



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2016년 8월

석사학위논문

Single mode fiber laser을 이용한
스테인리스강/인코넬의
wobble beam 용접 특성

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

정 진 호

Single mode fiber laser을 이용한 스테인리스강/인코넬의 wobble beam 용접 특성

Characterization and Weldability of Stainless Steel/
Inconel by Wobble Beam Welding with Single-Mode
Fiber Laser

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

정 진 호

Single mode fiber laser을 이용한
인코넬/스테인리스강의
wobble beam 용접 특성

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

정 진 호

정진호의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방 한 서 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 성 민 (인)

위 원 조선대학교 교수 방 희 선 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	IV
List of Tables	VI
Abstract	VII
1장. 서론	1
1 . 1 연구배경	1
1 . 2 연구동향	2
1 . 3 연구목적	6
2장. 이론적 배경	8
2 . 1 파이버 레이저 발진원리 및 특징	8
2.1.1 파이버 레이저 개발 배경	8
2.1.2 파이버 레이저 발진원리	11
2.1.3 파이버 레이저 특성	14
2 . 2 우블링 용접	17
2.2.1 우블링 용접 정의	17
2.2.2 스캐너 시스템	20
3장. 실험방법	22
3 . 1 실험 장비 및 재료	22
3.1.1 실험용 레이저 발진기 사양	22

3.1.2 실험용 용접 장비 사양	23
3.1.3 실험 재료	25
3 . 2 실험 조건	27
3.2.1 이종재(STS/Inconel) 싱글모드 파이버 레이저 우블링 용접	27
3.2.2 이종재(STS/Inconel) 멀티모드 파이버 레이저 직선 용접	30
3 . 3 용접품질 평가 방법	32
3.3.1 접합부 형상 평가 외관 및 단면 특성	32
3.3.2 경도 분포 분석	32
3.3.3 미세조직 관찰	35
4장. 실험 결과 및 고찰	36
4 . 1 멀티모드 직선용접/싱글모드 우블링용접 특성 비교	36
4.1.1 접합부의 형상 평가	36
4.1.2 경도 분포 특성	41
4.1.3 미세조직 특성	43
4 . 2 크랭크 레바(STS)/샤프트(Inconel) 용접조건 도출	44
5장. 결 론	45
참고문헌	46

List of Figures

Fig 1.1	고전적인 레이저 직선 방식의 판넬 갭 대한 용접성	3
Fig 1.2	도요타 스크류 방식의 레이저 겹치기 용접시 갭에 대한 용접성	3
Fig 1.3	도요타 스크류 방식의 레이저 다층 겹치기 용접 형상	4
Fig 1.4	이차 전지 탭 용접 사진	5
Fig 1.5	터보차저 및 크랭크 (저항 용접)	7
Fig 2.1	Nd-YAG 레이저 기본 구성도	8
Fig 2.2	rod type 열렌즈 현상	9
Fig 2.3	매질의 기하학적 변형	10
Fig 2.4	파이버 레이저 기본 구조도	11
Fig 2.5	Schematic fiber laser system to structures	11
Fig 2.6	Design of a fiber spacial coupler	12
Fig 2.7	Design of a double clad fiber of light pumping : laser active fiber	12
Fig 2.8	싱글 에미터 다이오드	13
Fig 2.9	Fiber laser beam profile	14
Fig 2.10	Compared to the high power CW laser efficient	15
Fig 2.11	Absorption rate of light to metal	15
Fig 2.12	Schematic fiber laser system of optical beam transmission	16
Fig 2.13	고전적인 용접 / 우블 용접 모식도	17
Fig 2.14	Oscillation function dependent on feed rate direction (left : 50mm/s, right : 200mm/s)	18
Fig 2.15	우블링의 형상 및 비드 형상	18
Fig 2.16	Schematic of the wobble welding technique.	19
Fig 2.17	레이저와 스캐너 시스템	20

Fig 2.18	스캔 헤드 모식도	21
Fig 2.19	f-theta lens의 focus / laser spot size	21
Fig 3.1	레이저 용접 장치	24
Fig 3.2	크랭크 부품	25
Fig 3.3	싱글모드 파이버레이저 우블링 용접	28
Fig 3.4	멀티 모드 파이버 레이저 직선 심 용접	30
Fig 3.5	마이크로 비커스 경도 실험기	33
Fig 3.6	경도 실험 위치 조직도	34
Fig 3.7	광학 현미경	35
Fig 4.1	멀티모드 직선 심 용접부 형상 (주파수별)	38
Fig 4.2	싱글 모드 우블링 심 용접부 형상(출력별)	40
Fig 4.3	우블링 및 직선 용접부 경도 분포	42
Fig 4.4	싱글 모드 우블링 맞대기 심 용접부의 미세조직	43

List of Table

Table 3.1	파이버 레이저 용접기	22
Table 3.2	용접 실험 장비 구성	23
Table 3.3	Chemical Compositions in SUS 304 and Inconel926	25
Table 3.4	싱글모드 파이버 레이저 우블링 용접 조건	29
Table 3.5	멀티모드 파이버 레이저 직선 용접 조건	31
Table 3.6	경도 실험 조건	33
Table 4.1	멀티모드 직선 심 자료(표면비드, 용입깊이, 70% 비드폭)	36
Table 4.2	싱글모드 우블링 심 자료(표면비드, 용입깊이, 70% 비드폭)	38
Table 4.3	용접 품질 검사 기준	44

ABSTRACT

Single mode fiber laser을 이용한 스테인리스강/인코넬의 wobble beam의 용접 특성에 대한 연구

Jin-Ho Jeong

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

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

This study introduces a welding technique of new ways in laser which has higher density in heat source than other lasers may exceed the limit of classic straight laser-beam welding after the superior fiber laser development.

Because of the quality, single-mode fiber laser beam was applied rather than other ways, it is equipped with a scan head which rotates to re-melt a portion of the weld part.

This is called as wobbling and this study shows the optimum process conditions and the properties of the steel material of the car by applying wobbling. The quality of weld zone and productivity could be increased by applying wobbling which has advantages in the properties of weld penetration and speed to the laser welding, deterioration occurred by the deviation of combination conditions - unevenness of gap, changed location of the center of weld zone - could be overcome and get better weld strength.

Recently, the existing processed of laser pulse welding and laser straight seam welding are substituted to laser wobbling. it is not only applied to the laser welding but also laser cutting, scribing and other

fields.

In this study, lever, shaft and pin that used as parts of automobile turbo charger will be linear seam butt welded by multi-mode fiber laser.

Also wobbling seam butt weld by using single-mode fiber laser was in progress. After that, weldability of weld zone has been tested by analysis of mechanical property and metallurgical characteristics.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

고밀도 열원을 갖는 레이저 중에서 타 레이저보다 빔 품질이 월등히 뛰어난 파이버 레이저 개발 이후에 고전적인 레이저 빔 직선 용접 방식의 한계를 뛰어 넘을 수 있는 새로운 방식의 용접 기법을 도입되어 많은 연구들이 진행되고 있다.

파이버 레이저 중에서 빔 품질이 극히 우수한 싱글 모드 파이버 레이저 빔을 적용하고, 스캔 헤드를 장착하여 레이저 빔을 회전시키는 방법으로 용융된 용접 부위의 일부를 재용융하면서 진행하는 우블링(Wobbling)이라고 하는 기법을 사용하였을 때의 자동차 철강 소재의 최적의 공정 조건과 특성을 연구하였다. 깊은 용입 특성과 빠른 용접 속도를 장점으로 갖고 있는 레이저 용접을 우블링 방식으로 적용하였을 때 재료 결합 상태의 편차(gap)의 불균일, 용접부 중심 위치 편차로 인한 용접 강도 저하를 극복하고, 또한 이종 소재의 레이저 용접 강도를 향상시킬수 있게 되어 용접 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 자동차 터보 차저의 장착 부품인 크랭크 조립에 사용되는 레바 및 샤프트에 대하여 멀티모드 파이버 레이저를 이용한 직선 심 맞대기 용접 과 싱글 모드 파이버 레이저를 이용한 우블링 심 맞대기 용접을 실시하여 용접부의 용접성을 평가하고자 하며, 용접부의 용접성을 평가하기 위해서 용접부의 기계적 특성 및 금속학적 특성을 고찰하였다.

1.2 연구동향

최근 들어 환경오염으로 많은 불편을 겪고 있고, 외부 원인 못지않게 자동차 배기가스도 원인으로 지목되면서 앞으로 화석 연료를 사용하는 차량에 대한 규제가 더 강화 될 것으로 예상된다. 반면에 전기차를 비롯한 하이브리드, 플러그 인 하이브리드 등 친환경차에 관심이 고조되고, 리튬이온 배터리 및 연료전지 기술과 재생에너지 등 친환경 에너지 생산 기술 발전이 지속되고 있다. [1]

이러한 친환경 자동차 관련 기술이 발전함에 따라 자동차 연비 향상 및 배기 가스 규제 목표를 달성하기 위해 차량 경량화에 이목이 집중되어 있으며, 특히 배터리의 경우 이종소재 용접 강도를 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

최근에 자동차 산업에서 이슈가 되고 있는 우블링 레이저 용접 방법은 ,주로 많이 사용하고 있는 레이저 리모트 용접 방법과 결합되어 용접하려고 하는 재료 사이의 갭으로 인해 발생하는 문제점을 해결하는 역할을 하고 있다. 기존의 방법으로는 갭을 메우기 위해서 충전재가 필요했었지만, 우블링 기법 적용함으로 인해 충전재를 사용할 필요성이 없어지고 있기 때문에 차량의 무게와 원가를 절감할 수 있다.

