



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](#) 

2013년 2월 석사학위논문

이차전지 극주
연속파형 Nd:SSYAG 레이저를
용접특성에
이용한 연구
황찬연

2013년 2월
석사학위 논문

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한
이차전지 극주 SS41의
용접특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

황 찬 연

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한
이차전지 극주 SS41의
용접특성에 관한 연구

Welding characteristic of the secondary battery pole SS41
using Continuous-Wave Nd:YAG laser

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

황 찬 연

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한
이차전지 극주 SS41의
용접특성에 관한 연구

지도교수 유 영 태

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

황 찬 연

황찬연의 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	i
LIST OF TABLE	iv
ABSTRACT	v
제 1장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구목적 및 내용	6
제 2장 이론적 배경	7
2.1 연속파형 Nd:YAG 레이저의 특성	7
2.2 레이저 용접	10
제 3장 실험장치 및 방법	12
3.1 실험재료	12
3.2 실험방법	13
3.3 CW Nd:YAG 레이저 장치	15
3.4 실험 분석장치 및 방법	16

3.4.1 실험시험편 제작 및 분석	16
3.4.2 광학 및 전자현미경 분석	18
제 4장 실험결과 및 고찰	19
4.1 노즐 형상에 대한 비드 온 플레이트 용접 특성	19
4.1.1 초점위치 변화에 따른 에너지 흡수 특성	19
4.1.2 노즐 형상별 비드 온 플레이트 용접특성	22
4.1.3 동축노즐 위치변화에 따른 용접특성	36
4.2 SS41 겹치기 용접특성	45
4.2.1 크로스노즐의 용접영향	45
4.2.2 동축노즐의 용접영향	49
4.3 니켈도금 된 SS41의 겹치기 용접 특성	55
4.3.1 크로스노즐의 용접영향	55
4.3.2 동축노즐의 용접영향	59
4.4 노즐 형상별 T형상 용접 특성	64
제 5장 결 론	67
참 고 문 헌	68

List of Figures

Figure 2.1 High laser power is obtained by mounting several cavities in line (CW Nd:YAG laser)	8
Figure 3.1 Welding cross-section area of argon arc welding	14
Figure 3.2 Schematic diagram of the experimental nozzle type	14
Figure 3.3 Laser oscillator and optic head of welding processing	15
Figure 3.4 Linear precision saw	17
Figure 3.5 Hot mounting press	17
Figure 3.6 Automatic grinder/polisher	18
Figure 3.7 Micro analysis system of optic-materials	18
Figure 4.1 The beam spot size configuration of focal position	20
Figure 4.2 The depth configuration of focal position	21
Figure 4.3 Variations in Aspect ratio with focal position of the welding lens	21
Figure 4.4 Comparison of welding bead and penetration bead with nozzle type and laser power	23
Figure 4.5 Cross-section of welding zone after nozzle type and laser power	25
Figure 4.6 Aspect ratio of nozzle type and laser power	26
Figure 4.7 Heat input of nozzle type and laser power	27

Figure 4.8 Power density of nozzle type and laser power	28
Figure 4.9 Comparison of welding bead and penetration bead with nozzle type and laser power	30
Figure 4.10 Cross-section of welding zone after nozzle type and laser power	31
Figure 4.11 Aspect ratio of nozzle type and laser power	32
Figure 4.12 Heat input of nozzle type and laser power	33
Figure 4.13 Power density of nozzle type and laser power	34
Figure 4.14 Schematic diagram of Coaxial nozzle height change	37
Figure 4.15 Comparison of welding bead with coaxial nozzle height change and shielding gas pressure, (Welding bead with shielding gas pressure, A:1bar, B:2bar)	39
Figure 4.16 Cross-section of welding zone after coaxial nozzle height change and shielding gas pressure	41
Figure 4.17 Aspect ratio of Coaxial nozzle height change	43
Figure 4.18 Heat input of Coaxial nozzle height change	44
Figure 4.19 Comparison of welding bead with beam welding speed	45
Figure 4.20 Cross-section of welding zone after beam welding speed	46
Figure 4.21 Aspect ratio of beam welding speed	47
Figure 4.22 Heat input of beam welding speed	48

Figure 4.23 Comparison of welding bead with coaxial nozzle and beam welding speed,
(Welding bead with shielding gas pressure; A:1bar, B:2bar) 49

Figure 4.24 Cross-section of welding zone after coaxial nozzle and beam welding speed
..... 52

Figure 4.25 Aspect ratio of coaxial nozzle and beam welding speed 53

Figure 4.26 Heat input of coaxial nozzle and beam welding speed 54

Figure 4.27 Comparison of welding bead with beam welding speed 55

Figure 4.28 Cross-section of welding zone after beam welding speed 56

Figure 4.29 Aspect ratio of cross nozzle and beam welding speed 57

Figure 4.30 Heat input of cross nozzle and beam welding speed 58

Figure 4.31 Comparison of welding bead with coaxial nozzle and beam welding speed,
(Welding bead with shielding gas pressure; A:1bar, B:2bar) 59

