기공등을 들 수가 있다. 응력 부식균열은 낮은 열전도도 및 높은 열팽창계수에 기인하여 발생하며 고온균열은 용접금속에서 응고시에 발생하는 응고균열, 연성이 저하하는 부위에 발생하는 연성저하 균열이 있다. 이러한 결함은 주로 응고시 오스테나이트 조직의 정출에서 비롯되는 합금원소나 불순물 원소의 결정립계에 편석 등에 기인하여 나타나는 용접 결함이다. 또한 기공의 발생은 용융금속의 응고 중 용융 금속내에 용해되었던 증기가 응고 단계에서 방출되지 못하고 응고 금속내에 갇혀 생성되며 이러한 기공의 발생은 모재의 물리적 성질 특히 항복점, 연신율, 인장강도, 피로강도 등에 영향을 미치게 된다.

(1) 알루미늄 용접 결함

(가) 용접 균열

알루미늄에 발생하는 균열은 응고 균열과 용해 균열로 크게 구분된다. 용접 금속내의 균열은 거의 응고 균열이고, 다층 용접시 금속의 재가열 구역 및 열영향부에서의 미세균열은 용해 균열에 해당된다. 균열의 대부분은 고온 균열이고, 주로 결정입계에 있어서 합금 원소의 편석 또는 저융점 물질의 존재에 기인한다. 응고 균열은 용접 금속이 응고할 때 응고시 수축응력 또는 외력이 작용할 때 발생하고, 용해 균열은 고온에서 가열된 입계가 국부적으로 용융하여 팽창할 때 발생한다. 용접조건에서 용접 속도의 영향이 가장 현저하고, 용접 속도가 증가하는데 따라 균열 감수성이 크게 된다.

(나) 기공

알루미늄의 용접에는 기공이 발생하기 쉽다. 용접 금속에 균일하게 분산된 기공은 이음부의 강도에는 큰 영향을 주지 않지만, 국부적으로 집중하거나, 크기가 큰 기공 등은 영향을 미친다. 기공의 발생은 주로 수소에 의한 것으로 알루미늄 용융응고시 수소의 용해도 변화가 현저하기 때문이다. 용해도 차이에 의해 조직내로 빠져 나온 수소가 외부로 방출되지 못하고 조직내에 남아서 기공이 되는 것이다. 수소 발생원으로는 모재, 용접 재료중의 용해수소, 표면에 부착한 수분, 유기물, 산화막에 부착한 수분, 보호가스중의 수소, 분위기중에 침입하는 공기중의 수분 등이 있다. 이중에서 가장 문제가 되는 것은 공기중의 수분 침입이다. 또 알루미늄에서는 개선부 부근의 산화피막 제거 및 층간의 청소가 불충분한 경우에 산화피막에

기인하는 융합 불량이 발생하기 쉽기 때문에 주의를 해야한다.

(2) 니켈 용접 결함

니켈은 응고 과정에서 상변태가 없는 Austenite 조직을 나타내고 고온 균열 감수성이 높다. 따라서 용접 입열을 제한하고 예열 및 층간 온도를 낮게 유지하는 것이 중요하다. 특히 기공, 용입 불량 등을 발생시키기 쉽기 때문에 용접시 이들 결함의 발생을 방지할 대책이 필요하다.

(가) 고온 균열

고온 균열의 발생 원인으로는 응고시 S나 Pb등과 같은 미량의 불순물에 의한 저융점 개재물이 액상의 Film 형태로 결정입계에 잔류해서 응고시 발생하는 수축응력에 의해 발생하는 것으로 이러한 저융점 개재물 중에는 Ni과 반응하여 융점이 더욱 낮은 공정화합물로 존재하여 균열을 야기 시킨다.

(나) 기공 발생

기공은 용접 개선 부위에 기름, 산화물 등 이물질의 존재에 의하여 주로 발생된다. 뿐만 아니라 보호가스의 유량이 부적당하고, 순도가 불량할 경우에도 기공이 발생하는데 이를 방지하기 위해서는 금속 표면을 용접전에 충분히 깨끗이 하고 보호가스의 종류와 유량 등을 충분히 검토하여 완전한 보호가스가 항상 얻어질 수 있도록 유의하여야 한다.[55~57]

제 3 장 실험방법 및 장치

3.1 실험 재료 및 장치

본 연구에서는 리튬이온전지의 극주와 극판에 사용되고 있는 전기전도도가 우수한 순도 99.0% 이상의 알루미늄과 니켈 시편을 용접하였다. 각 성분별 전기전도도 및 열전도도를 Table 3.1에 나타냈다. 순수 알루미늄의 특징은 강도는 낮지만 전기전도도 및 열전도도가 높고, 성형성, 내식성이 우수하다는 것이다. 순수 니켈은 순수 알루미늄보다는 전기전도도 및 열전도도는 낮지만, 뛰어난 내식성과 고온 강도 우수하며, 강도 또한 자유로이 조정할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 순수 알루미늄과 순수 니켈의 두께가 100㎛인 박판 10장을 한꺼번에 레이저 겹치기 용접할 수 있는 공정변수를 분석하고자 한다. 일반적으로 대형 리튬이온전지에 많이 사용되는 소재로는 구리 및 알루미늄이 많이 사용되고 있으나 열전도도와 반사율이 높아 레이저 가공이 어려워 많은 연구가 진행중이다. Table 3.2, 3.3은 순수 알루미늄과 순수 니켈의 화학 성분 및 기계적 성질을 나타낸 것이다.

본 연구에 사용한 파이버 레이저의 파장은 1.07㎛이고, 최대 출력은 10kW, 연속파형 레이저(YLS-10000-S4T)이다. 레이저빔은 직경이 200㎛인 광섬유(optical fiber)에 의해 전달된다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 f=250mm이고, 레이저 빔 품질 BPP(Beam Parameter Product)는 8.0mm*mrad이다. 장비 사진, 스펙 및 모식도를 Fig. 3.1, 3.2에 나타냈다.

Table 3.1 Electrical conductivity and thermal conductivity of materials

	Electrical conductivity		Thermal conductivity	
Si	2.52×10^{-12}	$10^6 cm^{-1}\Omega^{-1}$	1.48	$W\cdot cm^{-1}K^{-1}$
C	0.00061		1.29	
Mn	0.00695		0.0782	
Ti	0.0234		0.219	
Cr	0.0774		0.937	
Fe	0.0993		0.802	
Ni	0.143		0.907	
Mg	0.226		1.56	
Al	0.377		2.37	
Au	0.452		3.17	
Cu	0.596		4.01	
Ag	0.63		4.29	

Table 3.2 Chemical composition of Pure Aluminum and Pure Nickel(wt%)

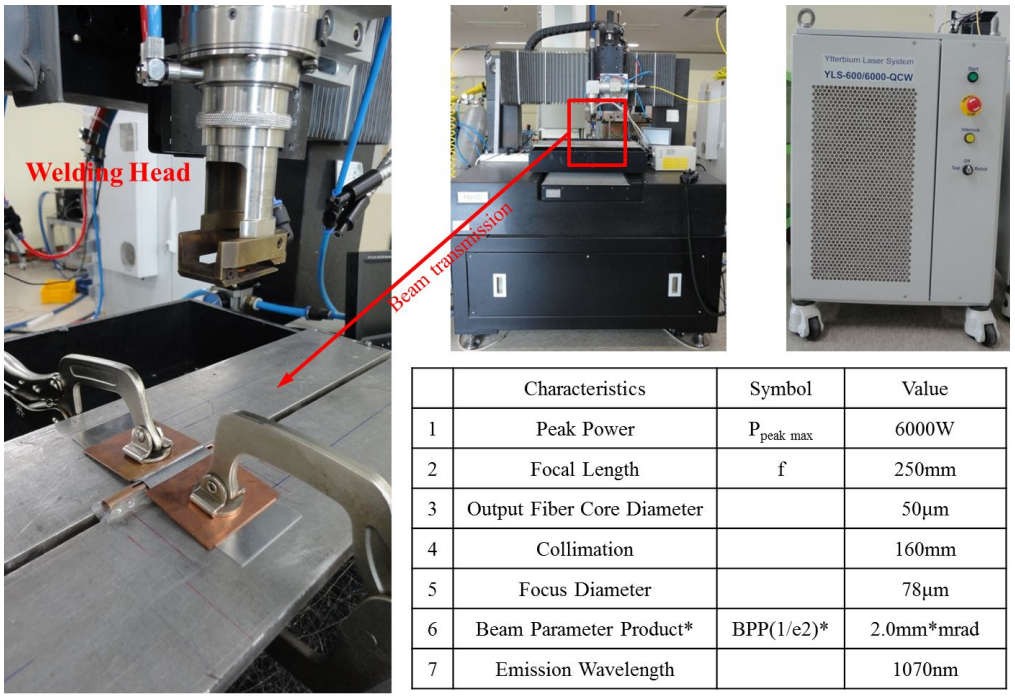
Al	Al	Cu	Fe	Si	Mn	Zn
	99	0.1	0.7	0.5	0.1	0.1

Ni	Ni	Cu	Fe	Si	Mn	C	S	Mg	Ti
	99	0.25	0.4	0.15	0.35	0.15	0.01	0.35	0.1

Table 3.3 Mechanical properties of Aluminum and Nickel

Al	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
	78~118	29~59	25~50

Ni	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
	380~520	105~210	40~55



	Characteristics	Symbol	Value
1	Peak Power	$P_{peak\ max}$	6000W
2	Focal Length	f	250mm
3	Output Fiber Core Diameter		50μm
4	Collimation		160mm
5	Focus Diameter		78μm
6	Beam Parameter Product*	BPP(1/e2)*	2.0mm*mrad
7	Emission Wavelength		1070nm

Fig. 3.1 Fiber laser and Lap-Joint welding experiment equipment

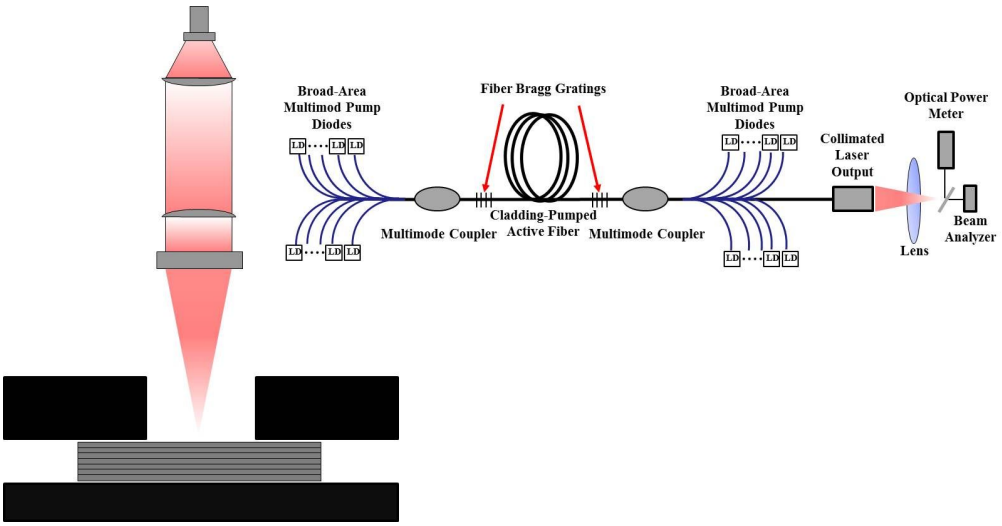


Fig. 3.2 Schematic of Fiber laser processing system

3.2 실험 방법

본 연구에서는 리튬이차전지에 사용되는 순수 알루미늄과 순수 니켈 소재를 100mm(L) × 50mm(W) × 0.1mm(T)로 제작하여 레이저 겹치기 용접을 실험하였다. 순수 알루미늄과 순수 니켈의 두께가 100㎛인 박판 10장을 겹치기 용접하였다. 10kW 파이버 레이저를 이용하여 Table 3.4 에 나타낸 것과 같이 용접 공정변수는 레이저 출력은 1800W, 2000W, 2200W로 실험하였고, 빔 이송속도는 4m/min ~ 10m/min까지 2m/min씩 증가시키면서 겹치기 용접하였다.

레이저 용접 후 용접부 기계적 성질을 분석하기 위하여 한국산업규격에서 제공하는 금속재료인장시험편 13B호로 제작하였다. 인장시험편 도면은 Fig. 3.3 에 나타내었다.

