



저작자표시 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.

- 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](#) 

2
0
1
3
년
2
월

석
사
학
위
논
문

F 다
i 층
b r 박
e 관
r 레이
레이저를
접치기
이용한
용접특성에
순수 관
수 알루미늄의
알루미늄의
연구

양
윤
석

2013년 2월
석사학위 논문

**Fiber 레이저를 이용한
순수 알루미늄의 다층 박판
접치기 용접 특성에 관한 연구**

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

양 윤 석

**Fiber 레이저를 이용한
순수 알루미늄의 다층 박판
접치기 용접 특성에 관한 연구**

**Research about lap joint welding characteristics of
multiple thin plates of pure aluminum with a fiber laser**

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

양 윤 석

**Fiber 레이저를 이용한
순수 알루미늄의 다층 박판
접치기 용접 특성에 관한 연구**

지도교수 유 영 태

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

양 윤 석

양윤석의 석사학위논문을 인준함

위원장 조 선 대 학 교 교 수 심 재 기 (인)

위 원 조 선 대 학 교 교 수 황 석 승 (인)

위 원 조 선 대 학 교 교 수 유 영 태 (인)

2012년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES	IV
LIST OF TABLE	VIII
ABSTRACT	IX
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	7
제 2 장 이론적 배경	11
2.1 알루미늄 특성	11
2.2 레이저 빔을 이용한 알루미늄 용접	15
2.2.1 레이저빔 용접 원리	15
2.2.2 레이저 용접 특징 및 장·단점	17
2.2.3 알루미늄 용접 결함	19
2.3 레이저 에너지 밀도 및 공정변수	29
제 3 장 실험방법 및 장치	31

3.1 실험 재료 및 장치	31
3.2 실험 방법	35
3.3 실험 분석 장치 및 방법	37
3.3.1 실험시험편 제작 및 준비	37
3.3.2 용접부 단면 광학 현미경 분석	37
3.3.3 경도 시험	37
3.3.4 인장 시험	37
제 4 장 결과 및 고찰	42
4.1 초음파 용접 특성	42
4.2 레이저빔 출력변화에 따른 용접 특성	47
4.2.1 공정변수별 중첩률 특성	47
4.2.2 전면, 후면비드 폭비 및 입열량 특성	50
4.2.3 인장강도 및 경도 특성	57
4.2.4 용접부 단면 미세조직 특성	66
4.3 레이저빔 펄스 조사시간변화에 따른 용접 특성	71
4.3.1 전면, 후면비드 폭비 및 입열량 특성	71
4.3.2 인장강도 및 경도 특성	75
4.3.3 용접부 단면 미세조직 특성	78

제 5 장 결 론 80

참 고 문 헌 81

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Principle of laser welding and keyhole formation in deep penetration welding	24
Fig. 2.2 Change in absorptance of nonferrous metal with wavelengths	25
Fig. 2.3 Equilibrium vapour pressure as function of temperature for various elements	25
Fig. 2.4 Solubility of hydrogen in aluminum (a) as a function of temperature and (b) at the melting point	26
Fig. 2.5 Schematic illustration of the mechanism of solidification cracking	27
Fig. 2.6 Schematic illustration of liquation cracking at the fusion line	28
Fig. 2.7 Parameters of pulse laser beam	30
Fig. 3.1 Fiber laser and lap welding experiment equipment	34
Fig. 3.2 Schematic of fiber laser processing system	34
Fig. 3.3 Tensile test specimens	36
Fig. 3.4 Hot mounting press	39
Fig. 3.5 Automatic grinder/polisher	39
Fig. 3.6 Micro analysis system of optic-materials	40
Fig. 3.7 Micro vickers hardness tester	40
Fig. 3.8 tensile test experiment equipment of lap welding	41
Fig. 4.1 Schematic of ultrasonic welding equipment	44

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4.2 Schematic of ultrasonic welding process	44
Fig. 4.3 Front bead and welding zone of ultrasonic welding	45
Fig. 4.4 Stress-Strain curve of ultrasonic welding	46
Fig. 4.5 Overlap Comparison of process parameters	48
Fig. 4.6 Variations of front bead width according to process parameters	48
Fig. 4.7 Variations of overlap according to process parameters	49
Fig. 4.8 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters	53
Fig. 4.9 Influence of welding process parameters on the pulse energy density	54
Fig. 4.10 Influence of welding process parameters on the width ratio	55
Fig. 4.11 Influence of welding process parameters on the heat input	56
Fig. 4.12 Stress-Strain curve of laser welding (3kW)	60
Fig. 4.13 Stress-Strain curve of laser welding (4kW)	60
Fig. 4.14 Stress-Strain curve of laser welding (5kW)	61
Fig. 4.15 Stress-Strain curve of laser welding (6kW)	61
Fig. 4.16 Stress-Strain curve of laser welding (2ms 50Hz)	62
Fig. 4.17 Stress-Strain curve of laser welding (3ms 33Hz)	62
Fig. 4.18 Stress-Strain curve of laser welding (4ms 25Hz)	63
Fig. 4.19 Stress-Strain curve of laser welding (5ms 20Hz)	63

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4.20 Stress-Strain curve of laser welding (6ms 16Hz)	64
Fig. 4.21 Welding width hardness to variation of welding process parameters	65
Fig. 4.22 Welding depth hardness to variation of welding process parameters	65
Fig. 4.23 Microstructure photos of weld zone (3kW 5ms 20Hz)	67
Fig. 4.24 Microstructure photos of weld zone (3kW 6ms 16Hz)	67
Fig. 4.25 Microstructure photos of weld zone (4kW 2ms 50Hz)	68
Fig. 4.26 Microstructure photos of weld zone (4kW 6ms 16Hz)	68
Fig. 4.27 Microstructure photos of weld zone (5kW 2ms 50Hz)	69
Fig. 4.28 Microstructure photos of weld zone (5kW 6ms 16Hz)	69
Fig. 4.29 Microstructure photos of weld zone (6kW 2ms 50Hz)	70
Fig. 4.30 Microstructure photos of weld zone (6kW 6ms 16Hz)	70
Fig. 4.31 Front bead comparison of process parameters	72
Fig. 4.32 Influence of welding process parameters on the pulse energy density	72
Fig. 4.33 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters	73
Fig. 4.34 Variations of front bead width according to process parameters	73
Fig. 4.35 Influence of welding process parameters on the heat input	74
Fig. 4.36 Stress-Strain curve of laser welding (5kW 15Hz)	76
Fig. 4.37 Welding width hardness to variation of welding process parameters	76

LIST OF FIGURES(Continued)

Fig. 4.38 Welding depth hardness to variation of welding process parameters	77
Fig. 4.39 Microstructure photos of weld zone (5kW 2ms 15Hz)	79
Fig. 4.40 Microstructure photos of weld zone (5kW 6ms 15Hz)	79

LIST OF TABLES

Table 1.1 recent research of aluminum alloys and thin plate welding	9
Table 2.1 Physical properties of aluminum	13
Table 2.2 Comparison of the properties of pure aluminum and iron	14
Table 2.3 Surface reflexivity of metal materials	23
Table 3.1 Electrical conductivity and thermal conductivity of materials	33
Table 3.2 Chemical composition of pure aluminum(wt%)	33
Table 3.3 Mechanical properties of aluminum	33
Table 3.4 Experimental processing parameters	36

ABSTRACT

Research about lap joint welding characteristics of multiple thin plates of pure aluminum with a fiber laser

Yang, Yun-Seok

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

Dept. of Precision Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Energy consumption has increased because of the development of modern industrial society and population growth. According to it, increase issue of a crude oil price to the lack of the fossile fuel like oil and the environmental pollution problem like the green house effect due to the use of fossile fuel has come to the fore. In order to solve these problems, the motor industry is interested in developing eco-friendly cars. According to this, the battery industry focuses on developing the performance of secondary batteries which are the main driving source of eco-friendly cars. Conventionally an ultrasonic welding is applied to producing a series of secondary lithium-ion battery. It is disadvantageous that the existing ultrasonic welding process has constraints on material, shape, and measurement of the processed article. Another weak point is the short lifespan of horn. In order to complement these drawbacks, we employ the laser welding process based on a high density energy source which has better performance comparing with the ultrasonic welding process. The advantage of a laser welding process is that it can precisely weld small parts without deformation.

In this study, we analyze and compare the performance of ultrasonic welding and fiber laser welding on pure aluminium thin plates in a series of secondary lithium-ion

batteries, and replace the conventional welding method to the laser welding method. In order to apply lap joint welding to 40 sheets of 30 μ m thick thin plates, we tested with follows; 314.1J of energy, 0.2MPa of pressure, 80% of amplitude, 0.3s of welding time, 3~6kW of laser peak power, 2~6ms of pulse duration, and 15~50Hz of frequencies. As a result, the weld width of ultrasonic welding is 5mm, but that of laser welding is 1~1.5mm. Also, the cross-sectional size of a welding area and the depth of the welding area are affected by pulse duration and the peak power, respectively. As a result of tension test, the tensile strength is high when the pulse duration is short for low peak power, while the tensile strength is high when the pulse duration is long for high peak power.

Comparing with ultrasonic and laser welding methods, the value of tensile strength in tension test is higher in ultrasonic welding while welding width showed 45% better result with the laser welding. Also, it is difficult for a specimen to be attached to a welding cross-sectional area due to the limit of the ultrasonic welding while laser welding brings lots of blow holes at the welding area due to the characteristics of aluminium. Blow holes are caused by different solubility of hydrogen between solid state and liquid state of aluminium. Based on this result, the laser welding might replace the ultrasonic welding, but the methods to remove weld defects at laser welding should be improved.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

현대 산업사회의 발전과 인구의 점진적인 증가로 에너지 소비가 증가하여, 석유 등 화석원료 부족으로 인한 원유가격 상승이 문제가 되고 화석원료에 의한 지구온난화 등의 환경오염에 많은 문제가 발생하고 있다. 화석원료 부족 및 가격상승과 환경오염을 해결하기 위해 자동차 산업에서는 무공해 차량을 개발하기 위하여 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle : HEV), 전기자동차(Electric Vehicle : EV), 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle : FCEV)의 개발에 관심이 높아지고 있다. 특히 하이브리드 자동차 및 전기자동차를 실용화함으로써 화석연료에 의한 환경오염과 석유원료 부족을 해결하는 방안으로 고려하고 있다. 앞에서 말한 하이브리드 자동차 및 전기자동차들은 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 있다. 이와 같은 이유로 전지 산업에서는 친환경자동차의 동력원인 이차전지개발과 이에 대한 성능향상에 많은 관심이 집중되고 있다. 또 다른 이유로는 최근 모바일 관련 산업의 활성화로 인하여 각종 노트북, 태블릿PC, 스마트폰 등의 수요가 매우 급증하고 있으며, 그에 수반하여 모바일 기기를 구동하는 2차전지의 수요도 급속히 증가하고 있기 때문이다. 대부분의 모바일 기기에는 재충전이 가능한 2차 전지를 사용하고 있는데 2차 전지의 종류에는 납축전지, 니켈-카드뮴전지, 니켈-수소전지, 리튬-이온전지, 리튬-이온 폴리머전지, 리튬인산철전지 등 다양한 제품이 있다. 이렇게 많은 전지들이 사용되고 있는데 전지 개발에 핵심이 되는 부분이 고용량화와 경량화이다. 이 중에서도 에너지밀도 측면에서 리튬이온전지에 대한 관심이 고조되고 있고, 안정성 측면에서는 리튬인산철전지의 성능개선과 경량화에 연구가 집중되고 있다.

이렇게 이차전지가 많이 사용되면서 발생하게 된 문제는 국내외에서 스마트폰 및 노트북의 발화 및 폭발사고가 빈번하여 리튬 이차전지의 안전성에 대한 불안이 증가되는 것이다. 그에 따라 현재 주목받고 있는 전지가 리튬인산철전지이다. 특히 리튬계열 이차전지는 하이브리드 자동차, 전기자동차 등의 이동수단으로 그 쓰임이 점차 대용량화로 확대됨에 따라 고용량, 고온특성 강화, 고출력의 특성 뿐 아니라

열적 안정성에 대한 중요성이 더욱 더 커지게 되었다. 따라서 이차전지로 많이 사용되고 있는 전지 중 전기자동차와 하이브리드 자동차에 적합한 전지사양은 자동차의 동력원으로 사용되는 특수성 때문에 고에너지 밀도와 고출력 밀도 같은 전지의 기본적인 성능, 수명뿐 아니라 신뢰성과 안전성이 자동차용 전지를 결정하는 데 중요한 요인이 되고 있다.

리튬이온이차전지의 가장 큰 문제점은 리튬금속이 대기 중에 노출될 경우 리튬 고유의 활성으로 인한 화재 발생문제가 있기 때문에 전기자동차 및 하이브리드 자동차용으로는 안전성이 높은 리튬인산철전지에 관심이 더 많아 지고 있다.

리튬인산철전지의 대표적인 특징으로는 폭발의 위험성이 없다는 것이다. 그 이유는 인산철 자체가 고온에서 매우 안정한 화학적 특성을 가지고 있고 리튬인산철전지 자체도 분자결정체, 양극간의 화학반응 등이 안정하기 때문이다. 다시 말하면 화학적으로 안정하기 때문에 전해질에 의한 용해가 매우 적다는 것을 의미한다. 그에 비해 리튬이온이차전지는 액체성 전해질에 의해 극판의 활물질이 용해가 일어나고 극판의 용해에 의해 수명도 짧아지게 되고 이때 산소 가스가 발생하게 되면 산화작용이 일어나면서 마이크로 쇼트 서킷(Micro short circuit)이 일어나게 되면 열이 발생하기 때문에 폭발의 위험성이 있다. 하지만 인산철은 전해액에 의한 용해정도가 훨씬 적어 열 및 가스발생이 없어 폭발의 위험성이 적게 된다. 따라서 리튬인산철전지의 내구성 좋고 수명이 길어지게 된다. 그리고 고용량 또는 고전압을 만들기 위한 2~25개의 셀(Unit)을 직병렬연결이 가능함으로써 전기자동차, 무정전 시스템(UPS) 그리고 에너지 저장 시스템 등에 사용할 수 있기 때문에 하이브리드 자동차 및 전지자동차의 모터구동처럼 고출방전을 요하는 제품에는 리튬인산철전지가 리튬이온이나 폴리머전지에 비해 폭발의 위험성도 훨씬 적어 에너지가 큰 전지에서의 응용이 기대되고 있다. 다만 기존 리튬이온 배터리에 비해 무겁고 에너지 밀도가 다소 떨어진다는 단점이 있다.

리튬인산철전지의 에너지 밀도가 다소 떨어진다는 단점 때문에 하이브리드 및 전기자동차에 사용되는 이차전지 기술 개발 중 핵심적인 것은 고용량화하는 것이다. 그 이유는 이차전지의 셀을 기존보다 크게 만들고 많이 연결하면 자동차를 장시간 움직일 수 있는 동력은 얻을 수 있지만 자동차가 필요이상으로 커지게 되고 차체도 무거워져 문제가 발생한다. 이런 문제 때문에 하이브리드 및 전기자동차에 사용되는 이차전지는 정해진 크기에서 에너지 밀도를 높여야 한다. 따라서 에너지 밀도를 높여 고용량화하는 것이 이차전지 기술개발의 핵심인 것이다. 에너지 밀도

를 높이기 위해서 전극밀도의 개선, 고전압 셀 개발, 고용량 재료 개발 등의 연구도 활발히 이루어지고 있지만 에너지 밀도를 높이기 위해 가장 먼저 이루어져야 할 부분은 설계의 간결화, 접합부 및 패키징 기술 개발이라고 생각한다. 설계를 간결화 하게 되면 이차전지의 크기를 줄이거나 극판 사이즈를 키워 에너지 밀도를 높일 수 있고 접합부 및 패키징 기술 개발 또한 이차전지의 전기적인 손실을 줄여 출력 특성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 이렇게 에너지 밀도를 높이게 되면 기존에 요구 되면 사양에 비해 크기와 무게를 줄일 수 있어 자동차 경량화를 통한 연비향상 효과를 볼 수 있고 기존의 크기로 제작하게 된다면 더 용량이 크고 출력 특성이 좋은 이차전지를 얻을 수 있게 된다.

이차전지의 성능을 개선하기 위해서 이차전지에 사용되는 소재도 다양한데 그 중 전기전도도 및 경량화 특성이 뛰어난 알루미늄 소재를 많이 사용하고 있다. 알루미늄 소재는 자동차 및 리튬이온계열 이차전지에 효율을 극대화하기 위해서 제품의 경량화와 각종 기기의 소형 고기능화, 설계의 최적화에 사용된다. 특히 제품의 경량화는 경제적인 운전과 이동성 효율의 극대화로 인식되고 있으며, 경량화 구조의 품질, 신뢰성, 안전성 등을 고려할 때 알루미늄 및 그 합금의 적용 영역이 증가되고 있다. 리튬이온 계열 전지 또한 용량을 크게 함과 동시에 소형·경량화를 추구하기 위해서는 전지 케이스 및 극판의 박판화가 요구되고 그 사용재료 또한 가벼워야 하므로, 이에 알맞은 재료인 알루미늄 및 알루미늄 합금이 주로 사용되고 있다.

알루미늄 및 알루미늄 합금은 높은 전기전도도, 높은 경량화율 및 재활용 특성 그리고 질량 대비 강도비가 높으며 내식성이 양호한 특성을 가지고 있는 금속으로 합금원소와 적절한 열처리를 통해 최적의 기계적 성질이 얻을 수 있는 특징이 있다. 알루미늄 합금의 개발과 발전은 경량화와 고비강도의 측면에서 오늘날 산업사회가 요구하는 에너지 절감 및 고효율화를 동시에 만족시킬 수 있기 때문에 다양한 분야에서 그 활용이 넓어지고 있다.

하지만 알루미늄은 경량화 및 전기전도도에 많은 강점을 가지고 있지만 재료특성상 높은 열전도율과 높은 반사율로 인해 용접시 많은 문제점을 가지고 있어 알루미늄 및 알루미늄 합금에 대한 용접연구가 국내외로 활발히 진행되고 있으며, 경량화 소재인 알루미늄은 용접시 에너지 밀도가 커야하므로 레이저를 용접열원으로 이용한 연구가 점점 확대되고 있다. 레이저를 이용한 알루미늄의 용접은 주로 단일 파장 레이저에 대한 다양한 알루미늄재료의 용입특성, 결함, 기계적 성질 등에 대

한 연구가 활발히 진행 중이다. 알루미늄에 대한 다양한 연구결과 용접이 손쉽게 이루어지지 않아 용접성이 열악하고 균열 및 기공 등의 결함에 취약한 것으로 보고되고 있다.

현재 이차전지 제작시 알루미늄 소재를 용접하는 방법으로는 초음파 용접법이 사용되고 있다. 초음파 용접의 특징은 가압상태에서 접합계면에 초음파 진동으로 마찰하면서 가열하여 양쪽 표면의 산화물을 제거하고 더욱 고온으로 되면 두 금속 표면이 밀착하게 되어 원자 간의 고상 확산접합이 되도록 하는 일종의 고상 용접법으로 용접 중에 국부적으로 고주파 진동에너지와 압력을 가하여 용접하는 방법이다. 이 때 모재를 용융시키지 않고 건전한 야금학적 결합부가 얻어진다는 큰 특징이 있다. 2매의 금속을 맞대어 그 한 쪽에 접촉면과 평행하게 고주파진동을 가하면 단시간에 접합된다. 이 공정을 초음파 용접이라고 하며 그 물리적인 본질은 아직 불분명하지만, 첫째로는 강한 마찰에 의해 금속 자유면의 산화물 층이 제거되기 때문이라는 점과 둘째로는 마찰에 의해 금속 표면이 강하게 가열되어 이에 따른 열화에 의해 접합이 된다고 판단하고 있다. 그러나 이와 같이 가열된다고 하더라도 가열은 표면부에만 국한되고 다른 부분은 가열되지 않는다. 따라서 초음파 용접은 냉간 접합이라고도 한다.

초음파 용접기는 초음파 발전기, 초음파 진동자, 부스터, 혼으로 구성되어 있다. 초음파 발전기는 60Hz의 AC전류를 20kHz이상의 고주파 전류로 변환시켜 초음파 진동자에 공급하는 역할을 하고, 초음파 진동자는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 역할을 한다. 초음파 진폭은 5~15 μ m로 작기 때문에 용접용으로 사용하려면 진폭을 증가시켜야 하며, 이를 위하여 부스터 및 혼(Horn)을 순차적으로 부착 시켜 사용하게 된다. 이렇게 형성된 초음파 진동에너지가 혼을 통해 금속 용착물에 전달되면 금속 용착물의 접합면에 강제적 확산에 의한 강력한 결합이 이루어지게 된다.

초음파 용접의 장점으로는 비철금속 특히 귀금속류에 널리 적용되는 용접법으로 접합부에 초음파 진동을 주어 진동에너지에 의해 발생하는 열에 의해 접합하는 방법으로 용접부의 변형이 거의 없다는 것이다. 이 용접법은 직접회로, 반도체 부품의 도선(Lead wire)의 접합에도 적용되고 있으며, 박판 용접에 활용하고 있다.

하지만 초음파 용접은 가공물의 재질, 형상, 치수에 제약을 받는다는 단점이 있다. 이는 기하학적 형상에 용접이 어렵고 혼 설계의 한계에 의해 용접부의 면적을 정밀화하기 어렵다는 것을 의미한다. 또 다른 단점은 혼의 수명이 짧다는 것이다.

그 이유는 혼에 초음파 진동에너지가 전달되고 가압력을 주게 되면 금속용착물의 접합면에 강제적 확산에 의한 강력한 결합이 이루어지게 된다. 이렇게 금속을 용착시킨 후 혼이 용착물과 떨어질 때 혼과 용착물에도 결합력이 남아 있어 용접부에 손상을 주거나 용착시 발생한 잔여물이 혼에 끼게 되면 용접특성도 달라지게 되므로 혼을 교체해 주어야 한다.

이러한 단점을 보완하기 위해 고밀도 에너지원인 레이저 용접법을 사용하여 초음파 용접법과 비교하고자 한다. 레이저빔은 코히런트(Coherent: 주파수와 위상이 일치)한 고에너지 밀도의 열원으로 정밀·미세가공이 가능하고, 종횡비(Aspect ratio: 폭 대 깊이의 비)가 큰 깊은 용입의 용접이 가능하다. 또한 같은 고에너지 열원인 전자빔에 비해 진공실이 필요하지 않다는 점과 X선 방사의 위험성이 없다는 점에 현장에서의 활용이 용이하다는 큰 특징이 있다. 또한 레이저 용접은 기하학적으로 작은 부분을 변형이 거의 없이 극소화하면서 용접이 가능하다. 레이저빔을 이용하는 용접은 고밀도 에너지 열원을 사용하기 때문에 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되어 일반용접에 비해 종횡비가 크고, 용입 깊이는 깊고, 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)가 작아 열변형이 거의 없고 극소 부위 용접이 가능한 장점이 있다. 레이저 용접은 거의 용가재(Filler wire)를 사용하지 않는 용접 방법이며, 높은 출력 밀도로 매우 짧은 시간 내에 용접하기 때문에 모재 내부로 열확산이 적어 내부응력이 작게 형성되어 용접변형이 적다. 이러한 이유로 레이저 용접은 일반 용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 용접성 평가를 받고 있다.

하지만 레이저 용접은 고에너지 밀도로 매우 빠른 속도로 용접하기 때문에 용접 공정변수에 예민하게 반응하는 성질이 있다. 그러므로 레이저 용접을 할 때는 다양한 공정변수를 적절하게 조절하여 최적의 상태로 용접해야 한다. 레이저 용접할 때 대표적인 공정 변수로는 레이저 파장, 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 초점위치, 보호가스의 종류, 유량 및 각도, 용접재료의 재질조성분과 반사율 등이 있다. 레이저 파장은 레이저빔의 에너지가 재료에 흡수되는 에너지를 결정하는 중요한 변수이고, 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 초점위치 등으로 입열량을 결정하기 때문에 재료의 두께 등을 고려하여 공정변수를 선정해야 한다. 특히 레이저빔은 전자기파이므로 금속표면의 자유전자에 의해 반사되는 반사량과의 상호작용이 중요한 변수로 작용하기 때문에 레이저빔의 종류와 금속 그리고 재료 가공 상태에 따라 용접성이 다르게 나타난다.[1~24]

따라서 본 연구에서는 파이버 레이저(Fiber laser)를 이용하여 현재 생산되고 있는 리튬이온 계열 배터리 부품 소재인 순수 알루미늄 박판을 초음파 용접과 파이버 레이저 용접에 대해 비교 분석하고 이를 레이저 용접방법으로 대체하기 위한 선행 연구 목적으로 실험을 실시하였다.

1.2 연구동향

본 연구의 목표는 두께가 30 μ m인 순수 알루미늄을 40장 겹치기 용접하는 것이다. 본 연구 수행을 위해 알루미늄 및 알루미늄 합금 용접과 박판 용접에 대한 선행연구를 조사하였다.

Lee. K. D.은 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:YAG 레이저-아크 하이브리드 용접을 사용하여 두께가 2mm인 6000계열 알루미늄 합금 박판의 용접시 기존 용접의 문제점인 열 변형과 낮은 생산성인 문제를 해결하였다.[25]

Kim. J. M. 등은 레이저를 이용한 알루미늄 재료의 용입특성, 결합, 기계적 성질 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 그 결과 알루미늄 합금은 레이저 용접성이 열악하고 균열 및 기공의 결합에 취약한 것으로 보고되고 있다. 따라서 알루미늄이 800nm 부근의 파장대에서 에너지 흡수가 높은 재료특성을 기반으로 808nm 연속발진형 다이오드 레이저와 펄스형 Nd:YAG 레이저의 빔을 혼합된 1064nm의 단일 파장의 하이브리드 빔을 이용한 알루미늄 용접부 단면형상 및 결합 등을 다양한 합금과 비교 관찰하였다.[6]

Yoon. J. W. 등은 알루미늄 합금 계열 중 5052 및 6061은 그 용도와 사용범위가 다양하며, 최근까지 이들 재료에 대한 연속파 CO₂ 레이저를 사용한 알루미늄 합금 레이저 용접의 인장특성 및 성형성 측정결과에 대해 많은 자료가 축적되었다. 그러나 CO₂ 레이저의 제한적인 레이저빔 전송 시스템으로 인해 Tailored Blank Weld (TWB), 3차원 레이저 용접이 어려워짐에 따라, 빔 전송이 편리한 Nd:YAG 레이저를 이용하여 5052, 6061 알루미늄 합금 판재를 용접하고 용접부 특성을 연구하였다.[26]

Huber. S. 등은 논문을 통해 초점이 둘인 하이브리드 레이저 용접(Bifocal Hybrid Laser Welding; BHLW)과 6kW급 고출력 다이오드 레이저(High Power Diode Laser; HPDL)를 이용하여 AA6060 알루미늄 합금 용접의 공정 변수 변화에 따른 용접성 및 기계적 성질을 연구하였다.[27]

Yan. S. 등은 논문을 통해 두께가 각각 0.8mm와 1.2mm인 SC270CC강과 A6111-T4 알루미늄 합금의 겹치기 용접은 연속파(CW)와 펄스파(PW)를 듀얼 빔

YAG 레이저를 이용하여 용접 후 용접부의 기계적 특성을 연구하였다.[28]

본 연구에서는 파이버 레이저를 이용하여 두께가 30 μ m인 순수 알루미늄 40장 겹치기 용접 공정특성을 제시하고자 한다. Table 1.1은 최근 알루미늄 및 알루미늄 합금 용접과 박판 용접에 관해 연구된 자료를 제시한 것이다.