차량용 재료의 접합을 하기 위한 플렌지를 소형화하는 것으로 차량의 무게를 감량할 수 있지만, 기존의 레이저 리모트 웰딩 방법으로는 충전재를 사용할 수 없기 때문에 맞대기 이음새를 용접 할 수 없었다

이러한 문제를 극복하고자 위하여, 직선으로 또 좌/우로 진동하는 새로운 우블링 기법을 도입하여, 나선형의 운동 형태로 빔을 이동시켜 재료를 용융하는데, 왼쪽과 오른쪽의 간극 용융물 풀을 넓혀주기 때문에 추가로 충전재를 대체할 필요가 없어지게 된다. 따라서 차량의 설계에 더 많은 자유도를 제공할 수 있을뿐만 아니라 차량의 무게 또한 경감할수 있는 장점이 있다. 일본이 도요다의 경우는 Fig 2.1과 같이 레이저 스크류 용접 방식을 도입하여 차체에 우블링 기법으로 레이저 스크류 용접을 적용하고 있다.[2]

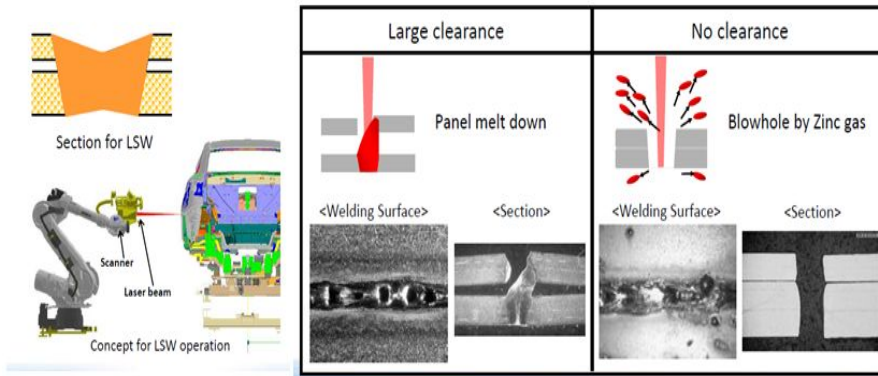


Fig 1.1 고전적인 레이저 직선 방식의 판넬 갭 대한 용접성

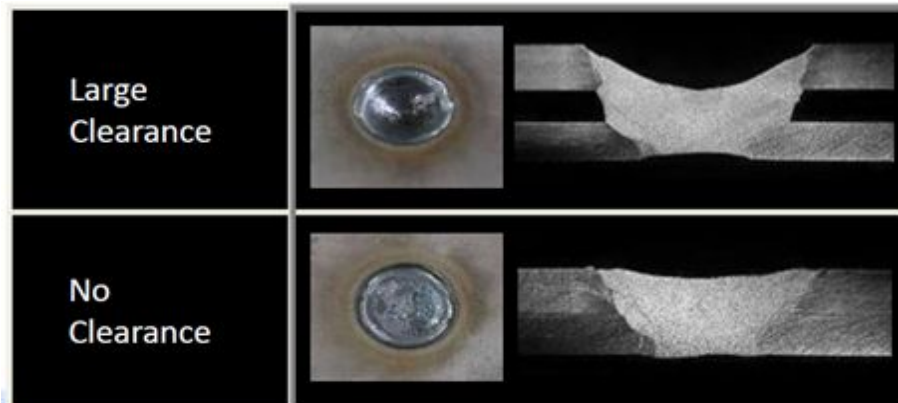


Fig 1.2 도요타 스크류 방식의 레이저 겹치기 용접 시 갭에 대한 용접성

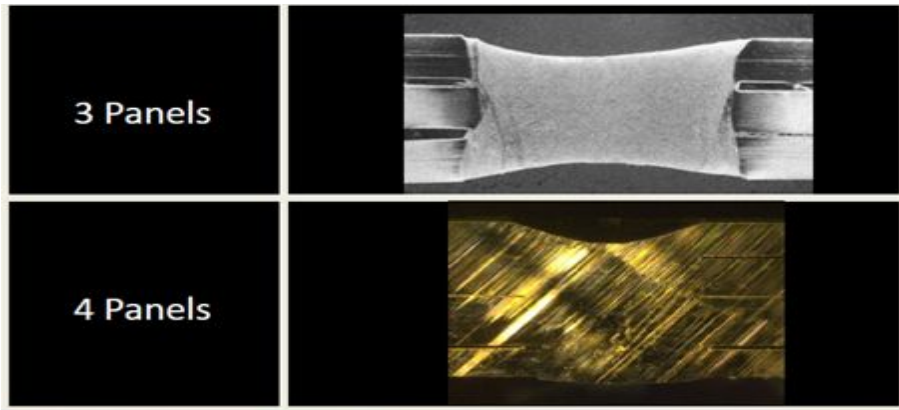


Fig 1.3 도요타 스크류 방식의 레이저 다층 겹치기 용접 형상

또한 자동차용 이차 전지 제조업계에서는 이차 전지 셀들을 조립하기 위하여 Fig 1.4와 같이 이종 소재간의 접합에 레이저 우블링 기법을 적용한 용접 공법의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

기존의 Nd-yag pulse laser를 이용해 박판의 20um 정도의 알루미늄재 다겹과 구리 판재의 겹치기 심용접에서는 다겹의 알루미늄 판재를 밀착시에 발생하는 재료간 간극으로 인해 레이저 용접시에 용락 현상 및 용접 강도 저하가 발생하게 되는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 싱글 모드 파이버 레이저를 이용한 우블링 기법을 적용하여 안정적인 용접 강도를 확보하고 있다 [3-4]



Fig 1.4 이차 전지 탭 용접 사진

1.3 연구 목적

최근 들어 자동차 배출가스로 인한 환경오염이 문제화 되면서 미세먼지, 배기가스 등 친환경적 차량에 이목이 집중되고 있으며, 특히 배기가스의 재활용을 하기 위해 터보 차저가 장착되는데 터보 차저는 달팽이 같이 생긴 두 개의 하우징으로 구성되어 있고 각각의 터빈 휠을 갖고 있으면 이것들은 샤프트에 연결되어 있다.

따라서 어느 한쪽이 회전하게 되면 다른 한쪽도 따라 회전한다. 이들 중 배기가스와 연결된 쪽이 터빈이고 그 반대편이 컴프레셔이다. 배기가스가 터빈의 축을 회전시키면 컴프레셔도 함께 회전하는데, 이 때 엔진 연소실 안으로 인터쿨러를 거쳐 신선한 공기를 다량으로 압축해서 공급하는 장치로 과급기라고 한다.

고밀도의 공기를 엔진에 공급함으로써 엔진의 출력을 순간적으로 높이는 장치이다. 또한 터보차저는 저속구간에서 더 많은 공기를 주입, 불완전 연소를 최소화하면서 배기가스를 줄이고 있다. 세계적인 터보차저 회사인 하니웰 코리아에 의하면, 최근에는 rpm 회전수의 높낮이에 따라 선택적으로 작동하는 투스테이지 터보와 쓰리스테이지 터보를 비롯, e-VGT(전기신호에 의한 공기량 제어) 등으로 진화하고 있다고 보고되고 있다.[3]

크랭크는 이 터보 차저에 장착되는 부품으로 Fig 1.5 과 같이 커넥팅 로드와 연결되며, 실린더의 왕복운동을 회전운동으로 바꿔주는 역할을 하며. 크랭크 샤프트는 레바보다 뛰어난 내열성을 요구하기 때문에 인코넬 926재질을 사용하고 있다. 기존의 크랭크 조립의 경우 성형된 각 부품을 지그 시스템으로 고정시키고 저항 프로젝션 용접을 실시하는데, 저항 프로젝션 용접 시 겹치기 용접을 위하여 샤프트에 저항 프로젝션 용접을 하기 위한 플렌지가 요구된다. 또한 저항 용접 타점 진행과 함께 전극의 마모가 발생하면 용접 강도가 저하되는 현상을 방지하기 위해 전극을 자주 교체할 필요성이 있다.

이로 인한 라인 정지 시간의 증가로 생산성 저하와 소모 비용이 증가되는 문제점이 발생할 뿐만아니라, 용접에 필요한 전력 소비량이 커서 전력비가 증가한다.

반면에 레이저 용접은 용접 속도가 빠르고, 용접 품질이 우수 할 뿐만 아니라, 크랭크 형상 및 크기에 있어서 조립 부품인 샤프트와 레바와의 조립 위치를 정렬하기 위한 최소한의 플렌지 크기만 남겨두고 기타 부분은 없앨 수 있기 때문에 저항 프로젝션 용접을 하기 위한 플렌지의 크기를 줄일 수 있어 자동차 차량 경량화에 효과적이라 할 수 있다.

또한 비 접촉식 용접이기 때문에 전극을 사용할 필요가 없어 경비 절감 효과가 있으며, 전극 교체를 하기 위한 라인 정지 시간도 필요 없게 된다.

또한, 싱글모드 파이버 레이저에 스캐너를 장착하고 우블링 기법을 이용하게 되면, 맞대기 용접에 있어서 갭이 주는 한계를 극복하고 안정적인 용입 깊이 와 용접 비드를 확보할 수 있어, 용접 품질의 균일화에 효과적이다.

따라서 본 연구에서는 자동차 터보 엔진부품에 사용되는 크랭크 부품소재 이종재 스테인리스강/인코넬용접을 위해 Single mode fiber laser을 이용한 우블 빔 용접을 실시하여 이에 대한 적용성을 검토하고자 하였다.



Fig 1.5 터보차저 및 크랭크(저항 용접)

제 2 장 이론적 배경

2.1 파이버 레이저 발진원리 및 특징

2.1.1 파이버 레이저 개발 배경

레이저란 light amplification stimulated emission radiation의 약자로, 유도 방출에 의한 빛의 증폭이라는 다소 어려운 개념의 집합체이다. 아인슈타인의 양자론에 근거하고 있으며, 외부에서 레이저 매질에 자극을 가해 레이저 매질에서 빛을 방출하게 하고, 공진기를 통해 증폭된 빛을 의미한다. 외부에서 자극을 주기 위해 펌핑 광원을 사용해서 레이저 매질에 빛을 공급하고, 매질로부터 방출된 빛은 공진기의 반사 미러에 의해 증폭된다.

레이저는 레이저 매질, 공진기, 펌핑 광원으로 구성되며, 매질의 종류에 따라 laser를 분류한다. Fig 2.1은 펌핑 광원으로 키세논 가스가 주입되어 있는 플래쉬 램프를 사용하는 Nd-YAG 레이저의 기본 구성 및 원리를 나타낸다.