Table 3.4 Experimental processing parameters

	Lap-Joint Welding
Laser Power(W)	1800W, 2000W, 2200W
Travel Speed(m/min)	4m/min, 6m/min, 8m/min, 10m/min
Focal Position (z)	0mm (f=250mm)

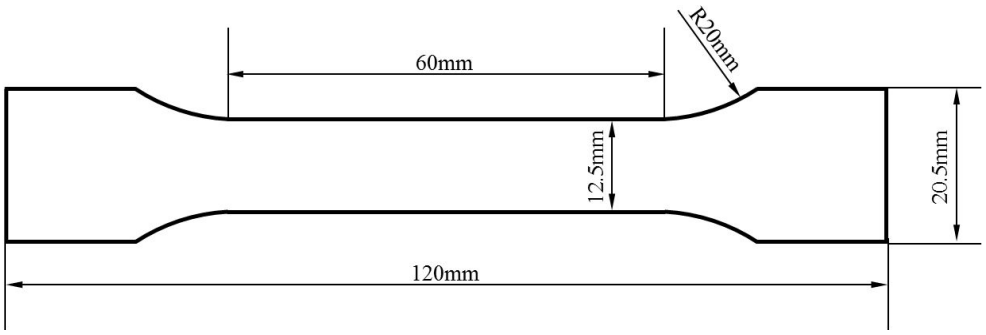


Fig. 3.3 Tensile test Specimens

3.3 실험분석 장치 및 방법

3.3.1 실험시험편 제작 및 준비

박판 순수 알루미늄과 순수 니켈의 두께가 100㎛인 박판 10장을 겹치기 용접한 시험편 용접부의 단면을 분석하고 인장시험 테스트를 하기 위해 와이어 커팅을 이용하여 정밀하게 절단하였다. 박판 10장을 겹치기 용접한 후 시편의 용접부를 중심으로 인장시험편 모양으로 시험편을 절단하였다. 겹치기 용접부 단면을 분석하기 위하여 Fig. 3.4에 나타낸 핫 마운팅기(Hot mounting press)로 마운팅을 하고, Fig. 3.5의 자동연마기(Automatic polisher)를 이용하여 샌드페이퍼로 표면연마를 실시하였다. 표면연마 된 시편을 에칭액 (Al : CH_3OH + HCl + HNO_3 + HF, Ni : H_2O + HNO_3 + CH_3COOH)을 사용하여 에칭 후 용접부 단면분석을 준비하였다.

실험결과를 분석하기 위해 입열량 및 비드폭비를 나타낼 때는 다음 식을 이용하여 공정변수 변화에 대한 용접 특성을 분석하였다.

$$WR(With\,Ratio) = \frac{W_2}{W_1} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$E(Heat\,input) = \frac{P}{w \times v}\,[J/cm^2] \quad \cdots\cdots (3)$$

E는 입열량을 나타내고, WR은 비드폭비를 나타낸다. P는 레이저 출력, w는 전면 비드폭, v는 빔 이송속도, W_1은 전면 비드폭, W_2는 후면 비드폭을 나타낸다.

3.3.2 용접부 단면 광학 현미경 분석

레이저 공정변수에 따라 용접성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 용접부의 미세조직을 관찰하였다. 표면 연마된 시편을 에칭한 후 Fig. 3.6의 금속광학현미경(Olympus : GX-51)으로 관찰하였다.

광학현미경(Olympus)은 최소배율 25배에서 최대배율 500배를 사용하여 두께가 100㎛인 순수 알루미늄과 순수 니켈 10장을 겹치기 용접하여 용접단면을 분석하였다. 주로 분석한 내용은 용입단면의 크기, 용입깊이, 용접단면의 결함 등을 분석하여 용접특성을 분석하였다.

3.3.3 경도 시험

레이저 용접시 발생하는 기공 및 고온균열과 같은 결함을 제외한 용접금속의 기계적 성질을 측정하기 위하여 경도시험을 실시하였다. 순수 알루미늄과 순수 니켈 10장 겹치기 용접 후 횡단면의 측정 위치는 시편 표면으로부터 아랫방향 200㎛ 지점에서 모재부터 용접부를 지나 모재 방향으로 각각 위치에서 횡방향으로 경도를 측정하였다. 깊이방향은 용접부를 중심으로 경도를 측정하였다. 경도값을 측정하기 위해 사용된 장비는 Fig. 3.7에서 나타낸 것과 같이 마이크로 비커어스 경도시험기(Simadzu : HMV-2series)를 사용하였으며, 다이아몬드 인덴터(diamond indenter)의 하중은 알루미늄의 경우 490.3mN(Hv 0.05kg)을 적용시켰고, 니켈의 경우 980.7mN(Hv 0.1Kg)을 적용시켰다.

3.3.4 인장 시험

레이저 용접부의 기계적 성질을 측정하기 위해 인장시험을 실시하였다. 인장시편은 Fig. 3.3와 같이 박판 순수 알루미늄과 순수 니켈 10장을 겹치기 용접하여 용접부를 중심으로 인장시험편을 준비하였다. 본 시험에 사용된 Fig. 3.8의 인장시험기는 Hounsfield사의 universal testing machine이다.

Fig. 3.4 Hot mounting press

Fig. 3.5 Automatic Grinder / Polisher

Fig. 3.6 Micro Analysis System of Optic-Materials

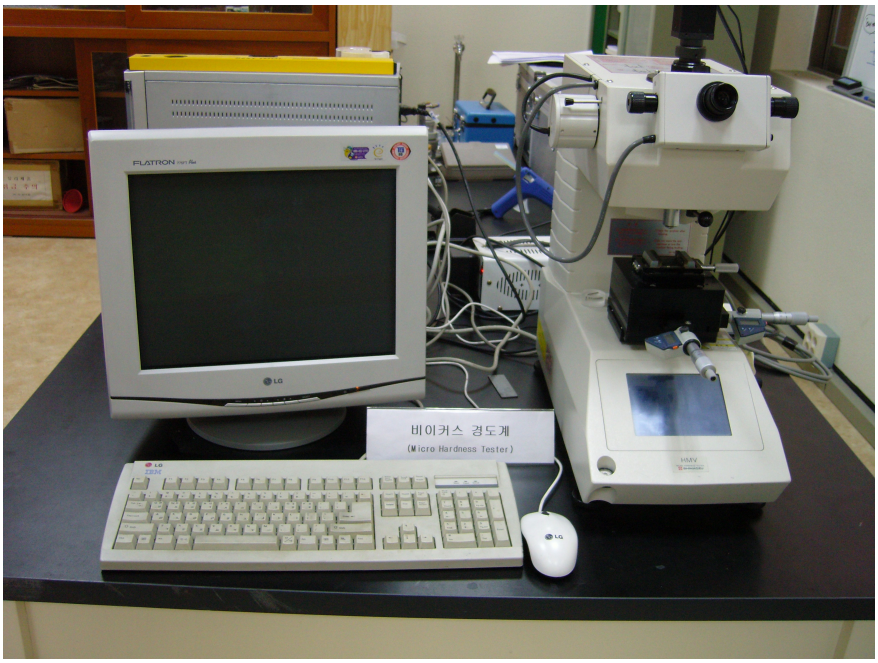


Fig. 3.7 Micro Vickers Hardness Tester

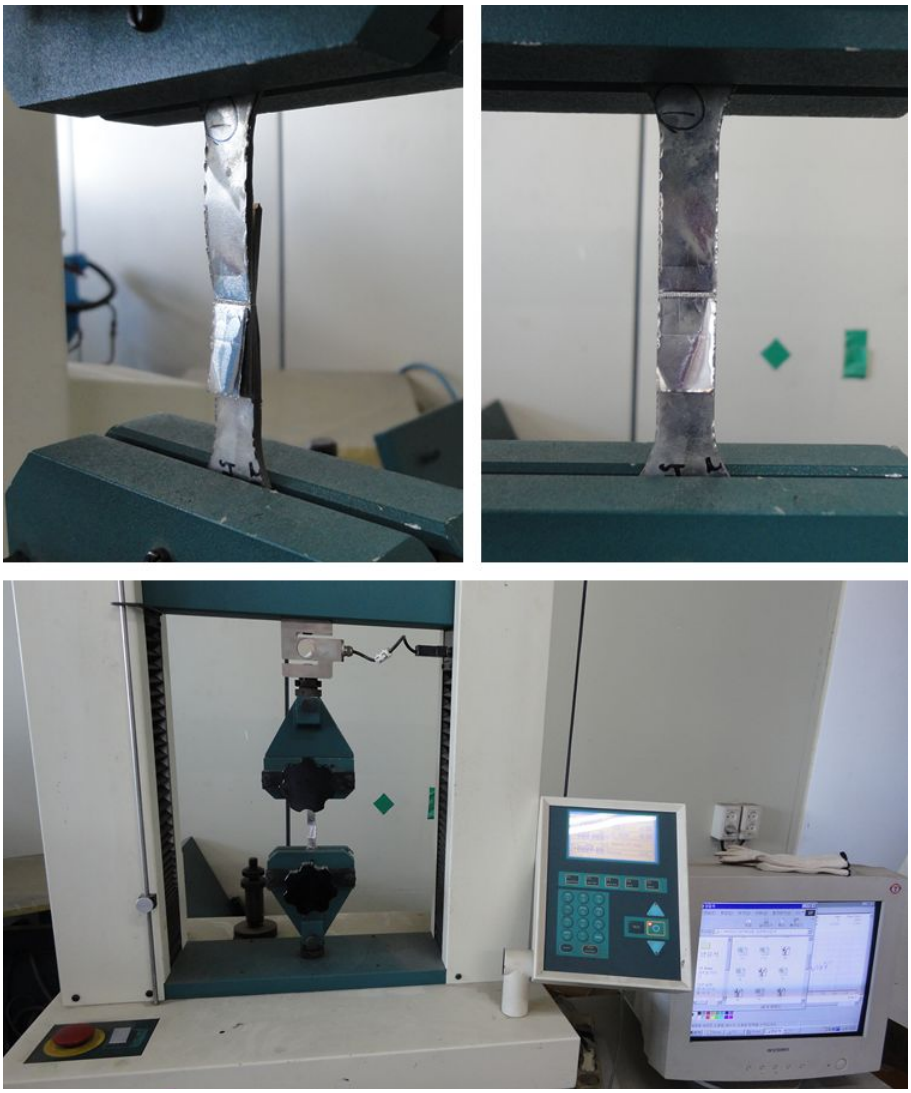


Fig. 3.8 Tensile test Experiment Equipment of Lap-Joint Welding

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 순수 알루미늄 연속파형 파이버 레이저 용접특성

4.1.1 공정변수별 겹치기 용접특성

두께가 100㎛인 박판을 10장을 한꺼번에 레이저로 겹치기 용접할 때 레이저출력이 너무 크거나 빔 이송속도가 너무 느릴 경우 과입열로 가장 위에 있는 시편은 용융되면서 기화되어 시편이 증발되는 현상으로 절단된다. 그렇기 때문에 가장 위에 있는 시편이 과입열량으로 용융•기화되는 현상을 억제하면서 두께가 100㎛인 박판 10장이 한꺼번에 겹치기 용접 되도록 용접 공정변수를 조절하면서 실험하였다.

박판 겹치기 용접에 사용한 레이저는 연속파형 파이버 레이저이다. Table 3.4에 나타낸 실험 공정변수로 순수 알루미늄 박판 10장을 겹치기 용접한 후 전면비드와 후면비드를 Fig. 4.1에 나타냈고, 용접단면은 Fig. 4.2에 나타냈다. Table 3.4에 언급한 것처럼 공정변수는 레이저 출력 1800W, 2000W, 2200W로 변화시켰고, 빔 이송속도는 4m/min ~ 10m/min까지 2m/min씩 변화시켜 용접하였다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2에 나타난 것과 같이 레이저 출력이 1800W와 2000W는 빔 이송속도가 10m/min일 때는 레이저빔과 시편의 상호작용시간이 짧아지면서 충분한 입열이 되지 않아 관통용접이 되지 않았다. 레이저빔의 이송속도가 10m/min으로 동일한 조건이고 출력이 1800W일 때는 8장이 겹치기 용접되었고, 출력이 2000W일 때는 9장이 용접되었다.