Figure 4.32 Cross-section of welding zone after coaxial nozzle and beam welding speed
..... 61

Figure 4.33 Aspect ratio of coaxial nozzle and beam welding speed 62

Figure 4.34 Heat input of coaxial nozzle and beam welding speed 63

Figure 4.35 Comparison of Argon TIG welding and laser welding 64

Figure 4.36 Comparison of welding bead with nozzle type and beam welding speed
..... 65

Figure 4.37 Cross-section of welding zone with nozzle type 66

List of Tables

Table 1.1 A recent research of low carbon steel welding by laser.....	5
Table 2.1 Surface reflexivity of metal materials.....	9
Table 3.1 Chemical compositions of low carbon steel SS41.....	12
Table 3.2. Mechanical properties of low carbon steel SS41.....	12

ABSTRACT

Welding characteristic of the secondary battery pole SS41 using Continuous-Wave Nd:YAG laser

Hwang, Chan-Youn

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

Dept. of Advanced parts and materials engineering,

Graduate School of Chosun University

It is difficult to process the cutting-edge industrial technologies with the conventional methods due to new materials and miniaturization. A laser manufacturing system requiring a high precision processing step based on the laser has come into the spotlight with the development of advanced machining process technologies. The laser process is widely used in welding, cutting, heat treatment and marking.

Although the price of laser devices is expensive, they work fast, and their materials barely transform. It is advantageous to use them in thin plate welding because of their fast speed with a contactless method. Especially, laser welding and cutting technologies are actively used in motor industry. However, the level of environmental pollution has become serious as the related industry has developed. Regarding this point of view, the motor industry focuses on developing electric or hybrid vehicles and researching key components in those cars. As a representative research about a secondary battery, an Argon TIG welding method was applied; however, since the performance of its weldability was not enough, a laser welding method has been applied in order to complement it. In this study, we employ the T-joint welding technique between a pole plate and tap to increase the output of a secondary battery.

As a basic test, we tried to find the optimal condition for the lap joint welding between a pole plate in a secondary battery and a low carbon steel SS41, which is tap material. From this test, the weldability is measured in comparison with welding characteristics by using a Ni-coated specimen of SS41 and according to nozzle types. As a result, the laser power is 1800W, and the laser beam welding speed is 1.8m/min for the optimal welding condition in case of a cross nozzle when lap joint welding was applied to every speed. The above welding condition is good for a coaxial nozzle, and a laser beam welding speed is fine for 2.0m/min. However, since it is lap joint welding, porosity is made at welding areas.

Lap joint welding is applied to Ni-coated SS41. Overall, porosity defects were not found, but crack issues appeared on joint areas. It is considered that nickel has influence on the crack issues. For T-joint between a pole plate and tap as a research objective, we tested SS41 and a Ni-coated SS41 specimen with a coaxial nozzle and cross nozzle, respectively. For the test condition, the laser power was 1800W, and the laser beam welding speed was 1.8m/min. As a result, the cross nozzle shows a uniform welding bead and welding depth while the quality of welding at front bead is low in the coaxial nozzle due to the high pressure of shielding gas, and the molten pool is deeply formed by the shielding gas. It might be advantageous to increase pressure than to weld at the coaxial nozzle in cutting.

제 1장 서론

1.1 연구배경

현대 산업사회의 과학기술은 신소재의 출현과 함께 부품이 복잡해지고 제품이 소형화 되면서 기존의 방법으로는 가공이 힘들기 때문에 고도화된 가공공정(AMP, Advanced Machining Process) 기술개발이 필요하게 되었다. 1950년대 초반부에 개발된 레이저는 그 출력이 증가하면서 레이저를 활용하여 제품을 생산하는 산업체의 수가 해가 지날수록 크게 성장하고 있다. 다양한 부품을 가공하는데 사용하는 레이저 가공 시스템 중에서도 용접(Welding)과 커팅(Cutting), 열처리(Heat-treatment), 그리고 마킹(Marking) 등에 이르기까지 레이저가 폭넓게 사용되고 있다. 과학기술이 발전하면서 가공물 자체가 소형화되거나 고정밀화를 요구하기 때문에 레이저의 사용빈도가 점차 증가하고 있다. 제품의 글로벌 경쟁력을 확보할 수 있는 정밀부품과 기능성 소재의 성질이 상실되지 않고 가공이 가능한 기술로 레이저 용접기술이 그 대안으로 제시되고 있기 때문이다.⁽¹⁻⁴⁾