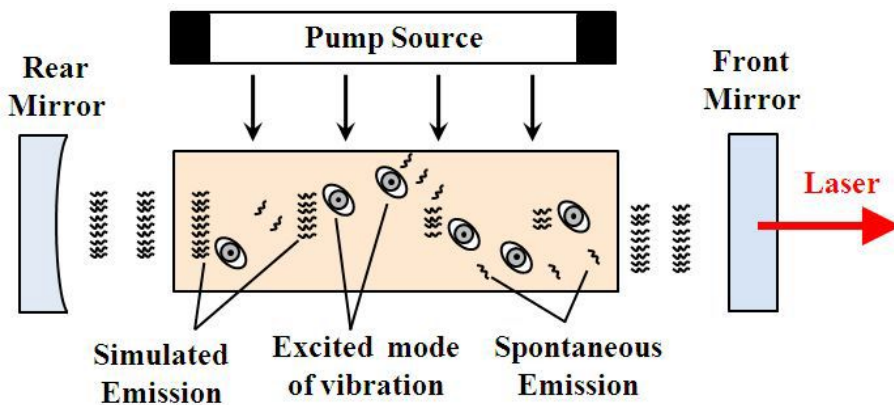


Fig 2.1 Nd-YAG 레이저 기본 구성도

1960년 휴우즈 (Hughes)항공사의 마이먼(T. H. Mainman)에 의해 개발된 루비 레이저가 최초의 레이저이며, 그 이후 60-70연대를 거치면서 급속한 발전을 보여 다양한 기체와 고체 레이저의 개발이 이루어졌고, 80년대 이후에는 자유 전자 레이저(FEL;Free Electron Laser), X-선 레이저, 펄초 레이저 등과 같은 신개념의 레이저가 등장하였다. 고품질의 레이저를 얻기 위해서는 매질의 냉각이 필수적인데, Nd-YAG 레이저와 같은 로드(rod) 타입의 레이저는 로드의 표면 온도와 로드의 내부 온도와의 차이로 인해 Fig 2.2와 같이 로드 단면이 볼록 렌즈의 형태로 변형이 되어 레이저 빔 품질과 출력의 저하와 같은 불안정한 현상을 발생시킨다.

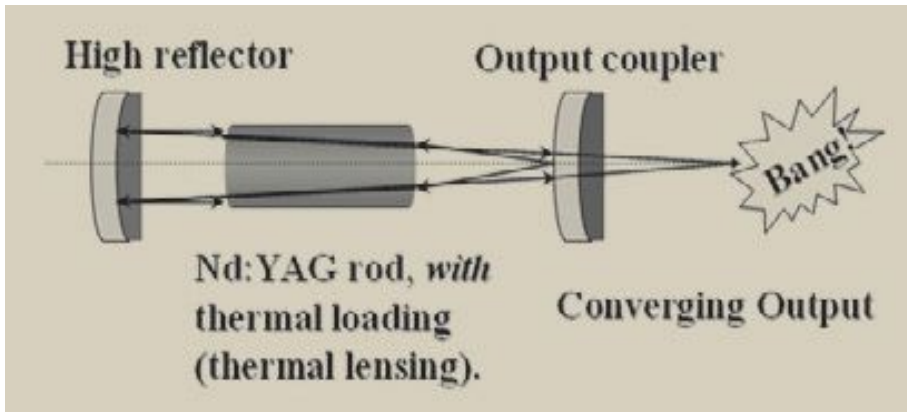


Fig 2.2 rod type 열렌즈 현상

이와 같은 열 렌즈 현상을 줄이기 위해서 매질의 냉각 효율을 높이는 방식으로 Fig 2.3와 같이 로드의 직경을 작게 하고, 길이를 길게 하여, 체적에 대한 표면적 비율을 높게 하기 위한 방식의 연구가 진행되었는데 이것이 파이버 레이저의 개발 배경이다.

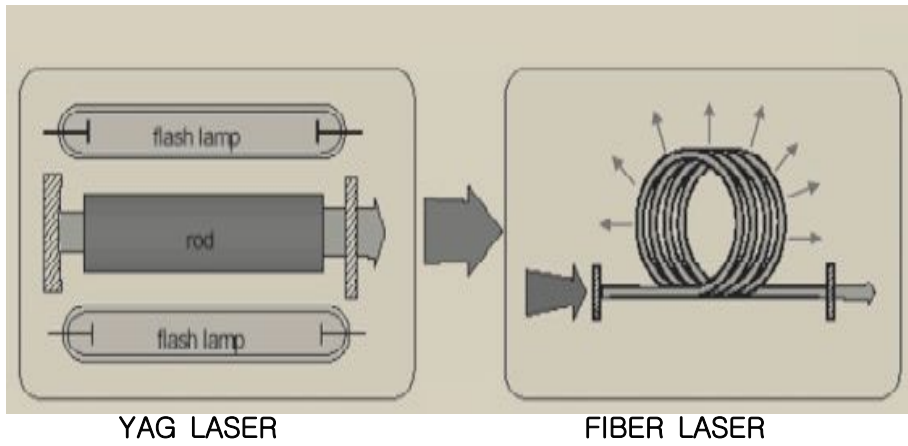


Fig 2.3 매질의 기하학적 변형

2.1.2 파이버 레이저 발진 원리

파이버 레이저 용접기는 Fig 2.4와 같이 구성되어 있으며, 레이저 발진을 하기 위한 기본 구성은 Fig 2.5와 같이 펌프 광원으로 다이오드 레이저(pump diode laser), 발진 매체로 이터븀 엑티브 파이버 (Ytterbium active fiber), 공진기 역할을 하는 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating : FBG이하)로 구성되어 있다.

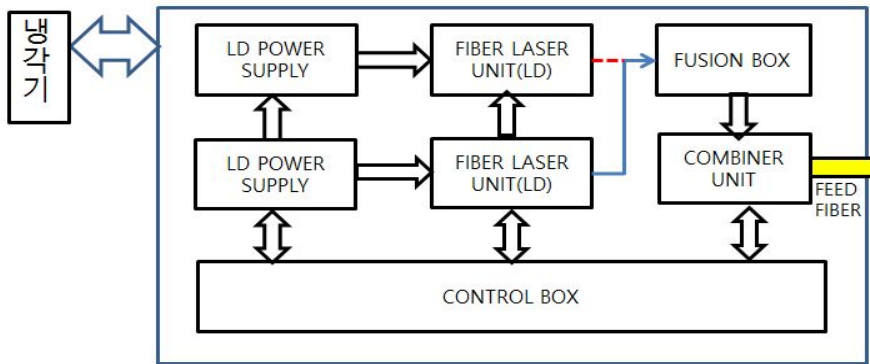


Fig. 2.4 파이버 레이저 기본 구조도

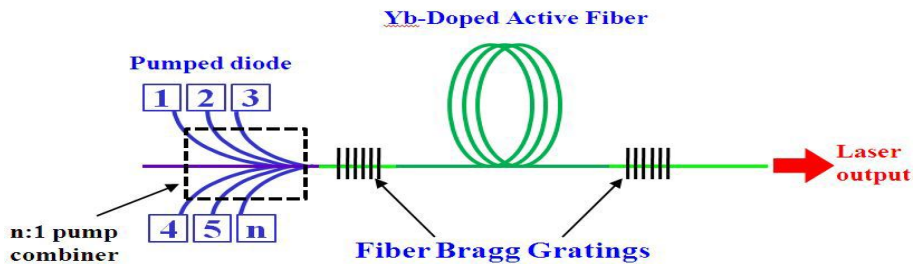


Fig. 2.5 Schematic fiber laser system to structures

펌프 다이오드에서 방출된 빛은 Fig 2.6와 같이 레이저 다이오드 광섬유(Laser Diode Pigtail : LDP이하)를 따라 전송되며, 스페셜 커플러를 통해 이중 클래딩 구조로 제작된 이터븀 엑티브 파이버 클래드에 펌핑 광원으로 입사하게 된다.

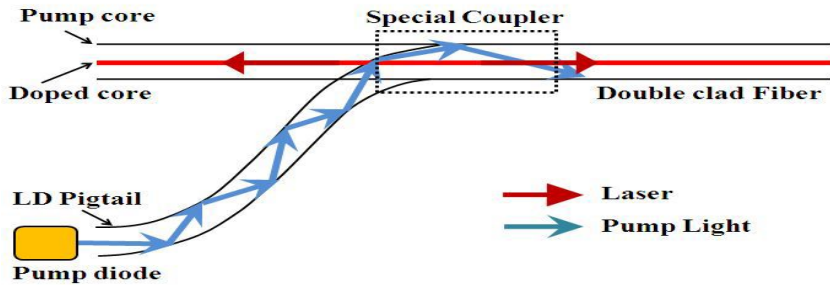


Fig. 2.6 Design of a fiber spacial coupler

이 빛은 Fig 2.7과 같이 파이버 클래드를 통해 전반사하면서 파이버 코어로 흡수되며, 이 흡수된 빛은 빛을 방출하고, 공진기 역할을 하는 FBG에 의해 빛이 증폭된다.

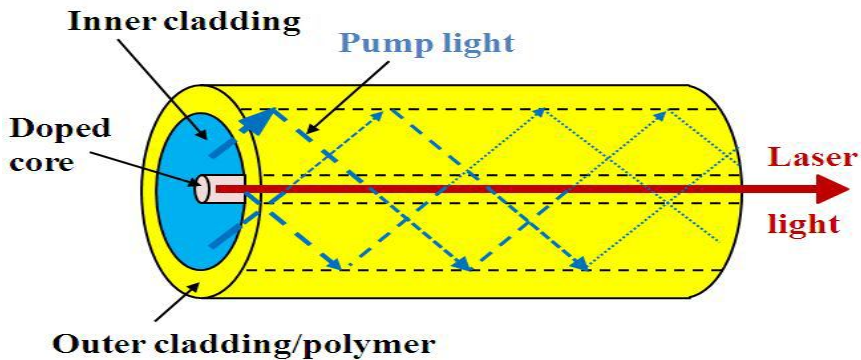


Fig. 2.7 Design of a double clad fiber of light pumping : laser active fiber

그리고 파이버 레이저에서는 펌핑 광원으로 Fig 2.8과 같은 싱글 에미터 다이오드레이저를 사용한다.

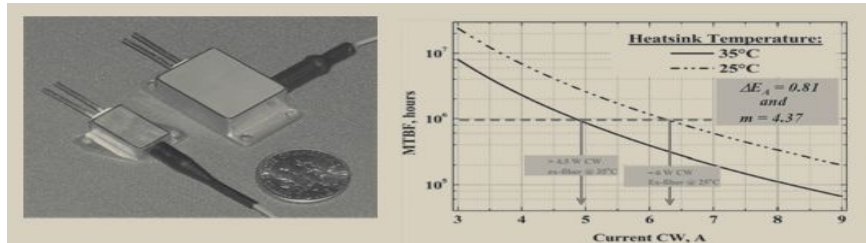


Fig. 2.8 싱글 에미터 다이오드

2.1.3 파이버 레이저 특성

첫째. 레이저 빔 품질이 우수하다.

레이저 빔의 품질 지수는 BPP(Beam Parameter Product:mm*mrad)로 표현하며, 레이저 가공 결과에 결정적인 역할을 하는 요소 중 하나이다.

Fig 2.9는 고출력 파이버 레이저의 빔 품질을 측정한 것으로 레이저 초점 크기가 작고, 빔 프로파일 (beam profile)이 가우시안 형태로 항상 일정하다.