전반적으로 용접부 단면에 알루미늄 용접시 발생하기 쉬운 결함인 기공이 용접부 단면에 나타나고 있다. 이러한 기공은 앞에서 설명한 것처럼 키홀의 불안정성으로 인해 발생한 기포, 합금원소의 증발과 용융된 알루미늄의 응고시 고상 및 액상의 수소 용해도차에 의한 용융금속 내에서 발생한 수소 등이 원인이 될 수 있다. 불안정한 키홀은 완전용입이 안정하게 일어나는 최적의 공정변수가 아닐 때 발생한다. 예를 들면 불안정한 키홀은 레이저빔 초점위치가 적절한 에너지 밀도를 가지는 위치가 아닐 경우와 적절한 초점위치에 완전용입 및 안정한 키홀을 생성하는데 필요한 입열량이 부족한 경우에 발생된다. 그리고 순수 알루미늄이라고 해도 미량의 다른 성분들이 포함되게 되는 데, 각 조성분들 별로 안정한 키홀을 생성하는데 필요한 에너지 차이가 발생하며 첨가된 조성분의 종류와 양에 따라 용융점이 서로 다르기 때문에 안정한 키홀을 형성하는데 필요한 임계 에너지 값이 달라지게된다.

그리고 소재의 두께에 따라서도 임계 에너지 값이 다르기 때문에 용접단면에 용접부의 형상이 다르게 나타나는 현상이 나타난다.

시편의 두께가 100㎛인 박판 10장을 겹치기 용접 했을 때 용접단면에 기공이 나타난 현상을 Fig. 4.2에 나타냈다. 실험결과에 나타나 있는 기공 발생의 가장 큰 이유로는 박판 시편을 10장 겹치기 용접하기 때문에 시편 사이사이에 있는 공기층의 영향을 받는 것으로 판단하고 있다. 이는 용접시 키홀은 상하좌우로 큰 진폭을 가지며 진동하게 되므로 용융금속이 시편과 시편 사이의 미세한 갭을 채우지 못하거나 키홀이 닫힐 때 키홀 내부에 있던 고온의 금속증기와 금속증기 방출 후 키홀 내부 및 주위와의 순간적인 압력차에 의해 키홀 내부로 들어온 시편 사이사이에 존재한 공기층의 공기가 레이저 용접의 빠른 응고속도로 인해 용융금속 표면으로 부상하여 배출되지 못하고 용접부 내에 기공으로 남게 된 것으로 사료된다.

용접부 단면에 발생한 기공의 또 다른 요인으로는 선행 연구자들에 의해 알려져 있는 알루미늄에 포함되어 있는 수소, 용접하면서 보호가스로 분사하는 보호가스의 난류에 의해 대기로부터 용접 분위기로 혼입되어 들어온 습기 등이 용접열에 의해 수소로 분해되어 포획된 것으로 생각 할 수도 있다. 용융 알루미늄의 수소용해도는 고체 상태의 알루미늄에 비해 액체 상태의 알루미늄에서 약 20배 높기 때문에 수소는 용융금속에서 쉽게 용해된다. 용융금속이 응고 단계에 이르면 수소의 용해도가 약 660℃의 응고온도에서 급격히 감소하므로 가스로 방출되게 되고 이중 응고된 금속 내에 갇힌 수소가 기공으로 남게 된 것으로 판단한다.[58~66]

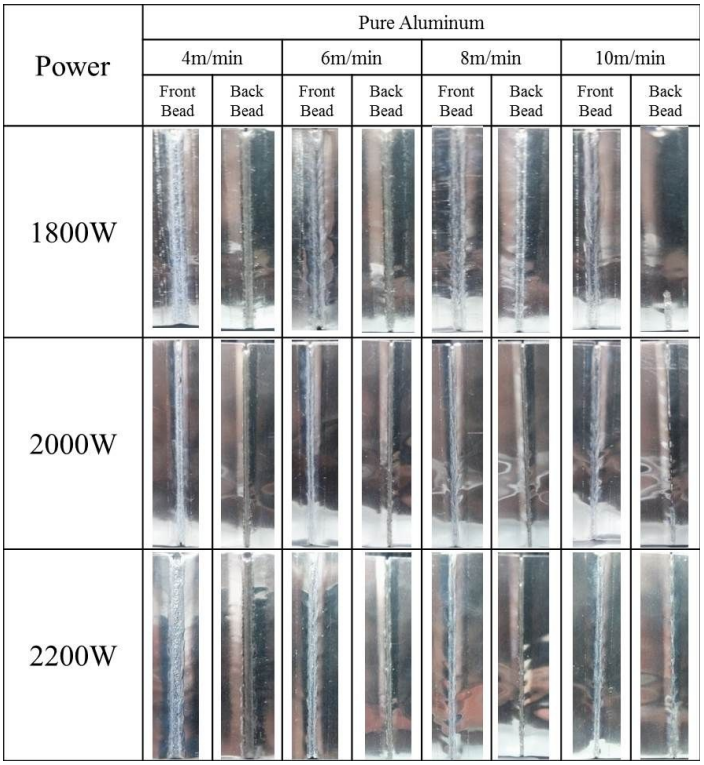
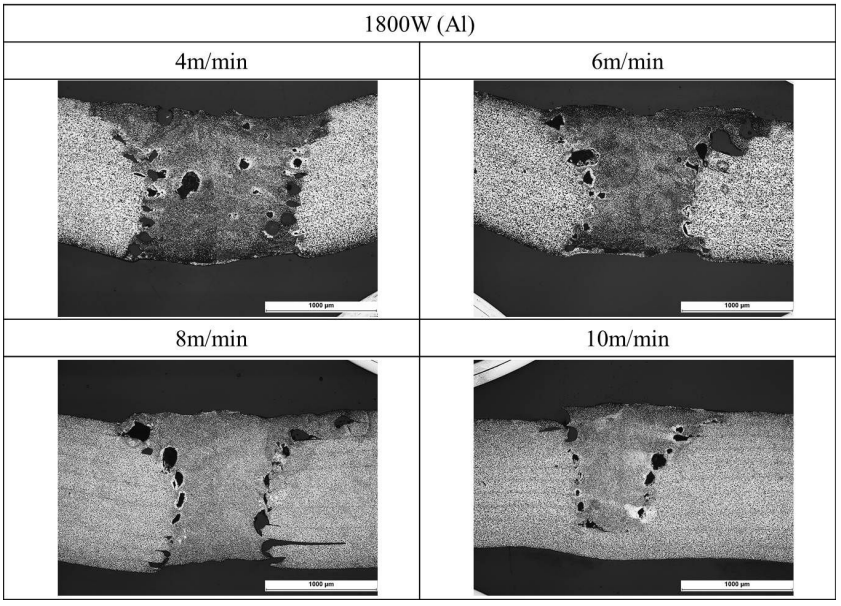
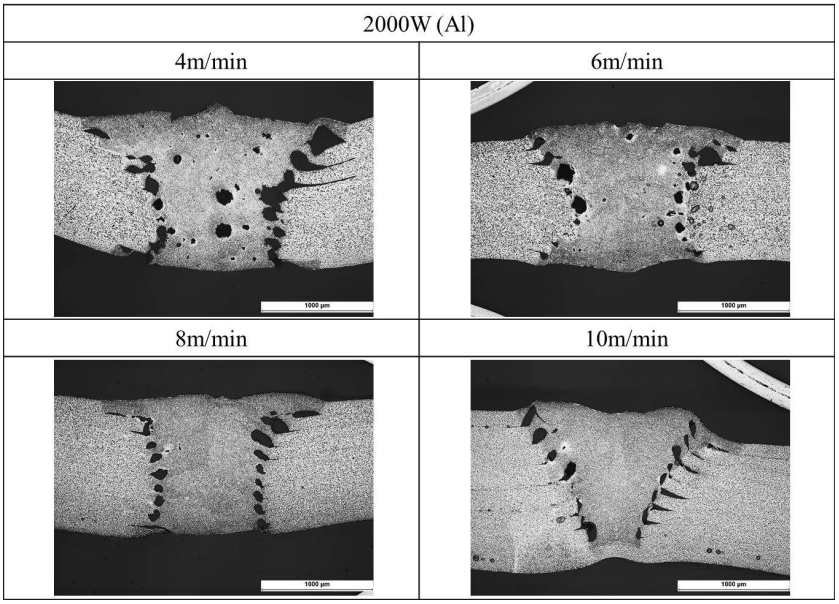


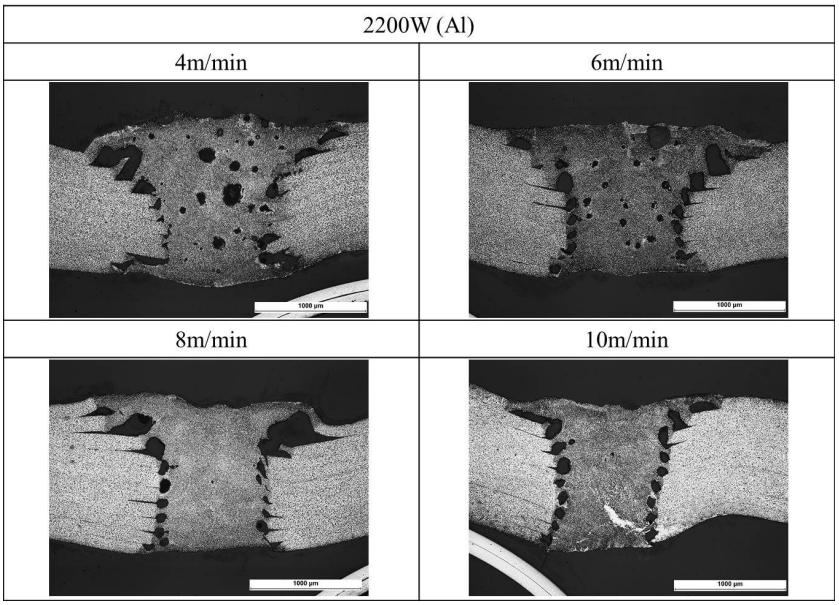
Fig. 4.1 Bead shape of Lap-Joint Welding of Al thin plate



(A) Cross-section of welding zone after Laser Welding (Al, 1800W)



(B) Cross-section of welding zone after Laser Welding (Al, 2000W)



(C) Cross-section of welding zone after Laser Welding (Al, 2200W)

Fig. 4.2 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters [Al, (A) 1800W, (B) 2000W, (C) 2200W]

4.1.2 비드폭비와 입열량 특성

두께가 100㎛인 순수 알루미늄 10장을 겹치기 용접 결과를 바탕으로 용접부의 전면비드 폭과 후면비드 폭의 비를 공정변수별로 측정하고, 식(2)로 계산하여 Fig. 4.3에 나타냈다. 그래프에 나타난 것과 같이 빔 이송속도가 증가함에 따라 후면비드의 폭이 열전도 손실에 의해 작아지기 때문에 비드폭비 값이 감소하였다. 레이저 출력 1800W와 2000W에서 빔 이송속도 10m/min일 때 시편 10장이 관통용접 되지 않았기 때문에 나타내지 않았다.

Fig. 4.3은 식 (3)으로 입열량을 계산하여 나타낸 그래프이다. 입열량은 전면비드 폭과 빔 이송속도의 함수로 표현된다. 그래프에 나타난 것과 같이 각각 출력을 변화시키고 레이저빔을 증가시키면서 겹치기 용접했을 때 레이저빔의 이송속도에 따라 입열량이 감소하고 있는 현상을 나타내고 있다. 레이저빔의 출력이 1800W이고 레이저빔의 이송속도가 4m/min일 때는 입열량이 1258.7J/cm^2이고, 출력이 2200W일 때는 입열량이 1359.8J/cm^2으로 108% 차이가 발생했다. 레이저빔의 이송속도가 증가하여 10m/min일 때 레이저빔의 출력이 1800W일 때는 입열량이 610.2J/cm^2이었고, 출력이 2200W일 때는 입열량이 672.8J/cm^2으로 110.3% 차이가 발생 했다. 레이저빔의 출력이 1800W일 때 레이저빔의 이송속도가 4m/min일 때 입열량이 1258.7J/cm^2에서 이송속도 10m/min으로 증가하면 입열량이 610.2J/cm^2으로 강하하는 이유는 레이저빔의 이송속도가 4m/min으로 상대적으로 느릴 경우에는 레이저빔과 시편과의 상호작용하는 시간이 길어지기 때문에 레이저빔의 에너지가 시편에 용입되는 양이 많기 때문이다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 10m/min으로 증가하면 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 짧아지면서 상대적으로 입열량이 감소했다.