Table 1.1 recent research of aluminum alloys and thin plate welding

Writer/Year	Study Substance
Li. Z. [1997]	항공원동기의 소재로 쓰이는 Waspaloy를 2mm, 4mm, 6mm두께로 어닐링 하여 CO ₂ 연속파 레이저와 Nd:YAG 펄스 레이저를 이용하여 용접 단면, 미세조직 및 용접성을 비교 분석하였다.[29]
Yoon. J. W. [2000]	두께가 6mm인 5083 알루미늄 합금을 10kW급 CO ₂ 레이저를 이용하여 용접시 용접시편 이음부 표면상태, 용접 Wire 표면상태, 보호가스 중의 수분함량 및 수소 함량을 변화시켜 용접 금속 중 기공 발생량을 추정하여 알루미늄 합금 용접 시 기공 발생원을 연구하였다.[30]
Yoon. J. W. [2000]	알루미늄 합금의 분류와 용접시 용접성, 용접 결합의 종류와 생성원인 및 레이저 용접 특성에 관하여 고찰하였다.[31]
Yoon. J. W. [2004]	기존의 알루미늄 합금에 비해 연신율이 개선된 두께 2mm인 5182-O 및 6K31-T4 알루미늄 합금을 4kW급 CW Nd:YAG 레이저를 이용하여 용접 후 용접부의 기계적 성질과 성형성을 평가 분석하였다.[32]
Park. Y. W. [2006]	4kW급 Nd:YAG레이저를 이용하여 두께 1.4mm인 AA5182 알루미늄 합금과 AA5356 용가와이어를 이용하여 용접 후 용접성 평가를 위해 인장강도 테스트 후 최적 공정변수에 관해 연구하였다.[33]
Kim. J. D. [2007]	알루미늄이 800nm 부근의 파장대에서 에너지 흡수가 높은 재료 특성을 기반으로 808nm 연속발진형 다이오드 레이저와 펄스형 Nd:YAG 레이저의 빔을 혼합된 1064nm의 단일 파장의 하이브리드 빔을 이용한 비열처리형 A1050, A3003, A4047, A5052와 열처리 A6061의 알루미늄 합금을 용접하여 용접부 단면과 결합등을 비교 관찰하였다.[34]

(계 속)

<p>Shi. Y. [2007]</p>	<p>상업용 1420 알루미늄과 니켈(Ni)합금을 4.5kW급 AM 356 YAG 레이저를 이용하여 용접 후 미세조직 및 인장력, 경도를 측정하여 용접성을 연구하였다.[35]</p>
<p>Park. Y. B [2009]</p>	<p>대형 중공형 알루미늄 합금 차량에 적용되는 압축패널인 A6005 알루미늄 합금을 마찰교반용접(Friction Stir Welding; FSW)시 용접 변수에 따른 용접부의 기계적 특성을 평가하였다.[36]</p>
<p>Zain-ul-abdein. M. [2010]</p>	<p>두께가 2.5mm인 AA6056-T4 합금을 T-joint 용접을 실시하여 피로 균열 성장의 유한요소 시뮬레이션을 이용하여 나온 열 이동, 하중, 응력, 인장강도의 해석 값과 실제 실험값을 비교 분석하였다.[37]</p>
<p>Park. Y. W. [2010]</p>	<p>자동차 차체 적용 가능성을 판단하기위해 AA5182 알루미늄 합금과 AA5356 와이어를 이용하여 4kW급 Nd:YAG 레이저를 이용하여 용접시, 용접 조건에 따른 성형성을 에릭슨 시험(Ericksen test)에 따라 평가하였다.[38]</p>
<p>Chan. C. W. [2011]</p>	<p>L27 Taguchi 실험법을 이용하여 두께가 0.25mm인 니켈-티타늄 형상 기억 합금을 행크의 루션(Hank's solution)에 의해 37.5℃의 온도로 예열 후 100W급 1091nm 파장대의 파이버 레이저를 이용하여 용접 후 예열을 한 경우와 그렇지 않은 경우의 용접부 특성에 대해 연구하였다.[39]</p>
<p>Tu. J. F. [2011]</p>	<p>300W급 1075nm 파장대를 가진 파이버 레이저를 이용하여 피로 균열이 발생된 두께가 800μm의 AA7075-T6 알루미늄 합금을 용접 후 용접부의 크랙 여부를 실험적으로 연구하였다.[40]</p>
<p>Nakashiba. S. I. [2012]</p>	<p>두께가 1mm인 구리 박판을 다이오드 펌핑 방식의 펄스 Nd:YAG 레이저와 1064nm 파장대의 Nd:YAG 레이저를 2차 조화파를 발생시켜 1.5kW급 532nm 파장대를 발생시킬 수 있는 그린 Nd:YAG 레이저의 효율 및 용접성을 비교 분석하였다.[41]</p>

제 2 장 이론적 배경

2.1 알루미늄 특성

알루미늄은 무게가 가볍고 종류에 따라 구조용 강보다 큰 강도를 갖는 알루미늄 합금도 있다. 또 전기와 열의 전도도가 우수하며 열과 빛에 대한 반사성이 높고 어떤 사용 조건하에서도 내식성이 높으며 독성이 없다는 특징이 있으며 불꽃을 발생하지 않고 또한 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 2.1에 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.

알루미늄을 철과 비교하면 밀도는 철에 비해 3배정도 작지만 비열은 크고 용융 온도가 철에 비해 매우 낮다. 그러나 열전도도는 철에 비해 3배정도 크기 때문에 용융에 의한 용접과 같은 가공은 높은 열전도 때문에 많은 어려움이 발생 할 수 있다. 이와 같은 이유로 알루미늄을 용접할 때 사용하는 열원은 철강에 비해 매우 집적화되어야 하며 고밀도화가 필요하다. 이와 같은 이유로 에너지를 하나의 초점으로 집적화하여 고밀도로 만들어 이용하는 레이저가 알루미늄 용접으로 활용하는 적합성에 대한 연구가 관심의 대상이 되고 있다. 전기전도도는 구리에 비해 65%정도 가지지만 철강에 비해 약 3.8배 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 경우 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 급냉 각이 가능한 레이저 용접이 훌륭한 대안으로 고려 할 수 있다. 이상 설명한 내용을 정리하여 철강과 알루미늄의 성질을 Table 2.2에 나타내었다.[42~45]

Table 2.1 Physical properties of aluminum[44]

Properties	High purity Al (99.996%)	Normal purity Al (99.5%)
Atomic number	13	-
Atomic weight [g/mole]	26.98	-
Crystal lattice	FCC	-
Lattice constant (at 293K)[nm]	0.40494	0.404
Density (at 293K)[$\times 10^3 \text{kg/m}^3$]	2.698	2.71
Melting point [K]	933.2	~923
Boiling point [K]	2750	-
Latent heat of fusion [$\times 10^3 \text{J/kg}$]	396.840	389
Specific heat (at 293K)[J/kg·K]	916	958
Coefficient of linear expansion (293~573K)[$\times 10^{-6}/\text{K}$]	25.4	25.6
Thermal conduction rate (293~673K)[W/K·m]	238	234
Conductivity [%IACS]	64.9	59
Electrical resistivity (at 293K)[$\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$]	2.69	2.92
Temperature coefficient of resistance [$\times 10^{-3}/\text{K}$]	4.2	4.0
Reflectivity ($\lambda=252; 500; 2000\text{nm}$)[%]	-	87; 90; 97

Table 2.2 Comparison of the properties of pure aluminum and iron[44]

Properties	Al	Fe
Atomic weight [g/mole]	26.98	55.84
Crystal lattice	FCC	BCC
Density [$\times 10^3 \text{kg/m}^3$]	2.70	7.87
E-modulus [GPa]	67	210
Coefficient of expansion [1/K]	$24.10 \cdot 10^{-6}$	$12.10 \cdot 10^{-6}$
Yield strength [MPa]	~ 10	~ 100
Ultimate tensile strength [MPa]	~ 50	~ 200
Specific heat [J/kg·K]	~ 890	~ 460
Melting heat [J/g]	~ 390	~ 272
Melting temperature [K]	933	1810
Thermal conductivity [W/K·m]	235	75
Electrical conductivity [$\text{m}/\Omega \cdot \text{m}^3$]	38	~ 10
Oxides	Al_2O_3	$\text{FeO}/ \text{Fe}_2\text{O}_3/ \text{Fe}_3\text{O}_4$
(Oxides) Melting temperature [K]	2323	1673/ 1728/ 1873

2.2 레이저빔을 이용한 알루미늄 용접

2.2.1 레이저빔 용접 원리

레이저 용접은 고밀도 에너지의 레이저빔이 집합하고자 하는 금속과 반응하여 열에너지로 전환되고 금속표면을 용융시킨 뒤 계속되는 레이저빔 조사에 의해 용융금속 내 키홀(Keyhole)을 형성하게 된다. 키홀 내에 레이저빔의 다중반사 및 흡수 현상 때문에 에너지가 흡수되며 주위에 열에너지가 전달되어 벽면이 용융과 응고가 주기적으로 반복되면서 용접이 이루어진다. 이와 같은 메카니즘 때문에 전도용접에 비하여 키홀용접이 레이저빔 흡수효율이 큰 집합 방법이다.

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. 금속의 표면상에 고출력의 레이저빔($10^6\sim 10^{10}\text{W/cm}^2$)을 조사시키게 되면 광자가 금속표면 자유전자를 여기시킴과 동시에 여기된 자유전자는 결정격자에 충돌된다. 이때 그 에너지는 열로 전환해서 금속의 온도를 상승시키게 되고, 연속적인 조사에 의해 다중반사와 흡수현상이 발생하게 되어, 레이저빔의 중심부 구역에서는 금속의 용융과 증발이 일어나고, 그 외곽 지역에서는 용융이 일어난다. 따라서 용융이 일어난 중심부 구역의 큰 증기압은 용융금속을 레이저빔이 조사되는 중심부 구역으로부터 외곽으로 밀어내고 레이저빔은 더욱 내부로 들어 갈 수 있게 되며 중심구멍의 깊이를 증가시킨다.

즉 레이저빔의 출력밀도가 어떤 임계값 이상이 되는 경우에는 Fig. 2.1과 같이 금속내부로 깊숙한 심층구역으로 침투하여 들어가는 효과를 나타냄으로써 관통하는 관이 생기는데 이를 키홀이라 한다. 이러한 경우에는 레이저빔 조사 초기의 금속표면상에서 빔의 반사 등 여러 가지 에너지 손실 현상에도 불구하고 형성된 키홀은 흑체(Black body)로 작용하여 연속적으로 조사되는 레이저빔은 키홀에 직접 조사되므로 키홀벽과 다중반사 및 흡수현상으로 인하여 레이저빔 에너지의 약 70%이상을 금속 내에 흡수시키므로 용접부 단면은 폭이 좁고 깊게 용융풀이 형성된다. 또한 증발한 금속증기가 고온의 플라즈마로 되면 레이저빔은 플라즈마에 흡수되어 재료에 도달하는 빔에너지가 감소하기 때문에, 보호가스를 분사시켜 플라즈마를 제거해야 한다. 레이저빔을 금속재료에 조사하면 초기에는 반사손실은 크지만, 일단 키홀이 형성되면 레이저빔은 키홀 내에서 다중반사하기 때문에 거의 반사손실이 일어나지 않아 에너지 효율이 매우 좋아진다.

레이저빔에 의한 키홀 형성 시, 키홀 주위에 있는 용융금속의 중력, 점성 및 표면장력과 유동 등에 의한 복잡한 작용들은 키홀을 붕괴시키려는 경향이 있는 반면, 조사되는 레이저빔에 의해 연속적으로 생성되는 금속증기의 압력으로 용융금속을 표면 밖으로 밀어내며 키홀을 유지하려는 경향이 있다. 키홀 내에서 연속적으로 생성되는 증기는 용융층의 흐름을 발생시키는 구동력을 제공한다. 그러므로 용융층은 키홀의 전단부에서 아래로 이동하고 다시 아래에서 후면부로 연속적으로 흐르게 된다. 이때 전단부에서 생성되는 용융유체는 벽면의 증발에 의한 극렬한 구동력과 가파른 벽면에 의해 흐름을 가속화 한다. 이 과정에서 키홀 뒤의 표면부근에 큰 와류가 생긴다. 이와 같은 키홀 내의 물질이동으로 용접 열원의 이동에 대해 키홀이 정상상태를 유지하게 된다. 이런 키홀을 형성하는 레이저빔 용접은 고온에 단시간 동안 유지되므로 결정립 성장이 제약되어 양호한 응고조직을 얻는다. 그리고 기존의 용접법에 비하여 상대적으로 작은 입열에 의해 변형도 작게 된다.[44~49]

2.2.2 레이저 용접 특징 및 장단점

일반적으로 사용하는 아크용접의 경우 용융 등온선이 열원에서 모재 쪽으로 움직이고 에너지 밀도도 작기 때문에 용접부의 폭에 비해 용입깊이 작게 된다. 이러한 이유로 원하는 용입 깊이를 얻기 위하여 입열량은 증가시키거나 용접속도를 느리게 해야 된다. 반면 레이저 용접은 기존의 용접법처럼 입열을 재료의 열전도도에 의존하지 않고 키홀에 의해 재료의 두께 방향으로 직접 투입하는 방식이며 고속으로 용접도 가능하다. 그리고 용입 깊이는 레이저 용접의 여러 공정변수들 중 레이저 출력에 의하여 크게 영향을 받는다.

기존의 용접법에 비해 레이저 용접법의 대표적인 장점은 좁고 깊은 용접부를 얻을 수 있다는 점이다. 레이저 출력을 포함하는 공정변수가 적절하면 두꺼운 소재의 관통용접도 가능하다. 이러한 특성은 후판 용접에 필요한 용접 홈 가공과 용접봉 사용을 배제할 수 있기 때문에 생산성의 관점에서 매우 유리하다. 작은 입열량으로 용접이 가능하기 때문에 소재의 열변형을 최소화할 수 있어서 용접 후 처리 공정을 생략하거나 축소할 수 있다. 또한 열영향부가 작아 입열에 의한 결정립의 조대화 경향을 감소시킬 수 있다. 또 다른 장점으로 고속 용접이 가능하다. 용접속도는 분당 수 m까지 높일 수 있고, 하나의 레이저 발전기로 번갈아 가면서 용접 할 수 있기 때문에 용접 생산성을 크게 높일 수 있다.

레이저 용접에 의한 많은 장점이 있음에도 불구하고 단점으로는 일반적으로 1mm이하의 빔 직경을 가진 레이저 빔 용접의 경우 정밀한 접합부의 정렬이 필요하다. 그 이유는 접합부 정렬이 적절하지 않으면 레이저빔 에너지의 대부분이 정렬이 적절하지 못한 틈 사이를 통해 손실되어 용융이 일어나지 않기 때문이다. 따라서 정밀한 접합부 설계는 용접 품질과 생산성을 높이는데 중요한 요소이다. 또 다른 단점으로는 레이저 빔이 일종의 빛이기 때문에 경면 금속표면이나 열전도도가 높은 금속이나 비철금속의 경우 반사손실이나 열전도손실이 발생하여 후판용접에 제약요인이 발생 할 수도 있다는 점이다.

$$R = 1 - 2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\sigma \frac{\lambda}{c}}} \quad (1)$$

ν : 주파수, σ : 금속의 전기전도도, λ : 레이저빔 파장, c : 빛의 속도

금속이나 비철금속에 레이저빔을 조사하면 레이저빔의 파장과 전기전도에 따라 식(1)에 나타난 것과 같은 형태로 반사된다. 식(1)에서 R은 반사도를 나타내고 있다. 철강에 비해 열전도도가 매우 높은 알루미늄 및 알루미늄 합금의 레이저 용접은 CO₂ 레이저 용접에 비해 파이버 레이저 용접이 상대적으로 유리한 것으로 알려져 있다. 이와 같은 이유는 식(1)에서 볼 수 있듯이 레이저빔 파장이 증가함에 따라 반사도가 증가한다. 따라서 전기전도도가 높은 알루미늄 및 알루미늄 합금은 낮은 파장의 레이저빔을 작게 반사하여 입열량 측면에서 더욱 효율적이기 때문이다. 다음 Fig. 2.2 및 Table 2.3은 파이버 레이저와 CO₂ 레이저의 소재에 흡수 및 반사율에 대한 자료이다. Table 2.3에서 확인할 수 있듯이 파이버 레이저는 CO₂ 레이저에 비해 금속표면에서의 반사율도 작고, 재료가공에 있어서 펄스 레이저로 발전하여 에너지 밀도가 적절하다면 알루미늄, 구리 등의 고반사 재료도 가공이 가능하다. 단파장이기 때문에 집광성이 우수하고 미세가공에 적합하다. 파이버 레이저의 파장($\lambda=1.07\mu\text{m}$)을 제2조화파(2nd harmonic generation)로 만들어 파장을 더욱 짧게 만들면 구리와 같이 열전도율과 반사도가 큰 재료도 가공할 수 있는 특징이 있다.

파이버 레이저를 알루미늄 및 알루미늄 합금에 조사할 경우 Fig. 2.2에서 확인할 수 있듯이 입사된 레이저빔 에너지의 약 10%정도 흡수되는 것으로 알려져 있다. 그리고 금속 표면 용융에 필요한 최소한의 출력 밀도는 10^6W/cm^2 이므로, 일정한 두께의 판재에 대해 고속으로 레이저 용접하기 위해선 고출력 파이버 레이저 용접 시스템이 필수적이다.[46, 50~53]

2.2.3 알루미늄 용접 결합

순수 알루미늄 및 알루미늄 합금을 용접하는데 가장 큰 문제점은 기공과 고온균열이다. 이들 문제점은 순수 알루미늄 및 알루미늄 합금을 용접하기 시작한 이래로 계속 언급된 문제이고 강도가 높은 합금이 개발되면 될수록 이들 결합 발생 방지는 더욱 더 중요시되고 있다. 이러한 용접결합들은 알루미늄 레이저 용접부의 기계적 성질 저하에 심각한 영향을 끼치므로 반드시 제어되어야 한다.

알루미늄 레이저 용접시 용접부에 기공이 발생하는 원인으로는 키홀의 불안정성으로 인해 발생한 기포, 합금원소의 증발 그리고 용융된 알루미늄의 응고시 고상(Solid state) 및 액상(Liquid state)의 수소 용해도차에 의한 용융금속 내 수소방출 등을 들 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 키홀 생성하는데 필요한 입열량이 부족한 경우에도 발생하게 된다. 또 키홀 내부 및 주변의 고온 분위기로 인해 발생한 금속 플라즈마와 공급된 보호가스 등의 영향 때문에 조사되는 레이저빔 흡수를 방해할 때 발생한다. 따라서 최적의 공정변수를 선정하기 위해서는 레이저빔 초점위치, 용접속도, 에너지 밀도, 보호가스 사용유무 및 보호가스 종류 등을 고려해야 한다. 이런 조건들이 맞지 않으면 레이저 용접시 불안정한 키홀을 생성하게 되고 이는 키홀 내부의 고온 금속증기가 방출될 때, 주위 압력차로 인해 증기가 빠져나가지 못하고 용접부에 존재하게 된다.

마지막으로 용융부의 유동에 의해서 기공이 발생할 수 있는데, 유동에 의해 용융 금속이 제대로 채워지지 않으면 용접부 하부 끝단에서 발생할 수 있는 기공이 완전히 방출되지 못하여 용접부 내에 갇혀 기공으로 존재하게 되는 경우이다. 수소에 의해 발생하는 기공은 알루미늄 합금 내부에 일정량 이하로 조절하거나, 모재 및 보호가스로부터 최소화 시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고 기공이 발생하는 것은 불완전한 키홀의 형성 또는 용융금속의 유동, 더 나아가 합금원소의 기화가 원인이 될 수 있다.

불안정한 키홀이 붕괴 시 키홀 내부에 있던 고온의 금속증기와 금속증기 방출 후 키홀내부 및 주위와의 순간적인 압력차에 의해 키홀 내부로 들어온 보호가스가 용융금속에 사로 잡혀 기공을 형성한다. 또 입열량 부족으로 인해 불완전 용입이 발생하며 위와 같은 입열 방해 요소들이 용접진행과 동시에 지속적으로 영향을 줄

경우 키흔은 상하좌우로 큰 진폭을 가지고 진동하고, 용융금속이 이러한 부분을 채우지 못하게 되면 키흔 하부 끝단에서 기공이 발생한다. 이러한 기공들은 완전용입 조건과 달리 키흔 하부로 빠져나가지 못하고 용융금속 내에 남게 되며, 레이저 용접의 빠른 응고속도로 인해 용융금속표면으로 부상하여 배출되지 못하고 응고되어 용접금속내 기공으로 남게 된다.

모재의 성분들 중 Mn, Cu 등의 원소들은 Al에 비해 끓는점이 낮거나 비슷하여 기화되어 버린다. 그리고 평행증기압은 Fig. 2.3 Al에 비해 약 10배 정도 높다. 또한 합금원소가 많이 들어간 알루미늄 합금의 경우 키흔 내부의 증기압은 다른 합금에 비해 상대적으로 높으며 키흔에서 방출되는 금속증기의 양과 압력이 더욱 강력하게 되어 레이저빔 에너지가 키흔을 유지하는데 방해가 된다. 이러한 원소들은 Al 용융 금속내 기체로 남아 기포(Bubble)를 형성하고 용융금속의 응고시 기공으로 남게 된다.

한편 최적의 용접조건이 선정되어 완전용입을 이루며 불안정한 키흔이 발생하지 않을 경우 용접금속에서 발생한 기공의 주요원인은 Fig. 2.4에서 확인할 수 있듯이 고온 용융상태와 응고구간에서의 수소의 용해도의 급격한 변화 때문이다. 알루미늄 수소용해도는 용접 바로 밑에서는 약 0.036cc/100g인 반면 용점온도에서의 약 20배 높은 0.7cc/100g이다. 그러므로 용접부가 응고할 때 고상의 용해도 이상의 수소는 가스 버블로 형성되어 표면으로 부상하지 못하고 주상정 및 결정립 계면에 잔류하게 되면 기공이 된다. 이러한 원인으로 기공이 전혀 없는 용접금속을 얻기 어렵다.

알루미늄 용접 시 수소의 주요 발생원은 연구자들마다 어느 정도 차이는 있으나 다음과 같이 대략 3가지로 정리할 수 있다. 첫 번째 모재인 알루미늄에 포함되어 있는 수소, 용가재를 사용할 경우 용접 와이어, 용접봉 등의 표면에 형성된 산화피막에 흡착되어 있는 수소화합물 등의 불순물과 보호가스 중의 미량 수분, 용접 중 난류에 의해 대기로부터 용접 분위기로 혼입되어 들어온 습기 등이다. 이 수분은 용접 중 용접열에 의해 다음과 같이 수소로 분해된다.



용접 공정변수의 영향은 용접부의 온도와 밀접한 관계가 있으며 용접부 온도가 850℃에서 760℃로 하락하게 되면 기공량은 약 1/4로 감소하게 된다는 연구 결과가 있다. 이처럼 용융 알루미늄의 수소용해도가 고체상태의 알루미늄에 비해 높기 때

문에 수소는 용융금속에서 쉽게 용해된다. 용융금속이 응고 단계에 이르면 수소의 용해도가 응고온도(약 660°C)에서 급격히 감소하므로 용접부를 가능한 낮게 유지시키고 응고속도를 빠르게 하여 액상이 존재하고 있는 시간을 줄여야 한다.

알루미늄 용접 시 기공 발생을 억제하기 위해서는 모재 표면을 탈지, 세척하고 건조시켜 흡착수분을 증발시키고, 용접 와이어의 보관 시 수분이 접촉하지 않도록 하며, 보호가스 및 보호가스 공급 장치 내 수분 유입을 예방하고, 보호가스의 공급 중 용접 분위기에 대기 중 습기가 유입되지 않도록 해야 한다.

용접단면에 발생할 수 있는 대표적인 결함으로 고온균열, 응고균열, 열영향부 액화균열이 있을 수 있으면 각 균열에 대한 사항을 정리하면 다음과 같다.

(가) 고온균열

레이저 용접 후 냉각이 완료된 상태로 오랜시간 경과 후 낮은 온도에서 발생하는 균열을 저온균열(Cold crack)이라 하며, 용접부의 응고과정 중 높은 온도 영역(일반적으로 용융온도 절반 이상)에서 발생하는 균열을 고온균열(Hot crack)이라 정의한다. 고온균열은 주로 비교적 용접 입열이 큰 용접부에서 발생되며, 용접 열영향부보다는 용접부 내부에서 발생하는 것이 대부분이다.

알루미늄 합금의 레이저 용접시 발생하는 고온균열 종류는 용융금속의 응고단계에서 고상과 액상 공존온도 영역에서 응고 마지막 단계에 발생하는 것으로 알려진 응고균열(Solidification crack)과 용접 열 사이클에 의해 액상선과 고상선 사이의 고상 액상 공존 온도 영역으로 가열된 열영향부에서는 결정립계에 존재하는 저용점 성분이 용융되고 여기에 국부적인 응력이 작용하여 발생하는 것으로 알려진 열영향부 액화균열(Heat affected zone liquefaction crack)이 있다. 이러한 균열은 용접부 기계적 성질 열화의 주요한 원인으로 작용하며, 특히 열처리형 알루미늄 합금은 이러한 고온균열 감수성이 높다

(나) 응고균열

응고균열은 용접부와 열영향부에서 주로 응고 결정립계를 따라 발생하며, 경우에 따라서는 아결정립계를 따라서 발생하기도 한다. 근본적으로 응고균열의 발생여부는 열, 기계적 변형 또는 응력과 재료의 응고 또는 조직적 특성에 의해 결정된다. 응고균열의 발생기구로서 지금까지 제시된 이론들은 수축-취성 이론(Shrinkage-brittleness theory), 변형률이론(Strain theory), 수정된 Borland 이론(Modified generalized theory), 강도이론(Technical strength theory)이 있다.