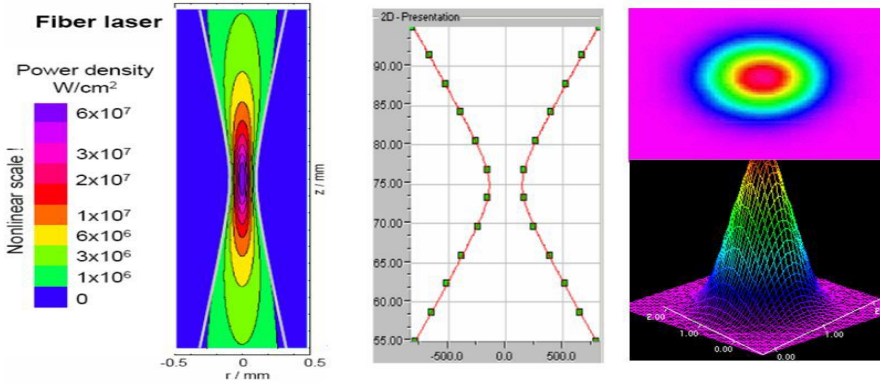


Fig. 2.9 Fiber laser beam profile

둘째, 다른 레이저 대비 효율성과 경제성이 뛰어나다.

파이버 레이저는 소모품이 없는 구조로 설계되었기 때문에, 전기료 등과 같은 최소의 운용비용 (runningcost)만 발생한다.

Fig.2.10은 다른 레이저 (Nd:YAG 레이저, CO2 레이저)와 파이버 레이저를 설치 시 필요한 실데 소요면적 나타내었으며, 각 레이저별 에너지 효율과 연간 소요되는 유지보수 비용을 나타내었다.

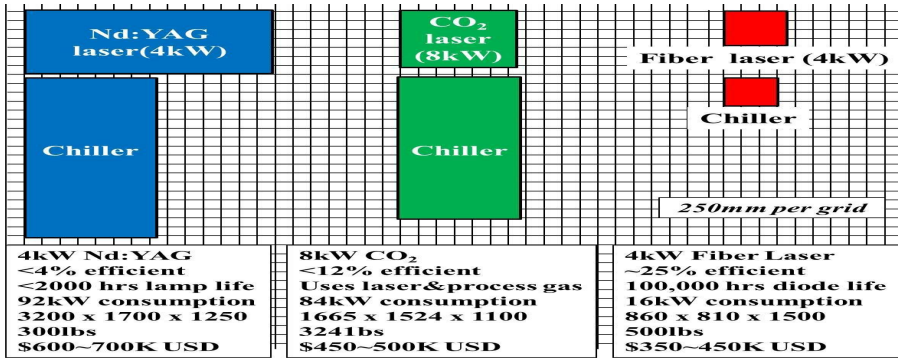


Fig. 2.10 Compared to the high power CW laser efficient

셋째, 빔 흡수율이 우수하다. 파이버 레이저는 Fig 2.11에서와 같이 금속 소재의 경우에 레이저 빔 흡수율이 높아 CO2 레이저에 비해 적은 출력으로 동일 두께 소재의 용접이 가능하다.

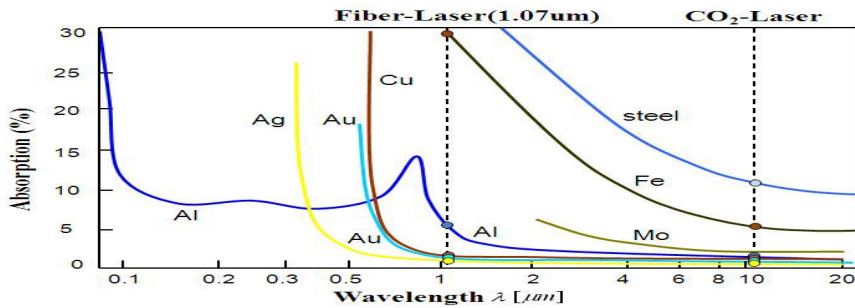


Fig. 2.11 Absorption rate of light to metal

넷째. 레이저 빔을 파이버로 전송함으로써 자동화 시스템 구성이 용이하다. 파이버레이저는 레이저 빔을 전송용 광파이버 케이블 (optical delivery fiber cable)에 의해 빔을 전송하기 때문에 레이저를 이용한 FA 시스템 구성이 용이하다. Fig 2.12는 파이버 레이저 가공 시스템에 대한 모식도이다.

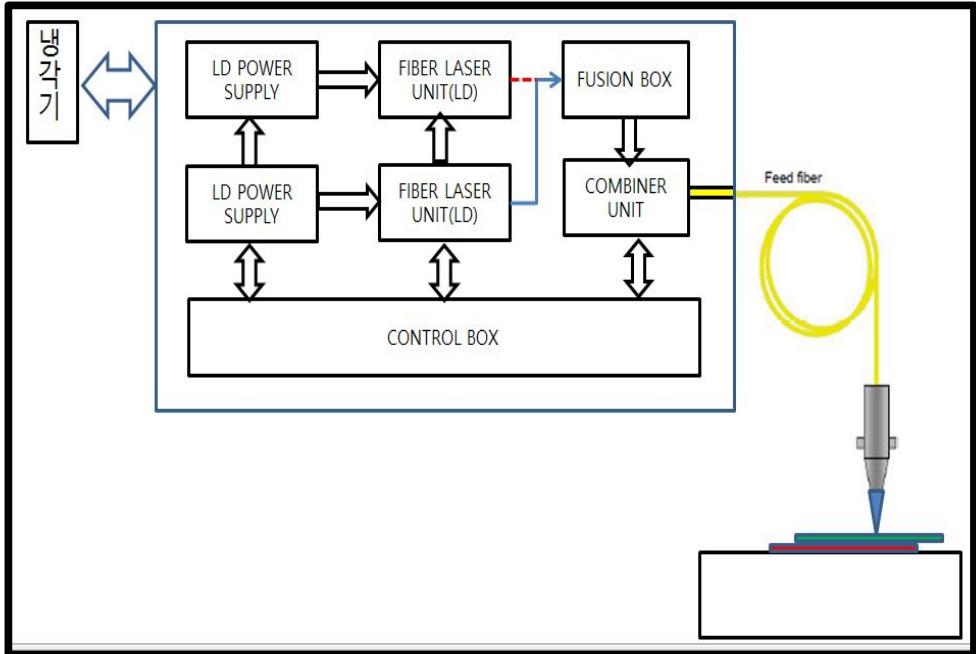


Fig. 2.12 Schematic fiber laser system of optical beam transmission

2.2 우블링 용접

2.2.1 우블링 용접의 정의

우블링 용접 기술은 원격 레이저 용접 (Remote laser welding)에서 기인하고 있으며, 용융 풀에 레이저 빔이 진동을 가지고 조사될 때 우리는 이 레이저 빔을 우블링이라고 하며, 레이저 빔을 선형 또는 곡선형의 진동을 이용해 주요 용접 경로를 따라서 이송시킨다. 이때 이 레이저 빔은 고속 반복적인 진동을 통해서 이동하면서 모재를 용융시키는데, 이 때 용융부의 일부를 재용융하면서 용접 경로를 따라 진행해 나간다. 이때의 비드 형상은 Fig 2.13 와 같으며, 고전적인 용접방법에 의한 비드 형상보다 기저면의 용융부가 넓은 것을 볼 수 있다.

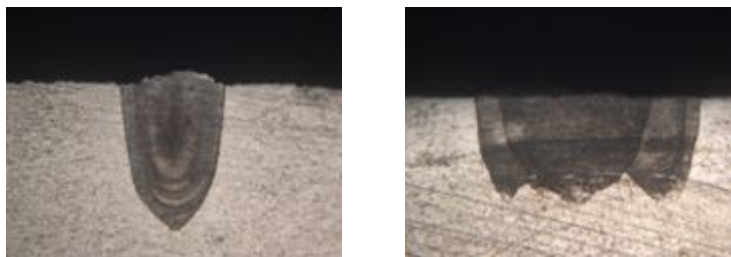
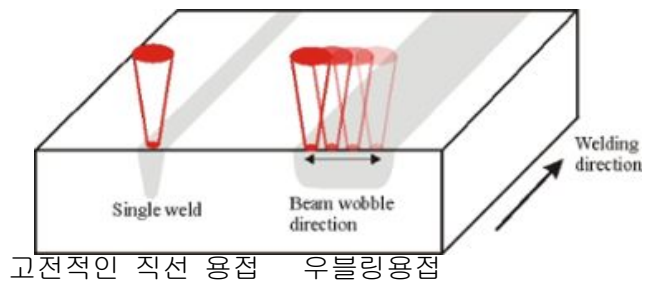


Fig 2.13 고전적인 용접 / 우블 용접 모식도

특히, 매우 작은 스폿 사이즈로 초점을 맞출 수 있는 고 품질의 파이버 레이저 빔을 사용하는 진동 기법은 갭의 문제가 있을 때 특히 유효하며, 직선 용접에서 용입 깊이가 낮은 문제점도 이러한 진동 기법(우블링)을 통해 해결할 수 있다.

Fig 2.14는 레이저 빔의 타원 형태의 진동 용접 우블링의 동작 원리를 나타내는 구조도이며,이송 스피드에 따라 중첩률이 결정되며, 중첩률에 따라 용접 비드의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다.

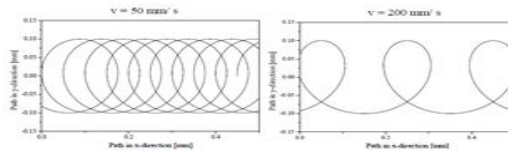


Fig 2.14 Oscillation function dependent on feed rate direction
 (left : 50mm/s, right : 200mm/s)

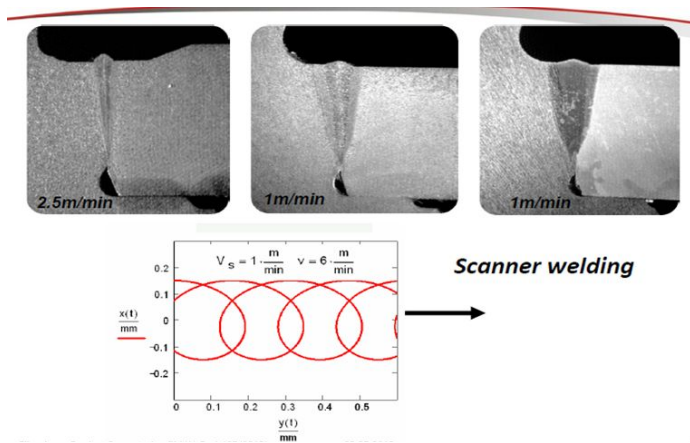


Fig 2.15 우블링의 형상 및 비드 형상

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

1. 높은 진동 주파수 값 : 진동을 하는 동안에 레이저 빔의 중첩을 일으켜서, 재료 일부분을 재 용융을 일으키며, 용접의 주요 경로의 진행 축을 따라 연속비드를 생성시킨다.