레이저를 활용하는 시장이 성장하면서 레이저 가공장비가 경쟁적으로 개발되고 있지만, 가격이 비싸고 용접공정변수가 복잡하기 때문에 최적의 용접조건을 선정하는데 많은 어려움이 있다. 가공공정의 많은 어려움이 있음에도 불구하고 레이저가 많이 사용되는 큰 이유는 작업시간이 빠르고 가공물의 변형이 적을 뿐만 아니라 다양한 소재의 용접이 가능하기 때문이다. 레이저 용접은 레이저빔을 초점렌즈로 집광하여 고에너지 밀도를 이용하는 용접방법으로 빠른 시간 내 가공하기 때문에 작업부품에 영향을 거의 주지 않는다. 즉, 부품 자체에 변형이 적고, 좁고 깊은 용접단면을 얻을 수 있고, 최적의 용접공정 조건을 DB로 구축하면 자동화 시스템으로 가공생산성을 크게 높일 수 있다. 또한 비접촉식이기 때문에 박판을 용접할 때 가공물에 변형을 주지 않고, 다양한 부품과 각기 다른 소재를 용접하는 이중용접에도 많은 장점을 가지고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾

레이저 장비가 많이 사용되는 대표적인 산업분야로 자동차 산업을 뽑을 수 있는데, 차체의 이음부나 이중재질의 겹치기 용접 등 많은 부분에서 다양한 방법으로 사용되고 있다. 하지만 산업사회가 발전하면서 대기오염에 따른 지구온난화 문제가 심각한 문제로 대두되고 있다. 그 중에서도 오염의 주범인 자동차 배기가스나 공장의 스모그 등을 들 수 있다. 19세기가 들어서면서 급속도로 증가하는 자동차의 배

기가스 저감을 위한 관심들이 무공해 자동차인 전기자동차(Electric vehicle : EV)의 개발로 이어져 왔다. 1990년대 미국의 캘리포니아 Clean Air Act에 의한 무공해 자동차 규제법 제정의 움직임에 따라 각국에서의 전기자동차에 대한 개발이 활발히 진행되어져 왔으며, 국내에서도 전기자동차의 개발에 대한 필요성이 크게 대두되면서 전기자동차 관련 핵심 기술개발이 진행되기도 하였으나 상용화에는 이르지 못하였다.⁽¹⁰⁾

최근에는 국내·외적으로 자동차의 연비향상과 배기가스 규제에 대한 대응으로 엔진과 모터를 혼용하여 구동시키는 다양한 구조의 첨단 시스템인 하이브리드(Hybrid) 차량 개발이 증대되고 있다. 이러한 하이브리드 차량을 개발하기 위해서 필수적으로 요구되는 분야로는 고성능 이차전지(Second battery)의 개발이다. 미국, 일본, 유럽 등 세계 각국의 자동차 강대국들 간에 하이브리드 자동차 개발을 위해 많은 연구들이 행해지고 있으며 경쟁 또한 치열해지고 있다. 특히 일본의 경우 도요타 및 혼다 등에 의해 팔복할 만한 연구가 이루어지고 있으며 이러한 하이브리드 차량용 전지로서는 대부분 고용량 및 안정성을 갖는 Ni-MH이차전지를 채택하고 있다.^(11,12)

이차전지에는 Ni-MH이차전지보다 에너지 밀도가 우수하고, 출력밀도도 높은 Li-ion이차전지가 있는데 이는 Ni-MH이차전지보다 안정적이지 못하여 하이브리드 자동차에는 적합하지 않다. Ni-MH이차전지는 사용용도에 따라 전지의 특성이 다르기 때문에 하이브리드 차량용으로는 전극의 용량과 체적 에너지 밀도가 중요한 설계 요소이다. 또한 우수한 출력밀도를 갖도록 전극의 내부저항 감소를 위해 고용량, 고출력의 음극과 양극의 개발이 전지설계의 핵심요인이다. 이에 따라 이차전지의 효율을 높이하고자 다양한 형태의 이차전지 개발에 대한 관심이 집중되고 있다. 이와 관련하여 전극의 재질을 바꾸거나 전해질의 종류를 변화시키면서 많은 연구를 하고 있다.^(13,14)

본 연구에서는 고용량 이차전지 내 극주와 극판의 안정적인 용접기술을 확보하기 위해 레이저 용접공정 조건에 따른 극주 소재의 레이저 용접특성에 관해 연구하고자 한다.

1.2 연구동향

과학기술과 산업사회에서의 경쟁이 극심해짐에 따라 제품생산이 점차적으로 고정밀화, 소형화가 요구되면서 경량화 및 고강도에 의한 안전성에 대한 연구가 집중되고 있다. 신소재 개발과 함께 경량화 및 고강도성을 확보한 제품을 가공하기 위해 다양한 용접방법을 개발하는데 관심이 집중되고 있다.