레이저빔의 이송속도가 4m/min이고 레이저빔의 출력이 1800W일 때는 입열량이 1258.7J/cm^2이고, 레이저빔의 출력이 2000W일 때는 입열량이 1229J/cm^2으로 그 차이가 크지 않지만, 레이저빔의 출력이 2200W일 때는 입열량이 1359.8J/cm^2으로 다소 차이가 크게 나타났다. 이는 레이저빔의 초기출력이 크게 작용하는 것이 알루미늄과 같이 빛에 대한 반사도나 열전도도 및 전기전도도가 큰 소재에는 용접하는 영향이 크다는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 레이저빔의 이송속도가 증가하여 10m/min일 때 레이저빔의 출력이 1800W와 2000W일 경우에는 입열량이 각각 610.2J/cm^2과 588.9J/cm^2이었지만, 출력이 2200W일 때는 입열량이 672.8J/cm^2으로 다소 차이가 발생하는 것과 일관성이 있음을 알 수 있다.

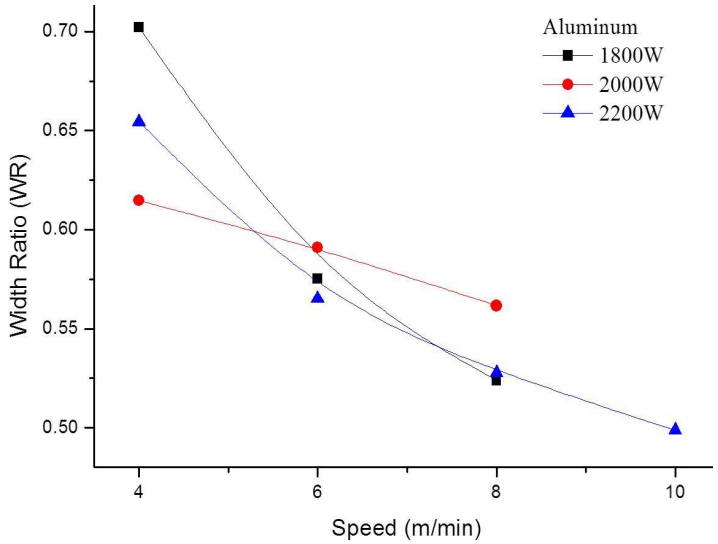


Fig. 4.3 Influence of Welding speed on the width ratio (Al)

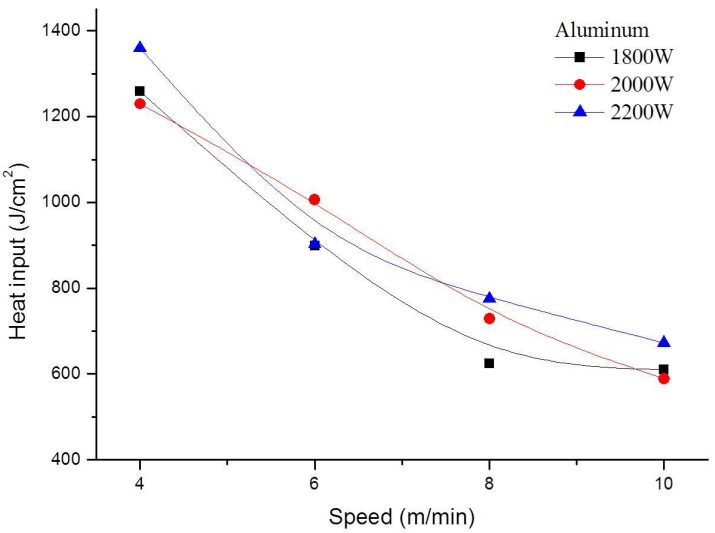


Fig. 4.4 Influence of Welding speed on the Heat input (Al)

4.1.3 인장강도 및 경도 특성

알루미늄 박판의 두께 100㎛인 시편 10장을 겹치기 용접한 후 용접부를 중심으로 인장시험편을 제작 후 출력별로 인장시험한 결과를 Fig. 4.5~4.7에 나타냈다.

레이저 출력이 1800W일 때 빔 이송속도 변화에 따른 인장강도 시험한 결과를 Fig. 4.5에 나타냈다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 10m/min으로 이 때 최대 인장강도 값은 25.32MPa이고, 단위폭당 인장강도 값은 14.31MPa/mm이다. 이와 같은 인장시험 결과는 앞에서 언급한 것처럼 레이저빔의 이송속도가 10m/min으로 용접했을 때는 10장 전부 겹치기용접이 되지 않은 상태이다. 레이저빔의 이송속도가 빠를 경우 시편과 레이저빔이 서로 상호작용하는 시간이 상대적으로 짧아 시편의 용접단면의 면적이 작아서 취성을 나타내는 단면적이 작기 때문에 나타나는 현상이다. 레이저빔의 출력이 1800W이고 시편 10장이 모두 겹치기 용접되었을 때 인장강도가 가장 큰 경우는 레이저빔의 이송속도가 8m/min일 때이고 이때 인장강도값은 20.93MPa이고 Fig. 4.4에 나타낸 입열량은 624.4J/cm^{2}이었다.

Fig. 4.6은 레이저 출력이 2000W일 때 빔 이송속도 변화에 따른 인장강도 시험한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 10m/min으로 최대 인장강도 값은 24.52MPa이고, 단위폭당 인장강도 값은 11.48MPa/mm이다. Fig. 4.6에 나타낸 인장강도 시험결과도 Fig. 4.5에서 설명한 것처럼 레이저빔의 이송속도가 10m/min일 때는 시편 10장이 모두 겹치기 용접된 것이 아니다. 레이저빔 출력이 2000W이고 두께가 100㎛인 박판 10장이 겹치기 용접되었을 때 가장 큰 인장강도 강도값은 17.35MPa이었고, 이때 레이저빔의 이송속도는 8m/min이고, Fig. 4.4에 나타낸 입열량은 728.6J/cm^{2}이었다.

Fig. 4.7은 레이저 출력이 2200W일 때 빔 이송속도 변화에 따른 인장강도 시험한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 8m/min으로 최대 인장강도 값은 17.88MPa이고, 단위폭당 인장강도 값은 8.41MPa/mm이다. 본 실험 조건에서 레이저빔의 출력이 가장 큰 경우 레이저빔과 시편과의 열적 상호작용 때문에 발생하는 취성영역의 면적이 넓어져 단위면적당 인장강도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 용접부위의 면적이 넓어지면 인장강도가 작아지는 이유는 시편이 용융되었다가 다시 냉각하면서 조직이 조대해지면 조직간의 결합력이 감소하기 때문에 인장강도가 감소하는 것으로 생각된다. 또 한 가지 인장강도가 감소하는 요인으로는 용접단면을 나타낸 Fig. 4.2에 나타낸 것처럼 박판 사이의 간극에 유입되는 공기

가 용접단면에 유입되면서 발생한 기공의 영향으로 유효접촉면적이 감소하면서 나타는 현상일 수도 있다고 생각된다. 또 한편으로 고려 해 볼 수 있는 사항은 앞에서 2.2.1과 2.3.2에 설명 한 것처럼 레이저의 고밀도 에너지가 알루미늄과 상호작용하면서 용융된 용융물에 공기 중에 혼입된 수소의 영향으로 용접단면에 기포가 발생하여 인장강도가 강하 할 수도 있다고 생각된다.

Fig. 4.8은 공정변수별로 모두 관통용접된 2200W일 때의 경도분포를 나타냈다. 겹치기 용접 후 시편 표면으로부터 200㎛ 아랫부분의 횡단면 경도분포를 측정한 결과이다. 용접된 부분의 경도는 약 36Hv에서 45Hv의 경도값을 나타내고 있다. 모재의 경도가 15Hv에서 20Hv 내외인 것을 고려하면 약 2~3배 정도 경도값이 증가되었다. 용접된 부분의 경도가 크게 측정되었던 것은 용융된 부분이 냉각되면서 조직이 성장하면서 조대해져 나타난 현상으로 생각된다. 레이저빔의 이송속도가 상대적으로 늦은 4m/min으로 느릴 경우가 가장 인장강도가 높은 이유는 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 상대적으로 길어지면서 시편이 유입되는 에너지가 많아져 용융되었던 시편의 체적이 증가하면서 냉각하면서 응고하는 도중에 조직이 조대해진 성분이 많아져 나타는 현상이 아닌가 생각한다.

Fig. 4.9는 용접된 용융단면의 중앙부를 따라 깊이방향으로 경도값을 측정한 결과이다. 그래프에 나타난 것과 같이 빔 이송속도가 느릴수록 종방향으로 측정한 경도값이 높게 나타났다. 빔 이송속도가 빠를수록 상대적으로 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 충분하지 않아 과입열량으로 냉각하면서 응고할 때 조직의 성장이 상대적으로 작기 때문에 나타나는 현상으로 판단한다. 레이저빔의 이송속도가 4m/min과 8m/min은 시편의 용접의 상부표면으로부터 용접 아랫방향으로 용접부의 중앙부분의 경도를 측정한 값이 크게 변하지 않고 있으나 레이저빔의 이송속도가 6m/min과 10m/min은 경도 측정값이 크게 요동치고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 이유로 생각 해 볼 수 있는 것은 측정오차 일 수도 있고, 레이저용접단면의 키홀이 형성되어 서로 용융물이 교반하면서 키홀의 불안정성에 기인한 조직의 불균형일 수도 있다고 생각된다.

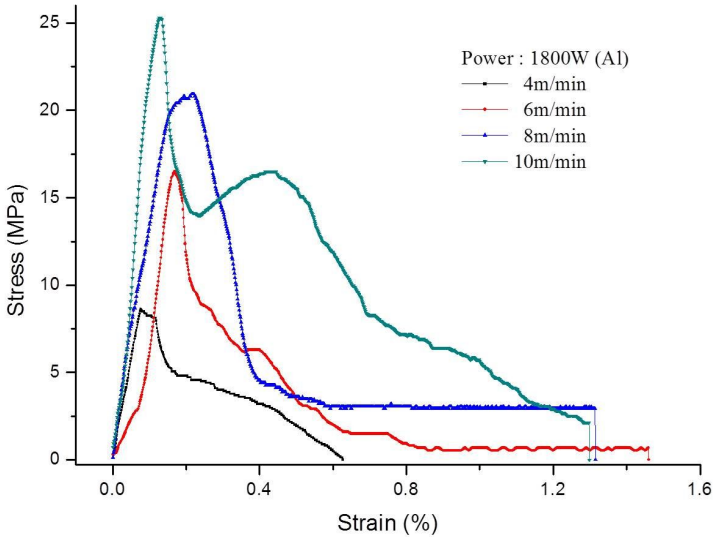


Fig. 4.5 Stress-Strain curve of Laser Welding (Al, 1800W)

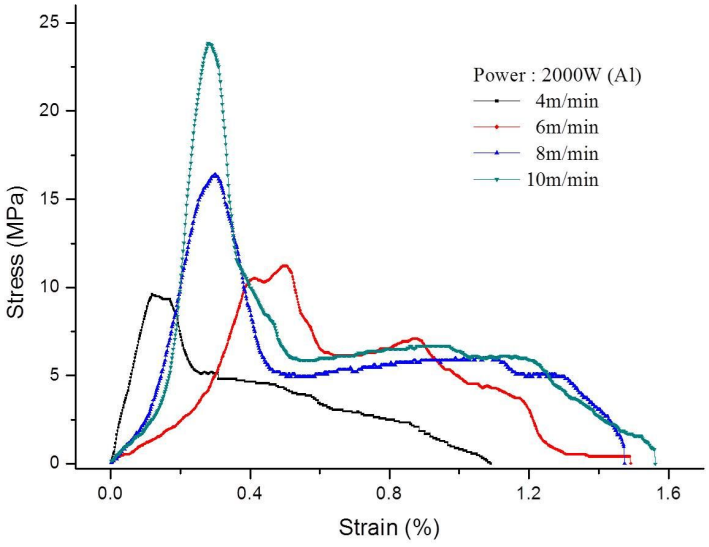


Fig. 4.6 Stress-Strain curve of Laser Welding (Al, 2000W)

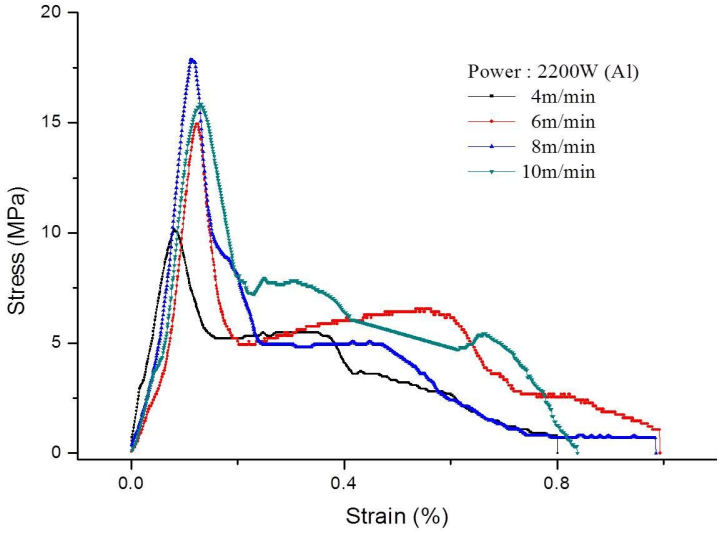


Fig. 4.7 Stress-Strain curve of Laser Welding (Al, 2200W)