상기된 이론의 공통점은 응고의 마지막 단계에서 액상의 필름이 응고 결정립계

를 따라서 존재함으로써 입계를 약화시켜 균열이 발생한다는 점이다. 이 필름상의 액상이 존재하는 입계가 응고 및 냉각 중 발생하는 수축과 외적 구속에 의해 발생하는 응력을 견디지 못해 균열이 발생하게 된다. 즉, Fig. 2.5와 같이 잔류 액상에서 S, P와 같은 원소가 편석되어 저융점의 화합물을 형성한다. 이로 인해 대부분의 용접금속이 응고하는 온도범위에서도 마지막 응고부위에서는 액상이 존재하게 되고, 고온의 고상이 냉각하면서 발생하는 수축변형으로 인해 인장응력이 액상에 작용하여 균열이 발생하게 된다.

(다) 열영향부 액화균열

부분 용융구역이나 열영향부의 결정립계를 따라서 발생하는 액화균열을 열영향부 액화균열이라 한다. 열영향부 액화균열은 Fig. 2.6과 같이 통상적으로 길이가 짧으며 용융선으로부터 2~3개의 결정립 직경 정도의 길이로 열영향부 측으로 성장한다. 이 균열은 입계균열이며, 부분 용융구역이나 열영향부의 최고 온도가 국부적으로 응고온도 이상으로 상승되고 모재의 온도가 응고온도 이하로 가열된 영역에서 냉각시 결정립계에 존재하는 저융점 성분들이 용융되어 액상상태로 존재할 때 응력이 작용하여 발생한다. 열영향부 액화균열은 부분 용융구역이나 열영향부의 결정립계가 국부적으로 용융되어 발생하며, 열영향부 액화 균열에 대해서는 침투이론과 편석이론으로 제안되어 있다.[54~70]

Table 2.3 Surface reflexivity of metal materials[53]

Materials \ Laser	$\lambda=0.9\sim 1.1\mu\text{m}$ (Nd:YAG, Fiber)	$\lambda=0.9\sim 11\mu\text{m}$ (CO ₂)
Au(2.4)	94.7%	97.7%
Pt(10.6)	72.9%	95.6%
Ag(1.62)	96.4%	99.0%
Al(2.75)	73.3%	96.9%
Cu(1.72)	90.1%	98.4%
Fe(9.8)	65.0%	93.8%
Ni(7.24)	72.0%	95.6%
Zn(5.9)	49.0%	98.1%
Mg(4.9)	74.0%	93.0%
Cr(10.9)	57%	93%
Mo(5.6)	58.2%	94.5%
W(5.6)	62.3%	95.5%
V	64.5%	92%
T	48.5%	78%
S	54%	87%
Cast iron(10~20)	63.1%	93.8~96%
1%C	7%	-
Constantan(50)	22.4%	94.2%

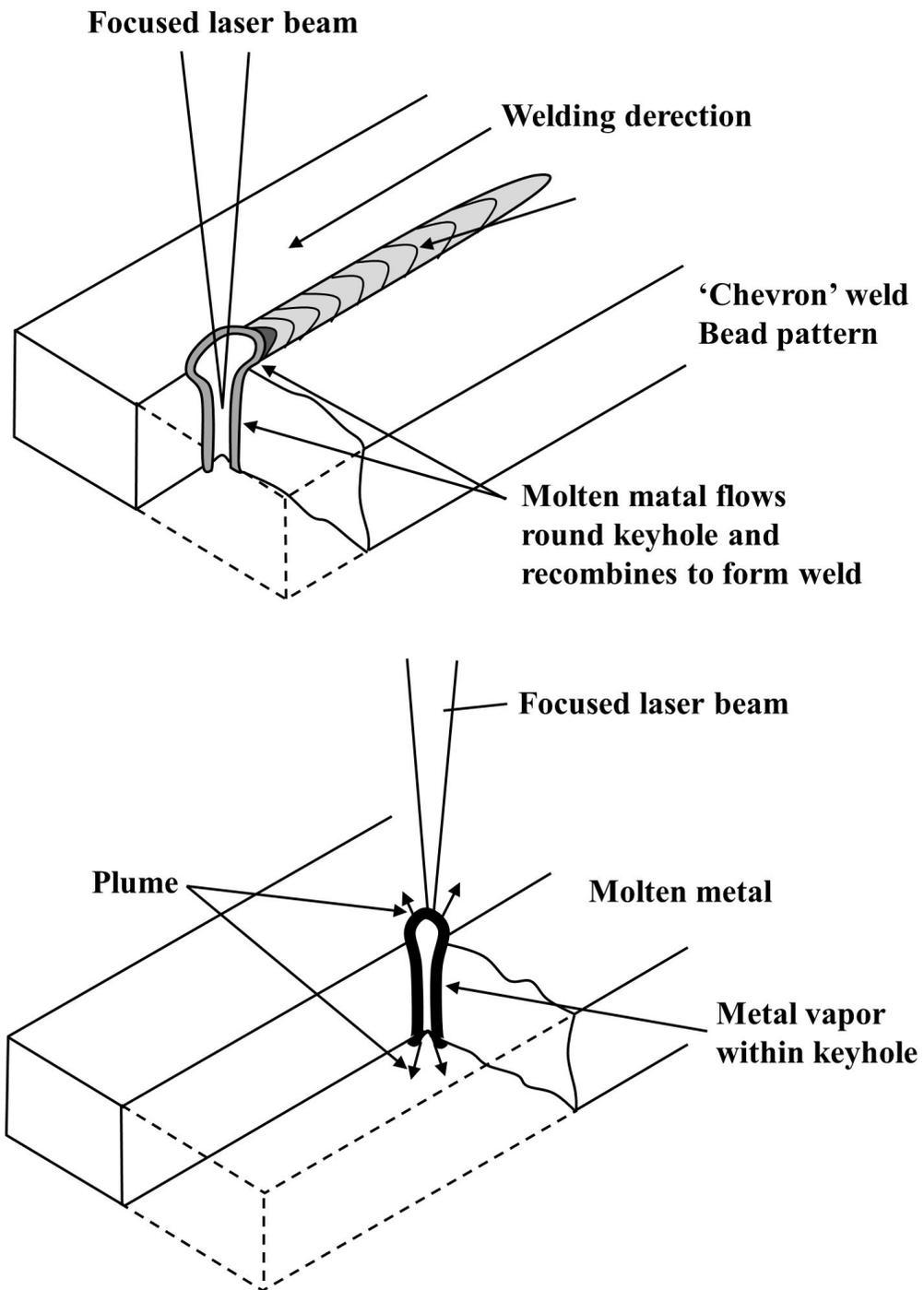


Fig. 2.1 Principle of laser welding and keyhole formation in deep penetration welding[44, 45]

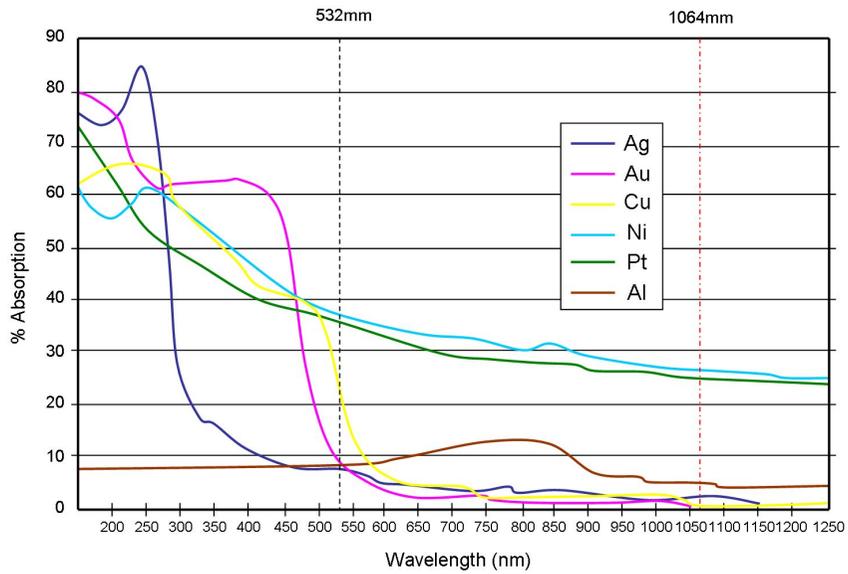


Fig. 2.2 Change in absorptance of nonferrous metal with wavelengths[53]

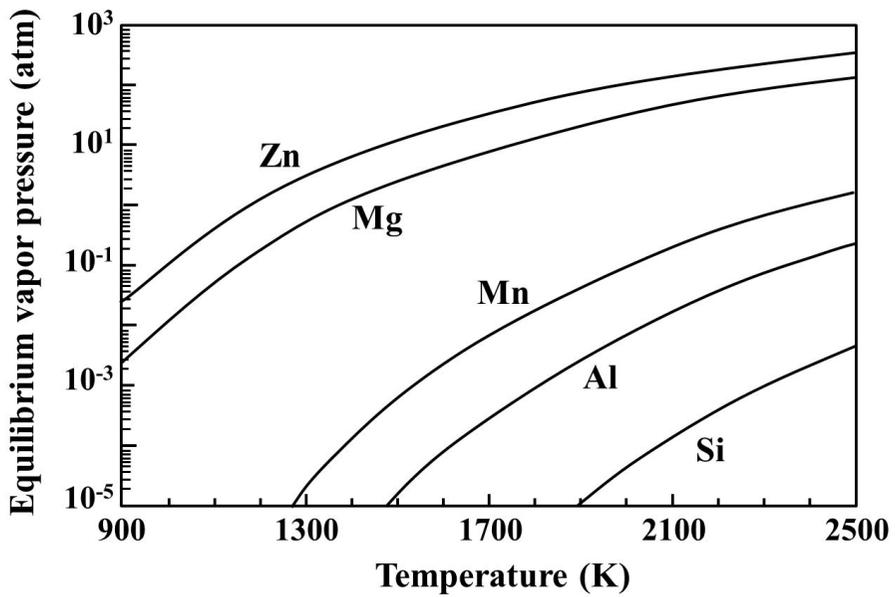


Fig. 2.3 Equilibrium vapour pressure as function of temperature for various elements[44, 45, 70]

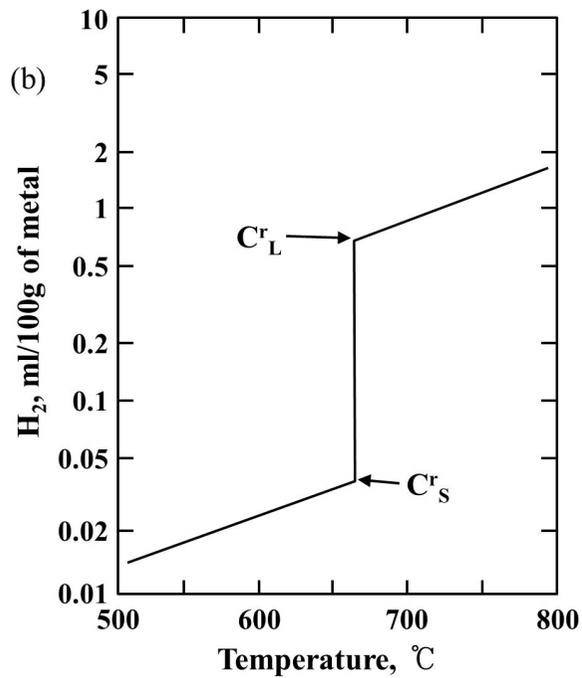
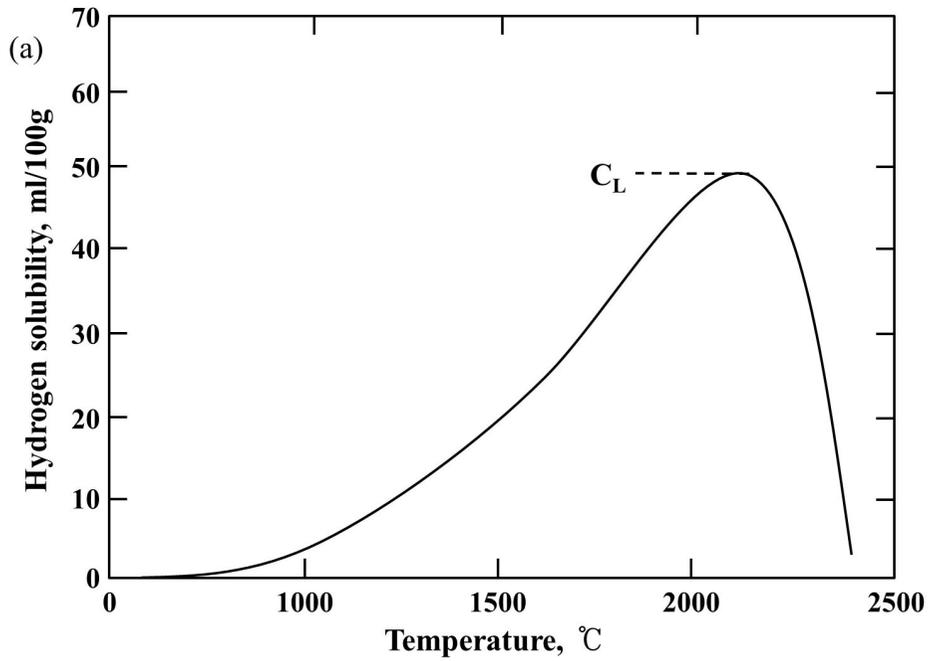


Fig. 2.4 Solubility of hydrogen in aluminum (a) as a function of temperature and (b) at the melting point[31, 44, 45]

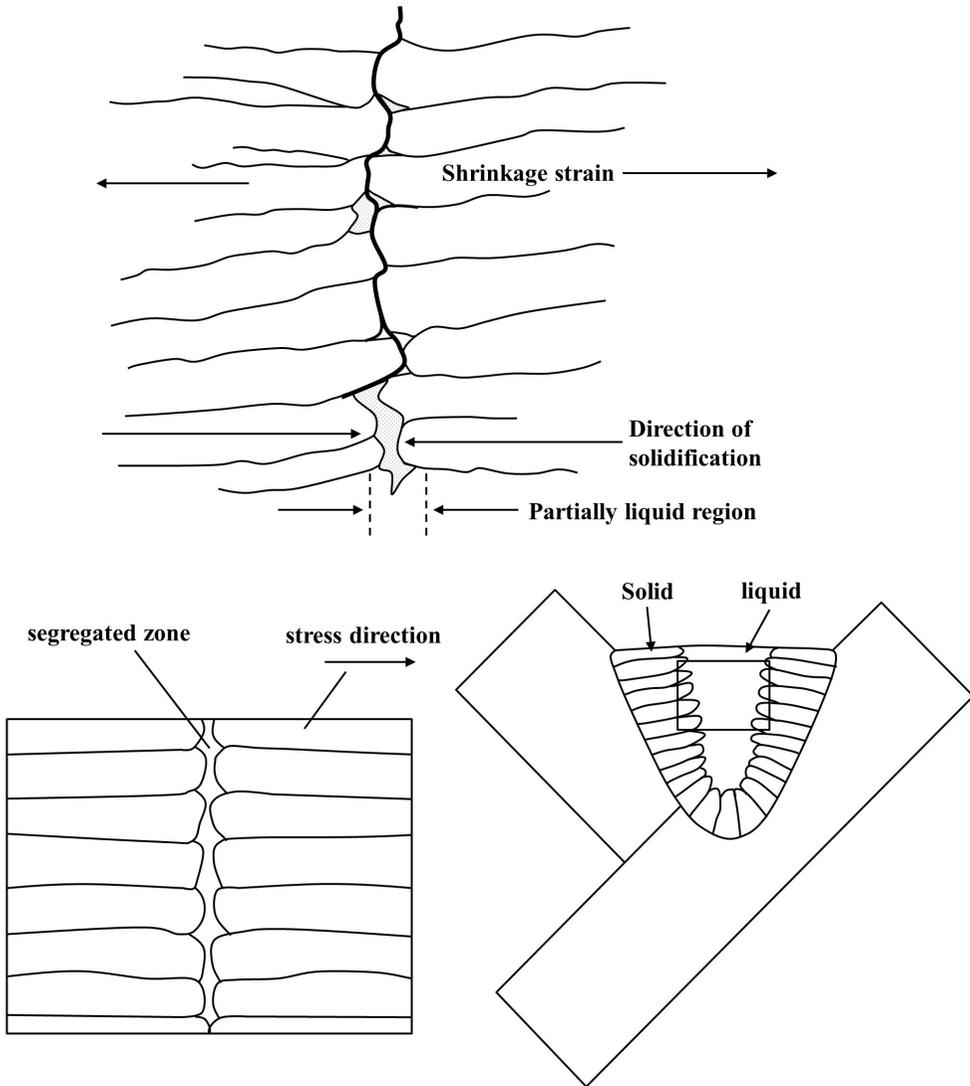


Fig. 2.5 Schematic illustration of the mechanism of solidification cracking
[44, 45]

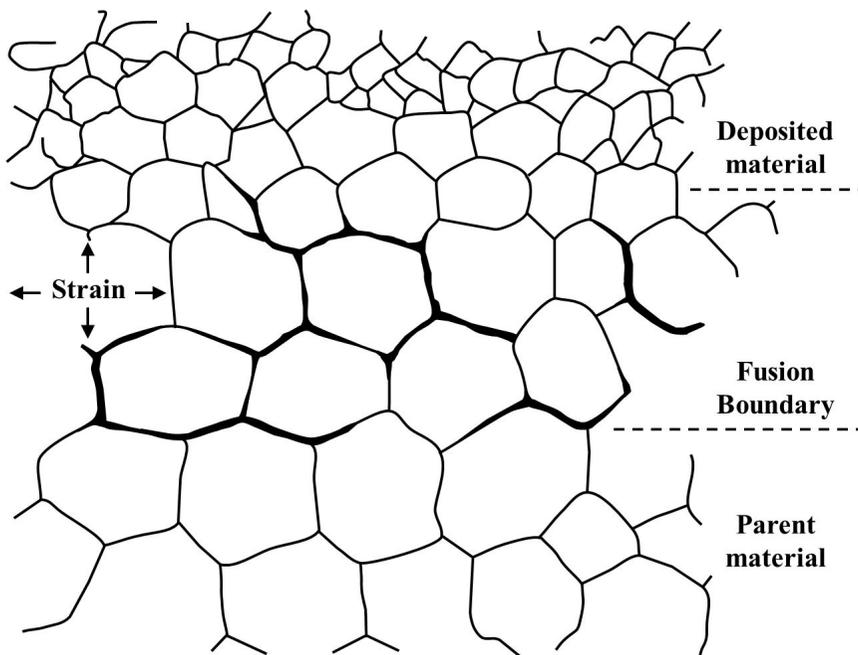


Fig. 2.6 Schematic illustration of liquation cracking at the fusion line[44, 45]

2.3 레이저 에너지 밀도 및 공정변수

알루미늄 박판을 겹치기 용접에 사용한 레이저는 펄스형 파이버 레이저이다. 용접공정 변수는 펄스시간, 피크출력, 펄스당 에너지, 펄스당 에너지 밀도 등으로 나타낼 수 있다. 펄스에너지는 피크 출력(Peak power), 평균 출력(Average power)과 펄스당 에너지가 용접공정 변수의 중요한 요소가 되며 이는 펄스 조사시간, 주파수, 듀티 등에 영향을 받고 그와 관련된 내용을 Fig. 2.7와 식(2)~(7)에 나타내었다. 본 연구에서는 식(5)를 이용하여 펄스 조사시간과 주파수를 고정하고 피크 출력 변화에 따른 펄스당 에너지와 피크 출력과 주파수를 고정하고 펄스 조사시간을 변화시키면서 펄스당 에너지 변화를 계산하였고 그에 따른 용접상태를 공정변수별로 실험하여 분석하였다.

본 연구에 사용된 파이버 레이저 장비의 듀티는 10%로 고정되어 있어 식(4)에 의해 최대 평균 출력이 0.6kW이기 때문에 최대 피크 출력은 6kW가 된다. 또 펄스 조사시간과 주파수는 식(2), (3)에 의해 결정된다. 만약 주파수를 50Hz로 하게 되면 식(2)에 의해 펄스시간(T)는 0.02초가 되고 식(3)에 의해 펄스 on 시간 즉 펄스조사시간은 0.002초인 2ms이 된다. 이렇게 주파수를 결정하면 펄스 조사시간이 정해지고, 펄스 조사시간을 정하게 되면 주파수가 정해지기 때문에 식(2), (3)의해 레이저 용접시 공정변수를 선정하였다. 따라서 주파수와 펄스 조사시간을 고정하고 피크 출력을 변화시켜 실험하였다. 그리고 장비의 최대 에너지를 초과하지 않은 범위 내에서 피크 출력과 주파수를 고정하고 펄스조사시간을 변화시켜 실험하였다.

$$\text{펄스시간}(T) = \frac{1}{\text{주파수}(f)} \quad (2)$$

$$\text{펄스 on 시간}(t) = \text{펄스시간}(T) \times \text{듀티}(D) \quad (3)$$

$$\text{피크출력}(P_p) = \text{평균출력}(P_a) / \text{듀티}(D) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{펄스당 에너지}(J) &= \text{평균출력} \times \text{펄스시간} \\ &= \text{피크출력} \times \text{펄스 on 시간} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{펄스당 에너지 밀도}(J/cm^2) = \frac{\text{펄스당 에너지}}{\text{포커싱된 초점면적}} \quad (6)$$

$$\text{입열량}(J/cm^2) = \frac{\text{펄스당 에너지}}{\text{레이저빔 조사면적}} \quad (7)$$

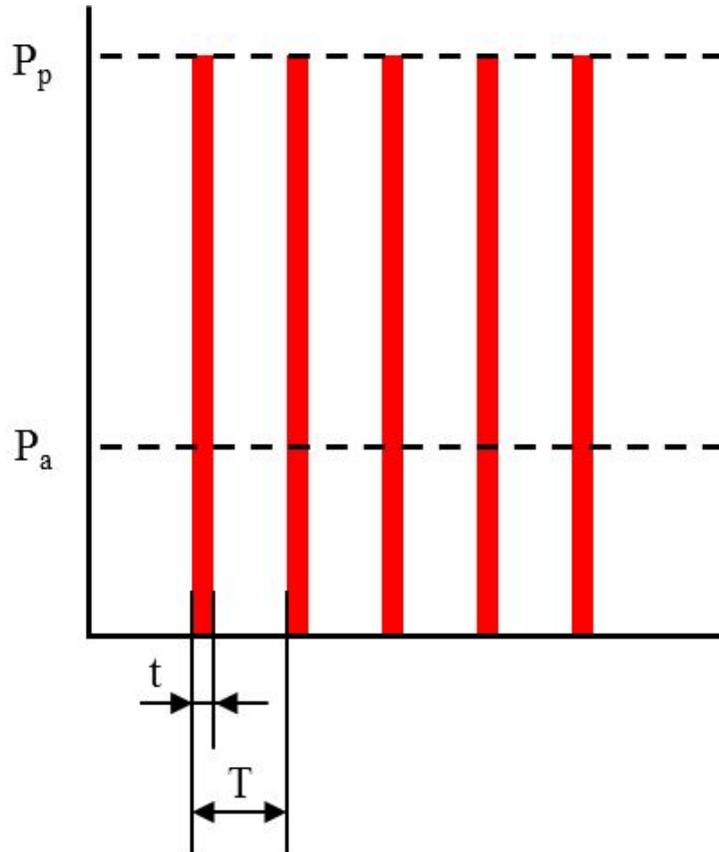


Fig. 2.7 Parameters of pulse laser beam

제 3 장 실험방법 및 장치

3.1 실험 재료 및 장치

순도 99.0% 이상의 알루미늄은 광범위한 용도를 가지며, 특히 전기, 화학 분야에 서 많이 쓰인다. 일반 공업용(순도 99.0 ~ 99.5%)은 통상적인 불순물도 Fe와 Si을 함유하므로 내식성이 고순도 알루미늄보다는 떨어지나 그래도 높은 편이다. 순도 99.0% 알루미늄의 특징은 뛰어난 내식성, 열전도도 및 전기전도도가 높은 것이다. 알루미늄의 열전도도 및 전기전도도는 Table 3.1에서 볼 수 있듯이 철에 비해 각각 3배, 3.8배 높은 것을 확인할 수 있다. 하지만 순수알루미늄에 불순물을 첨가함에 따라 변화하게 된다. 가장 유해한 원소는 티타늄(Ti)이고, 다음은 망간(Mn), 아연(Zn), 구리(Cu), 실리콘(Si), 철(Fe) 의 순서이다. 이처럼 합금원소들이 순수알루미늄에 첨가되었을 때 물리량의 변화를 정리하였다.

순수 알루미늄에 주조성, 기계적 성질, 물리적 성질, 화학적 성질, 그 외의 특성을 개선할 목적으로 각종 원소가 비교적 많이 첨가되지만 잉곳의 제련과정 및 합금제조단계 중에 불순물원소가 혼입되며, 아래와 같은 영향을 미치게 된다.

(가) 구리(Cu)

알루미늄에 구리의 첨가는 고용체강화와 석출강화에 의한 강도의 향상, 내열성의 향상, 기계가공성(절삭성)의 개선효과가 있다. 그러나 열간균열이 일어나기 쉽다. 또한 구리를 함유하지 않으면 내식성이 양호한데 비해 구리의 함유는 내식성을 현저하게 저하시킨다.

(나) 규소(Si)

실리콘을 첨가하면 용탕의 유동성, 수축공동, 내열 균열성이 크게 향상되어 우수한 주조성을 가진다. 또한 다량의 실리콘을 함유한 금속은 열팽창계수가 작고 내마모성이 우수하다. 그러나 기계가공성을 현저히 떨어뜨리기도 한다.

(다) 철(Fe)

철은 Fe-Al₃, Al-Fe-Si 등의 화합물을 형성하고 인성과 내식성, 용탕보급능력을 현저하게 약화시키는 유해원소이다. 따라서 인성을 특징으로 하는 합금, 또는 내식성을 특징으로 하는 합금에서는 철을 가능한 낮게 억제할 필요가 있다.

(라) 망간(Mn)

Mn은 재결정을 억제하여 알루미늄 합금의 기계적 성질과 부식성을 높여준다. 고

온강도의 향상 및 철 함유량이 많은 합금에 첨가함으로써, 유해한 Al-Fe-Si 화합물의 정출을 억제하고 인성저하방지 효과를 낸다.