2. 높은 용접 속도 : 레이저 빔의 통로로부터 용융된 재료 부분 사이에 큰 갭이 형성되어 레이저로 용융시킨 재료의 일부를 재 용융시키는데는 제한이 있기 때문에, 레이저의 주요 용접 경로를 따라서 불완전한 연속 비드가 발생할 위험이 있다.

이러한 우블링 기법은 좁고 얇은 고밀도 레이저 빔을 이용해 선형의 경로를 따라 완벽한 원형 모션으로 빔을 이동시킴으로써 Fig 2.16과 같이 스폿 용접부도 만들 수 있다.

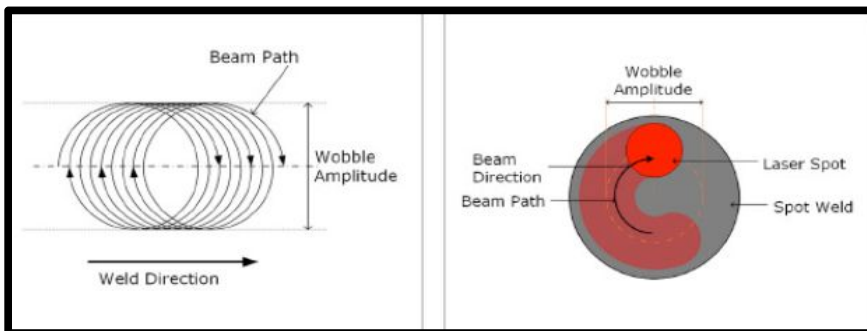


Fig 2.16 Schematic of the wobble welding technique.

2.2.2 Scanner system

정밀한 용접이 필요한 경우에 복잡한 2차원 3차원의 용접 경로를 거치는데, 이를 달성하기 위한 방법으로 적절한 초점 렌즈와 스캔 헤드를 사용하는 것이다.

Nd:Yag 레이저의 경우 큰 입력 빔의 직경과 초점 거리가 짧은 렌즈를 사용해 스폿 크기를 최소화하여 사용할 수 있지만, 이것은 용접 깊이 및 스캔 헤드의 작업 영역에 대한 제약으로 작용하고 있다.

하지만 정밀 용접을 수행하는데 필요한 매우 작은 스폿의 크기를 가능하게 하는 거의 최적의 가우시안 프로파일을 갖는 파이버 레이저의 출현으로 Fig 3.1과 같은 스캔 헤드와 결합을 하게 되면 산업의 많은 가공 분야에 걸쳐 복잡한 접합 패턴을 가능하게 한다. 이것은 컴퓨터 제어 인터페이스를 이용하여, 프로그램된 위치를 스캔 헤드 내부의 두 개의 미러를 이동하게 함으로써 가능하다. 우블링 기술은 스캔 헤드를 지정된 원형진폭을 이용하여 고속으로 용접 방향의 축 주위로 레이저 빔의 위치를 회전하는데 사용한다.

스캔 헤드를 이용한 우블링 레이저 용접을 하기 위해서는 Fig 2.17과 같이 레이저 발진기와 스캔헤드, 컨트롤러가 필요하다.

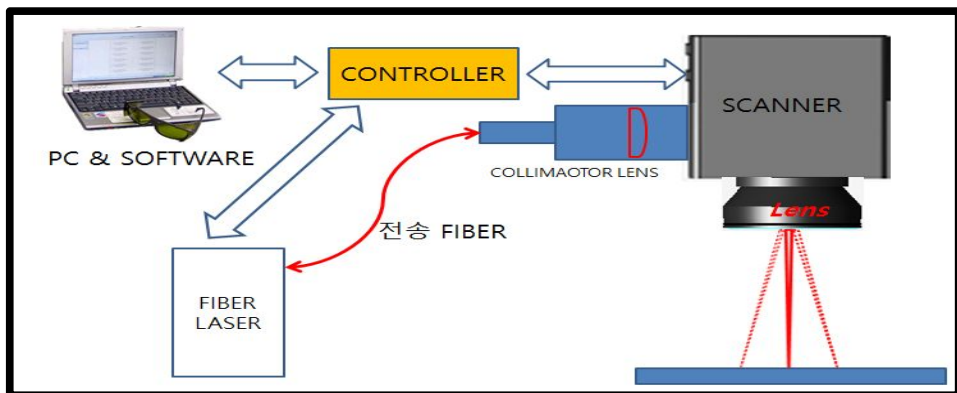


Fig 2.17 레이저 와 스캐너 시스템

스캔 헤드의 구성은 Fig 2.18와 같다.

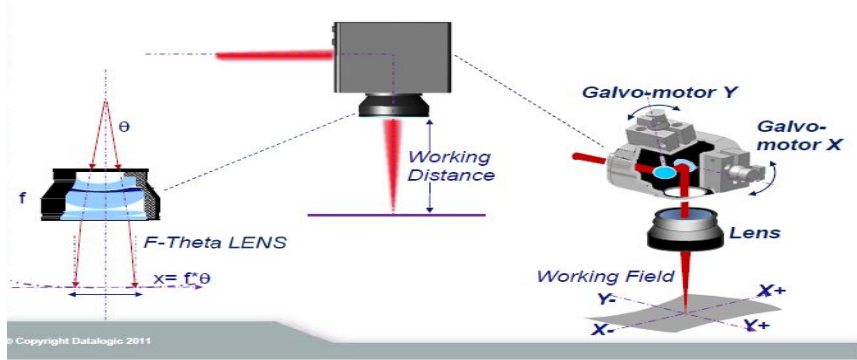


Fig 2.18 스캔 헤드 모식도

스캔 헤드에서 f-theta lens를 통해 집적화된 빔은 크기는 f-theta lens의 초점 거리에 따라 Fig 2.19과 같다.

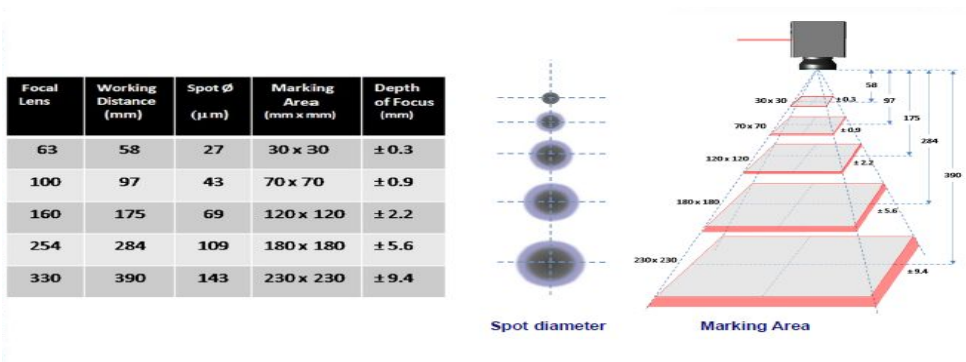


Fig 2.19 f-theta lens의 focus / laser spot size

제 3 장 실험 방법

3.1 실험 장비 및 재료

3.1.1 실험용 레이저 발전기 사양

본 연구에 사용되어진 레이저 발전기는 FUJIKURA社에서 제조한 두 종류의 연속파(CONTINUOUS WAVE) 타입의 파이버 레이저로 구체적인 사양은 다음의 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 파이버 레이저 용접기

Model	FMC-2000M	FLC-700S-W
Type	연속파 (CW Type)	
MODE TYPE	Multi	Single
Wavelength of the laser light	1080nm±5nm	
Maximum output power	≥2000W	≥700W
Workpiece	크랭크(레바 + 샤프트)	
Beam quality (BPP, M ²)	$BPP \leq 4.5mm \cdot mrad$	$M^2 \leq 1.4$
Laser light cable diameter(μm)	Φ100	Φ22
Length of light cable	10m	3m
Power consumption	7.2 kW 이하	3.5 kW 이하
Cooling water emp.range	21 ~ 25℃	
Weight (kg)	280	300
Demension W*H*D(mm)	517×1,104×1,056	516×1,104×1,000
Ambient temp.	5 ~ 45℃	

3.1.2 실험용 용접 장비 사양

직선 심 / 우블링 심 용접 실험 장비는 다음의 Table 3.2 와 Fig 3.1과 같다. 직선 심 용접에 사용한 3축 로봇은 UNITED WINNERS社의 제품을 사용하였고, INDEX는 주식회사 엘엠에스에서 제작한 제품을 사용하였다.

Table 3.2 용접 실험 장비 구성

구분	직선 심 용접 장치	우블링 심 용접 장치
LASER model	FMC-2000M	FLC-700-S
QBH type Fiber diameter(μm)	$\Phi 100(10\text{m})$	$\Phi 22(3\text{m})$
collimating lens focus	150mm	100mm
focusing lens focus	200mm	-
f- θ lens focus	-	277mm (area 142*142mm)
laser spot diameter(μm)	$\Phi 133$	$\Phi 60.94$
이송 장치	3축 robot	scanner(2축)+INDEX
software	nc program	전용 program
용접용 지그	사용	사용
보조 가스	질소 7L/min	
냉각기	3마력	2마력

구분	레이저 및 주변 장치	이송장치 및 용접용 지그
직선 심	 용접 헤드  2kw <u>화이버레이저</u>  냉각기	 3축 로봇 장비  용접용 <u>지그</u>
우블링 심	 비전  700W <u>화이버레이저</u>  냉각기  스캐너  PC 소프트웨어	 장비 내부  용접 설비  용접용 <u>지그</u>  용접 불꽃  질소 <u>레귤레이터</u>

Fig 3.1 레이저 용접 장치

3.1.3 실험 재료

본 연구에서 사용되어진 재료는 FIG 3.6과 같이 자동차 터보 차저에 장착되는 크랭크를 제작하는 부품으로 다음의 Table 3.3 에서는 각 재료의 화학적 조성치를 나타내었다.