이와 같은 다양한 용접방법으로 초음파 용접(Ultrasonic welding), 플라즈마 용접(Plasma Arc welding) 및 레이저 용접(Laser welding) 등에 대한 다양한 가능성이 연구되고 있는데, 이 중 레이저는 다른 열원들보다 에너지를 집중시켜서 고에너지 밀도로 변화시키는 장점이 있다. 레이저는 빛을 집중하여 작은 초점으로 만드는 방법으로 고에너지를 사용하고 있다. 레이저를 활용하는 방법은 전자 반도체 산업, 정보통신 산업, 자동차 산업, 토목 산업, 농업 산업 및 의료 산업 등에 많이 응용되고 있다. 레이저를 이용하는 가공방법으로는 용접, 절단, 크래딩(Cladding), 천공(Drilling), 마킹, 트리밍(Trimming), 세정(Cleaning) 등 그 종류가 매우 다양하지만 본 연구에서는 레이저 용접에 대한 공정변수 특성을 연구하고자 한다.⁽¹⁵⁾

레이저(LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)란 유도방출에 의해 광을 발진 혹은 증폭시키는 장치로 레이저의 동작원리는 1917년 아인슈타인이 빛과 물질사이의 상호작용에 있어 유도방출 과정이 있음을 이론적으로 보여주었다. 양자이론에 따르면 분자는 일정한 에너지를 갖는 준위를 가지고 있으며 빛을 흡수하면 기저상태(Ground state)에서 높은 에너지 상태로 전이하게 된다. 여기 상태(Excited state)의 분자들은 짧은 시간동안 존재하다가 곧이어 이완과정을 통해 에너지를 방출하면서 기저상태로 된다. 이때 여기상태에 있는 분자는 공급된 빛과 같은 파장의 또 다른 광자를 방출하는데, 방출되는 광자의 방향은 공급된 빛과 같은 방향으로 빛의 세기가 증폭되게 된다. 이를 유도방출(Stimulated Emission)이라 한다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾

유도방출 이론을 활용하여 발진하는 레이저는 역사적으로 1950년 C. H. Townes가 개발한 메이저(MASER)이며, 그 후 1958년 A. L. Schawlow와 레이저의 원리를 제시하였다. 그러나 실제로 최초의 레이저는 1960년 T. H. Maiman이 개발한 펄스형 루비(Ruby) 결정 레이저($\lambda=694.3\text{nm}$)이다. 1961년 A. Javan, W. Bennet와 D. Herriott는 최초의 기체레이저인 He-Ne레이저 발진에 성공하였다. 그 뒤로 반도체 레이저, 유기액체 레이저 및 색소레이저 등이 개발되고, 1970년까지는 발진 스펙트럼

의 폭을 확장시키는 연구가 마무리 단계에 도달하였다. 고출력 레이저가 개발됨에 따라 1970년대 후반에는 철강산업, 1980년부터는 자동차산업의 생산라인에 레이저 가공기술이 도입되었다. 현재 산업현장에서는 대부분 CO₂레이저와 Nd:YAG레이저를 많이 사용하고 있다.^(13,19-21)

CO₂레이저의 파장대는 10.6 μ m, Nd:YAG레이저의 파장대는 1.06 μ m로 재질에 따라 흡수율에 많은 차이가 발생한다. 빔 모드(mode)가 같은 경우 파장대에 따라 재료에 흡수되는 에너지가 다른데 Nd:YAG레이저가 CO₂레이저에 비해 파장이 10배 정도 작아 초점깊이와 초점크기가 상대적으로 매우 우수하다. 이와 같은 장점으로 Nd:YAG레이저는 CO₂레이저에 비해 주로 정밀가공에 이용되고 광케이블을 통해 전송이 가능하여 로봇 등 자동화 시스템에 활용되고 있다.^(22,23)

본 연구에서는 Nd:YAG레이저를 이용하여 저탄소강(Low carbon steel) SS41의 겹치기 용접 공정특성을 제시하고자 한다. Table 1.1은 최근 레이저를 이용한 저탄소강 소재의 용접에 관련된 연구동향을 정리한 것이다.