(마) 티타늄(Ti)

Ti는 함량이 0.02~0.04%일 때 고온균열의 발생을 억제하는 효과가 가장 두드러지나, 단독으로 첨가될 때보다 다른 결정립 미세화 원소와 함께 첨가될 때 더 양호한 효과를 나타낸다. 티타늄에 의해 결정립을 미세화 시켜 구조성 및 기계적 성질을 향상시키며 붕소가 공존하면 첨가량이 적더라도 미세화 효과를 얻을 수 있다. Ti이 과잉 함유되어 있으면 유동성이 떨어지고 실리콘을 함유한 합금에 있어서 조대한 Al-Si-Ti 화합물이 정출되어 인성이 현저하게 저하된다. 또한 전기전도도 및 열전도도 저하된다.[71]

본 연구에서는 순수 알루미늄의 겹치기 용접시 최적의 공정변수를 선정하기 위해 실험하였다. 본 연구에서 사용된 소재는 순도 99.3%의 순수 알루미늄이다. Table 3.1에 성분별 전기전도도 및 열전도도를 제시하였다. 알루미늄 및 구리의 전기전도도가 높아 리튬이온 계열 배터리에 많이 사용되고 있으나 열전도도와 반사율이 높아 가공이 어려워 많은 연구가 진행 중이다. Table 3.2, 3.3은 본 연구에 사용된 순수 알루미늄의 화학 성분 및 기계적 성질 나타낸 것이다.

본 연구에 사용한 파이버 레이저는 파장은 $1.07\mu\text{m}$ 이고, 최대 평균 출력 600W, 최대 피크 출력은 6kW급의 연속파와 펄스파가 가능한 듀얼 모드 레이저(YLS-600/6000-QCW-AC)이다. 레이저빔은 직경이 $50\mu\text{m}$ 인 광섬유(optical fiber)에 의해 전달된다. 광섬유로 전달되는 레이저빔의 초점직경은 $78\mu\text{m}$ 이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 $f=250\text{mm}$ 이다. 레이저 빔 품질 BPP(Beam Parameter Product)는 $2.0\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 이다. 이 관련된 장비 사진, 스펙 및 모식도를 Fig. 3.1, 3.2에 나타내었다.

Table 3.1 Electrical conductivity and thermal conductivity of materials

	Electrical conductivity		Thermal conductivity	
Si	2.52×10^{-12}	$10^6 \text{cm}^{-1} \Omega^{-1}$	1.48	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$
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(wt%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Al
	0.186	0.393	0.002	0.001	0.12	99.298

Table 3.3 Mechanical properties of aluminum

Al	Tensile Strength (kg/mm^2)	Yield Strength (kg/mm^2)	Elongation (%)
	9.5 이상	7.5 이상	2 이상

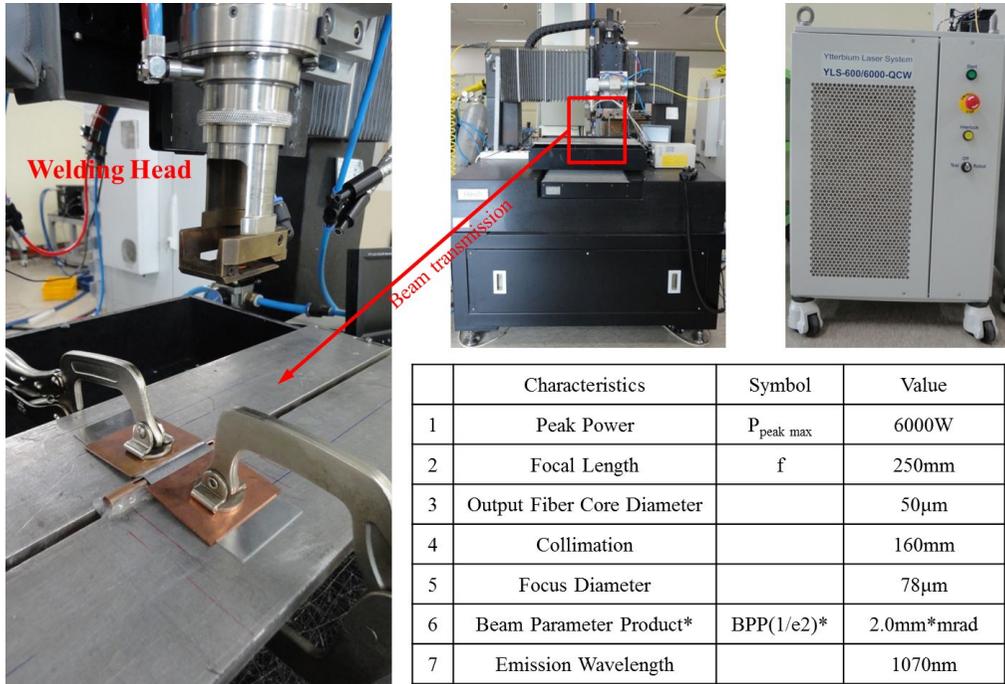


Fig. 3.1 Fiber laser and lap welding experiment equipment

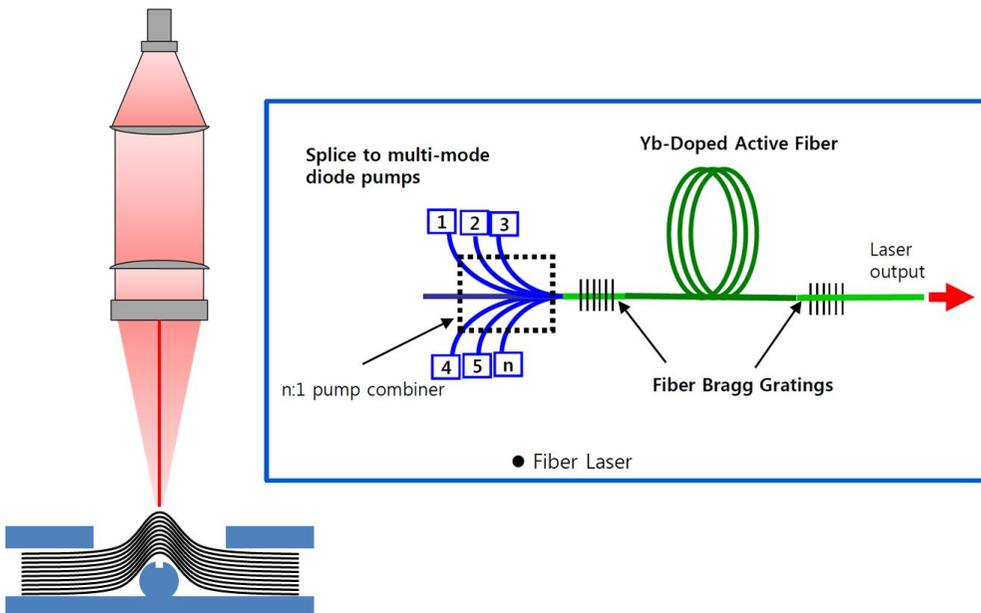


Fig. 3.2 Schematic of fiber laser processing system

3.2 실험 방법

본 연구에서는 순수 알루미늄 소재를 100mm(L) × 50mm(W) × 0.03mm(T)로 제작하여 레이저 겹치기 용접시 최적의 공정을 결정하기 위해 실험하였다. 두께가 30 μ m 이고 99.3%이상인 초박판 순수 알루미늄 40장을 겹치기 용접하였다.

현장에서는 알루미늄 용접시 초음파 용접을 활용하고 있다. 초음파 용접은 고주파 기계 진동을 이용한 용접의 한 방법으로, 기계적 진동을 2개 금속소재 표면에 전달하여 가압 상태에서 2개 금속 표면이 서로 마찰하고 원자가 표면 접촉 및 서로 융합하여 분자간의 고정 융합으로 이루어지게 된다. 하지만 초음파 용접의 문제점으로는 가공면적 및 가공 깊이의 제한이 있어 기계적 강도 면에서 문제가 발생하게 된다. 또 모재가 얇을 경우에는 찢어질 위험성도 있으며 3개 이상의 판재의 용접에는 적용이 어렵고, 용접하더라도 원하는 기계적 강도를 얻기 힘들며 피로에 취약하게 된다.

이를 보완하기 위해 본 연구에서는 펄스파형 레이저를 이용하여 레이저 용접 하였다. 본 연구에 사용된 펄스파형 레이저의 듀티가 10%로 고정되어 있기 때문에 식(2)~(6)에 의해 Table 3.4와 같이 공정변수들을 선정하였다.

최대 평균 출력은 0.6kW로 듀티 10%에 의해 최대 피크 출력은 6kW까지 사용할 수 있다. 따라서 피크 출력을 3kW, 4kW, 5kW, 6kW별로 실시하였다. 펄스파형 레이저이기 때문에 레이저빔 이송속도는 1.5m/min으로 고정하고 주파수와 펄스 조사시간을 변화시켜 실험하였다. 앞에 언급했듯이 장비 특성상 듀티가 10%로 고정되어 있기 때문에 식(2), (3) 주파수를 정하면 펄스 조사시간이 결정되고 펄스 조사시간을 정하게 되면 주파수가 결정되게 된다. 이렇게 때문에 펄스 조사시간과 주파수는 2ms(50Hz), 3ms(33Hz), 4ms(25Hz), 5ms(20Hz), 6ms(16Hz)으로 고정하고 피크출력을 변화시켜가며 실험하였다.

또 펄스 조사시간 변화에 따른 용접특성을 확인하기 위하여 장비의 최대 에너지 값을 넘지 않은 조건하에 피크출력과 주파수를 각각 5kW, 15Hz로 고정하고 펄스 조사시간을 2ms, 3ms, 4ms, 5ms, 6ms로 변화시켜 실험을 실시하였다.

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

Table 3.4 Experimental processing parameters

	Lap Welding			
Laser Peak Power (kW)	3	4	5	6
Welding Speed (m/min)	1.5			
Focal Position (z)	0mm (f=250mm)			
Pulse Duration (ms)	2, 3, 4, 5, 6			
Frequency (Hz)	15, 16, 20, 25, 33, 50			

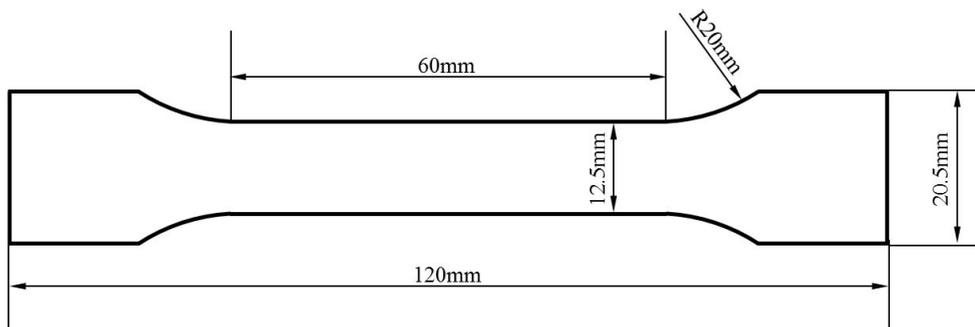


Fig. 3.3 Tensile test specimens

3.3 실험분석 장치 및 방법

3.3.1 실험시편 제작 및 준비

초박판 순수 알루미늄 40장 겹치기 용접한 시편의 용접부 단면 분석 및 인장 시험 테스트를 하기 위해 와이어 커팅을 이용하여 정밀하게 절단하였다. 절단 위치는 시편의 용접부를 중심으로 인장시편편 모양으로 시편편을 채취했으며, 겹치기 용접부 단면을 분석하기 위하여 Fig. 3.4에 나타난 핫 마운팅기(Hot mounting press)로 마운팅을 하고, Fig. 3.5의 자동연마기(Automatic polisher)로 샌드페이퍼 220~2000번까지 하고 최종면은 0.25 μ m까지 표면연마를 실시하였다. 표면연마 후 Keller's reagent ($H_2O + HNO_3 + HCl + HF$)를 사용하여 20초간 에칭 후 용접부 단면을 분석하기 위한 시편편을 준비하였다.

3.3.2 용접부 단면 광학 현미경 분석

펄스파형 레이저 공정변수에 따라 용접성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 용접부의 미세조직을 관찰하였다. 표면 연마된 시편을 Keller's reagent를 사용하여 20초간 에칭한 후 Fig. 3.6의 금속광학현미경(Olympus : GX-51)으로 관찰하였다.

Fig. 3.6에서 보는 바와 같이 광학현미경(Olympus)은 최소배율 $\times 25$ 에서 최대배율 $\times 500$ 을 사용하여 초박판 순수 알루미늄 40장 겹치기 용접부 단면을 관찰하였다.

3.3.3 경도 시험

레이저 용접시 발생하는 기공 및 고온균열과 같은 결함을 제외한 용접금속의 기계적 성질을 측정하기 위하여 경도시험을 실시하였다. 순수 알루미늄 40장 겹치기 용접한 후 횡단면의 측정 위치는 1/2두께 위치에서 모재, 용접금속, 모재의 순서로 각각 경도를 측정하였고 깊이방향은 용접부를 중심으로 측정하였다. 경도값을 측정하기 위해 Fig. 3.7에서 보는 바와 같이 마이크로 비커어스 경도시험기(Simadzu : HMV-2series)를 사용하였으며, 다이아몬드 인덴터(diamond indenter)의 하중은 98.07mN(Hv0.01)을 적용시켰다.

3.3.4 인장 시험

레이저 용접부의 기계적 성질을 측정하기 위해 인장시험을 실시하였다. 인장시편은 Fig. 3.3와 같이 초박판 순수 알루미늄 40장 겹치기 용접부를 중심으로 인장시험

편을 준비하였다. 본 시험에 사용된 Fig. 3.8의 인장시험기는 Hounsfield사의 universal testing machine이며 인장시험 시 인장시편이 인장하중 방향에 수직한지 확인하고 인장시험 각 용접조건별로 인장시편을 사용하여 시험하였다.



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

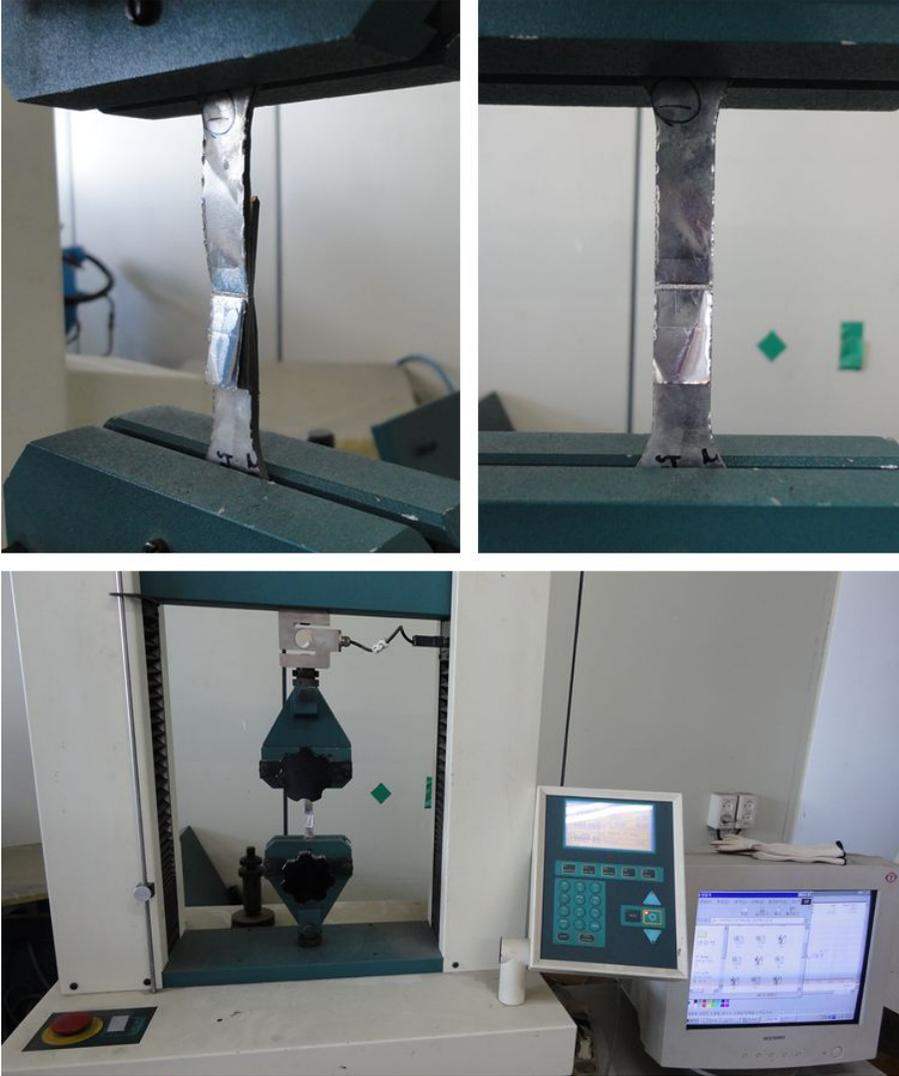


Fig. 3.8 tensile test experiment equipment of lap welding

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 초음파 용접 특성

산업체 현장에서는 초음파 용접기를 이용해서 알루미늄 박판을 용접하고 있다. 레이저 용접과 초음파 용접기로 용접한 결과를 비교하기 위해 초음파 용접을 하였다. 순수 알루미늄 박판의 두께는 30 μ m이고 용접한 박판은 40장이다. 용접형태는 초박판 순수 알루미늄을 40장 겹치기 용접하였다.

Fig. 4.1는 초음파 용접 장치의 모식도이다. 60Hz의 교류를 파워서플라이를 통해 15~40kHz로 변화시킨 후 전기적 에너지를 변환기에서 기계적 에너지인 진동에너지로 변환하고, 진동 에너지의 진폭이 부스터에 의해 증가 또는 감소된다. 부스터를 통과한 진동에너지는 용접이 이루어지는 혼 끝단부에서 최대 진폭을 가진다. 혼은 진동을 전달하는 역할을 한다. 혼의 넓은 상부시편을 고정하게 되는데 이것은 혼에 의해 전달된 진동에너지가 상부시편에 전달시키기 위해서 이다.

Fig. 4.2는 초음파용접 공정 모식도이다. 혼으로 상부시편을 고정하고, 앤빌로 하부시편을 고정한다. 15~40kHz 초음파 진동으로 혼과 상부시편이 진동하게 되고, 하부시편은 고정되므로 상부시편과 하부시편의 마찰에 의해 접합이 이루어지게 된다. 상하부시편의 마찰에 의해 산화층이 제거되고, 금속원자들이 계면에서 산화층이 파괴됨과 동시에 각각의 계면으로 확산되어 접합이 된다.[72] Fig. 4.3의 초음파 용접 조건은 에너지는 314.1J, 압력은 0.2MPa, 앰플리튜드는 80%이고 용접시간은 0.3s 이다. 혼의 사양은 피치가 1.2mm이고 면적은 46mm \times 5mm이다.

Fig. 4.3은 알루미늄 박판 40장을 초음파 용접한 결과를 나타내고 있다. (a)초음파 용접부 전면비드를 실사와 현미경으로 관찰하여 도시하였다. (b)는 초음파 용접부 단면을 현미경으로 관찰한 것을 나타내고 있다. Fig. 4.3(b)에서 용접단면의 전면비드와 후면비드가 물결모양으로 되어 있는 것은 혼에 의한 가압부분의 영향으로 파도모양 모양의 단면형태를 나타내고 있다. 단면에서 볼 수 있듯이 시편사이에 용융되어 접합되어 있지 않고 층층이 융착되어 있으며 대부분은 거의 접합되어있지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 초음파 용접시 혼의 설계가 중요하며 시편 수 십장을 겹치기 용접하기 위해서는 초음파 용접부를 넓게 하여 Fig. 4.3(b)에 보이는 다른 부분에서는 융착되어 접합하는 효과를 기대할 수 있다. 따라서 용접부 면적이 레이저 용접에 비해 넓어 질 수 밖에 없다. Fig. 4.3(a)에 나타난 용접의 전면비드는

초음파 용접기로 용접할 때 시편을 가압하는 혼의 면적 때문에 용접단면의 폭이 5mm였다. 초박판 순수 알루미늄의 초음파 용접부 기계적 성질을 측정하기 위해 인장응력 실험 결과를 Fig. 4.4에 나타냈다. 레이저 용접은 초음파 용접에 비해 용접 전면 비드의 폭이 작기 때문에 단위 용접폭당 인장응력으로 비교하였다. Fig. 4.4에 의하면 최대 인장응력의 크기는 25.95MPa이다. 이 인장응력을 레이저로 용접한 인장응력과 비교하기 위해 용접폭 5mm로 나누면 5.19MPa/mm가 된다.

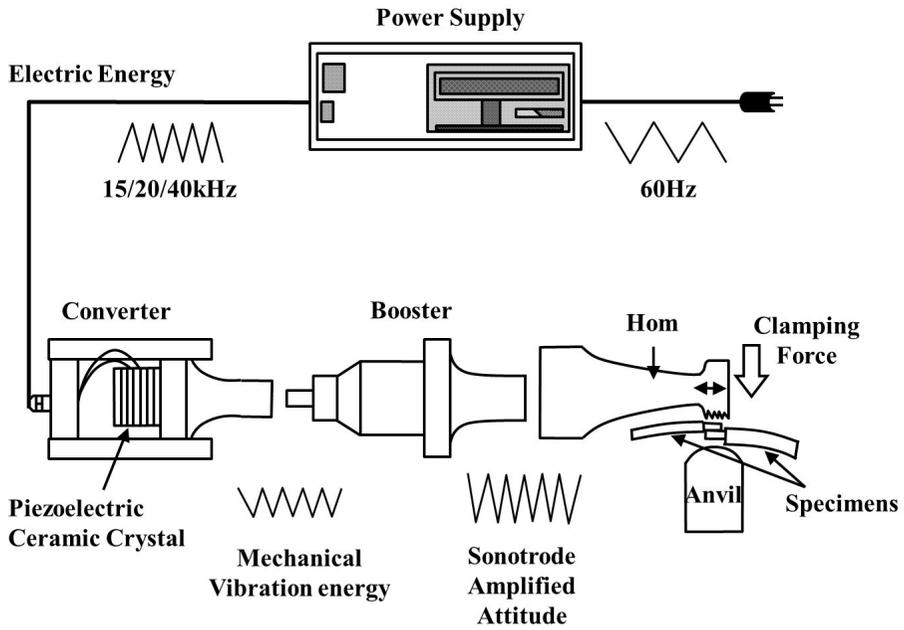


Fig. 4.1 Schematic of ultrasonic welding equipment[72]

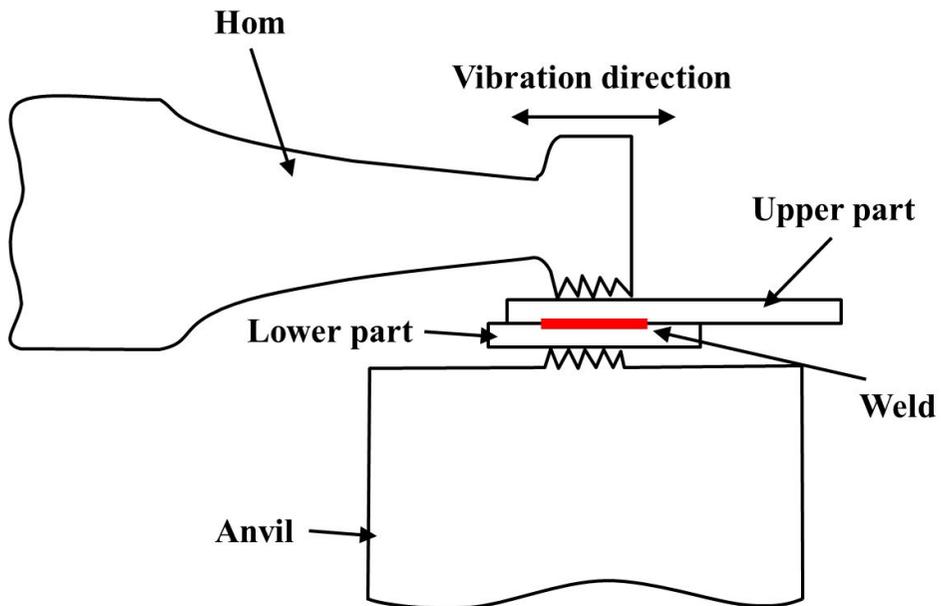


Fig. 4.2 Schematic of ultrasonic welding process[72]

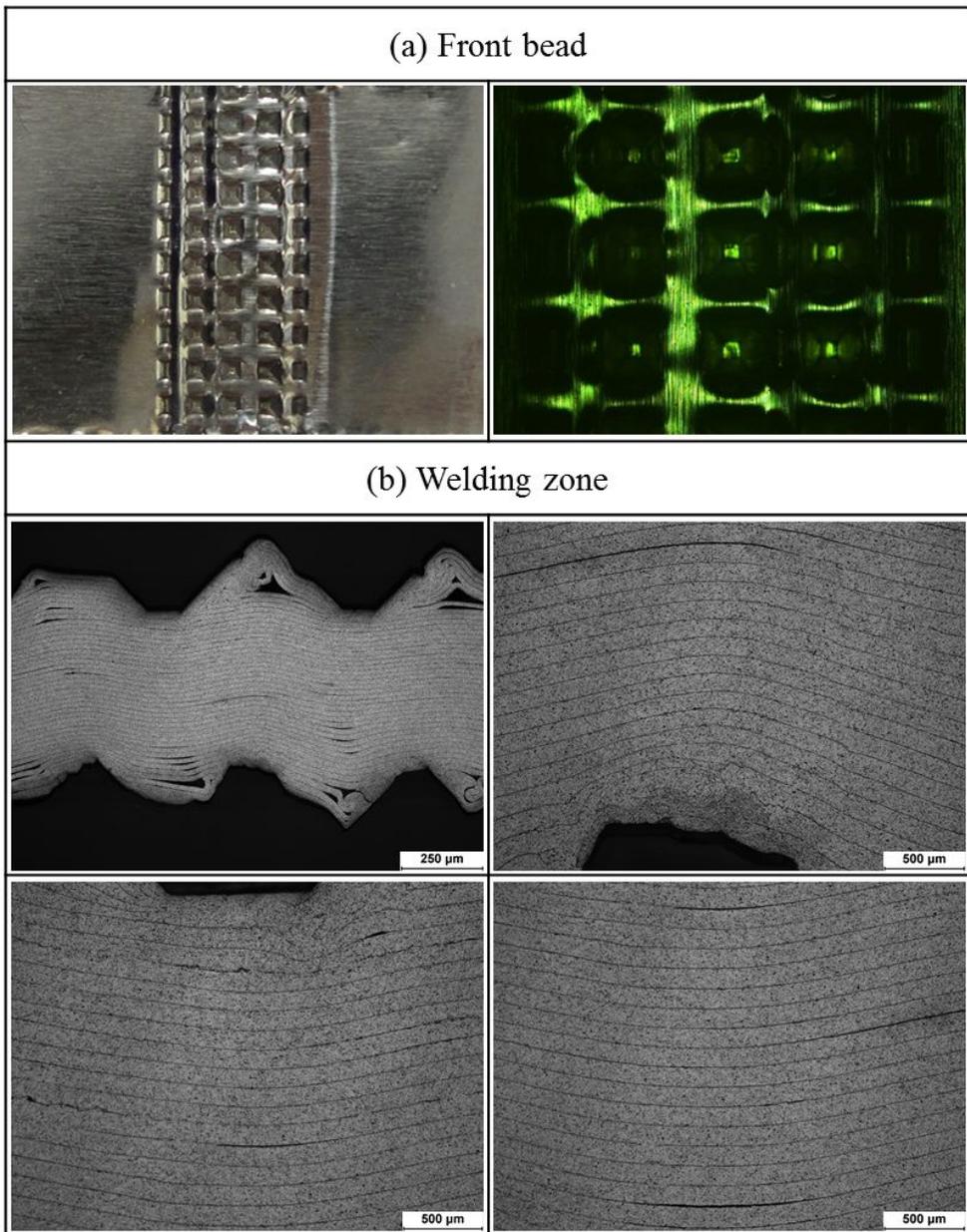


Fig. 4.3 Front bead and welding zone of ultrasonic welding

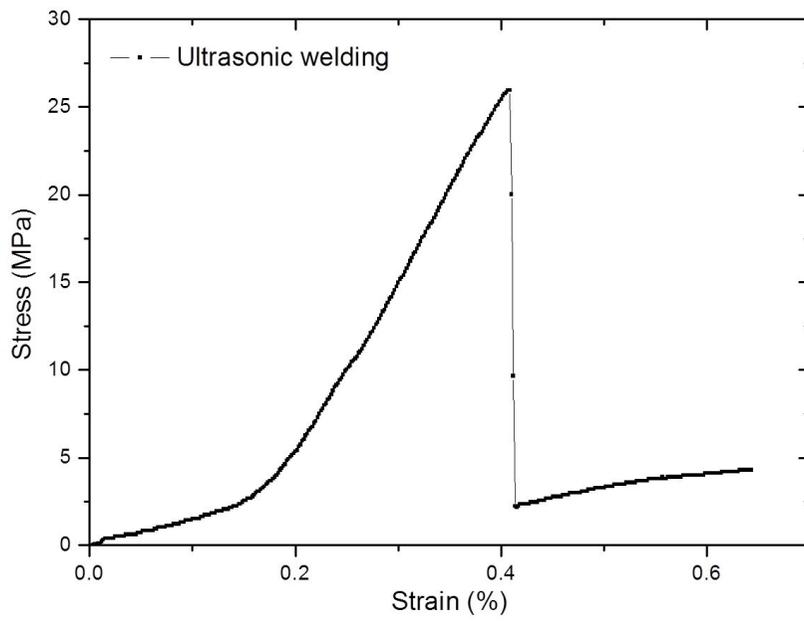


Fig. 4.4 Stress-Strain curve of ultrasonic welding

4.2 레이저빔 출력변화에 따른 용접 특성

4.2.1 공정변수별 중첩률

파이버 레이저로 두께가 30 μ m인 알루미늄 박판 40장을 겹치기 용접한 후 중첩률 및 전면비드 폭을 분석하기 위하여 용접부를 현미경으로 관찰하여 Fig. 4.5에 나타내었다.