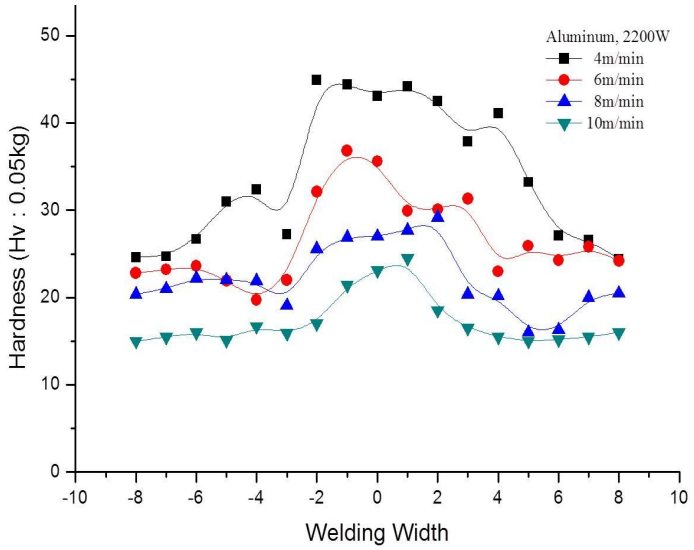


Fig. 4.8 Welding width Hardness to variation of welding process parameters (Al, 2200W)

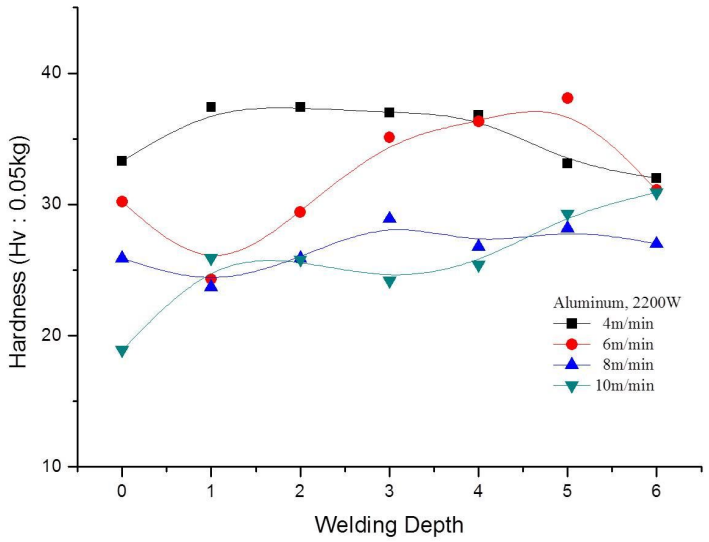


Fig. 4.9 Welding depth Hardness to variation of welding process parameters (Al, 2200W)

4.2 순수 니켈 연속파형 파이버 레이저 용접특성

4.2.1 공정변수별 겹치기 용접특성

4.1절 순수 알루미늄과 같은 공정변수로 순수 니켈을 연속파형 파이버 레이저로 겹치기 용접 후 전면비드와 후면비드를 Fig. 4.10에 나타냈고, 용접단면은 Fig. 4.11에 나타냈다. 순수 니켈도 순수 알루미늄과 마찬가지로 1800W와 2000W일 때는 관통용접이 되지 않았다. Fig. 4.10과 Fig. 4.11에 나타난 것과 같이 순수 니켈에서는 기공 때문에 발생하는 용접 결함이 발생하지 않았다.

Fig. 4.11에 나타난 것과 같이 Fig. 4.2 알루미늄과는 다르게 후면비드 폭이 전면비드 폭보다 더 크게 형성된 것을 확인할 수 있다. 니켈의 경우 알루미늄보다 열전도율이 약 3배 정도 낮아서 알루미늄처럼 열이 신속하게 시편의 모재로 열전도되어 손실되지 않고 용접부에 레이저 에너지에 의한 열이 응집되어 있기 때문이라고 생각된다. 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하면서 발생한 에너지가 용접단면 내에 융합·용융되면 용융단면 내에서 열이 전도되어 용접단면의 후면부의 용융면적이 증가되고 전면비드의 폭보다 크게 형성된 것으로 판단된다.

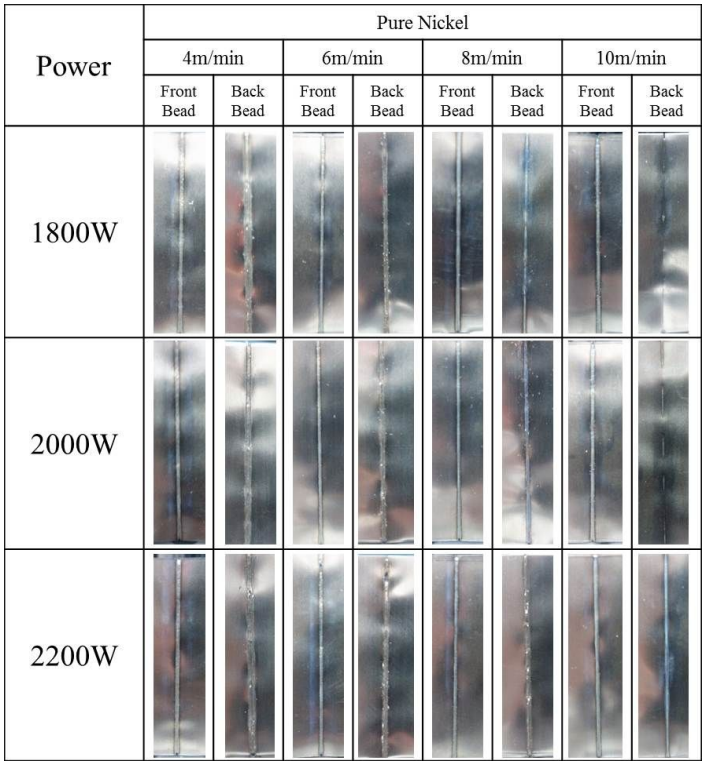
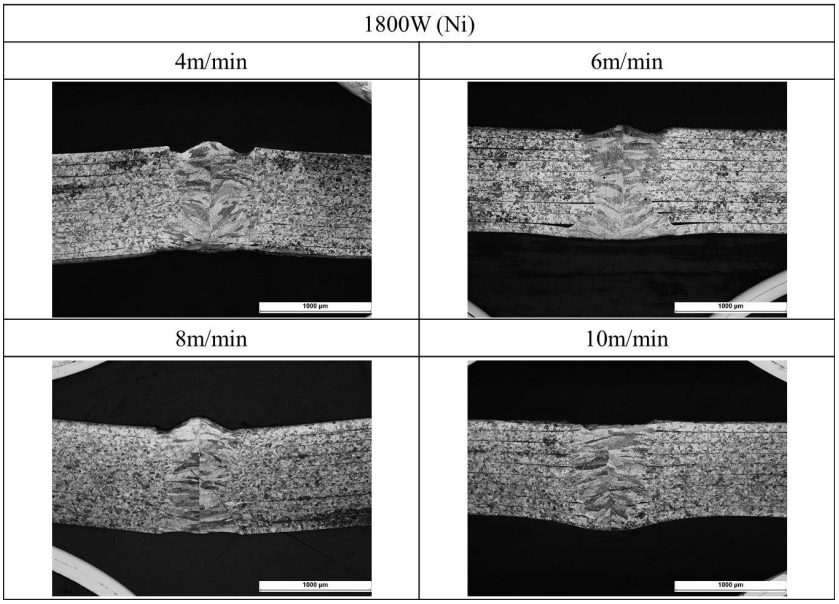
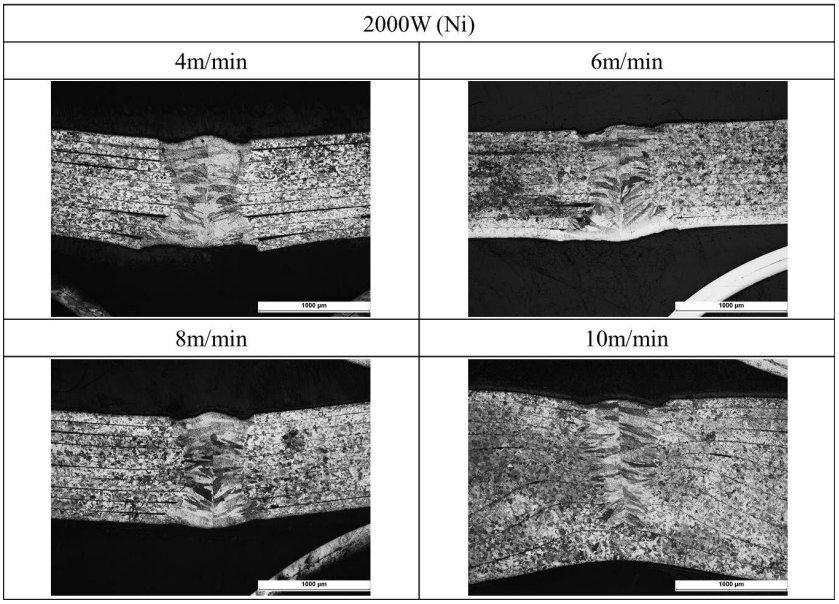


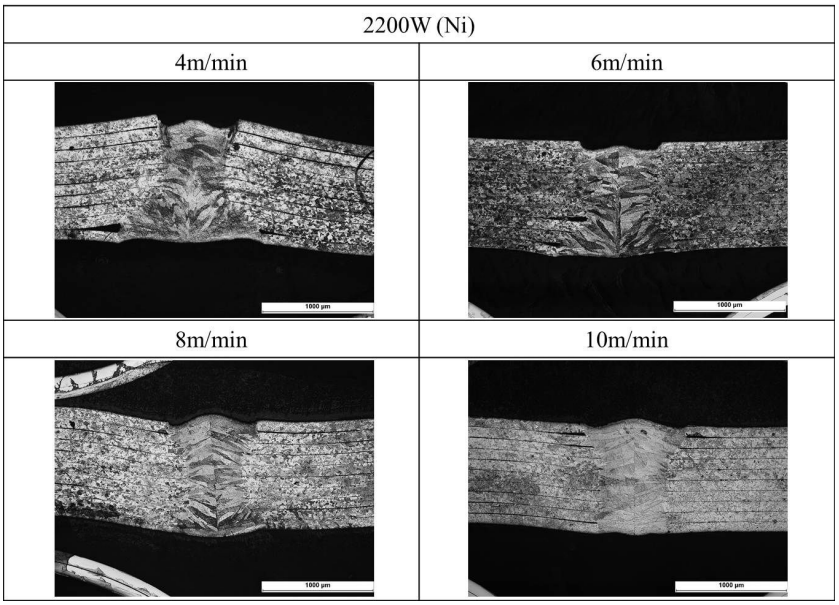
Fig. 4.10 Bead shape of Lap-Joint welding of Ni thin plate



(A) Cross-section of welding zone after Laser Welding (Ni, 1800W)



(B) Cross-section of welding zone after Laser Welding (Ni, 2000W)



(C) Cross-section of welding zone after Laser Welding (Ni, 2200W)

Fig. 4.11 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters [Ni, (A) 1800W, (B) 2000W, (C) 2200W]

4.2.2 비드폭비와 입열량 특성

두께가 100μm인 순수 니켈 10장을 겹치기 용접한 결과를 바탕으로 용접부의 전면비드 폭과 후면비드 폭의 비를 공정변수별로 측정하고, 식(2)로 계산하여 Fig. 4.12에 나타냈다. 앞에서 언급한 것처럼 빔 이송속도가 증가함에 따라 후면비드의 폭이 열전도 손실에 의해 작아지기 때문에 비드폭비 값이 증가하였다. 순수 니켈도 레이저 출력이 1800W와 2000W에서 빔 이송속도 10m/min일 때 10장이 관통용접되지 않았기 때문에 그래프에 나타내지 않았다. 알루미늄보다 비드폭비 값은 낮지만 알루미늄과 비슷한 경향성을 나타내고 있다. 알루미늄과 니켈의 폭비를 비교하기 위해 Fig. 4.13에 나타냈다. 알루미늄의 전기전도도는 $0.37x10^6 cm^{-1}\Omega^{-1}$이고 니켈의 전기전도도는 $0.143x10^6 cm^{-1}\Omega^{-1}$ 으로 알루미늄의 전기전도도가 니켈 보다 높다. 열전도도 알루미늄이 2.37 $W{\cdot}cm^{-1}K^{-1}$이고 니켈은 $0.907W{\cdot}cm^{-1}K^{-1}$ 로 열전도도 알루미늄이 니켈보다 보다 크다. 철의 전기전도도가 $0.0993x10^6 cm^{-1}\Omega^{-1}$이고 열전도도가 0.8020907$W{\cdot}cm^{-1}K^{-1}$으로 전기전도도는 낮고 열전도도가 높은 것에 비교하면, 알루미늄과 니켈의 용접이 쉽지 않다는 것을 나타내고 있다. 니켈과 알루미늄을 비교하면 알루미늄의 전기전도도와 열전도도가 크기 때문에 순식간에 열이 모재부위로 확산되어 용융풀이 형성되지 않고 손실될 수 있음을 나타내고 있다. 이와 같은 이유로 레이저 빔의 출력이 1800W이고 레이저빔의 이송속도가 4m/min일 때 용접부의 전면비드 폭이 알루미늄의 경우 2.145mm이고 니켈의 경우에는 0.808mm였다.