Table 1.1 A recent research of low carbon steel welding by laser⁽²⁴⁻³⁵⁾

Writer/Year	Study Substance
Lee, J. H [1996]	저탄소강과 스테인레스 강을 비드 온 플레이트 용접을 하고, TIG용접법과 비교하여 용접성을 분석
Eroglu, M. [1999]	저탄소강을 비드 온 플레이트 용접을 실시하고, 열영향부 (HAZ, Heat Affected Zone)에 대하여 연구
Katayama, S. [2001]	고출력 레이저로 용접 시 기공이 용접비드에 형성됨 용접 프로세스를 이용해 용접속도와 노즐타입으로 용접성을 조사
Ahn, S. H. [2005]	저탄소강을 일정 온도까지 상승시킨 후 유지하고 냉각시킨 뒤 이러한 열 사이클 재현장치를 통해 인장시험과 조직분석, 부식특성 등을 분석
Miles, M. P. [2006]	마찰교반용접과 레이저 용접을 모두 사용하여서 탄소 0.19%의 DP강의 용접성을 비교 마찰교반 용접과 레이저 용접을 같은 조건으로 용접한 결과 레이저 용접의 경우가 마찰교반 용접보다 큰 값의 경도를 갖고 있음을 확인
Ueji, R. [2006]	저탄소강을 마찰교반 용접을 통해 용접성을 평가
Gural, A. [2007]	다양한 저탄소강을 용접한 뒤에 열처리를 함으로 용접부의 용접특성이나 강도의 특성 및 조직에 관해 분석
Oh, Y. S. [2009]	파이버레이저를 이용해 T형상 레이저 용접을 실시 맞닿은 부분을 중심으로 양쪽으로 레이저빔을 조사하여 용접성을 평가
Gharibshahiyan, E. [2011]	저탄소강을 불활성 가스를 이용해 용접하고 용접성 평가 중 입열량을 통해 경도와 인성에 대해 연구
Ruggiero, A. [2011]	CO ₂ 레이저를 이용하여 저탄소강과 스테인레스 316의 맞대기 용접을 초점위치와 빔 속도별로 실험하여 용접부를 판단
Torkamany, M. J. [2012]	저탄소강과 스테인레스 304L의 겹치기 용접을 실시하고, 출력증가로 저탄소강의 용접 크기변화가 증가함을 고찰
Zhao, Y [2012]	저탄소강 소재의 박판을 겹치기 용접하고, Gap의 영향을 주어서 출력과 Gap과의 연관성을 연구

1.3 연구목적 및 내용

본 연구의 목적은 이차전지 내 극주와 탭 용접에 대해 연구하고자 한다. 기존 이차전지의 극주와 탭 용접은 Argon TIG용접으로 직접 손으로 용접을 하였다. 그러나 사람 손으로 용접하고 있기 때문에 용접단면이 균일하지 않고, 입열이 고르지 못해 과입열 된 경우에는 균열이 발생하고 입열이 적은 부분에서는 용접성이 좋지 않았다.⁽³⁶⁾

균일한 용접성과 결합을 줄이기 위해 최근에는 아크 용접(Arc welding), 점용접(Spot welding), 레이저 용접 등 다양한 용접법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 자동화에 적합하고, 빠른 시간 내 균일한 용접이 가능한 레이저 용접에 대해 연구하고자 한다.

레이저 용접은 고에너지 밀도를 빠른 시간에 용접을 하기 때문에 시험편에 열영향을 거의 주지 않는다. 그리고 용접부의 입열량과 종횡비가 우수하고 공정조건을 DB로 구축하여 활용하면 자동화에 적합하다.

본 연구에서는 자동차 이차전지 내 전해질 격리막으로 구성된 탭을 극주와 레이저 용접하고자 한다. 극주와 탭 소재는 저탄소강 SS41이기 때문에 이 재질에 대한 용접성을 다양하게 공정변수를 변화시키면서 연구하고자 한다. 두께가 2mm인 시편을 겹치기 용접하고, Ni도금된 SS41을 겹치기 용접하여 각각의 특성을 비교하고자 한다. Ni도금의 경우에는 열전도성이나 에너지 반사도 등의 차이가 있기 때문에 공정조건에 따라 용입깊이 및 용접단면에서 차이가 나타날 수 있기 때문이다.

레이저 용접은 대기의 영향을 억제하기 위해 보호가스(Shielding gas)를 분사하면서 용접을 실시한다. 보호가스를 분사시키는 노즐은 노즐형상과 노즐의 각도에 따라 레이저용접에 영향을 미칠 수 있다. 레이저 용접에서 사용하는 노즐은 보호가스의 분사 방향이 45°각도에서 분사시키는 크로스노즐(Cross nozzle)과 레이저빔과 동일한 축에서 분사하는 동축노즐(Coaxial nozzle) 등이 있다. 본 연구에서는 형상이 다른 크로스노즐과 동축노즐을 사용하여 레이저 용접을 한 후 각각의 용접특성을 비교해보고자 한다.