공정변수는 앞에서 언급한 것처럼 식(5)를 이용하여 펄스당 에너지를 변화시켰으며, 식(2), (3)에 의해 펄스 조사시간과 주파수를 고정하고 피크 출력을 변화시켜 용접하였다. Fig. 4.6에서 확인할 수 있듯이 피크출력과 레이저빔 이송속도를 고정하고 주파수를 감소시키면 펄스 조사시간이 길어져 용접하였을 때 단위 펄스당 용접부 전면비드 폭이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 피크 출력이 같더라도 펄스 조사시간이 길어지게 되면 펄스당 에너지가 증가하고 레이저빔과 시편의 상호작용시간이 길어지면서 용접부 폭이 증가한 것으로 판단된다. 이렇게 주파수를 감소시키면 펄스 조사시간이 길어져서 용접부 전면비드 폭이 증가하여 중첩률이 증가할 것 같지만 주파수가 낮아져 레이저빔 조사회수가 줄어들어 중첩률은 감소하고 있다. 중첩률을 측정하여 Fig. 4.7에 나타내었다. Fig. 4.7에서 확인할 수 있듯이 중첩률은 펄스 조사시간이 아닌 주파수에 영향이 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.6에 의하면 펄스 조사시간과 주파수를 고정하고 피크 출력을 증가시키면 용접부 전면비드 폭도 약 0.01~0.1정도 증가하게 되고 피크출력을 고정하고 주파수를 감소시키게 되면 용접부 전면비드 폭은 약 0.5~0.6mm 증가하게 된다. 따라서 전면비드 폭은 피크 출력보다는 펄스 조사시간에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.7에서 보면 펄스 조사시간과 주파수를 고정하고 피크 출력을 증가시켜도 중첩률의 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급하였듯이 펄스 조사시간과 주파수가 고정된 상태에서 피크 출력을 증가시켰을 경우 전면비드 폭의 증가율이 미미하기 때문이다.

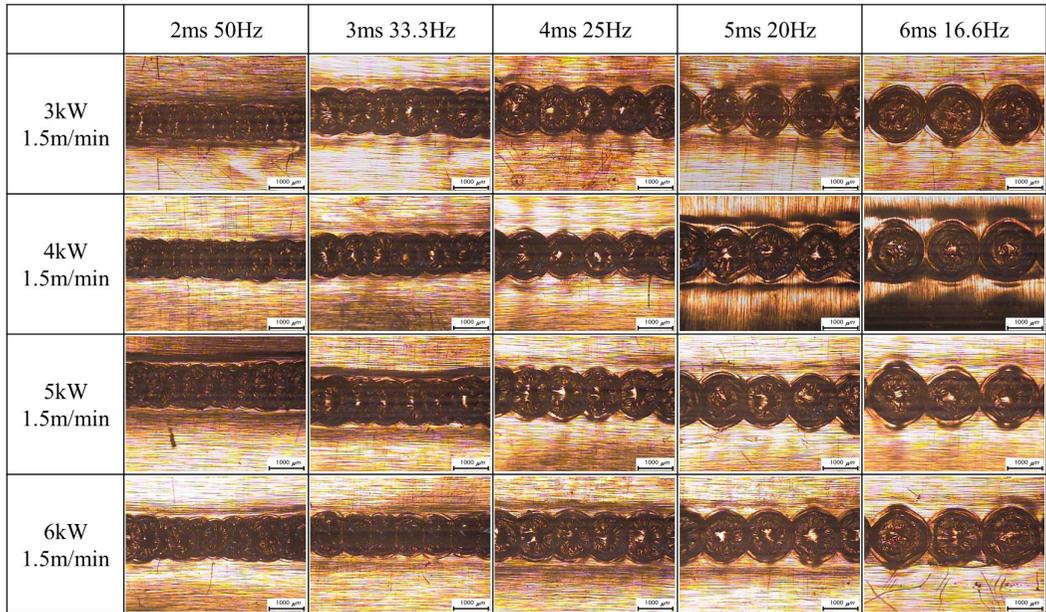


Fig. 4.5 Overlap Comparison of process parameters

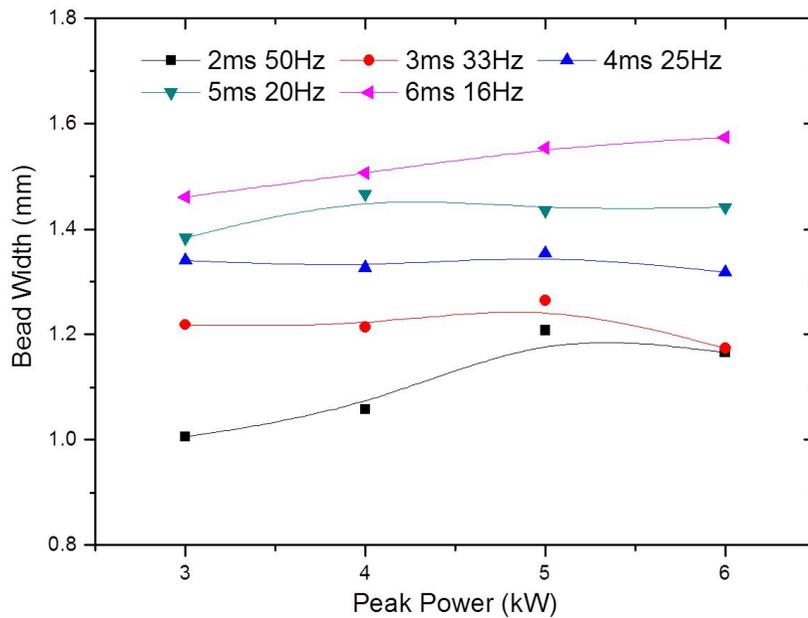
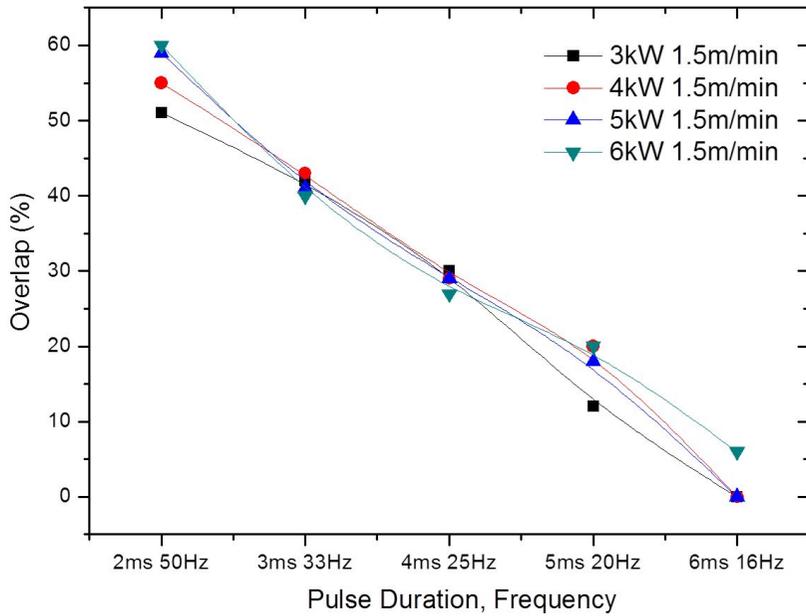
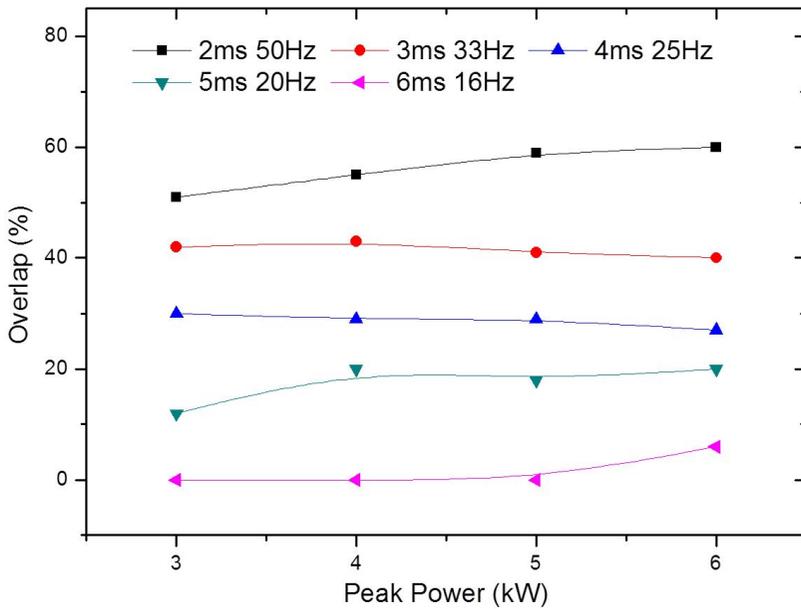


Fig. 4.6 Variations of front bead width according to process parameters



(a) Variations of overlap according to pulse duration and frequency



(b) Variations of overlap according to peak power

Fig. 4.7 Variations of overlap according to process parameters

4.2.2 전면, 후면비드 폭비와 입열량 특성

펄스 지속시간, 주파수와 레이저빔 이송속도를 일정하게 하고 피크 출력을 변화시켜 실험한 후 용접부 단면을 분석하여 Fig. 4.8에 나타냈다. Fig. 4.8의 용접부 단면에서 보듯이 피크 출력이 증가할지라도 전면비드의 용접폭의 변화가 크지 않았으나 용접단면의 용접부 면적은 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 피크 출력이 증가함에 따라 펄스당 에너지 밀도가 증가하게 되기 때문이다. 펄스당 에너지 밀도는 식(6)를 이용하여 계산하였고 조건별로 펄스당 에너지 밀도값은 Fig. 4.9에 나타내었다. 이렇게 피크 출력을 높이거나 펄스 조사시간을 길게하면 펄스당 에너지 밀도값이 증가하게 된다. 조건에 따라 증가되는 펄스당 에너지 밀도는 소재 40장 겹치기 용접하는 같은 조건에서 키홀을 형성하는데 필요한 에너지 임계값이 같기 때문에 키홀을 형성하고 남은 펄스당 에너지 밀도는 용접부 단면적을 증가시키는데 사용되기 때문이다.

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 Table 3.2에서 볼 수 있듯이 다른 성분들이 포함되게 된다. 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 달라지게 된다. 그리고 소재의 두께에 따라서도 임계 에너지 값이 다르기 때문에 나타나는 현상을 실험결과로 제시하고 있다.

실험결과에 나타나 있는 기공 발생의 가장 큰 이유로는 초박판 시편을 40장 겹치기 용접하기 때문에 시편 사이사이에 있는 공기층의 영향을 받는 것으로 판단하고 있다. 이는 용접시 키홀은 상하좌우로 큰 진폭을 가지며 진동하게 되므로 용융 금속이 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 키흔 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 많은 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. 2.2.3절에서 설명한 것처럼 용융 알루미늄의 수소용해도는 고체 상태의 알루미늄에 비해 액체 상태의 알루미늄에서 약20배 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.

박판 알루미늄 40장을 겹치기 용접했을 때 알루미늄 용접 시 자주 발생하는 고온균열은 발생하지 않았다. 이와 같은 이유는 본 연구에서 시편으로 사용한 알루미늄 박판의 두께가 30 μ m로 매우 얇기 때문에 용접부 단면에서 액체와 고체 경계면이 용접단면에서 발생하지 않았기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4.10는 용접부의 전면비드 폭과 후면비드 폭의 비를 공정변수별로 측정하여 나타낸 것이다. 펄스 조사시간과 주파수가 2ms 50Hz이고 피크 출력이 3kW일 때 전면비드와 후면비드의 폭비가 큰 이유는 Fig. 4.8에 나타낸 것처럼 펄스당 에너지 밀도가 충분하지 않아 시편 끝까지 에너지가 전달되지 못하고 표면에서 에너지가 흡수되어 전면비드에 비해 후면 비드 작게 형성되었기 때문이다. 펄스 조사시간과 주파수를 일정하게 하고 피크 출력을 증가시키면 Fig. 4.9에서 처럼 펄스당 에너지 밀도가 증가하여 관통 용접시 용접부 단면과 후면비드 폭도 같이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 최초에 레이저빔에 알루미늄 시편을 용융시켜 키흔을 형성하는데 필요한 에너지는 같아 키흔을 형성하고 남은 에너지는 용접부 단면과 전면, 후면비드 크기를 증가시키는데 사용된 것으로 판단된다. 따라서 펄스 조사시간을 증가 시키거나 피크 출력이 높이면 후면비드 폭도 같이 증가하여 전면비드와 후면비드 폭비에는 큰 변화가 보이지 않았다.

용접부 단면 분석을 바탕으로 펄스 레이저로 초박판 소재 수십장 겹치기 용접시 관통용접에 크게 영향을 미치는 것은 피크 출력이고 용접부 단면의 크기에 영향을 미치는 것은 펄스 지속시간에 영향을 받고 있음을 실험결과로 확인하였다. 이는 펄

스 조사시간과 주파수를 고정하고 피크 출력을 조절하면 용접부 단면이 좁은 용접이 가능하고 펄스 조사시간을 증가시키면 용접부 단면이 넓은 용접이 가능하다는 것을 의미한다.

실험 공정변수를 기준으로 식(6)을 이용하여 펄스당 에너지 밀도를 계산하여 Fig. 4.9에 나타냈다. 피크 출력을 일정하게 하고 주파수를 감소시키면 펄스당 에너지 밀도가 증가하고 있다. 이는 주파수가 감소하면 식(2),(3)에 의해 레이저빔의 펄스 조사시간이 증가하여 같은 피크 출력을 더 오래 조사하기 때문이다. 주파수와 레이저빔의 이송속도를 일정하게 하고 레이저빔의 피크 출력을 증가시켜도 펄스당 에너지밀도가 증가하고 있다. 이는 같은 펄스 조사시간이더라도 피크 출력이 크면 더 큰 에너지는 받기 때문이다. 이처럼 원하는 펄스당 에너지 밀도는 피크 출력을 조절하거나 펄스 조사시간을 조절하여 얻을 수 있다. 하지만 펄스당 에너지가 같더라도 피크 출력과 펄스 조사시간이 다르기 때문에 시편에 전달된 입열량에는 차이가 발생하게 된다. 그 결과를 식(7)에 의해 입열량을 계산하여 Fig. 4.11에 나타냈다. Fig. 4.11에서 확인할 수 있듯이 피크 출력이 클수록 펄스 조사시간 변화에 따른 입열량 변화가 선형적인 것을 확인할 수 있다. 이는 피크 출력이 큰 경우에 키홀을 피크 출력이 작을 경우보다 더 빨리 형성할 수 있기 때문이다. 이렇게 키홀을 빨리 형성하게 되면 키홀을 형성하고 남은 펄스당 에너지 밀도는 시편에서의 손실이 거의 없이 키홀 내부에 전달되어 용접부를 형성하는데 사용되기 때문이다.

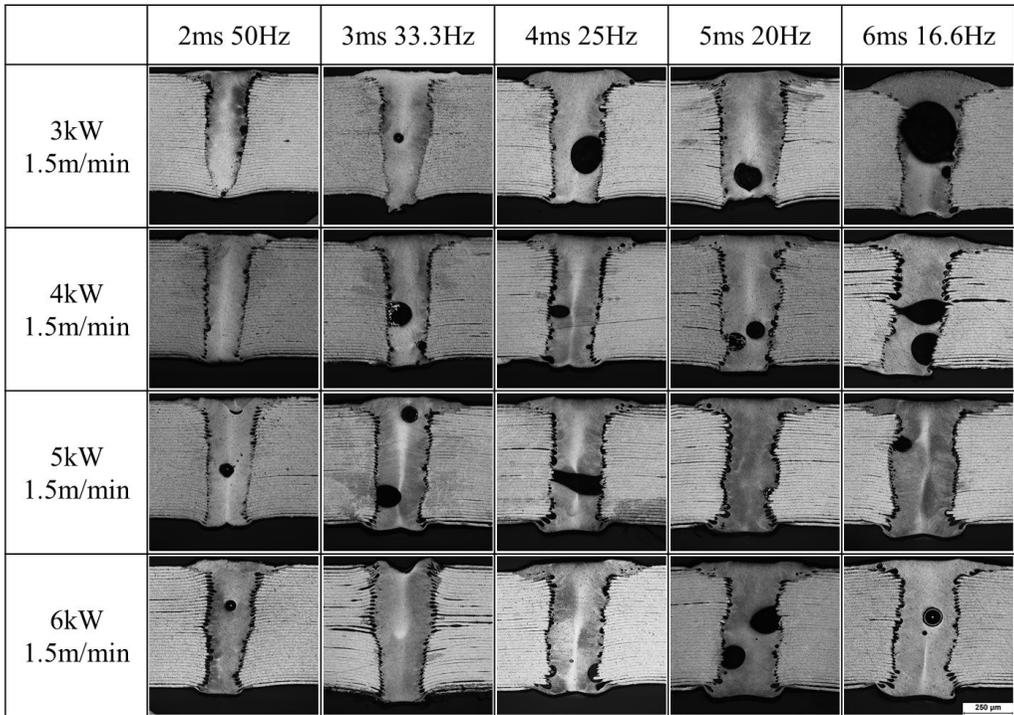
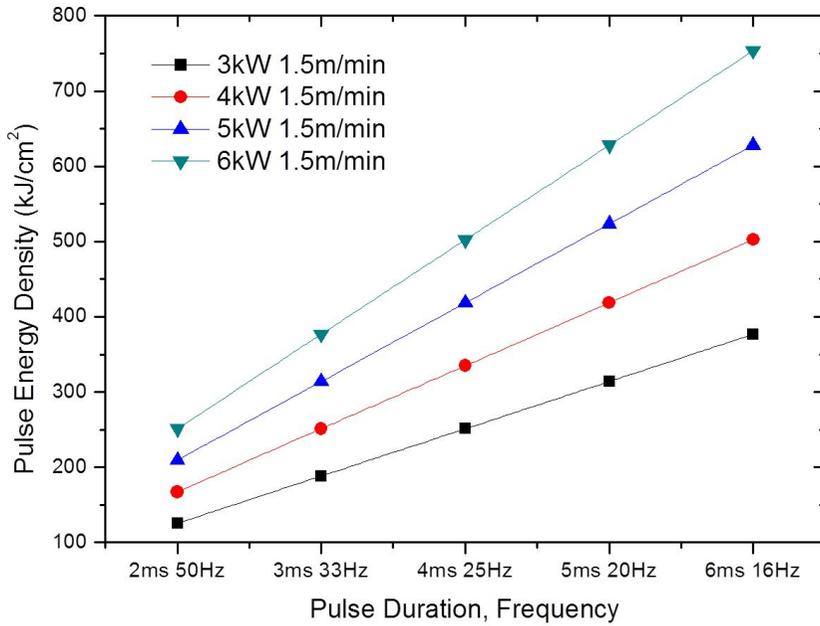
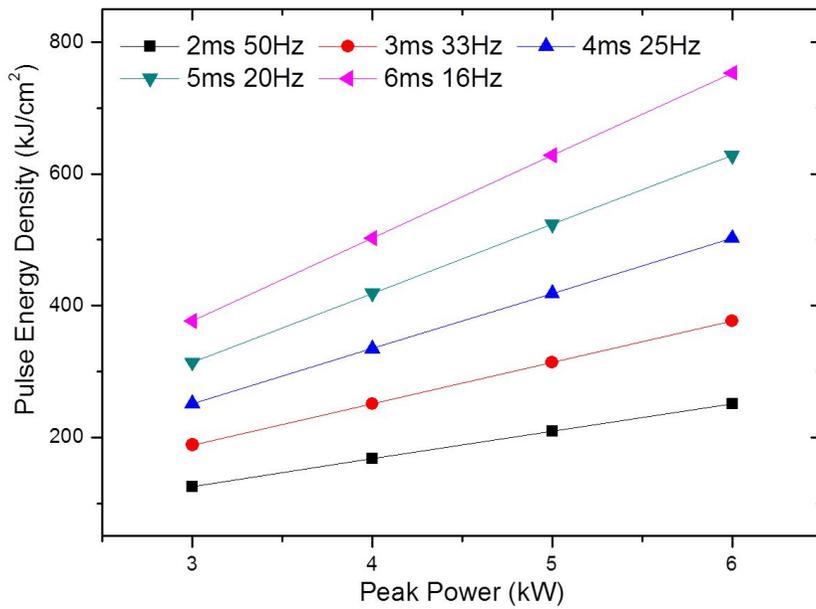