Fig 3.2 크랭크 부품

Table 3.3 Chemical Compositions in SUS 304 and Inconel926

Material	Chemical Composition (Wt%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	N	Etc
SUS304	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2	≤ 0.045	≤ 0.03	8.0 - 10.5	18 - 20					
INCONEL 926	0.02	0.5	2	0.03	0.01	24 - 26	19 - 21	6.0 - 7.0	0.6 - 1.2	0.5 - 1.5	0.15 - 0.25	bal.

위 크랭크 부품은 소재가 스테인리스 304강인 레바와 소재가 인코넬 926 강인 샤프트로 구성되어 있다.

이 부품의 용접을 하기 위한 레이저 용접 공정변수는 2종류로 나누어 볼 수 있으며, 본 연구에서는 크랭크 부품소재 이종재 스테인리스강304/인코넬926에 대해 Single mode fiber laser를 이용한 wobble beam 용접을 실시하여

이에 대한 적용성을 검토하고자 하였다. 아울러 멀티모드 파이버 레이저 직선 용접적용에 따른 용접특성을 비교 평가함으로써, 모드 및 우블링 조건이 용접부의 접합부 형상 및 기계적, 금속학적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

3.2 실험 조건

3.2.1 이종재(STS/Inconel) 싱글모드 파이버 레이저 우블링 용접

싱글모드 파이버 레이저 우블링 용접 공정 변수는 레이저출력, 레이저 빔의 이송 속도, 레이저 빔의 초점 거리, 보호 가스, 우블링 주파수/진폭이다. Table 3.4와 같이 이번 실험에서는 레이저 출력, 빔의 진동 폭, 이송 speed, 용접 시간을 고정 하였으며, 변수로 진동 주파수를 30Hz에서 150Hz까지 30Hz씩 증가시키면서 용접 조건을 확인하였다.

용입 깊이와 용입 깊이 70% 지점에서의 기저 비드의 크기 그리고 표면 비드의 크기를 확인하였다.

용접 비드의 균일성과 용접 분위기 안정을 위해 사이드 노즐을 제작해 사용하였으며, 용접에 사용한 보호 가스는 질소 가스를 이용하였으며, 유량은 7ℓ/min로 흘러보내 주위 공기와의 접촉을 차단하였다.

레이저 빔으로 용접한 크랭크 부품의 용입 깊이를 분석하기 위해 실 소재를 이용하여 원주 맞대기 심 용접을 실행하였다.

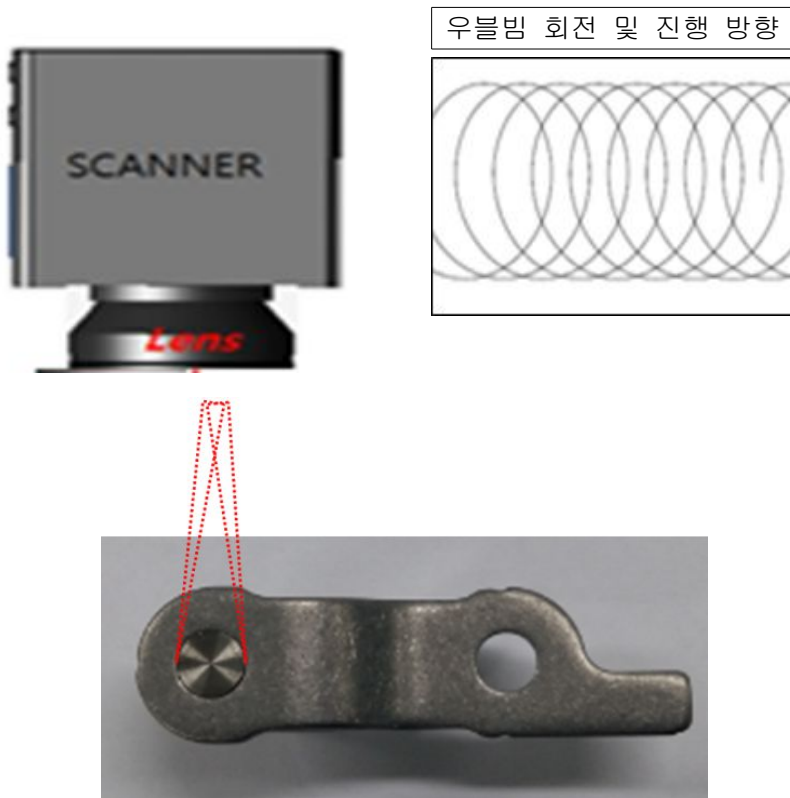


Fig 3.3 싱글모드 파이버레이저 우블링 용접

Table 3.4 싱글모드 파이버 레이저 우블링 용접 조건

항 목	재료	
	레바 : SUS 304 / 샤프트 : INCONEL 926	
우블링 이송 속도	15mm/sec	
용접 시간	2.53sec	
레이저 출력	360W	
보조가스(N2)	7L/min	
오버랩	340도	340도
(변수: 주파수)	30Hz/1sec	
	60Hz/1sec	
	90Hz/1sec	
	120Hz/1sec	
	150Hz/1sec	

3.2.2 이종재(STS/Inconel) 멀티모드 파이버 레이저 직선 용접

멀티모드 파이버 레이저 직선 용접 공정 변수는 레이저출력, 레이저빔 이송 속도, 레이저빔의 초점거리, 보호 가스이다.

레이저 출력은 360W ~ 760W까지 200W씩 증가시키고, 동축 노즐을 사용하였으며, 용접 헤드는 고정시키고, x-y 로봇을 이용하여 모재를 회전시키고, 회전 속도는 10mm/sec로 고정하고 용접조건을 확인하였다. 용접 비드의 균일성과 용접 분위기 안정을 위해 동축 노즐을 제작하였으며, 용접에 사용한 보호 가스는 질소 가스를 이용하였으며, 유량은 7ℓ/min로 흘러보내 주위 공기와의 접촉을 차단하였다.

레이저 빔으로 용접한 크랭크 부품의 용입 깊이를 분석하기 위해 실 소재를 이용하여 원주 맞대기 심 용접을 실행하였다.

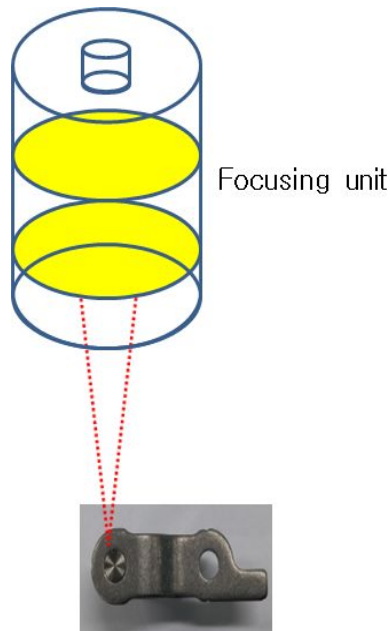


Fig 3.4 멀티 모드 파이버 레이저 직선 심 용접

Table 3.5 멀티모드 파이버 레이저 직선 용접 조건

항 목	재료1
로봇 이송속도	15mm/sec
포커스	200mm
용접 시간	2.53sec
오버랩	340도
N2	7L/min
(변수: 레이저 파워)	360W
	560W
	760W

3.3 용접품질 평가방법

3.3.1 접합부 형상 평가 외관 및 단면 특성

각 공정/조건별 용접부의 외관 평가는 육안 검사를 통하여 표면 및 비드 형상에 대한 결함 검사를 실시하였으며, 올림푸스사의 광학 현미경(INFINITY1) 및 이미징 소프트웨어(I-solution)를 이용하여 용접부의 정확한 폭과 용입 깊이를 측정하였다. 특히 단면 특성 평가에서는 공정별 용접부내 존재하는 결함의 형태를 비교 하였다.

3.3.2 경도 분포 분석

각 공정별 싱글모드 파이버 레이저 우블링 맞대기 심 용접, 멀티모드 파이버 레이저 직선 맞대기 심 용접부의 레이저 출력 파워 및 주파수에 따른 레이저 용접부의 경도 측정을 Fig 3.11과 같이 akashi사의 모델명 HM-112의 비커스 경도 시험기를 사용하였다.

현미경 배율은 50um이며, 135°다이아몬드 피라미드 입자를 사용하여 접합 방향 수직인 단면을 절단하여 미세연마후 표와 같이 에칭을 실시한 후에 하중 0.5 kgf, 10sec 조건으로 각 공정별 싱글모드 파이버 레이저 우블링 맞대기 심 용접, 멀티모드 파이버 레이저 직선 맞대기 심 용접부 상부 표면에 서 0.5mm지점으로부터 1mm간격으로 경도를 측정하였다.



Fig 3.5 마이크로 비커스 경도 실험기

Table 3.6 경도 실험 조건

Item	Values
Type	Micro Vickers Hardness Tester
Load	0.5Kgf
Loading Time	10sec
Test Position	bellow 1.5 from surface

(sus) (inconel) (sus)

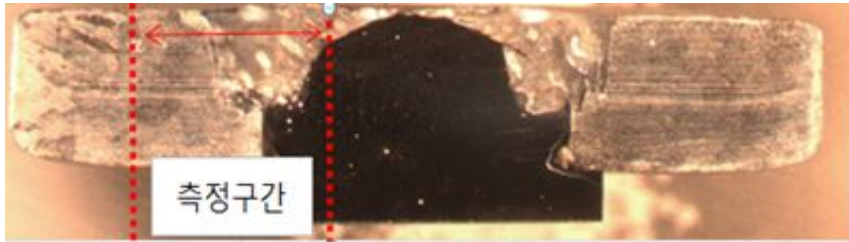


Fig 3.6 경도 실험 위치 조직도

3.3.3 미세조직 관찰

각 공정별 싱글모드 파이버 레이저 우블링 맞대기 심 용접, 멀티모드 파이버 레이저 직선 맞대기 심 용접부와 레이저 출력 파워 및 주파수에 따른 레이저 용접부의 미세 조직 관찰을 하기 위하여 용접부 횡단면을 Fig 3.12와 같이 광학 현미경을 이용하여 조직을 관찰하였다. 용접부의 조직을 관찰하기 위해 미세 연마후 메탄올 92ml + 질산8ml 혼합시킨 나이탈 8% 용액을 이용하여 레이저 용접부 30sec 동안 에칭후 미세조직을 관찰하였다.