Fig. 4.14는 식 (3)으로 입열량을 계산하여 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난 것과 같이 출력별로 비슷한 경향성을 나타내는 이유는 레이저 출력이 고정되고, 빔 이송속도가 증가함에 따라 레이저 빔과 시편이 상호작용하는 시간이 짧아져 비드폭이 용접단면 폭이 감소하기 때문에 입열량이 감소하고 있다. 레이저빔의 이송속도가 4m/min이고 출력이 1800W일 때 입열량은 3461.5J/cm^2이고, 2000W일 때의 입열량은 3562.9J/cm^2으로 입열량의 차이가 101.4J/cm^2으로 크지 않으나 레이저빔의 출력이 2200W일 때는 입열량이 4477.6J/cm^2으로 2000W에 비교하여 914.7J/cm^2 증가하였다. 이는 레이저 용접할 때 순간출력이 시편의 열전도율이나 전기전도도를 고려할 때 중요한 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 레이저빔의 이송속도를 증가시켜 10m/min으로 하면 출력이 1800W일 때는 입열량이 1321.9J/cm^2이고, 2000W일 때는 1425.2J/cm^2, 2200W일 때는 1396.8J/cm^2으로 큰 차이가 발생하지 않았다. 이는 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 레이저빔이 시편에 조사하는 시간이 단축되

어 모재로 순식간에 열이 전달되면서 나타는 현상으로 생각된다.

알루미늄과 니켈의 열전도율과 전기전도도의 영향 때문에 발생하는 입열량의 변화를 고찰하기 위해 레이저빔의 출력이 2200W일 때의 입열량 변화를 Fig. 15에 나타냈다.

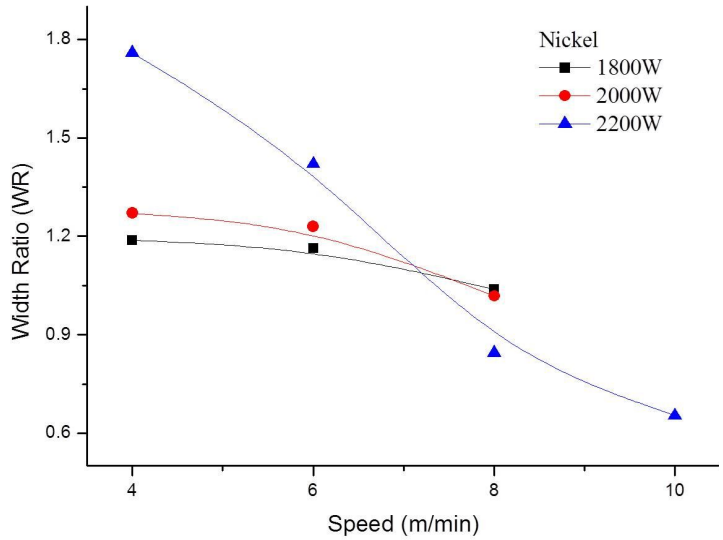


Fig. 4.12 Influence of Welding speed on the width ratio (Ni)

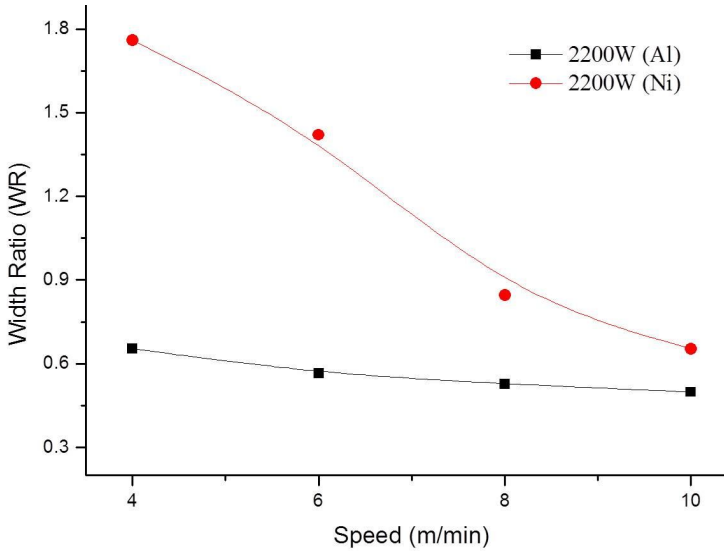


Fig. 4.13 Influence of Welding speed on the width ratio (Al and Ni Comparison 2200W)

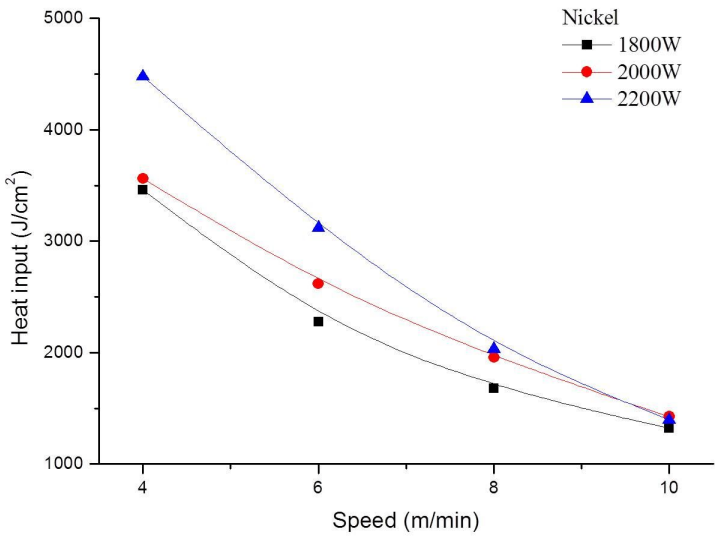


Fig. 4.14 Influence of Welding speed on the Heat input (Ni)

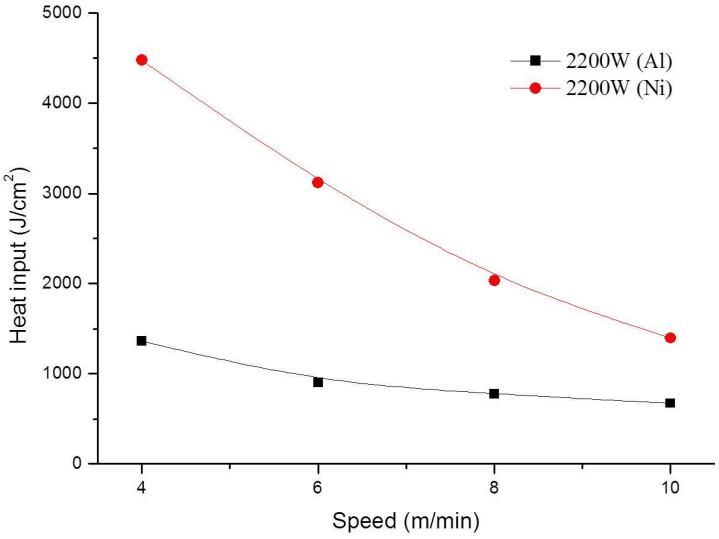


Fig. 4.15 Influence of Welding speed on the Heat input (Al and Ni Comparison 2200W)

4.2.3 인장강도 및 경도 특성

니켈 박판의 두께 100㎛인 시편 10장을 겹치기 용접한 후 용접부를 중심으로 인장시험편을 제작 후 출력별로 인장시험한 결과를 Fig. 4.16~4.18에 나타냈다.

레이저 출력이 1800W일 때 빔 이송속도 변화에 따른 인장강도 시험한 결과를 Fig. 4.16에 나타냈다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 8m/min으로 이 때 최대 인장강도 값은 175.23MPa이고, 단위폭당 인장강도 값은 227.9MPa/mm이다. Fig. 4.17는 레이저 출력이 2000W일 때 빔 이송속도 변화에 따른 인장강도 시험한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 4m/min으로 최대 인장강도 값은 170.11MPa이고, 단위폭당 인장강도 값은 202.03MPa/mm이다. Fig. 4.18은 레이저 출력이 2200W일 때 빔 이송속도 변화에 따른 인장강도 시험한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 10m/min으로 최대 인장강도 값은 189.34MPa이고, 단위폭당 인장강도 값은 200.23MPa/mm이다. 인장시험 결과에서 그래프에 계단모양이 형성 된 것은 인장시험 할 때 10장으로 구성된 박판이 동시에 절단되지 않고 일부가 절단되면서 나타는 현상이다. 인장강도를 나타낸 결과값을 비교 분석 해보면 레이저 빔의 출력을 작게 하여 용접했을 때 용접단면이 냉각되면서 발생하는 조직의 조대한 부분이 작아 인장응력이 크게 측정되었다. 인장시험의 결과만을 비교 했을 때 인장응력값이 커야하는 부품을 레이저 용접할 때에는 가급적이면 허용하는 범위 내에서 레이저빔의 출력을 작게 하여 용접하는 것이 바람직하다고 생각된다.

Fig. 4.19은 공정변수별로 모두 관통용접된 2200W일 때의 경도분포를 나타냈다. 겹치기 용접 후 시편 표면으로부터 200㎛ 아랫부분의 횡단면 경도분포를 측정한 결과이다. 용접된 부분의 경도는 약 120Hv에서 148Hv의 경도값을 나타내고 있다. 모재의 경도가 158Hv로 용접부에서 경도값이 약간 감소되었다. 모재에 비하여 경도값이 감소되는 이유는 레이저빔으로 용접할 때 시편이 용융되면서 일부 조성분이 기화되어 용융표면 냉각되면서 응고될 때 조직의 밀도가 감소되어 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 4.20은 용접된 용융단면의 중앙부를 따라 깊이방향으로 경도값을 측정한 결과이다. 빔 이송속도가 느릴수록 경도값이 높게 나타났다. 레이저빔의 이송속도가 10m/min으로 본 실험 조건에서 비교적 빠른 경우에는 전면비드에서부터 후면비드까지 측정한 경도값이 비록 작지만 일정하게 나타났다. 레이저빔의 이송속도가

4m/min일 때는 전면비드 쪽에서 측정한 경도값이 157Hv이고 후면비드 쪽에서 측정한 경도값은 131Hv으로 26Hv의 차이가 발생하였다. 레이저빔의 이송속도가 6m/min일 경우에는 전면비드 쪽에서 측정한 경도가 138Hv이고 후면비드 쪽에서 측정한 경도는 108Hv로 20Hv차이가 발생하였다. 이는 레이저빔이 직접 조사되는 전면비드와 레이저빔과 상호작용으로 용융된 열이 모재로 확산되면서 손실되는 후면비드와의 냉각속도 차이에서 오는 것이라고 생각된다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 10m/min으로 증가하면 전면비드 쪽의 경도는 123Hv이고 후면비드 쪽의 경도값은 122Hv 경도값의 차이가 불과 1Hv에 불과하다. 이는 레이저빔의 이송속도가 빨라지면서 전면비드와 후면비드에서 모재로 열이 전달되어 손실되는 속도가 비슷하기 때문인 것으로 판단된다.