Fig. 4.8 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters

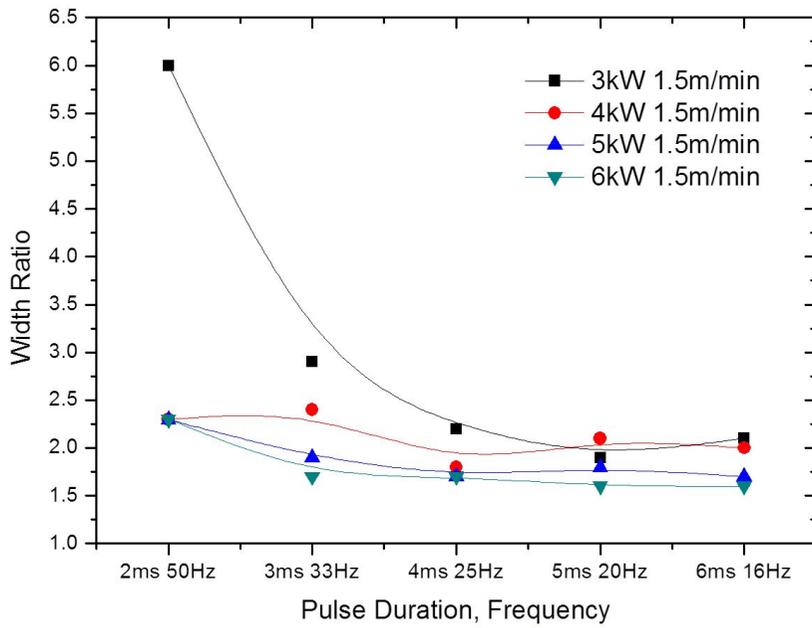


(a) Influence of pulse duration and frequency on the pulse energy density

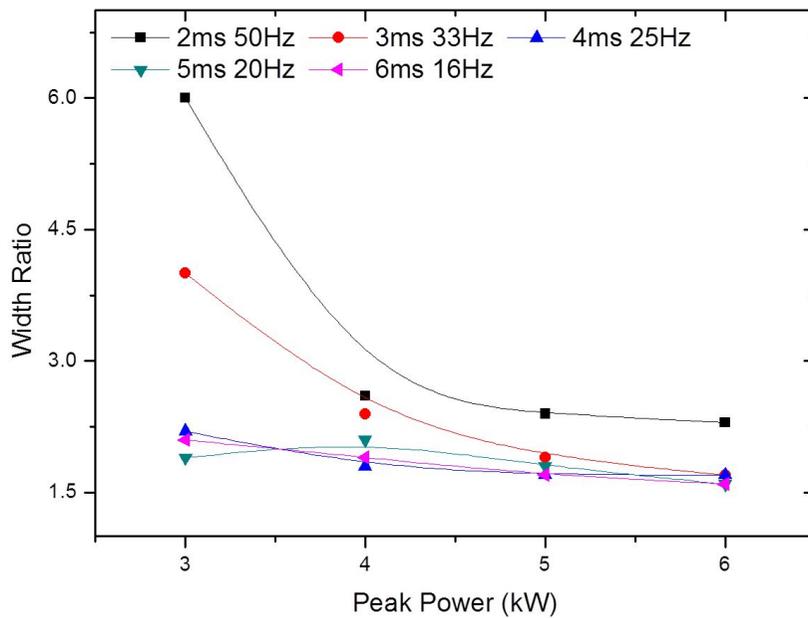


(b) Influence of peak power on the pulse energy density

Fig. 4.9 Influence of welding process parameters on the pulse energy density

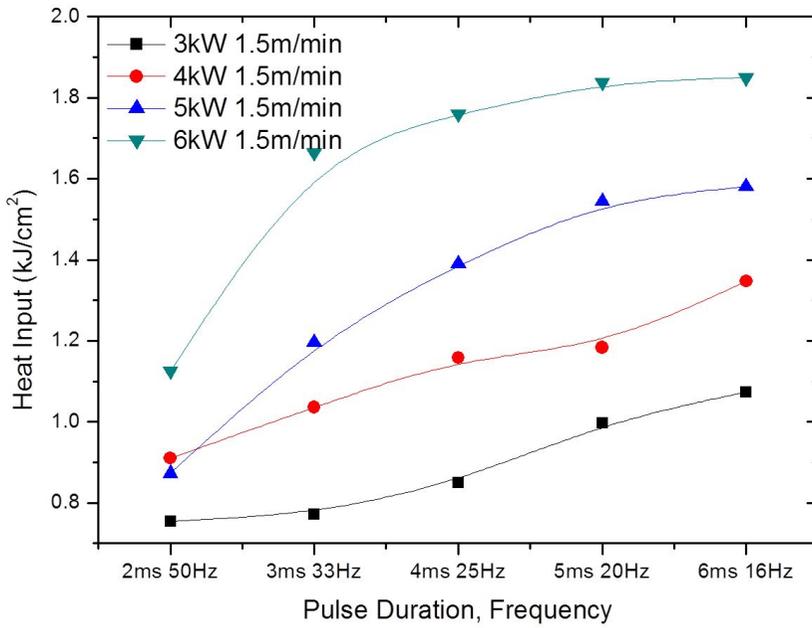


(a) Influence of pulse duration and frequency on the width ratio

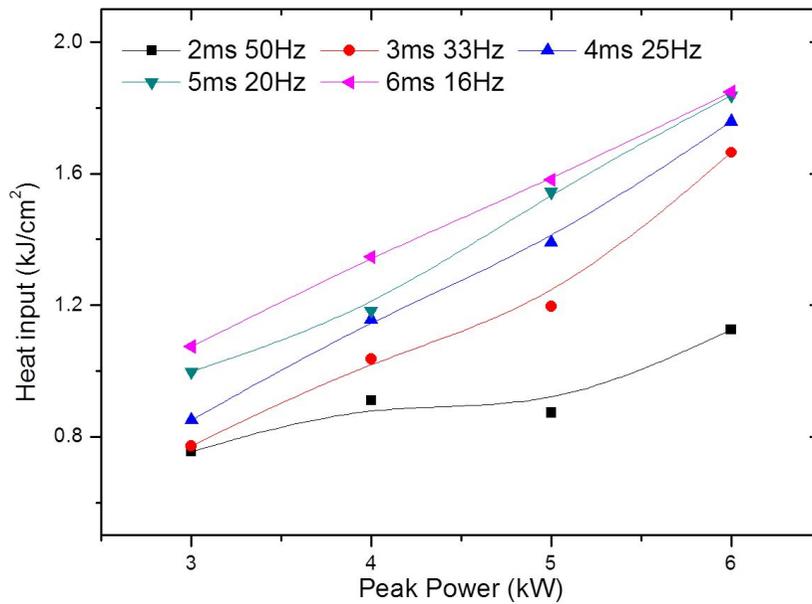


(b) Influence of peak power on the width ratio

Fig. 4.10 Influence of welding process parameters on the width ratio



(a) Influence of pulse duration and frequency on the heat input



(b) Influence of peak power on the heat input

Fig. 4.11 Influence of welding process parameters on the heat input

4.2.3 인장강도 및 경도 특성

알루미늄 박판의 두께 30 μ m인 시편 40장을 겹치기 용접한 후 용접부를 중심으로 인장시험편을 만들어 인장시험한 결과를 Fig. 4.12~4.20에 나타냈다. 초음파 용접한 결과와 비교하면 최대 인장강도 값은 초음파 용접에 경우에 더 크게 측정되었다. 하지만 초음파 용접의 경우에는 용접비드의 폭이 5mm로 레이저 용접에 비해 넓어 단위폭당 인장강도 값으로 계산하여 비교하였다. 초음파 용접의 단위폭당 인장강도 값은 4.1절에서 계산하였듯이 5.19MPa/mm이다.

피크 출력이 3kW일 때 펄스 조사시간과 주파수 변화에 따른 인장강도 테스트 결과를 Fig. 4.12에 나타내었다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 5ms 20Hz로 이때 최대 인장강도 값은 10.36MPa이었다. 이때 용접비드 폭은 약 1.38mm이었으며 단위폭당 인장강도 값은 7.51MPa/mm이다. Fig. 4.13는 피크 출력이 4kW일 때 펄스 조사시간과 주파수 변화에 따른 인장강도 테스트 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 6ms 16Hz로 이때 최대 인장강도 값은 8.71MPa이었다. 이때 용접비드 폭은 약 1.5mm이었으며 단위폭당 인장강도 값은 5.81MPa/mm이다. Fig. 4.14는 피크 출력이 5kW일 때 펄스 조사시간과 주파수 변화에 따른 인장강도 테스트 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 6ms 16Hz로 이때 최대 인장강도 값은 8.71MPa이었다. 이때 용접비드 폭은 약 1.55mm이었으며 단위폭당 인장강도 값은 5.62MPa/mm이다. Fig. 4.15는 피크 출력이 6kW일 때 펄스 조사시간과 주파수 변화에 따른 인장강도 테스트 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 값이 가장 크게 나타난 조건은 6ms 16Hz로 이때 최대 인장강도 값은 9.75MPa이었다. 이때 용접비드 폭은 약 1.57mm이었으며 단위폭당 인장강도 값은 6.21MPa/mm이다.

전체적으로 단위폭당 인장강도 값은 레이저 용접시 더 좋은 결과를 나타내고 있다. 초음파 용접과 같은 면적으로 레이저 용접을 했을 경우 훨씬 더 좋은 인장강도 값을 갖는다는 것을 의미한다. 피크 출력과 레이저빔의 이송속도를 일정하게 하고 주파수를 변화시켜 용접한 시편을 인장시험한 결과 주파수를 감소시키면 인장강도가 피크 출력이 3kW를 제외하고는 증가하고 있다. 3kW의 경우에는 에너지 밀도가 작아 시편으로 전달되는 에너지 중 열전도 및 반사에 의한 에너지 손실이 커 불안정한 키홀이 형성되어 인장강도 값도 작아진 것으로 판단된다.

Fig. 4.16~4.20은 레이저빔 이송속도, 주파수와 펄스 조사시간을 고정하고 피크 출

력을 변화시켰을 때 인장강도 테스트 결과를 나타낸 것이다. 그 결과 2ms 50Hz처럼 펄스 조사시간이 짧고 주파수가 클 경우에는 피크 출력이 작을 경우 큰 인장강도 값을 얻을 수 있었다. 이는 피크 출력이 증가하면 펄스당 에너지 밀도가 증가하게 되어 큰 에너지가 짧은 시간에 조사되기 때문에 과입열량이 되어 용접부의 조성분 중 용융온도가 낮은 일부 성분이 증발하거나 용접부 조직 성장이 불안정하게 이루어져 나타나는 현상으로 판단된다. 3ms 33Hz에서도 피크 출력이 작은 경우에 인장강도 값이 큰 경우도 이와 같은 이유로 판단된다. 4ms 25Hz에서는 피크 출력이 큰 경우에도 충분한 펄스 조사시간에 의해 용접부가 안정화되어 전체적으로 비슷한 인장강도 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 5ms 20Hz 경우에는 반대로 피크 출력이 작으면 펄스 조사시간에 비해 펄스당 에너지 밀도가 부족하여 충분한 입열량을 얻지 못해 용접부 조직 성장이 불안정하게 이루어져 인장강도 값이 떨어지는 것으로 판단된다. 6ms 16Hz에서처럼 펄스 조사시간이 길어지면 피크 출력도 증가한 경우에 높은 인장강도 값을 나타내었다. 이와 같은 결과로 펄스 조사시간이 짧으면 피크 출력이 작은 경우에 높은 인장 강도 값을 나타냈고 펄스 조사시간이 길면 피크 출력이 큰 경우에 높은 인장강도 값을 나타내었다. 인장강도 테스트 결과에서 불연속선이 나타난 것은 시편 40장을 용접하였기 때문에 인장시험 도중 내부에서 1장이 먼저 항복점이 지난 다음 나머지가 그 뒤따라 항복점을 넘었기 때문이다.

Fig. 4.21는 40장을 겹치기 용접한 후 용접부 중앙부인 20번째 시편의 횡단면의 경도분포를 측정한 결과이다. 용접된 부분의 경도는 약 45Hv에서 60Hv의 경도 값을 나타내고 있다. 모재의 경도가 35Hv 내외인 것을 고려하면 약 1.5배정도 경도 값이 증가되었다. 이것은 3.1절에서 언급하였듯이 용융부의 티타늄 성분이 냉각되면서 결정립을 미세화 시켰기 때문으로 판단된다. 경도 값을 나타낸 용접부의 폭은 약 0.8mm정도이다. 그림에서 제시한 공정변수들은 각각 레이저 피크 출력별로 인장응력이 가장 크게 나타난 것과 가장 작게 나타난 공정변수의 경도분포를 측정한 결과이다. 왼쪽에 있는 공정변수가 인장강도 값이 큰 경우이고 오른쪽의 공정변수가 인장강도 값이 작은 경우이다. 전체적으로 인장강도가 큰 경우에 작은 경우보다 경도값이 약 5Hv정도 크게 측정되었다.

Fig. 4.22은 시편 40장이 용접된 용융단면의 위에서 아래 방향으로 중앙부를 따라 경도 값을 측정한 것이다. 그래프에 표시된 공정변수의 의미는 Fig. 4.21와 같다. 피크 출력이 3kW일 경우에는 펄스 조사시간이 짧은 경우에 경도값이 크게 측정되었

지만 피크 출력이 4kW 이상의 경우에는 펄스 조사시간이 길수록 인장강도 값과 경도 값이 높게 측정되었다. 피크출력이 크고 펄스 조사시간이 짧은 경우에는 충분한 입열량이 전달되지 못하여 급가열 급냉각되면서 용접부 조직이 미세화되기 전에 응고되기 때문에 인장강도 및 경도 값이 작게 나타난 것으로 판단된다. 전체적으로 깊이방향에서도 인장강도 값이 큰 경우에 작은 경우보다 경도 값이 높게 측정되었다.

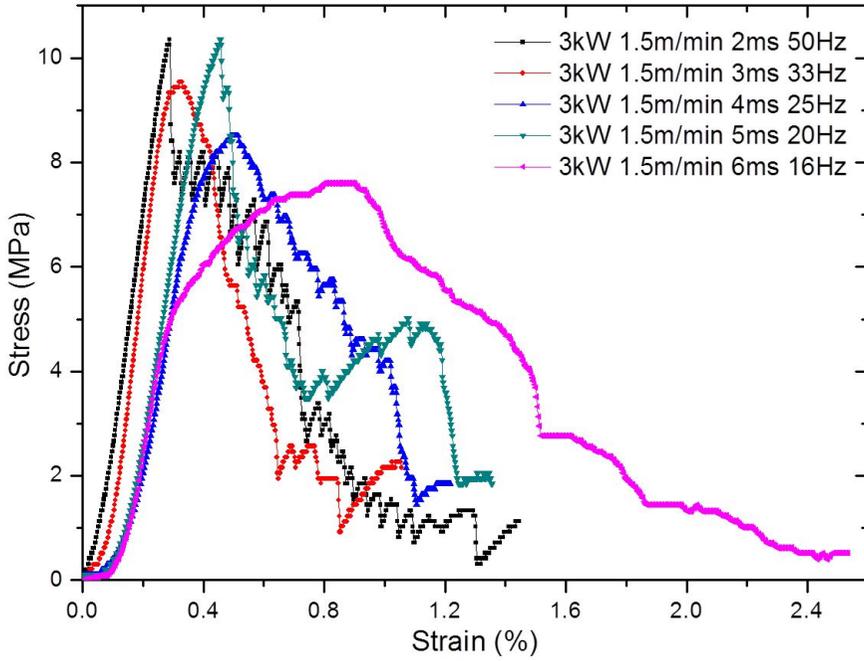


Fig. 4.12 Stress-Strain curve of laser welding (3kW)

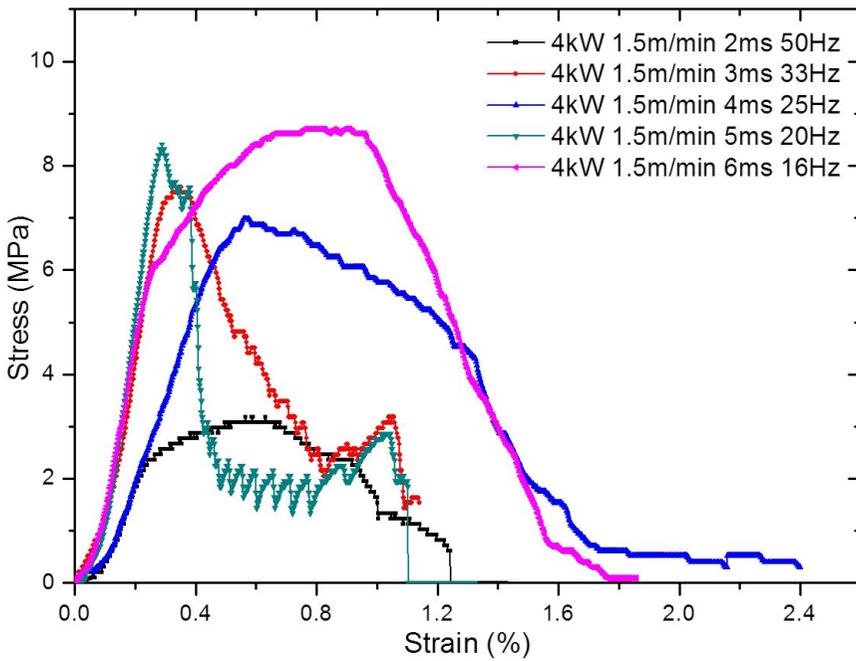


Fig. 4.13 Stress-Strain curve of laser welding (4kW)

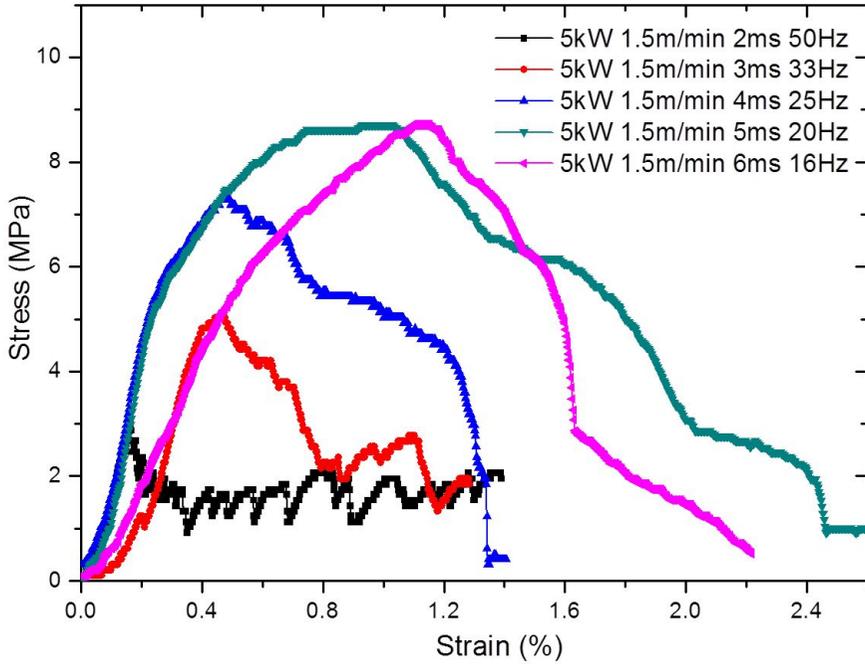


Fig. 4.14 Stress-Strain curve of laser welding (5kW)

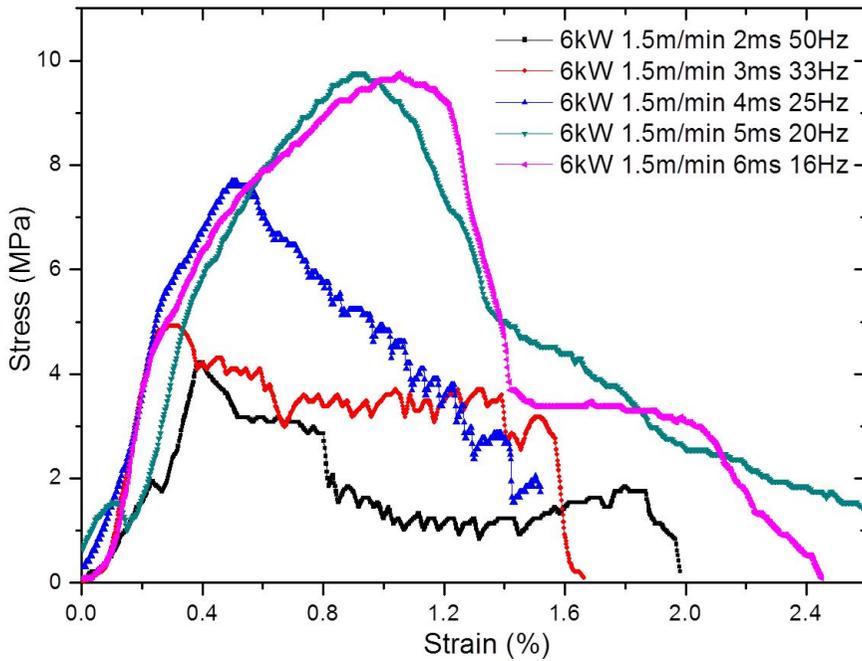


Fig. 4.15 Stress-Strain curve of laser welding (6kW)

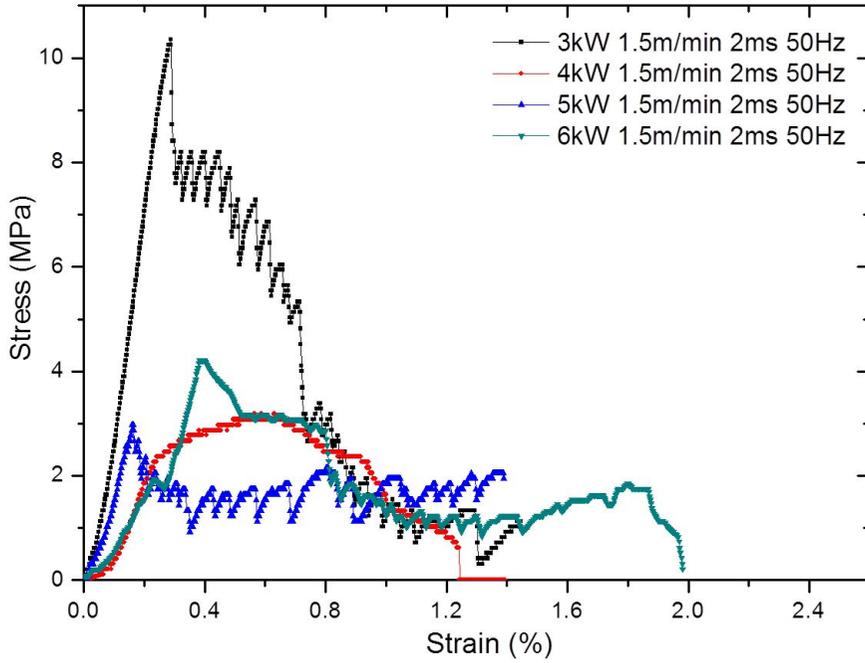


Fig. 4.16 Stress-Strain curve of laser welding (2ms 50Hz)

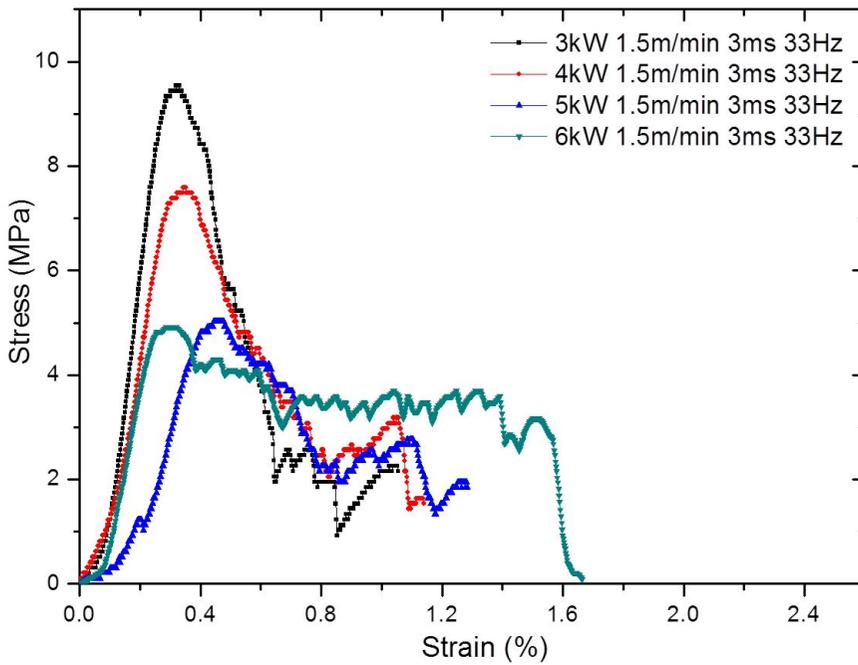


Fig. 4.17 Stress-Strain curve of laser welding (3ms 33Hz)

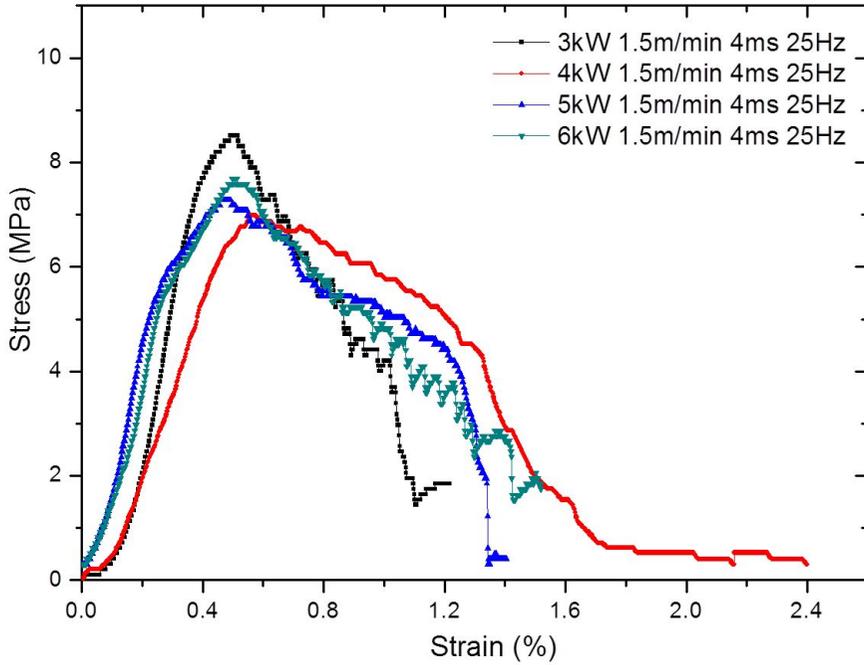


Fig. 4.18 Stress-Strain curve of laser welding (4ms 25Hz)

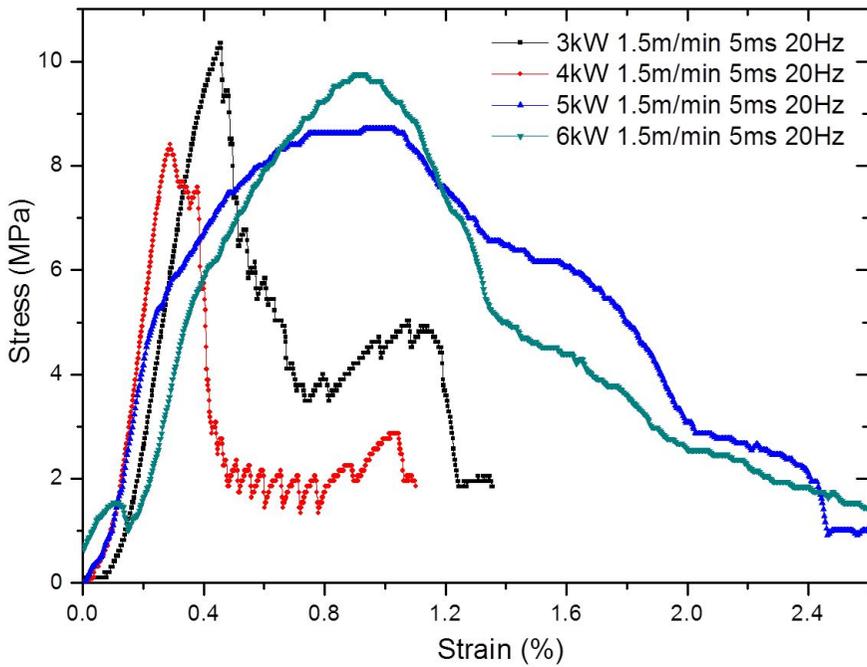


Fig. 4.19 Stress-Strain curve of laser welding (5ms 20Hz)