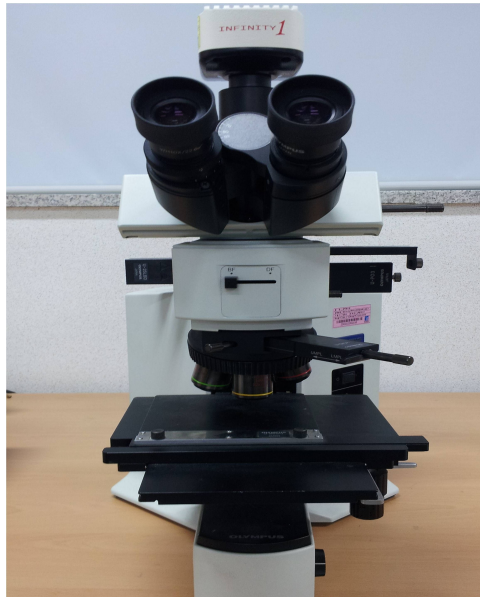


Fig 3.7 광학 현미경

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 멀티모드 직선 용접 / 싱글모드 우블링 용접 특성 비교

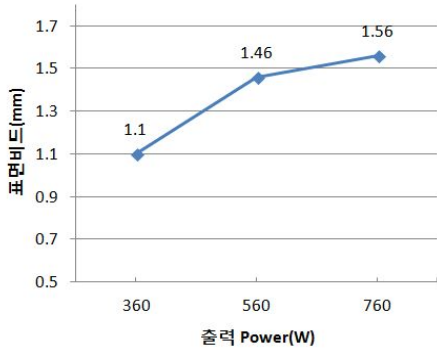
4.1.1 접합부의 형상 평가

Fig4.1은 멀티모드 직선 심 용접부로 스퍼터의 발생이 많으며, 용접 표면 비드가 거칠고 760w에서는 일부 구간에 용락 및 크랙이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고밀도 에너지가 좁은 영역에 집중되고, 고속으로 용접되기 때문에 급냉으로 인한 응력이 걸리고 이러한 응력을 풀어주지 못해 발생한 균열로 사료 된다.

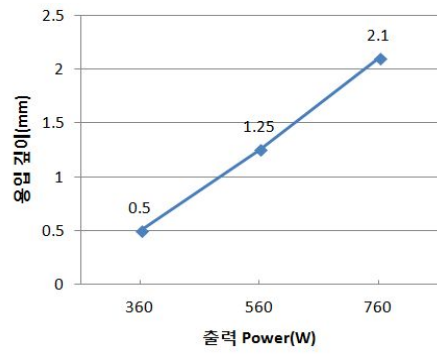
전체적인 비드 크기는 Fig 4.2 와 Table 4.1과 같으며, 용접 위치 편차가 발생하는 부위에서는 용입 깊이의 편차가 나타나며, 용접 강도의 저하로 나타날 수 있다.

Table 4.1 멀티모드 직선 심 자료

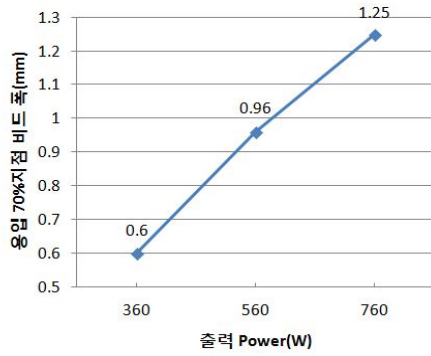
출력 power(w)	표면비드(mm)	용입 깊이(mm)	용입 70%지점 비드 폭(mm)
360	1.10	0.5	0.6
560	1.46	1.25	0.96
760	1.56	2.1	1.25



(a) 출력(W)별 표면 비드



(b) 출력(W)별 용입깊이



(c) 주파수(Hz)별 용입70%지점 비드 폭



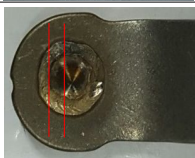
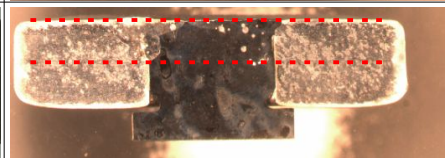

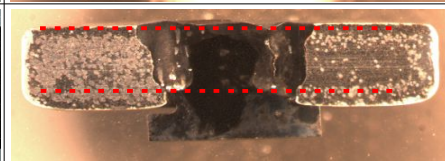
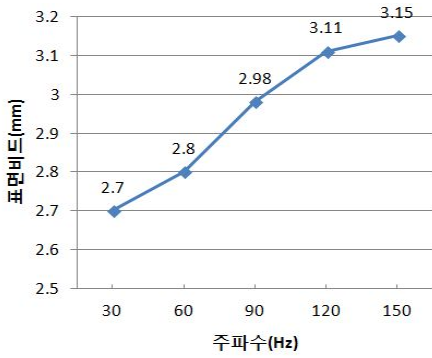
Power (W)	표면비드	Bead	Cross Section
	용입깊이		
360	1.1mm		
	0.5mm		
560	1.46mm		
	1.25mm		
760	1.56mm		
	2.1mm		

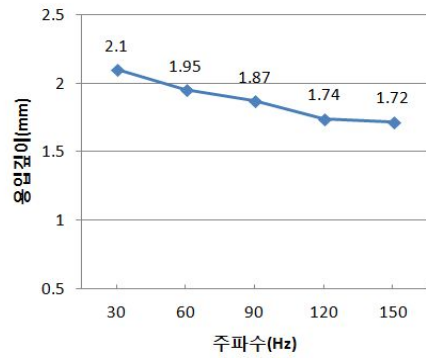
Fig 4.1 멀티모드 직선 심 용접부 형상 (주파수별)

Table 4.2 싱글모드 우블링 심 비드

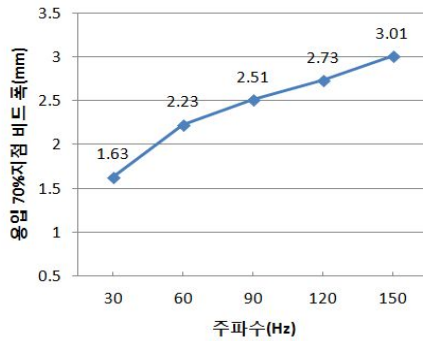
주파수(Hz)	표면 비드(mm)	용입 깊이(mm)	용입 70%지점 비드 폭(mm)
30	2.7	2.10	1.63
60	2.8	1.95	2.23
90	2.98	1.87	2.51
120	3.11	1.74	2.73
150	3.15	1.72	3.01



(a) 주파수(Hz)별 표면 비드



(b) 주파수(Hz)별 용입깊이



(c) 주파수(Hz)별 용입 70%지점 비드 폭

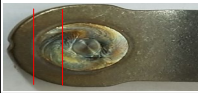
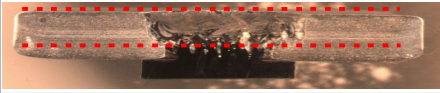
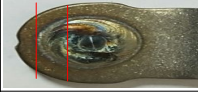
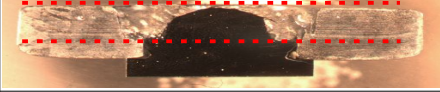
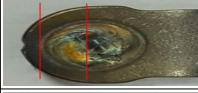



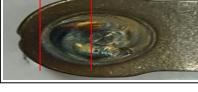

우블링 주파수(Hz)	표면 비드	Bead	Cross section
	용입 깊이		
30	2.7mm		
	2.1mm		
60	2.8mm		
	1.95mm		
90	2.98mm		
	1.87mm		
120	3.11mm		
	1.74mm		
150	3.15mm		
	1.72mm		

Fig 4.2 싱글 모드 우블링 심 용접부 형상(출력별)

Fig4.2는 싱글 모드 우블링 심 용접부로 스패터 발생이 적으며, 표면 비드가 미려하고, 용락이나 크랙의 발생이 나타나지 않고 있으며, 또한 상대적으로 360W라는 적은 용량으로도 멀티모드 직선 심 용접부에 비해 Table 4.2와 같이 용입 깊이와 표면비드, 용입 깊이 70% 지점에서의 기저 비드가 크게 나타나고 있다. 이는 레이저 빔이 진동하면서 용접 경로를 따라 이송하기 때문에 기존의 용접된 부위를 재용융하기 때문에 발생하는 현상이라고 할 수 있다.

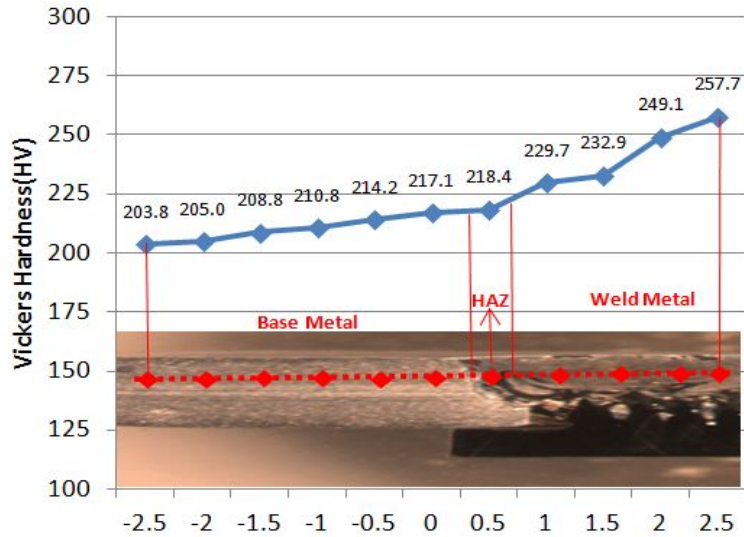
또한 주파수가 높아질수록 용입 깊이는 줄어 들지만,표면의 용접 비드가 인코넬 926 소재인 샤프트쪽으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 이는 인코넬 926의 용점이 약 100°C 정도가 낮으며, 구조적인 형상으로 인해 샤프트 중심쪽으로 열전달이 많아지기 때문으로 판단된다.