제2장 이론적 배경

2.1 연속파형 Nd:YAG 레이저의 특성

일반적으로 레이저의 종류는 많지만, 레이저빔을 발진시키는 활성매질의 형태, 출력의 형태, 강도 및 레이저빔의 파장 등 여러 가지 방법으로 구분할 수 있다. 그러나 활성매질의 형태에 따라 고체레이저(Solid-state laser), 가스레이저(Gas laser), 반도체레이저(Semiconductor laser) 및 액체염료레이저(Liquid laser)로 분류시키는 방법이 가장 보편적이다.^(37,38)

본 연구에 사용한 레이저는 고체레이저 중에서도 YAG레이저를 사용하였다. YAG는 (Yttrium-Aluminum-Garnet)에서 Y원자의 약 0.5-1.5%를 Nd원자로 치환시킨 단결정재료를 사용한다. 일반적으로 Nd:YAG레이저는 출력형태 및 발진방식에 따라 연속파(Continuous wave, CW), 펄스파(Pulsed wave, PW) 및 Q스위칭 모드(Q-Switched mode) 등 3가지로 구분할 수 있다. Nd:YAG레이저는 CO₂레이저보다 출력이 낮지만 빔과 시편과의 상호작용이 우수하고 금속 표면에서 반사도(Reflectance)가 적어 많이 사용되고 있다. CO₂레이저와 비슷한 출력을 발생하기 위해 일반적으로 Nd:YAG레이저 시스템 공진기 안에는 여러 개의 레이저 로드(Laser rods)를 배열하여 높은 출력을 갖게 한다. 현대에 이르러서는 YAG봉을 여러 개 연결하여 수 kW의 출력을 발진하는 Nd:YAG레이저가 개발되면서 금속가공의 다양한 분야에 적용하는 사례가 증가하고 있다.

YAG레이저는 CO₂레이저보다 금속 표면에서 반사도가 작고 재료가공에 있어서 펄스레이저로 발진할 경우 Al, Cu등 높은 반사도가 있는 재료가공도 가능하다. Nd:YAG레이저의 파장을 제2조화파(2-end harmonic generation wave)나 제3조화파(3-red harmonic generation wave)로 파장을 짧게 하면 집광성이 좋아지고 빛에 대한 반사도가 큰 금속이나 정밀 미세가공에도 유리하다. Fig. 2.1과 Table 2.1은 연속파 Nd:YAG레이저의 공진기 및 YAG레이저와 CO₂레이저의 파장에 대한 원소별 표면 반사율을 비교한 것이다.⁽¹⁹⁾



Fig. 2.1 High laser power is obtained by mounting several cavities in line(CW Nd:YAG laser)

Table 2.1 Surface reflexivity of metal materials

Materials \ Laser	Nd:YAG ($\lambda=0.9\sim 1.1\mu\text{m}$)	CO ₂ ($\lambda=0.9\sim 11\mu\text{m}$)
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%

2.2 레이저 용접

레이저 용접은 고에너지 밀도의 빛 에너지가 접합하고자 하는 금속과 반응하여 열에너지로 전환되고, 금속표면을 용융시킨 다음 레이저빔의 지속적인 조사에 의해 용융된 금속 내에 키홀을 형성시켜 접합하는 방법이다.⁽³⁹⁾

레이저 용접은 크게 키홀용접과 전도(Conduction)용접 두 가지로 구분할 수 있다. 고밀도의 에너지를 금속 표면에 조사하면 빔의 중심부에서는 용융과 기화가 동시에 발생하고, 외곽에서는 용융이 발생한다. 용융된 중심부에서는 증기압이 발생하여 용융된 금속을 외곽으로 밀어내고 레이저빔은 더욱 깊게 들어가서 용융깊이를 증가시킨다. 이를 키홀(Key hole)이라 한다. 이후 용융된 금속은 레이저빔이 옆으로 이동하면 용융금속의 중력, 점성 및 표면장력 등에 의한 복잡한 작용으로 인해 다시 흘러들어와 표면의 용접비드를 형성하게 된다. 그리고 응고가 되면서 이러한 작용이 주기적으로 반복되며 용접이 시작된다.^(37,40)

키홀용접은 키홀에 의해 레이저빔이 다중반사 및 흡수현상이 발생하기 때문에 전도용접 보다는 레이저빔의 흡수 효율이 크다. 따라서 키홀용접 시 금속표면에서 발생하는 플라즈마의 조절이 중요하고 이 플라즈마(Plasma)가 레이저빔을 방해하지 않도록 해야 한다. 입열량이 지나치게 클 경우에는 증발 및 플라즈마가 형성되고, 이때 금속의 손실과 플라즈마의 차장효과 때문에 키홀용접에 문제점이 발생하게 된다.^(41,42)

이러한 문제점을 보완하고자 불활성가스인 Ar, He, N₂등을 보호가스로 선택하여 용접부에 있는 증기 및 플라즈마를 제거하면서 용접을 실시한다. 그리하여 플라즈마를 효율적으로 제거하면 레이저빔은 금속 내부로 깊숙이 들어가게 되고 용접부의 폭은 좁고 깊이는 깊게 들어가게 된다.