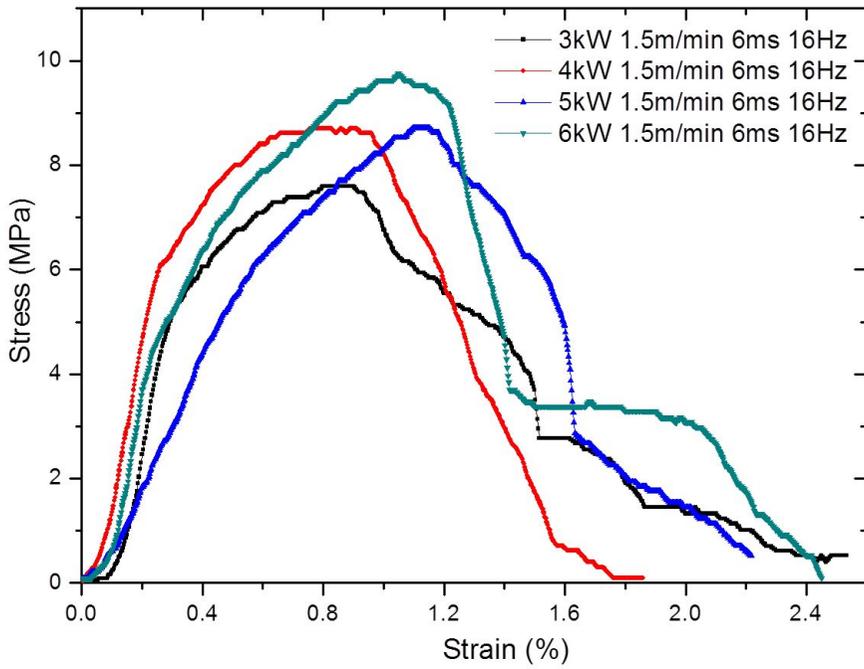


Fig. 4.20 Stress-Strain curve of laser welding (6ms 16Hz)

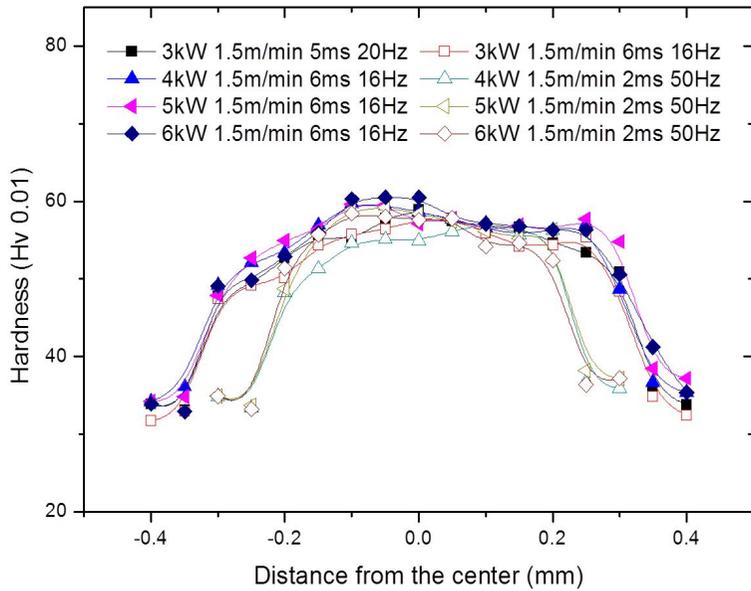


Fig. 4.21 Welding width hardness to variation of welding process parameters

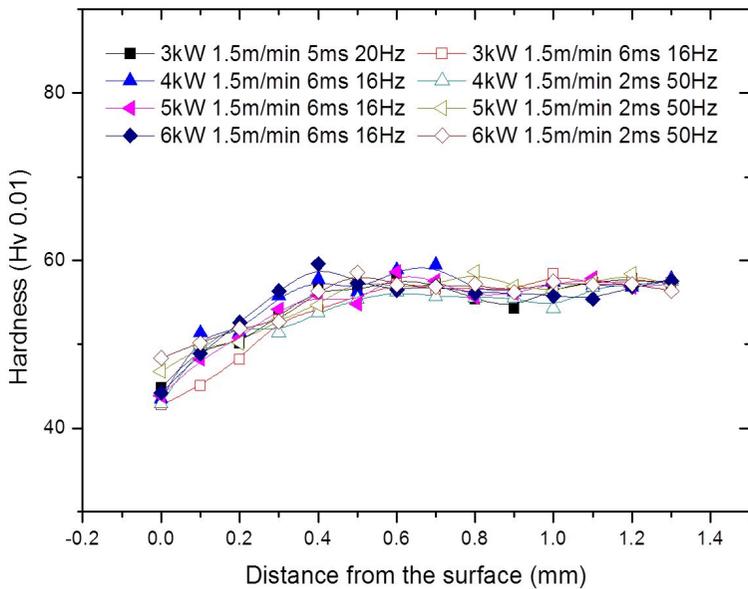


Fig. 4.22 Welding depth hardness to variation of welding process parameters

4.2.4 용접부 단면 미세조직 특성

Fig. 4.23~4.30는 인장시험 결과 인장강도가 가장 크게 나타난 것과 가장 작게 나타난 조건들의 조직사진이다. 인장강도가 가장 크게 나타난 조직사진의 공정변수를 빨간색으로 기입하였다.

모재의 조직을 관찰하면 순수 알루미늄이라고 하더라도 Table 3.2에 나타나 있듯이 철과 규소를 포함하게 된다. 따라서 모재 부분에서 보이는 검은 부분은 $FeAl_3$ 를 나타내며 일반적인 알려진 순수 알루미늄의 조직사진과 비슷하다. 이렇게 철 및 규소 불순물이 함유되므로 철 및 규소의 불용성 성분이 나타나는 것은 정도의 차이는 있지만 일반적인 현상이다.

용접부와 열영향부에서는 모재에 비해 매우 조밀한 조직을 관찰 할 수 있다. 이것은 3.1절에서 설명하였듯이 티타늄 성분에 의한 것으로 판단된다. 그 이유는 레이저 용접시 모재가 짧은 시간에 용융과 응고과정이 이루어지게 되는데 이때 모재 포함된 티타늄성분도 용융과 응고과정을 거치면서 모재의 결정립을 미세화 시켜 조직을 조밀하게 만든 것으로 판단된다. 또 다른 이유로는 모재가 용융된 후 냉각될 때 박판 겹치기 용접의 경우에는 박판 사이사이의 공기층에 의해 더 빠른 냉각 효과가 발생하게 되고 그에 따라 조직이 조밀하게 형성하게 된 것으로 판단된다.

하지만 인장강도 값이 큰 경우와 작은 경우의 조직사진을 자세히 관찰하면 조직의 미세화 차이가 다른 것을 확인할 수 있다. 인장강도가 높은 경우에 조직이 더 미세하게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 펄스당 에너지 밀도에 의해 입열량이 결정되는데 피크 출력이 4, 5, 6kW의 경우에는 펄스 조사시간이 짧으면 입열량이 충분하지 않고, 펄스 조사시간이 너무 짧아 조직이 미세화되기 전에 응고된 것으로 판단된다. 따라서 4, 5, 6kW에서는 펄스 조사시간이 6ms로 길 경우에는 조직이 미세화될 시간이 충분하여 인장강도 값도 크게 나온 것이다. 인장강도 값이 높은 조건에서 경도 값도 크게 측정된 이유는 앞에서 언급한 내용 때문인 것으로 판단된다. 3kW에는 피크 출력이 적어 조직이 성장하고 미세화되는데 필요한 입열량이 부족하여 공정변수 별로 비슷한 조직이 관찰되었으며 인장강도 및 경도에 차이가 있는 것은 용접부 크기와 용접부 결합인 기공과 연관이 있는 것으로 판단된다.

전체적으로 알루미늄 용접에서 발생하기 쉬운 기공이 관찰되었다. 기공의 모양 및 위치를 관찰하면 앞서 언급하였듯이 박판 사이사이의 공기층에서 공기가 들어

오게 되고 그에 따라 수소가 방출되면서 발생한 것을 확인할 수 있다.

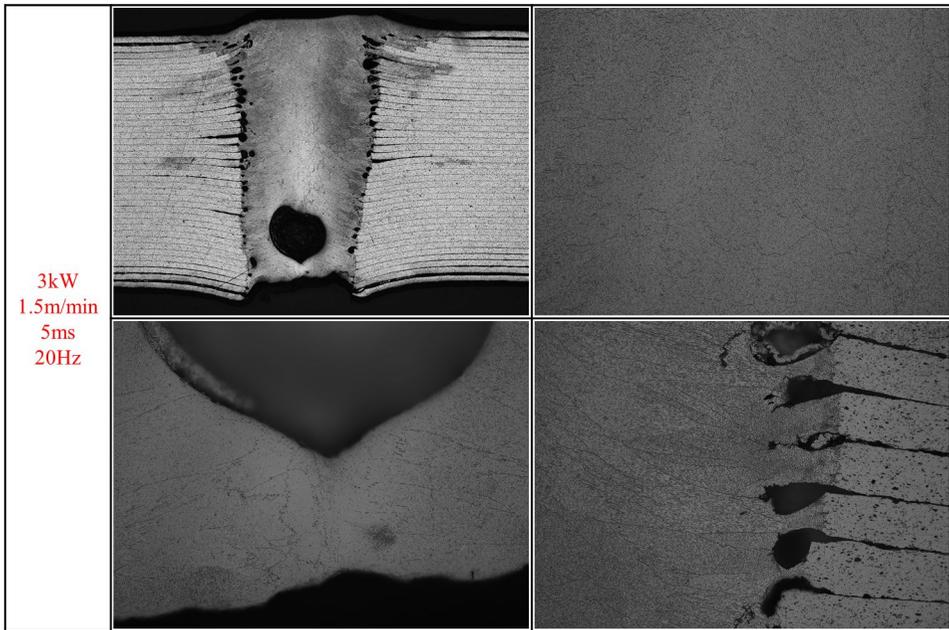


Fig. 4.23 Microstructure photos of weld zone (3kW 5ms 20Hz)

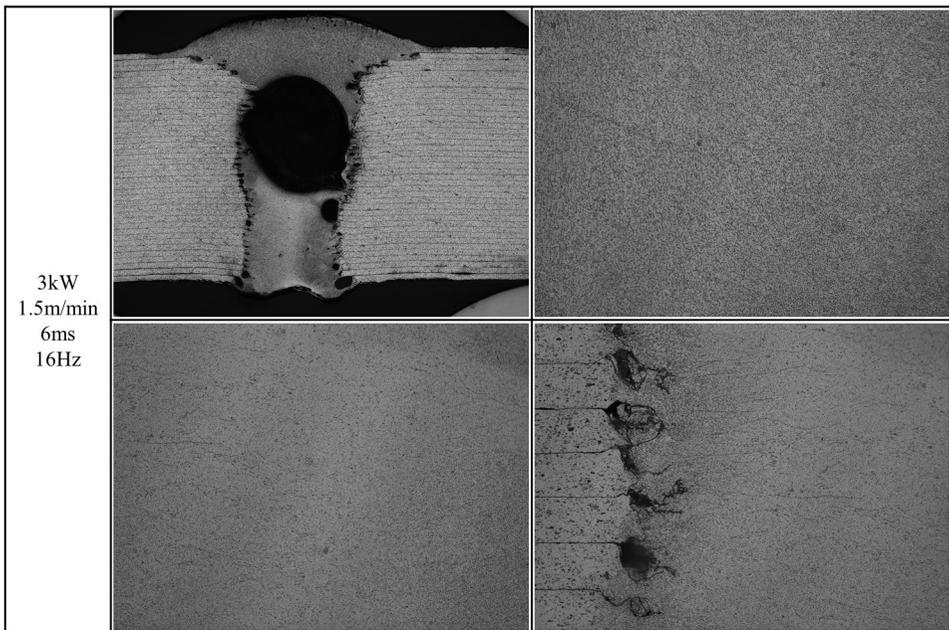


Fig. 4.24 Microstructure photos of weld zone (3kW 6ms 16Hz)

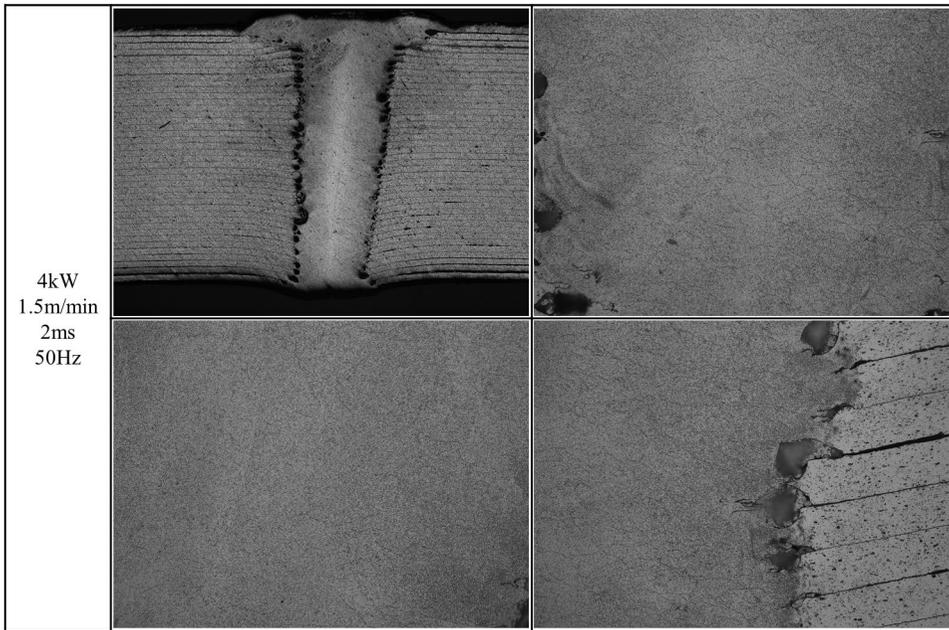


Fig. 4.25 Microstructure photos of weld zone (4kW 2ms 50Hz)

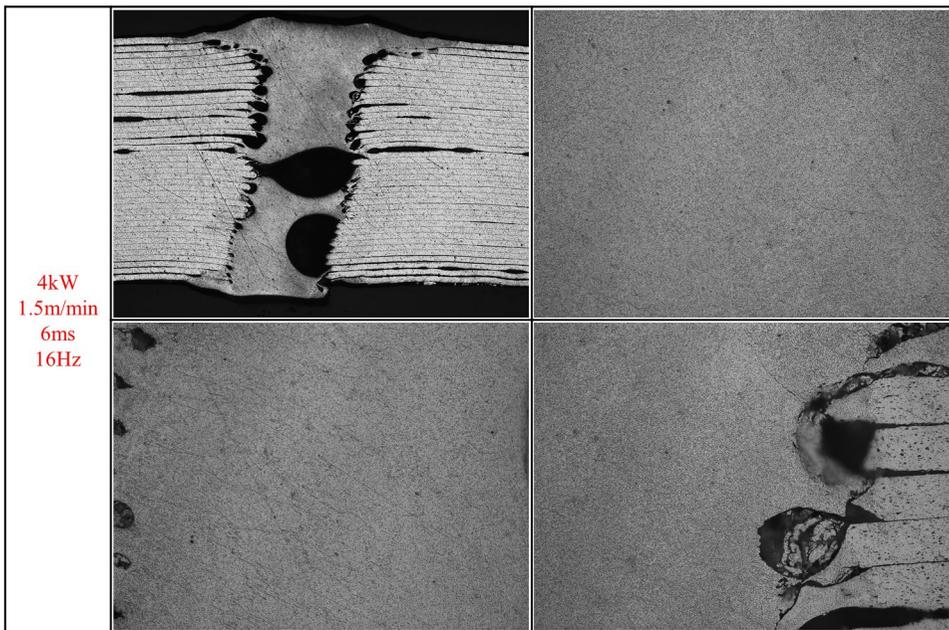


Fig. 4.26 Microstructure photos of weld zone (4kW 6ms 16Hz)

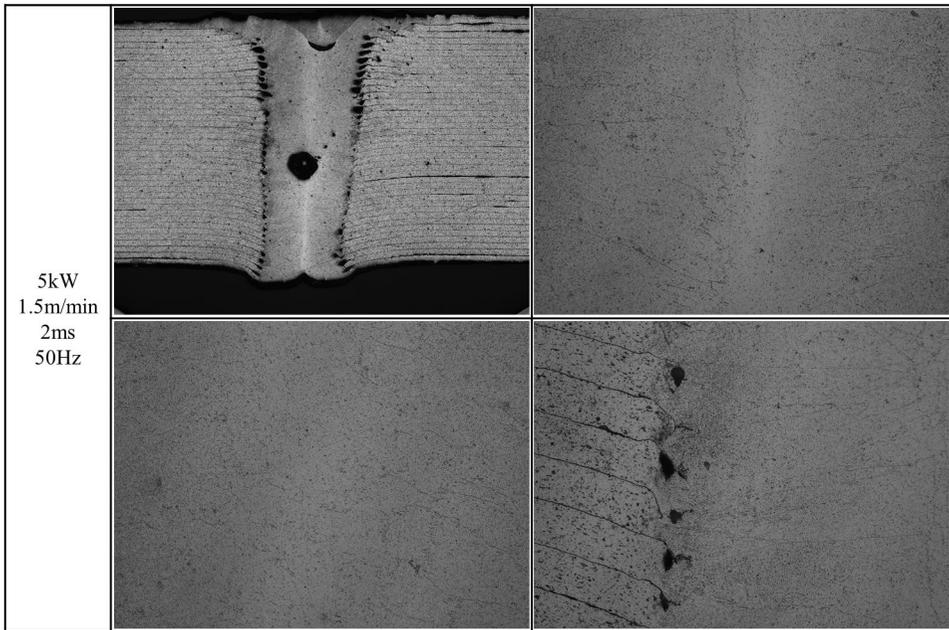


Fig. 4.27 Microstructure photos of weld zone (5kW 2ms 50Hz)

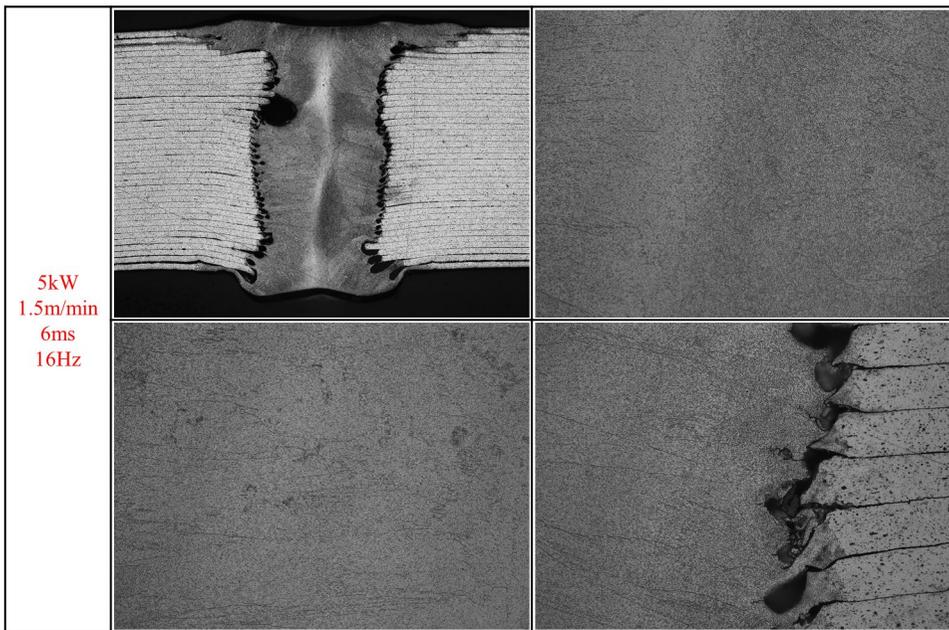


Fig. 4.28 Microstructure photos of weld zone (5kW 6ms 16Hz)

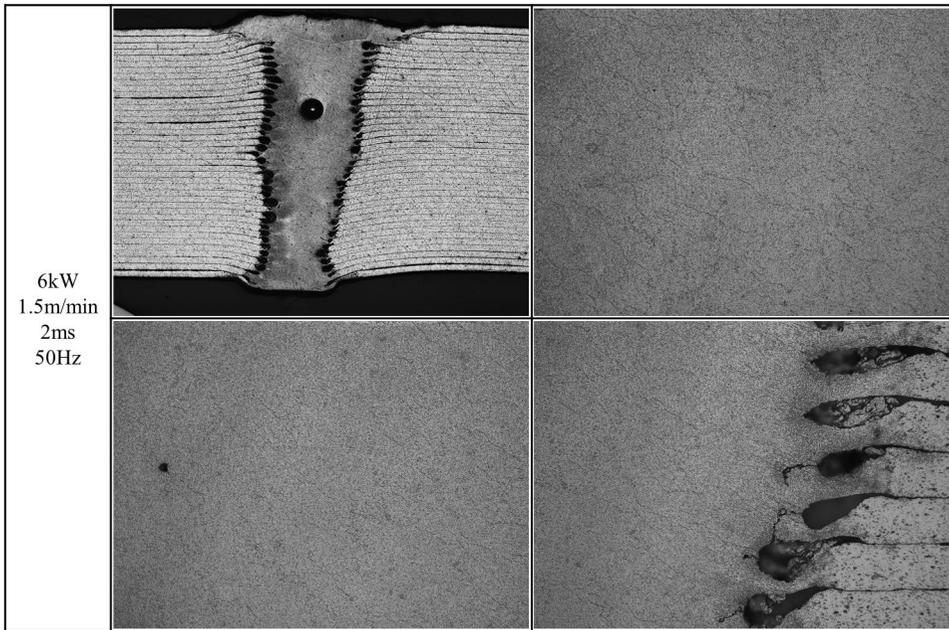


Fig. 4.29 Microstructure photos of weld zone (6kW 2ms 50Hz)

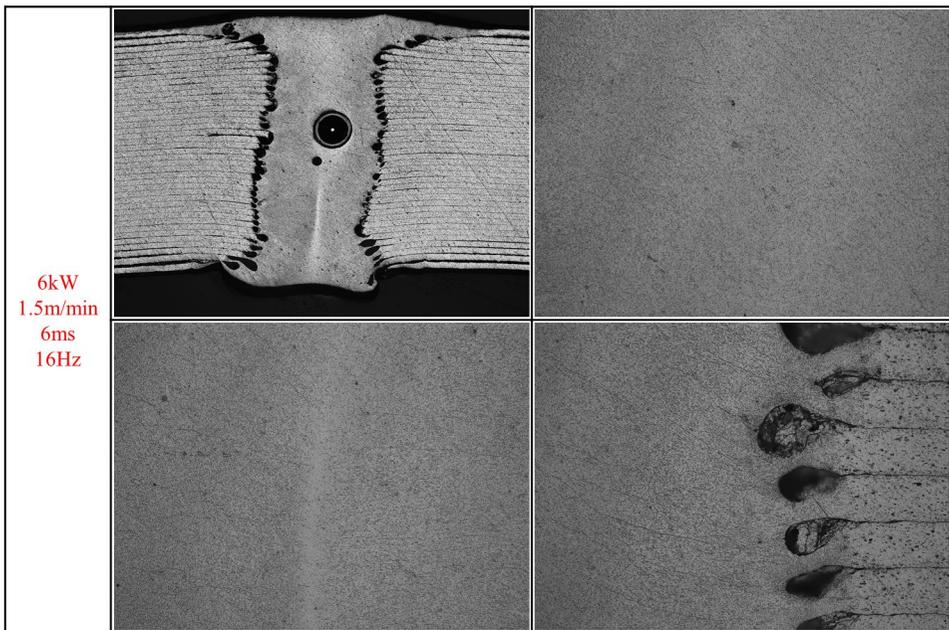


Fig. 4.30 Microstructure photos of weld zone (6kW 6ms 16Hz)

4.3 레이저빔 펄스 조사시간변화에 따른 용접특성

4.3.1 전면, 후면비드 폭비와 입열량 특성

Fig. 4.31는 피크 출력, 레이저빔 이송속도, 주파수를 고정하고 펄스 조사시간을 변화시켜 실험한 후 전면비드를 촬영한 사진이다. 주파수를 15Hz로 고정하게 되면 식(2),(3)에 따라 펄스 조사시간은 약 6.7ms이다.

펄스 조사시간이 6.7ms일 때 최대 에너지 값을 같기 때문에 최대 에너지 값을 초과하지 않기 위해 2, 3, 4, 5, 6ms로 펄스 조사시간을 임의로 조절하여 실험하였다. Fig. 4.31는 펄스 조사시간 변화에 따른 전면비드를 나타낸 것이다. Fig. 4.31에서 볼 수 있듯이 주파수는 정해져 있기 때문에 레이저빔 펄스당 사이의 간격은 거의 일정하나 펄스 조사시간이 변함에 따라 빔 사이즈가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 펄스 조사시간이 길어짐에 따라 펄스당 에너지 밀도가 증가하기 때문이다. 따라서 공정변수 별로 펄스당 에너지 밀도를 계산하여 Fig. 4.32에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 피크 출력과 주파수를 고정하더라도 임의로 펄스 조사시간을 조절하면 펄스당 에너지 밀도를 조절할 수 있다.

Fig. 4.33는 용접부 단면을 나타낸 것이다. 4.2.1절에서 설명하였듯이 펄스 조사시간이 길어짐에 따라 용접부 단면이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 용접부 단면 크기를 결정짓는 인자는 펄스 조사시간인 것으로 판단할 수 있다. 펄스 조사시간을 조절하더라도 40장 겹치기 용접을 하기 때문에 박판사이에 존재하는 공기층들에 의해 기공이 발생하였다.

Fig. 4.34는 전면, 후면비드 폭비를 나타낸 그래프이다. 펄스 조사시간이 길어짐에 따라 펄스당 에너지 밀도가 증가하게 되고 4.2.2절에서 설명하였듯이 용접부 단면과 후면비드가 같이 성장하게 된다. 그에 따라서 전면, 후면비드 폭비가 펄스 조사시간에 길어짐에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다.

식(7)를 이용하여 입열량 계산하여 Fig. 4.35에 나타내었다. 펄스당 에너지 밀도가 증가함에 따라 조사면적도 증가하지만 펄스당 에너지 밀도 증가율에 비해 조사면적 증가율이 적어 전체적인 입열량은 펄스 조사시간이 길어짐에 따라 증가하고 있다.