4.1.2 경도 분포 특성

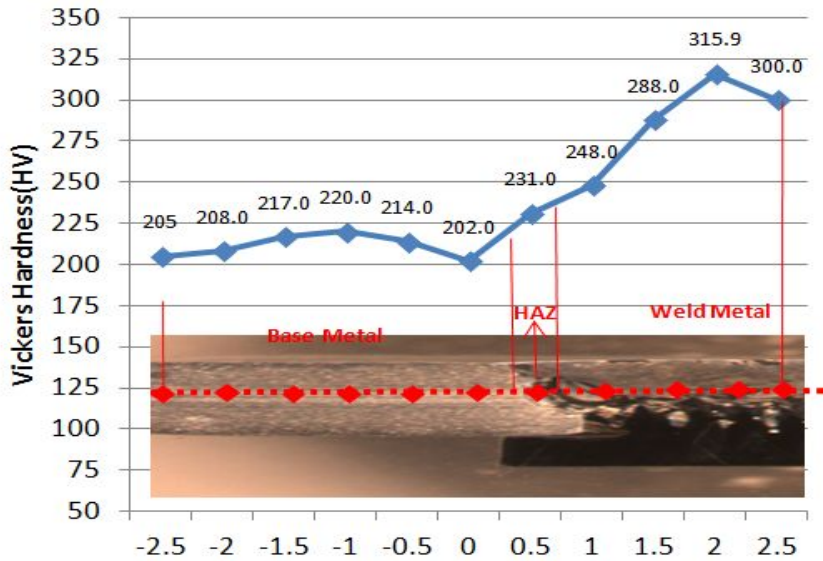
Fig 4.5는 멀티 모드 파이버 레이저 직선 용접부 및 싱글 모드 파이버 레이저 우블링 용접부에 대한 경도분포를 나타내었다. (a)는 싱글 모드 파이버 레이저 우블링 심 용접부의 주파수(30Hz)이며, (b)는 멀티 모드 파이버 레이저 직선 심 용접부의 출력(760w) 경도 분포에 따른 용입 깊이에서 얻어질 수 있는 용접 조건에서 경도 분포를 알아보았다.

경도 측정 포인트는 반쪽에 대해서 모재방향으로 0.5mm 등간격으로 측정을 하였다. 싱글 모드 파이버 레이저 우블링 용접에서 최대 경도값은 WM(Weld Metal)부에서 약 260HV값이 나왔으며, 모재 평균값(208HV)대비 약 50HV 높은 것을 알 수 있다. 멀티 모드 파이버 레이저 직선 용접에서의 최대 경도값 또한 WM(Weld Metal)부에서 300HV 모재평균값(220HV)대비 약 80HV 높은 것을 알 수 있다.

우블링 용접 대비 직선 용접의 최대 경도 값이 상대적으로 약 40HV이상 증가 됐음을 확인 할 수 있다.



(a) 싱글 모드 파이버 레이저 우블링 심 용접부의 주파수(30Hz)



(b) 멀티 모드 파이버 레이저 직선 심 용접부의 출력(760w)

Fig 4.3 우블링 및 직선 용접부 경도 분포

4.1.3 미세조직 특성

Fig 4.7은 우블링 주파수 30Hz에서의 싱글모드 우블링 심 용접부의 미세조직(Microstructure)을 나타낸 것이다. SUS304의 모재부(Base Metal)에서는 전형적인 오스테나이트 조직을 나타내고 있으며, 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에서는 모재부에 비해 다소 조대화된 결정립(Grain)이 관찰되었다. (c) 및 (d)에서는 레이저 열에 의한 모재로부터 급격한 온도변화에 따라 용융부 경계부(Fusion Line)에서 용융부(Fusion Zone)쪽으로 길고 가느다란 형태의 Columnar dendrite가 방향성을 갖고 성장하고 있음을 나타내었다.

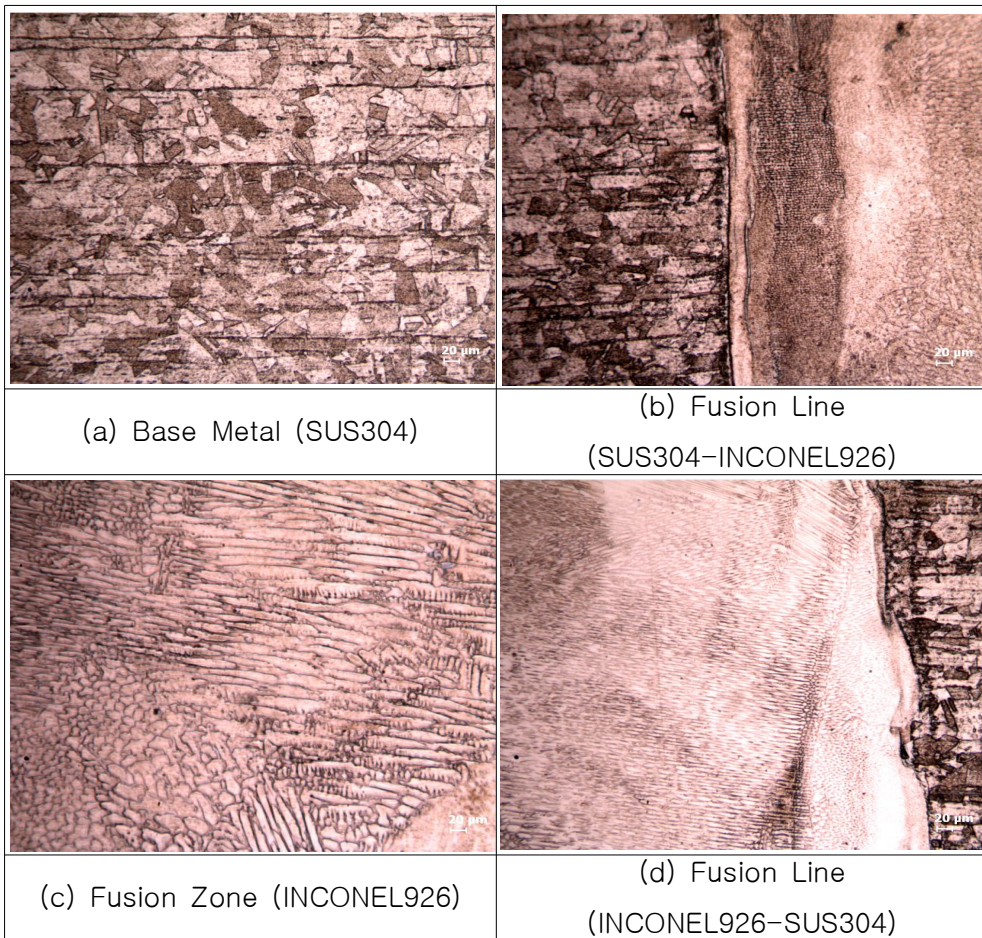


Fig 4.4 싱글 모드 우블링 맞대기 심 용접부의 미세조직

4.2 크랭크 레바(STS)/샤프트(INCONEL) 용접 조건 도출

레이저 빔 품질인 $M2 \leq 1.4$ 인 싱글 모드의 파이버 레이저의 적은 빔 크기를 사용하여 우블링 심 용접시 실제 생산 현장에서의 품질 검사 기준을 만족하는 Table 4.3 와 같은 조건을 만족하기 위하여 우블링 주파수를 변조하면서 용접 실험을 해본 결과 주파수 120Hz미만에서는 안정적인 용입 깊이를 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4.3 용접 품질 검사 기준

항목	기준
용접 시간	2.52sec / 1ea
외관 검사(육안)	용접표면이 깨끗할 것
	용접부 흠 발생 없을것
	용접부 크랙 없을것
용입 깊이(절단면 2곳 확인)	1.72mm 이상일것

제 5 장 결론

본 연구에서는 자동차 터보 차저 부품에 적용되는 두께 3mm 스테인리스 판재에 대하여 인코넬 부품을 각 공정별 맞대기 용접을 실시하여 용입 깊이 및 넓이, 기계적 특성 평가와 금속학적 특성을 비교 실험하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 우블링 용접은 스퍼터 발생이 적고, 용접 표면 비드가 미려하고, 용접 종료지점에서 용락 현상의 발생이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

2) 우블링 용접에서는 용접부의 크랙이 보이지 않는데, 이는 기 용접된 부위를 재용융하면서 레이저 빔이 전진하기 때문에 용융부의 크랙 발생으로 인한 간극을 충전시키는 역할을 하는 것을 확인할 수 있다

3) 우블링 용접에서는 주파수를 높아질수록 용입 깊이는 적어지지만, 기 용접부의 재용융 반복 속도가 빨라지면서 입열량 증가로 인해 표면 비드 크기가 증가하고, 용입 깊이 70% 지점에서의 비드 크기도 증가하기 때문에 용접 위치 편차가 발생하더라도 하더라도 일정한 용입 깊이 확보가 가능한 것을 확인할 수 있다.

4) 각 공정별 싱글 모드 우블링 용접은 멀티모드 직선 심 용접부의 용입 깊이를 비교하여 본 결과 동일 용입 깊이 조건의 레이저 출력은 싱글 모드 우블링이 360W로 멀티모드 직선의 760W에 비해 약 1/2 용량으로 달성할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

Reference

- [1] “현대자동차 블로그”, <http://blog.hyundai.com/> (2016.05.2)
- [2] “Laser screw welding”,
http://www.cargroup.org/assets/speakers/presentations/235/takefumi_shiga.pdf (2016.05.2)
- [3] 김순덕, "친환경·고성능 터보엔진, 중형차 시장 대세로 떠오른다",
2016.05.19, 베타뉴스, 2016.05.23
- [4] “nissan 350z performance-north american specification”,
http://www.airpowersystems.com/350z/turbo_boost_article/turbo_boost.htm (2016.05.20.)
- [5] Y. B. Oh "study on the Characteristics of Welding and Cutting in the Automobile Steel Parts Using a Continuous Wave Fiber laser", 2012
- [6] 한유희, “광학과 기술” p28-p33
- [7] 유영태, 연속파형 파이버 레이저를 이용한 자동차 철강소재의 용접 및 절단 특성에 관한 연구, 2013.2
- [8] 아마다미야찌코리아 블로그
- [9] 도요타스쿠류웰딩, “Challenge for light weight”
- [10] Schmitt, Felix, et al. "Laser beam micro welding with high brilliant fiber lasers." Proc. of LAMP (2009).
- [11] Rofin, Fiber lase product presentation.
- [12] Fujikura, "Fiber laser Manual"
- [13] 유영태, “연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 인코닐 600 합금의 맞대기 용접특성 연구(2004)
- [14] 주성민, et al. "자동차 부품 제조를 위한 레이저 스티치 용접 기술." 대한용접·접합학회지 31.4 (2013): 1-6.
- [15] 방한서, et al. "Laser-FSW Hybrid 접합기술을 적용한 이종재료 (Al6061-T6/SS400)." Journal of KWJS 28.6 (2010).

- [16] 김준형, et al. "Nd: YAG Laser-MIG 하이브리드 용접을 이용한 Al5052-(H32) 의 용접성에 관한 연구." 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 (2009): 130-130.
- [17] Bang, Hee-Seon, et al. "하이브리드 용접 (MIG+ CO2 LASER) 를 이용한 이종재." (2009).
- [18] 방희선, et al. "SS400-ST304 이재용접부의 외력작용시 용접잔류응력 특성." Journal of KWJS 27.5 (2009).