전자빔 용접과 레이저 용접은 고에너지 밀도로 용접하기 때문에 용입깊이가 깊다는 장점이 있다. 특히 전자빔 용접은 진공 속에서 가속된 전자를 시편에 충돌시켜 생기는 충격발열을 이용하기 때문에 대기의 오염을 받지 않고, 용입깊이가 깊고, 열영향이 적으며, 변형이 적게 일어나는 점이 장점이다. 하지만 전자빔의 전자가 X선의 영향을 많이 받기 때문에 자기장의 영향을 받는 부품은 레이저 용접으로 많이 대체되고 있다. 레이저 용접은 초점렌즈를 사용하여 레이저빔을 집광하는 방법으로 에너지 밀도를 크게 하여 용접하는 방법으로 레이저는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.^(20,43,44)

1. 레이저는 단색성(Monochromaticity), 지향성(Directivity), 간섭성(Coherence) 등을 지니고 있어 에너지 집광성이 우수하고 고에너지 밀도의 열원으로 정밀용접이 가능하다.
2. 비접촉식으로 가공물을 가공하기 때문에 접촉 시 발생하게 되는 형태변형과 마모현상을 없앨 수 있다.
3. 비접촉식으로 인해 변형을 방지하는 화학품의 사용이 필요 없고, 가공 뒤의 후처리 공정이 불필요하다.
4. 레이저빔과 가공물의 상호작용에 필요한 시간이 매우 짧기 때문에 소재의 열 영향부가 적다.
5. 전자빔 용접처럼 진공상태가 필요치 않고, 대기 중에서 바로 용접이 가능하다.

제3장 실험장치 및 방법

3.1 실험재료

일반 구조용 압연강재(Rolled steel for general structure) 중 저탄소강 SS41을 시편으로 제작한 후, 겹치기 용접 공정변수를 분석하고자 한다. 겹치기 용접하면서 결정한 공정변수를 기본으로 하여 T형상으로 용접하고자 한다. 일반 구조용 압연강재는 탄소 C이외에 Si, Mn, P 및 S등이 함유되어 있다. 저탄소강으로 구분되는 SS41은 탄소 함유량이 적어서 열처리가 되지 않아 그대로 사용한다. 선박, 차량 등 모든 분야에 사용되지만, 기계 내부의 특정 응력을 받는 부품의 재료로는 쓰이지 못하고, 단순히 기계를 지탱해주는 부위에만 쓰인다. 일반적으로 연강과 같이 연한 기계적 특성을 가지고 있어 용접성이 좋고, 값이 싸고, 가공하기 쉬워서 현장에서 많이 쓰이는 재료이며 프레임이나 케이스, 배관 이음부 등에 자주 사용한다. SS(Steel-Structure)재라고도 불리는데, SS41은 SS400과 동종재질이며 400은 최소인장강도 400N/mm^2 이상이라는 것을 의미한다.^(45,46)

아래 Table 3.1, 3.2는 SS41의 조성분과 물성치를 나타낸 것이다.

Table 3.1 Chemical compositions of low carbon steel SS41

SS41 (wt, %)	C	Si	Mn	P	S
	0.1511	0.222	0.749	0.0158	0.0086

Table 3.2 Mechanical properties of low carbon steel SS41

SS41	Yield point (N/mm^2)	Tensile strength (N/mm^2)	Elongation
	245	400~510	17%

일반적으로 탄소강은 탄소량이 증가됨에 따라 경도와 강도가 증가하고, 반면에 연신율과 단면 수축률은 감소되는데 본 연구에 사용한 시편은 저탄소강에 속한다.

3.2 실험방법

이차전지 내 극주와 탭의 기존 용접법은 Argon TIG용접을 하고 있으며 그 결과를 Fig. 3.1과 같이 하고 있다. 사람이 직접 손으로 용접을 하기 때문에 용접공정을 정밀하게 제어하지 못하여 과입열, 크랙 등과 같은 결함이 발생한다. 본 연구에서는 수작업으로 작업자의 능력에 따라 용접성이 다르게 나타나는 현상을 보완하기 위해 레이저 용접을 하였다.⁽³⁶⁾

레이저 용접은 보호가스의 종류와 유량, 레이저의 출력, 레이저빔의 이송속도 및 작업거리에 따라 용접특성이 달라진다. 작업거리는 초점렌즈를 사용하여 조사한 초점의 크기에 따라 에너지 밀도가 달라지기 때문에 시편에서 레이저빔을 흡수하여 형성된 초점크기 변화를 정확하게 예측한다는 것은 용접의 품질에 매우 중요하게 작용한다. 레이저의 출력변화에 따라 시편에 조사된 초점크기의 변화를 확인하기 위해 레이저 출력을 500, 600, 700W로 하고 작업거리를 이동하면서 레이저빔을 조사하여 초점크기(Spot-size)의 변화를 실험하였다. 작업거리를 변화시키면서 시편에 조사한 레이저빔의 조사시간은 180ms이다. 작업거리를 변화시키면서 시편에 조사한 레이저빔의 초점이 가장 작게 형성된 거리를 초점거리로 하여 용접하였다.