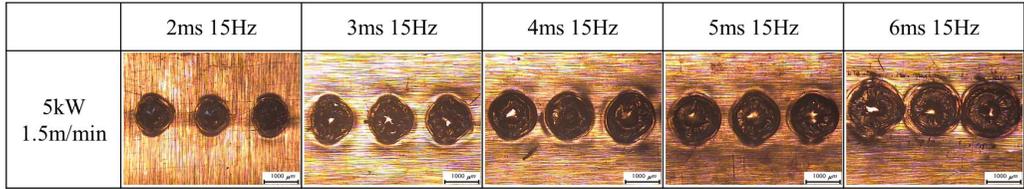


Fig. 4.31 Front bead comparison of process parameters

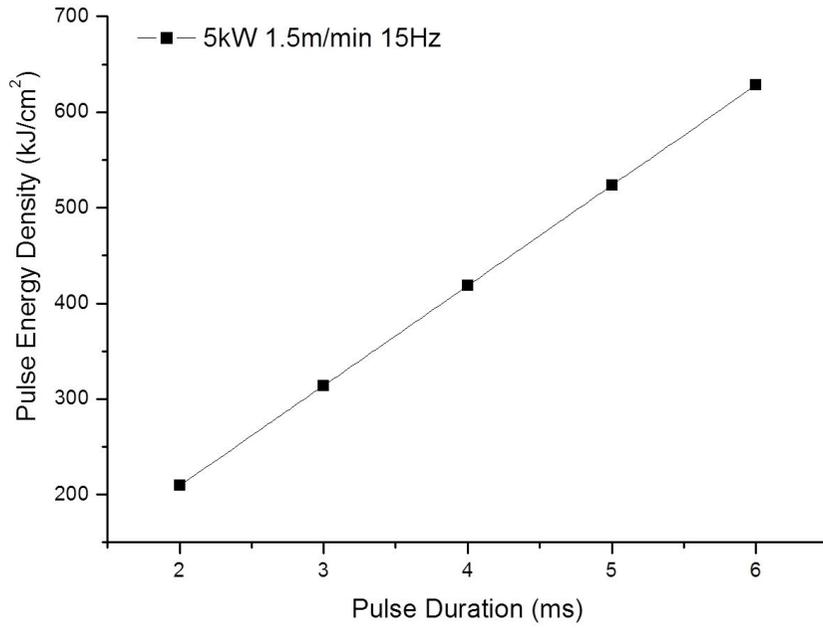


Fig. 4.32 Influence of welding process parameters on the pulse energy density

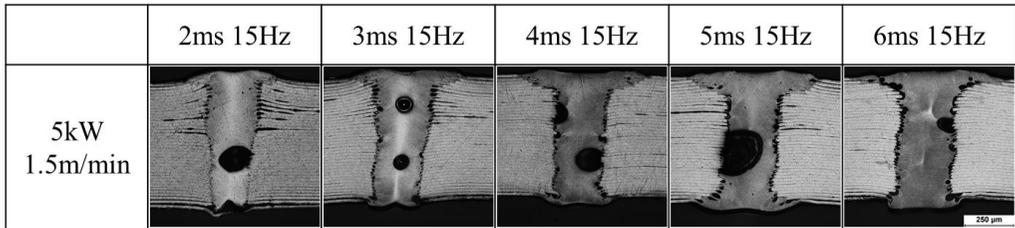


Fig. 4.33 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters

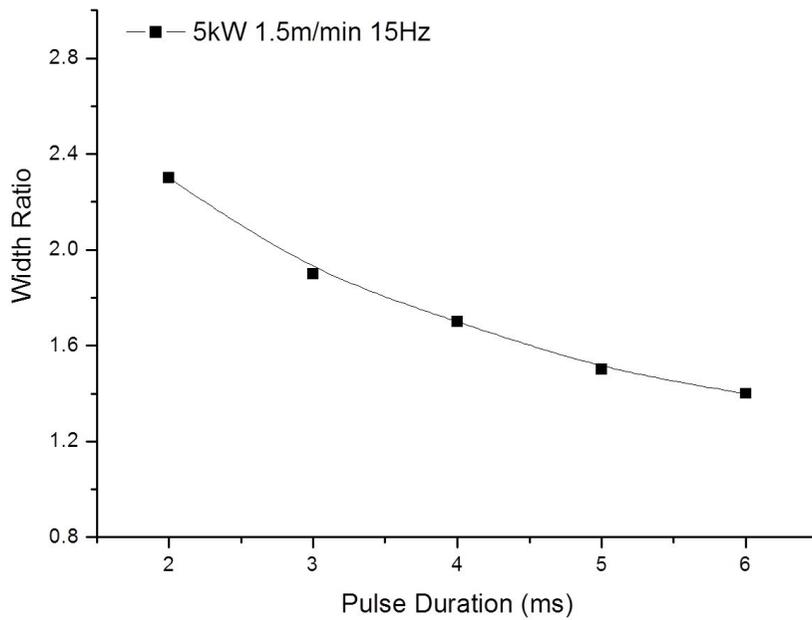


Fig. 4.34 Variations of front bead width according to process parameters

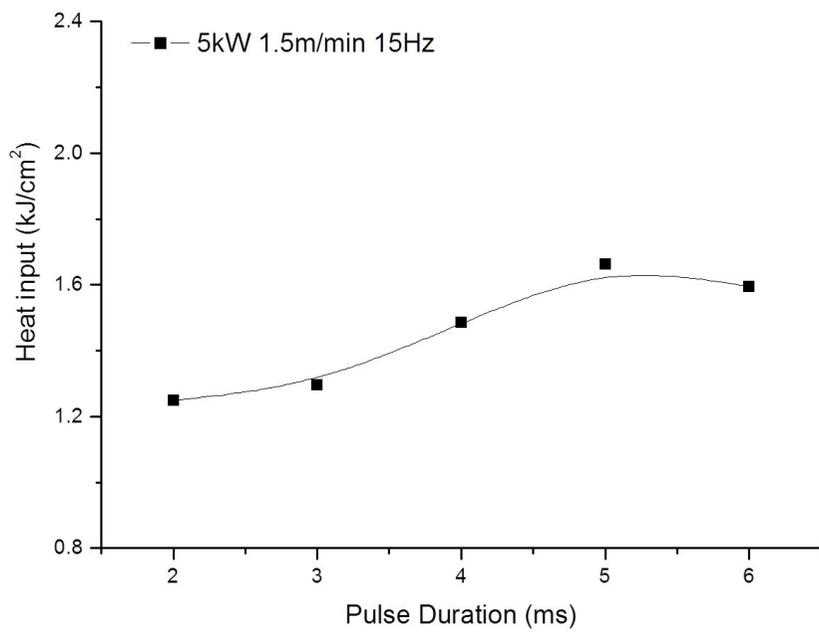


Fig. 4.35 Influence of welding process parameters on the heat input

4.3.2 인장강도 및 경도특성

Fig. 4.36는 피크 출력, 레이저빔 이송속도, 주파수를 고정하고 펄스 조사시간을 변화하여 실험한 시편의 인장시험한 결과이다. 인장강도가 가장 큰 조건은 5kW 1.5m/min 6ms 15Hz이며 이때 인장강도 값은 8.83MPa이었으며 인장강도가 가장 작은 조건은 5kW 1.5m/min 2ms 15Hz이며 이때 인장강도 값은 4.2MPa이었다. Fig. 4.36에서 확인할 수 있듯이 펄스 조사시간이 길어짐에 따라 인장강도가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 공정변수와 상관없이 알루미늄 용접시 내부 기공이 발생하기 때문에 결함에 대한 영향보다는 용접부 면적에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 펄스 조사시간이 길어짐에 따라 용접부 면적이 커져 그에 따라 인장강도도 같이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 4.37와 Fig. 4.38는 각각 용접부 폭방향 경도 측정 값과 용접부 깊이방향 경도 측정 값을 나타낸 것이다. 4.2.3절에서 설명하였듯이 인장강도가 큰 조건일수록 경도 값도 약간 크게 측정되었다. 이는 조직 관찰에서도 언급하였듯이 조직의 조밀한 정도에 따라 결정된 것으로 판단된다.

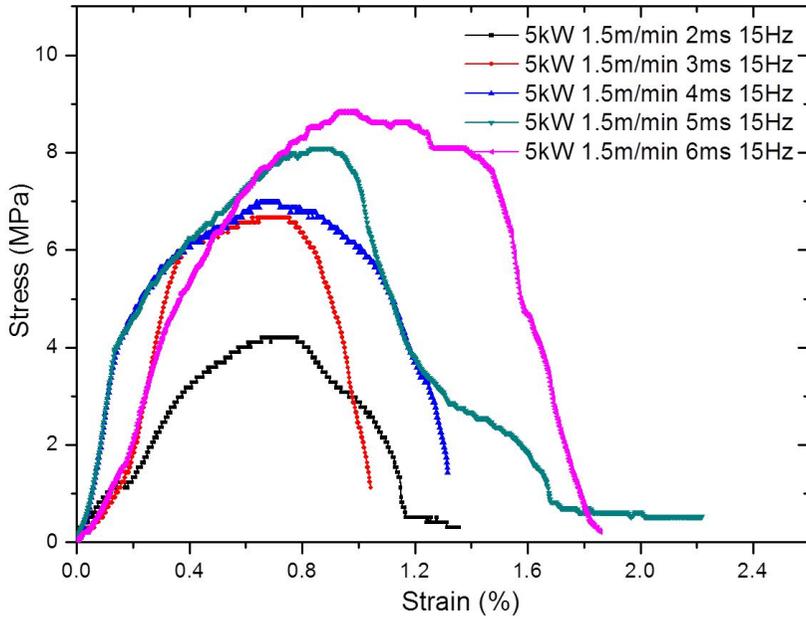


Fig. 4.36 Stress-Strain curve of laser welding (5kW 15Hz)

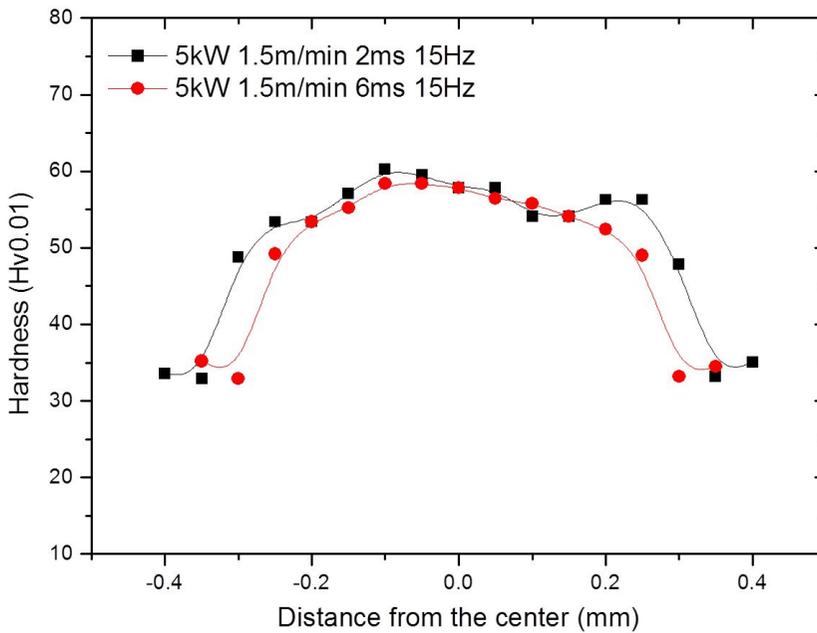


Fig. 4.37 Welding width hardness to variation of welding process parameters

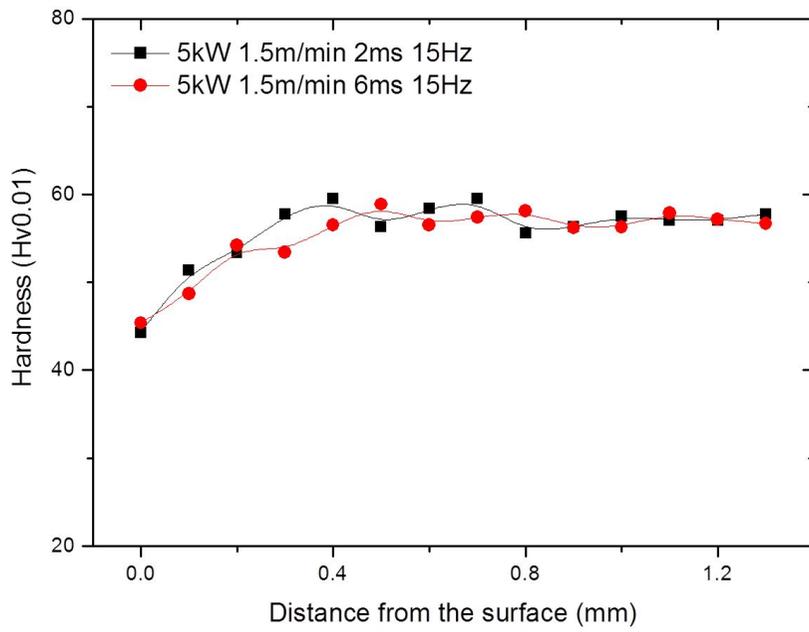


Fig. 4.38 Welding depth hardness to variation of welding process parameters

4.3.3 용접부 단면미세조직 특성

Fig. 4.39, 4.40은 피크 출력과 주파수를 고정하고 펄스 조사시간을 변화시켜 실험한 결과 인장강도 값이 낮은 조건과 높은 조건의 조직사진을 나타낸 것이다. 빨간색으로 표시한 조건이 인장강도 값이 높은 조건이다.

4.2.4에서 언급하였듯이 펄스 조사시간이 짧으면 그에 따라 펄스당 에너지 밀도가 작아지고 조직이 성장하거나 미세화되는 시간도 부족하게 되어 인장강도가 더 낮게 측정된 것을 확인할 수 있다. 조직을 관찰하면 인장강도가 큰 경우의 조직사진이 더 조밀한 조직을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다.

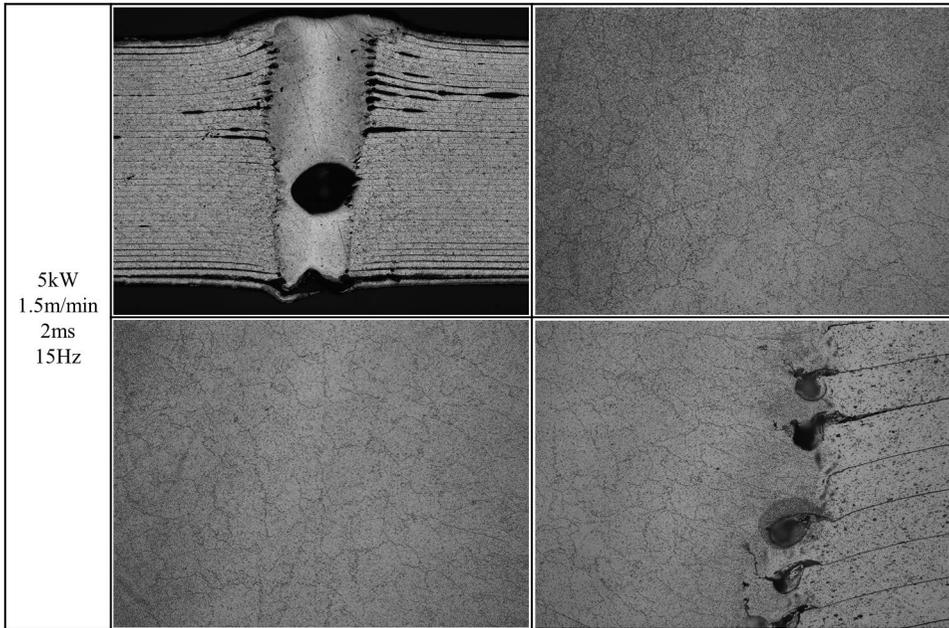


Fig. 4.39 Microstructure photos of weld zone (5kW 2ms 15Hz)

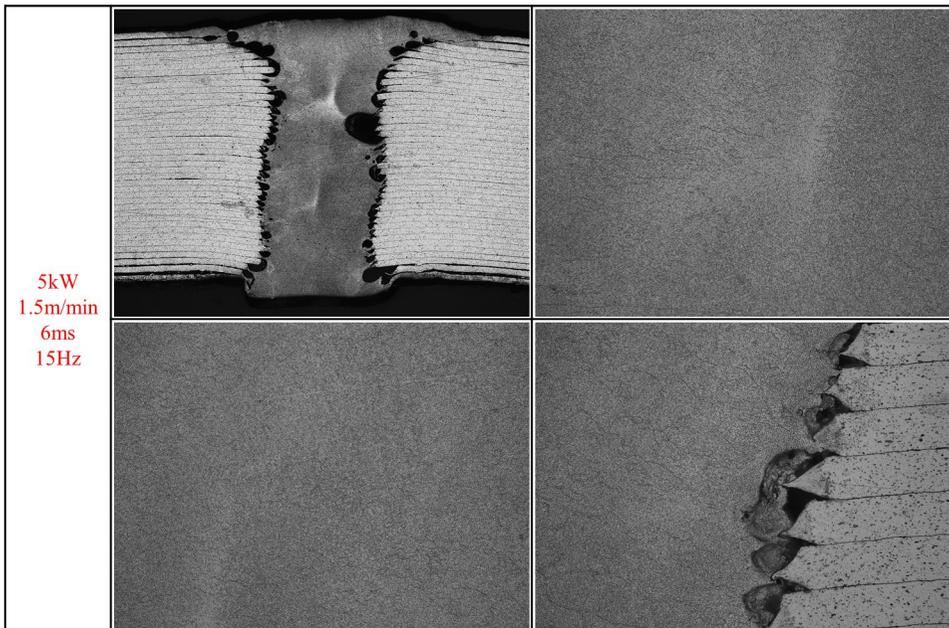


Fig. 4.40 Microstructure photos of weld zone (5kW 6ms 15Hz)

제 5 장 결 론

순수 알루미늄을 펄스형 파이버 레이저로 30 μ m 박판 40장을 겹치기 용접하여 초음파 용접결과와 비교였다. 겹치기 용접의 공정변수를 변화시켜 펄스당 에너지 밀도, 전면, 후면비드 폭비, 입열량, 금속학적 분석과 기계적 성질인 인장강도 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파 용접법은 혼의 설계의 한계 때문에 용접부 비드 폭이 5mm였지만 레이저 용접을 할 경우에는 1~1.5mm로 70~80% 좁은 범위의 용접이 가능하다.

2. 펄스당 에너지 밀도는 펄스 조사시간, 주파수와 피크 출력을 변화시켜 최적의 에너지 밀도를 얻을 수 있지만 펄스당 에너지 밀도가 같더라도 공정변수에 따라 용접단면의 특성에 주도적인 영향을 미치는 변수가 있음을 알았다.

3. 펄스파형 레이저로 박판 겹치기 용접시 관통용접에 크게 영향을 주는 변수로는 피크 출력이고 용접부 크기에 크게 영향을 주는 변수는 펄스 조사시간이다.

4. 초음파 용접과 레이저 용접의 인장강도 비교 결과 피크 출력이 3kW 경우에는 약 145% 높았고 4kW는 112%, 5kW는 108%, 6kW는 120% 정도 높은 인장강도 값을 얻었다.

5. 조직사진 분석 결과 펄스 조사시간은 용접시 용접부 조직이 미세화되는데 큰 영향을 주며 조직이 미세화되면 높은 인장강도 값과 경도 값을 얻을 수 있다.

6. 연구 결과 초음파 용접법을 레이저 용접법으로 대체는 가능하지만 레이저 용접시 용접부 결함을 없애는 방법에 대한 연구는 더 진행되어야 할 것이다.

Reference

(1) 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/>>.

(2) jung, D. Y., "Hybrid car battery technology trends," The Institute of Electronics Engineers of Korea., Vol. 34, No. 5, pp. 525-536, 2007.

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

(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) 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.

(6) 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.

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

(10) Park, Y. H., Kim, C. H., Kim, J. H., and Lee, S. H., "Development of 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) 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.

(16) 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.

(17) Jang, I. C., 2011, *Improvement of battery performance for LiCoPO₄ cathode material in 5V region*, A master's thesis, Chonnam National University, Republic of Korea.

(18) 이승원, 최수안, “리튬이차전지용 양극활물질 개발 동향”, The Korean journal of ceramics, Vol. 13, No. 5, pp. 32-38, 2010.

(19) Park, H. G., "The Research and Development Trend of Cathode Materials in Lithium Ion Battery", The Korea Electrochemical Society, Vol. 11, No. 3, pp. 197-210, 2008.

(20) 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.

(21) Kim, S. R., Lee, J. H., and Yoo, C. D., "Design of Cylinder Horn for Ultrasonic Welding", The Korean Welding and Joining Society, Vol. 27, No. 4, pp. 60-66, 2009.

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

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

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

(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) Yoon, J. W., and Lee, Y. S., "Study on the laser welds of 5052 and 6061 aluminum alloys", THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT, Vol. 17, pp. 161-167, 2003.

(27) Huber, S., Merzkirch, M., Zaeh, M., and Schulze, V., "Applications of High-Power Diode Lasers for Aluminum Welding", Progress in Biomedical Optics and Imaging, Vol. 7198, pp. 71980M-1-71980M-12, 2009.

(28) Yan, S., Hong, Z., Watanabe, T., and Jingguo, T., "CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 48, No. 7-8, pp. 732-736, 2010.

(29) Li, Z., Gobbi, S. L., and Loreau, J. H., "Laser welding of Waspaloy sheets for aero-engines", Journal of materials processing technology, Vol. 65, No. 1-3, pp. 183-190, 1997.

(30) Yoon, J. W., "Study on the porosity source of aluminum alloy welds", The Korean Welding and Joining Society, Vol. 2, pp. 208-210, 2000.

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

(32) Yoon, J. W., Lee, Y. S., Park, H. S., and Shin, H. I., "Factors affecting the mechanical properties of aluminum alloy laser welds", The Korean Welding and Joining Society, Vol. 1, pp. 131-133, 2004.

(33) Park, Y. W., "Optimization of Process Parameters Using a Genetic Algorithm for Process Automation in Aluminum Laser Welding with Filler Wire", The Korean Welding and Joining Society, Vol. 24, No. 5, pp. 67-73, 2006.

(34) Kim, J. D., and Kim, J. M., "Weldability of aluminum alloys by

multi-wavelength laser beam", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 567-574, 2007.

(35) Shi, Y., Zhong, F., Li, X., Gong, S., and Chen, L., "Effect of laser beam welding on tear toughness of a 1420 aluminum alloy thin sheet", Materials science & engineering Structural materials, Vol. 465, No. 1-2, pp. 153-159, 2007.

(36) 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.

(37) Zain-ul-abdein, M., Nelias, D., Jullien, J., and Deloison, D., "Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4", Materials science & engineering Structural materials, Vol. 527, No. 12, pp. 3025-3039, 2010.

(38) Park, Y. W., An, J. H., and Kim, D. Y., "A Study on Formability Characteristic Evaluation of Laser Weld for 5000 Series Aluminum Alloy using Welding Wire", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 2010. No. 11, pp. 1834-1838, 2010.

(39) Chan, C. W., and Man, H. C., "Laser welding of thin foil nickel-titanium shape memory alloy", OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, Vol. 49, No. 1, pp. 121-126, 2011.

(40) Tu, J. F., and Paleocrassas, A. G., "Fatigue crack fusion in thin-sheet aluminum alloys AA7075-T6 using low-speed fiber laser welding", Journal of materials processing technology, Vol. 211, No. 1, pp. 95-102, 2011.

(41) 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.

(42) Mathers, G., 2002, *The welding of aluminum and its alloys* (1st Edition), Woodhead Publishing Ltd. & CRC Press LLC, Cambridge.

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

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

(45) Lee, Y. S., 2004, *Study on the Nd:YAG laser weldability of aluminum alloys*, A master's thesis, Dongeui University, Republic of Korea.

(46) 김도훈, 2009, 레이저가공학, 경문사

(47) 서울대학교광학연구회, 1996, 현대광학, 교문사

(48) 유종인, 유연석, 1993, LASER 입문, 청범출판사

(49) 한봉희, 2003, 금속재료, 인터비전

(50) Katayama, S., Matsunawa, A., Kojima, K., and Kuroda, S., "CO₂ laser weldability of aluminum alloys (Report4) - Effect of welding defects on mechanical properties, deformation and fracture of laser welds", *Journal of Light Metal Welding and Construction*, Vol. 37, No. 3, pp. 1-9, 1999.

(51) Katoh, M., "Factors affecting mechanical properties of laser welded aluminum alloys", *Journal of Light Metal Welding and Construction*, Vol. 10, No. 10, pp. 771-777, 1996.

(52) Moon, D. W., and Metzbower, E. A., "Laser Beam Welding of Aluminum Alloy 5456", *Welding Journal*, Vol. 62, No. 2, pp. 53s-59s, 1983.

(53) 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.

(54) Thorstensen, B., 1989, Laser welding of Aluminum, Industrial Laser Annual Handbook.

(55) Kim, K. J., 2002, *The effects of nozzle shape and gas pressure on the weldability of A3003 Al thin sheet by Nd:YAG laser beam*, A master's thesis, Yonsei University, Republic of Korea.

(56) Heo, I. S., 2000, *A Study on the Welding Behavior of Al 3003 Alloy thin sheet by Nd:YAG Laser Beam*, A master's thesis, Yonsei University, Republic of Korea.

(57) Lee, H. H., 2004, *A Study on the Weldability of Hop-dip Aluminum Coated Steel with Pulsed Nd:YAG Laser*, A master's thesis, Hanbat National University, Republic of Korea.

(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.

(67) Kim, J. R., Ha, Y. S., Kang, C. Y., Kim, I. B., "CO₂ Laser Weldability of High Strength Al Alloy A5083 and A7N01", *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-12, 2001.

(68) Xijing, W., Katayama, S., and Matsunawa, A., "Character of Melting and Evaporation in Laser Beam Welding of Two Aluminum Alloys", *Welding Journal*, Vol. 76 No. 2, pp. 70s-73s, 1997.

(69) Pastor, M., Zhao, H., Martukanitz, R. P., and DebRoy, T., "Porosity, Underfill

and Magnesium Loss during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754", *Welding Journal*, Vol. 78, No. 6, pp. 207s-216s, 1999.

(70) Zhao, H., and DebRoy, T., "Weld Metal Composition Change during Conduction Mode Laser Welding of Aluminum Alloy 5182", *Metallurgical and Materials Transaction B*, Vol. 32, No. 1, pp. 163-172, 2001.

(71) Cho, G. S., 2002, *A study on the machining characteristics of the electropolishing of aluminum*, A master's thesis, Inha University, Republic of Korea.

(72) Kim, D. M., 2007, *Quality Evaluation by Waveform Analysis and Application of Response Surface Methodology in Al Multi Point Ultrasonic Welding*, A master's thesis, Pukyong National University, Republic of Korea.