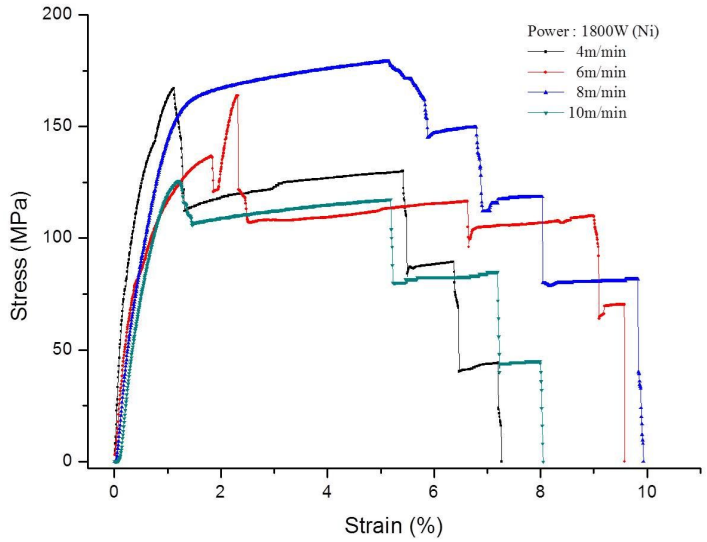


Fig. 4.16 Stress-Strain curve of Laser Welding (Ni, 1800W)

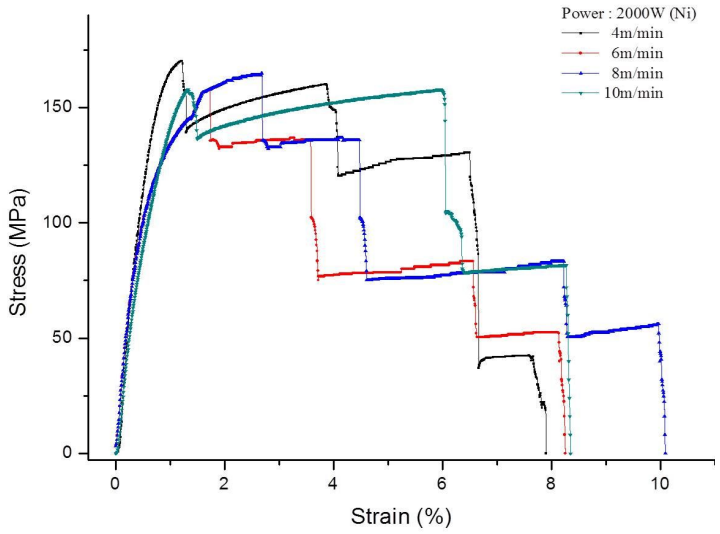


Fig. 4.17 Stress-Strain curve of Laser Welding (Ni, 2000W)

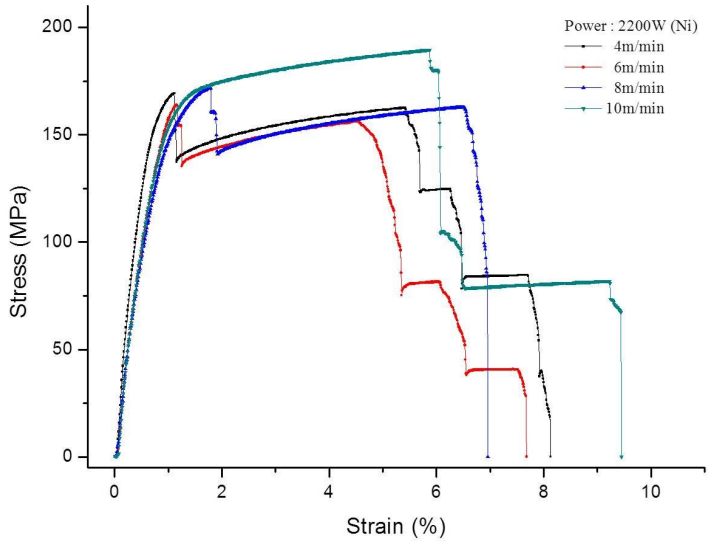


Fig. 4.18 Stress-Strain curve of Laser Welding (Ni, 2200W)

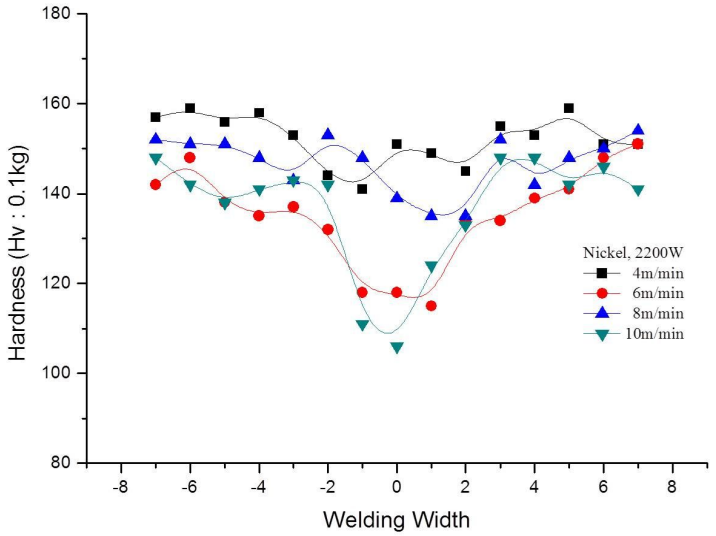


Fig. 4.19 Welding width Hardness to variation of welding process parameters (Ni, 2200W)

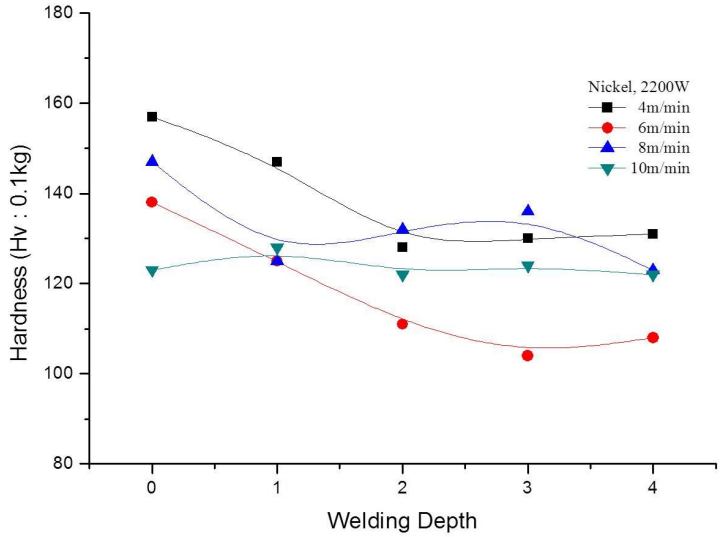


Fig. 4.20 Welding depth Hardness to variation of welding process parameters (Ni, 2200W)

4.3 연속파형과 펄스파형 파이버 레이저 용접특성 비교 (Al)

연속파형 파이버 레이저와 펄스파형 파이버 레이저로 순수 알루미늄 레이저 용접을 한 선행연구와 비교하였다. 펄스파형으로 용접한 알루미늄의 시편은 두께가 30㎛로 박판 40장 겹치기 용접하였다.[53]

Fig. 4.21은 펄스파형 레이저로 용접 후 공정변수별로 용접부 단면분석을 나타내고 있다. 연속파형 레이저로 겹치기 용접을 하였을 경우 용접단면에 크기가 작은 기공들이 발견된다. 하지만 펄스파형으로 용접하였을 경우 용접단면에 커다란 기공이 포획되어 있는 것이 서로 다르게 관찰되고 있다. 연속파형으로 용접을 하면 용융풀의 동적인 교반운동으로 기포가 잘게 부서지면서 포획되지만, 펄스파형의 기공은 기공이 상승하면서 응고될 때 뒤따라 조사되는 펄스파형의 영향으로 새롭게 발생한 기공이 결합되면서 기공이 크게 형성된 것으로 생각된다. 대체적으로 연속파형의 용접단면의 종횡비가 펄스파형의 용접단면 종횡비보다 작게 형성되어 모재부위로 열전도에 의한 열손실량이 많은 것을 나타내고 있다. Fig. 4.2와 Fig. 4.21을 보면 공정변수는 다르지만 연속파형의 경우 모재와 열영향부에서의 기공이 많이 발생한 것을 볼 수 있다. 이에 비해 펄스파형은 용접단면의 내부에서 기공결함이 많이 발생하고 있다.

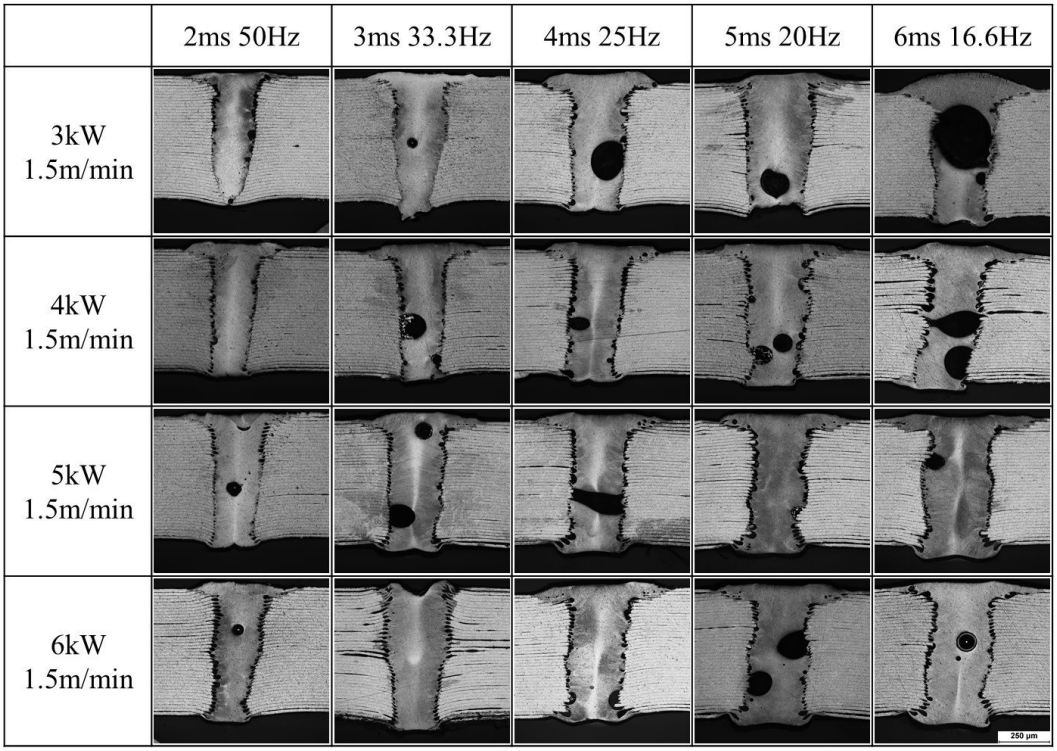


Fig. 4.21 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters (Al, 30㎛, Pulse Wave Fiber Laser Welding) [53]

제 5 장 결 론

순수 알루미늄과 순수 니켈을 연속파형 파이버 레이저로 박판 100㎛ 10장을 겹치기 용접하였다. 겹치기 용접의 공정변수를 변화시켜 비드폭비, 입열량, 금속학적 분석과 인장강도 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연속파형 레이저로 순수 알루미늄과 순수 니켈을 공정변수별로 박판 겹치기 용접시 레이저 출력 1800W, 2000W는 빔 이송속도 10m/min일 때 10장 관통용접이 되지 않았다.

2. 순수 알루미늄과 순수 니켈의 전면비드 폭과 후면비드 폭 측정결과 순수 니켈은 빔 이송속도가 느릴 경우 후면비드 폭이 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 레이저빔을 이용한 용접은 급가열, 급냉각으로 이루어 지는데, 알루미늄이 니켈보다 열 전도도가 더 높기 때문에 열이 잔류하는 시간이 니켈보다 짧기 때문인 것으로 판단된다.

3. 인장강도 시험한 결과 순수 알루미늄의 경우 1800W에서 빔 이송속도 10m/min일 때 25.32MPa로 공정변수중 가장 큰 인장강도 값을 얻었다. 순수 니켈의 경우 2200W에서 빔 이송속도 10m/min일 때 189.34MPa로 공정변수중 가장 큰 인장강도 값을 얻었다.

4. 미세조직 분석 결과 순수 알루미늄은 기공결함이 많이 발생하였지만, 공정변수별 빔 이송속도가 증가함에 따라 용접부 중앙에서의 기공결함은 감소하는 결과를 나타냈다.

5. 연구 결과 순수 알루미늄을 레이저 용접시 용접부 결함을 없애는 방법에 대한 연구는 더 진행되어야 할 것이다.

Reference

(1) Park, S. Y. and Kim, S.W., "Nickel-metal hydride battery technology of electric vehicles," The Korean Physical Society, Vol. 8, No. 4, pp. 1-16, 1999.

(2) Yoo, S. J., 2005, "The Occurrence of Weld-defects and Its Preventive Methods in Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Lithium-ion Battery," A master's thesis, Korea Maritime University, Republic of Korea.

(3) Park, Y. W., Park, H., Rhee., Park, Y. W., and Park, H., "A Study of Quality Monitoring System for Manufacturing Process Automation during Laser Tailored Blank Welding," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 3, No. 1, pp. 45~50, 2003.

(4) Korea institute of science and technology information, "The Study on bibliometric profiles of academic Li secondary batteries research," Next Generation Growth Engine Industry, pp. 1-32, 2004.

(5) Kim, H. W., 2005, viewed 13 February 2011, "System for hybrid cars ; review," retired scientists and engineers for advancement of technology, <http://www.reseat.re.kr/>.

(6) Lee, C. G., "Fundamentals of Ultrasonic Application," The Korean Society Mechanial Engineers, Vol. 38, No. 7, pp. 44-46, 1998.

(7) Kim, J. D., and Kim, J. M., "Weldability of aluminum alloys by multi-wavelength laser beam," The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 567-574, 2007.

(8) Park, Y. B., Koo, J. S., and Goo, B. C., "A Study on the Friction Stir Welding Properties of A6005 Extruded Aluminum Panels," The Korean Society For Railway, Vol. 12, No. 4, pp. 512-517, 2009.

(9) Kim, J. M., Kim, I. H. and Choi, J. D., "Autogenous Welding Properties of Aluminum Alloys by Multi Wavelength Laser," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 22, No. 1, pp. 32-37, 2004.

(10) Park, Y. H., Kim, C. H., Kim, J. H., and Lee, S. H., "Development if Monitoring System for Weld Quality in Aluminum Laser Welding," The Korean Welding and Joining Society conference, pp. 149-151, 2006.

(11) M. Katoh., "Factors affecting mechanical properties of laser welded aluminium alloys," Welding International, Vol. 10, No. 10, pp. 771-777, 1996.

(12) Woods, R. A., "Hydrogen in Metals, ASM International Materials Park," Ohio, pp. 713-725, 1974.

(13) Cieslak, M.J., and Fuerschbach, "Metallurgical Transaction 19B," pp. 319-329, 1988.

(14) Steen, W. M., "Technical and economic comparison of laser technology with the conventional technologies for welding," PROCEEDINGS OF THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASERS IN MANUFACTURING, pp. 105~120, 1989.

(15) Korea institute of science and technology information, "Hybrid new power system," MCTNET, pp. 1-15, 2008.

(16) Hong, J. P., Jung, S. H., Won, T. H., and Kwon, S. J., "A Study on Ultrasonic Welding System Design," The Korean Institute of Power Electronics annual conference, pp. 164-166, 2008.

(17) Yoo, C. D., "Design of Ultrasonic Welding Horn", The Korean Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 1, pp. 9-11, 2008.

(18) Jeong, H. S., "Fundamentals of Ultrasonic Welding", The Korean Welding and Joining Society, Vol. 15, No. 6, pp. 24-31, 1997.

(19) Kim, C. O., Sohn, H. J., and Kim, S. J., "Effects of Welding Condition on Hardness and Micro structure of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate," The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 56-64, 2011.

(20) Kwon, S. W., Kong, Y. S., and Kim S. J., "High Temperature Creep Rupture Characteristics of Ni-Based Alloy718 Jointed by Friction Welding," The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 22, No. 6, pp. 58-63, 2008.

(21) Song, K. H., and Kazuhiro, N., "Development of Microstructure and Mechanical Properties of Hybrid Friction-stir-welded Ni-Base Superalloy," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 29, No. 5, pp. 545-551, 2011.

(22) Vicente, A. V., Jose, R. B., and Wagner, D. R., "Pulsed Nd:YAG Laser welding of Ni-alloy Hastelloy C-276 foils," Physics Procedia, Vol. 39, pp. 569-576, 2012.

(23) Hwang, C. Y., Yang, Y. S., and Yoo, Y. T., "Characteristics on Sandwich Panel Welding of a Ni Thin Plate and Porous Ni Thin Plate," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 4 pp. 547-555, 2012.

(24) Kim, S. W., and Kim, S. H., "Effects of the Chemical composition on the Depth of Weld in Electron Beam Welding of Aluminum Alloys," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 5, pp. 433-435, 2008.

(25) Lee, K. D., "Laser-Arc Hybrid Welding Process of Aluminum Alloy," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 22, No. 2, pp. 23-27, 2004.

(26) Kim, J. D., Lee, J. H., and Kim, K. C., "Welding Characteristics of Aluminized Steel Sheet by Nd:YAG Laser(1)," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 25, No. 4, pp. 403-409, 2007.

(27) Paleocrassas, A. G., and Tu, J. F., "Inherent instability investigation for low speed laser welding of aluminum using a single-mode fiber laser," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pp. 1411-1418, 2010.

(28) Yoon, J. W., "Laser Welding of Aluminum Alloys," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 18, No. 2, pp. 20-26, 2000.

(29) Kim, T. J., Byun, Y. B., Joe, K. Y., Cho, S. M., and Kim, C. U., "The study of variable polarity AC pulse GMA welding system," The Korean Institute of Power Electronics, pp. 665-668, 2002.

(30) Yoon, J. W., Lee, Y. S., Lee, M.Y., and Jeong, B. H., "Study on the mechanical properties of 5052 aluminum alloy laser welds," Journal of Korean Society of Laser Proessing, Vol. 6, No. 1, pp. 25-31, 2003.

(31) Na, G. D., Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Oh, Y. S., "A Study on the Welding Characteristics of Hastelloy C-276 using a Continuous Wave Nd:YAG Laser," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 5, pp. 481-491, 2008.

(32) Kwon, S. W., 2009, "A Study on Optimization of Friction Welding Conditions and Its Mechanical Properties in Ni-based Alloy 718 for Nuclear Power Plants," A Thesis for a Doctorate, Pukyong University, Republic of Korea.

(33) Bang, H. S., Kim, J. H., and Bang, H. S., "Investigation on Weldability of Aluminum Alloy by Arc, Laser, Hybrid(Laser+MIG) Welding," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 29, No. 4, pp. 389-391, 2011.

(34) Kim, C. H., Ahn, Y. N., and Lim, H. S., "Laser Welding of Automotive Aluminum Alloys," The Korean Welding and Joining Society, Vol. 29, No. 4, pp. 383-388, 2011.

(35) Choi, S. G., 2011, "A Study on the Thermal Degradation Behavior and Welding Characteristics of Ni-base Superalloy Hastelloy X," A master's thesis, Yeongnam University, Republic of Korea.

(36) 송민규, "리튬이온전지 소재기술 동향 분석 및 전망," 2012. <http://rd.kdb.co.kr/er/simplejsp.do>

(37) Lee, Y. M., Son, B. K., Seo, M. W., Lee, H. W., Choi, J. C., and Lee, Y. J., "Cell Chemistry and Design of Lithium Secondary Batteries for HEV," Journal of the KSAE, pp. 1595-1598, 2012.

(38) 김강회, 나도백, 김석진, 한국과학기술정보연구원 심층정보 분석보고서, "미래형 자동차," 2002. <http://www.reseat.re.kr>

(39) 조만, 한국과학기술정보연구원 기술동향 분석보고서, "니켈-수소 이차전지 기술동향과 연료전지에의 응용," 2003. <http://www.reseat.re.kr>

(40) 김경연, LG주간경제 2003년 2월 12일, 26-30.

(41) 강정화, 해외경제연구소 산업투자조사실연구원 산업리스크 분석보고서, "리튬 이차전지 산업 동향," 2011. <http://keri.koreaexim.go.kr/>

(42) 조만, 한국과학기술정보연구원 기술현황 분석보고서, "리튬이차전지의 현황과 전망," 2010. <http://www.reseat.re.kr>

(43) Kang, J. I., 2005, "Nd:YAG laser weldability of aluminum alloys," A master's thesis, Dongeui University, Republic of Korea.

(44) Nakashiba, S. I., Okamoto, Y., Sakagawa, T., Takai, S., and Okada, A., "Micro-welding of Copper Plate by Frequency Doubled Diode Pumped Pulsed Nd:YAG Laser," Physics Procedia, Vol. 39, pp577-584, 2012.

(45) Smith, W. F., 1994, "Structure and properties of engineering alloys (2nd Edition)," McGraw-Hill, Singapore.

(46) 이진희, LG건설 기술사, 2000. <https://www.technonet.co.kr>

(47) Nickel 200 and Nickel 201, SPECIAL METALS, <http://www.specialmetals.com>

(48) 위키백과, <http://ko.wikipedia.org/wiki>

(49) Shin, H. J., 2008, "A Study on Characteristics of Welding and Surface heat treatment of High temperature structural alloy steel by continuous wave Nd:YAG Laser," A Thesis for a Doctorate, Chosun University, Republic of Korea.

(50) Kim, D. H., 2012, "A study on Real-time Monitoring System for Laser Steel Sheets Welding," A Thesis for a Doctorate, Chosun University, Republic of Korea.

(51) Oh, Y. S., 2012, "A Study on the Characteristics of Welding and Cutting in the Automobile Steel Parts Using a Continuous Wave Fiber Laser," A Thesis for a Doctorate, Chosun University, Republic of Korea.

(52) Hwang, C. Y., 2012, "Welding characteristic of the secondary battery pole SS41 using Continuous-Wave Nd:YAG laser," A master's thesis, Chosun University, Republic of Korea.

(53) Yang, Y. S., 2012, "Research about lap joint welding characteristics of multiple thin plates of pure aluminum with a fiber laser," A master's thesis, Chosun University, Republic of Korea.

(54) 김도훈, 2009, 레이저가공학, 경문사.

(55) 이지환, 김병일, 이정중, 배차헌, 1993, 비철금속재료, 원창출판사.

(56) 한봉희, 2009, 금속재료, 교보문고.

(57) 김정근, 박노진, 이상봉, 2009, 금속조직학, 노드미디어.

(58) Lee, C. H., Chang, R. W., and Yoon, E. P., "Weldability of Al Alloys : Cracking and Porosity," The Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 10, No. 3, pp. 69-93, 1992.

(59) Yang, H. S., Lee, K. D., Kim, Y., and Park, K. Y., "Study on the porosity formation in the lap joint CW Nd:YAG laser welds of 6K21 aluminum alloy sheet," Vol. 11, No. 3, pp. 16-20, 2008.

(60) Kim, H. T., Hwang, S. H., and Nam, S. W., "Weldability of High Strength Aluminum Alloy," The Korean Institute of Metals and Materials, pp. 29-28, 1992.

(61) Kim, B. H., 2010, "Improvement of overlap welding characteristics for Al 6k21-T4 alloy by using laser weaving method," A master's thesis, Pusan National University, Republic of Korea.

(62) Takahashi, K., and Sato, S.,"Porosity reduction in CO2 laser welding of aluminum alloys-Influence of penetration, joint, oxygen gas and oxide films," Journal of Light Metal Welding and Construction, Vol. 37, No. 10, pp. 1-10, 1999.

(63) Seto, N., Katayama, S., and Matsunawa, A., "Porosity formation mechanism and suppression procedure in laser welding of aluminum alloys," Journal of Japan Welding Society, Vol. 18, No. 2, pp. 243-255, 2000.

(64) Kutusna, M., Suzuki, J., Kimura, S., Sugiyama, S., Yuhki, M., and Yamaoka, H., "CO2 laser welding of A2219, A5083 and A6063 aluminum alloys," Journal of the International Institute of Welding, Vol. 31, No. 2, pp. 126-135, 1993.

(65) Takahashi, K., Mehmetli, B., and Sato, S., "Influence of shielding gas and laser irradiation conditions on porosity formation in CO2 laser welding of aluminum alloy," Journal of Light Metal Welding and Construction, Vol. 35, No. 9, pp. 1-8, 1997.

(66) Takahashi, K., Kumagai, M., Katayama, S., and Matsunawa, A., "Aluminium alloy welding by CO2 laser using filler wire - AlN formation and aluminum alloy weldability," WELDING INTERNATIONAL, Vol. 15, No. 12, pp. 946-951, 2001.