초점크기가 가장 작게 형성된 작업거리를 초점거리로 하여 2mm두께의 시편을 비드 온 플레이트(BOP, Bead-on-plate) 용접하였다. BOP용접할 때 보호가스를 분사하는 노즐의 각도에 따라 용접특성을 비교하기 위해 크로스노즐과 동축노즐을 사용하였다. 노즐형상이 다르기 때문에 보호가스의 유동특성이 다르게 나타날 것이고, 이로 인해 용접성이 달라질 것이라 판단하기 때문이다. 시편을 용접한 레이저빔의 출력은 900W부터 관통용접 되는 1500W까지 용접하였다. 이때 레이저빔의 이송속도는 1.2m/min로 하여 용접하였다.

크로스노즐을 사용했을 때의 용접특성과 비교하기 위해 사용한 동축노즐은 노즐의 높이변화에 따라 보호가스가 분사되는 유동장(Flow field)의 영향을 분석하였다. 본 실험에 사용한 노즐의 형태는 Fig. 3.2에 나타내었다.

앞에서 언급한 실험으로 저탄소강인 SS41용접특성을 정리한 다음 겹치기 용접하였다. 겹치기 용접할 때 보호가스는 Ar, 1bar의 압력으로 분사시켜 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 겹치기 용접특성을 분석하였다. 동축노즐을 사용하여 보호가스를 분사시킬 경우에는 1bar, 2bar로 압력을 변화시키고 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 겹치기 용접하여 용접특성을 분석하였다.

그 다음 저탄소강인 SS41의 표면을 Ni도금 했을 때 겹치기 용접특성을 연구하기 위해 시편표면에 Ni도금한 다음 위에서 실험한 동일한 조건으로 크로스노즐과 동축노즐로 보호가스를 분사시키면서 겹치기 용접하였다. 자동차용 이차전지의 전해질에 부식되지 않도록 코팅제로 사용하는 니켈이 도금된 경우에는 레이저빔의 열전도성이나 에너지 반사도가 다르기 때문에 용접성에서 차이가 나타날 것으로 생각되기 때문이다.

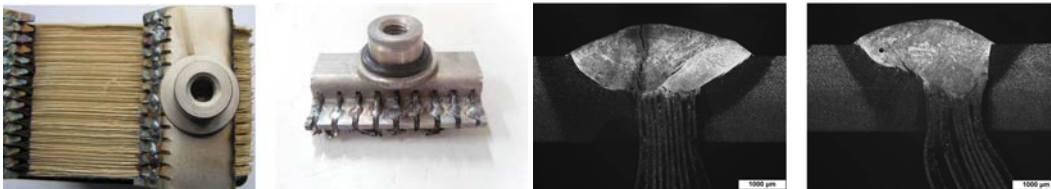


Fig. 3.1 Welding cross-section area of argon arc welding

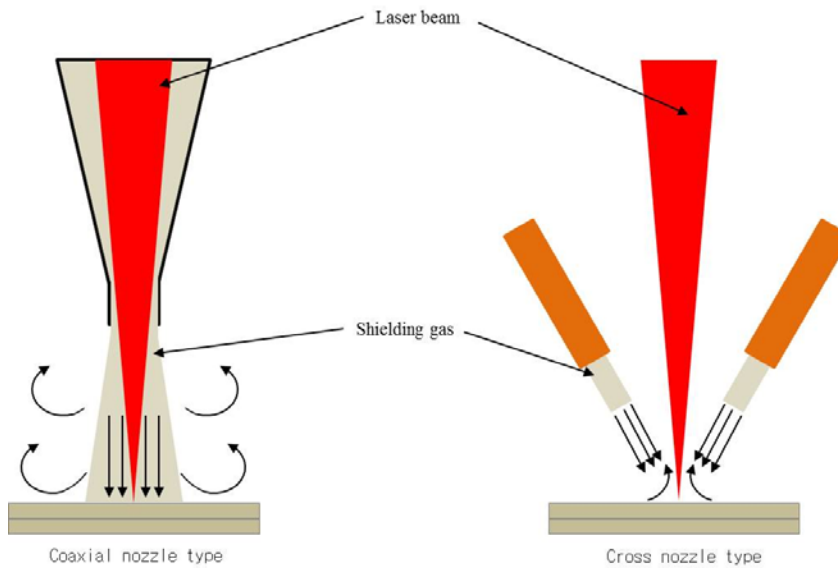


Fig. 3.2 Schematic diagram of the experimental nozzle type

3.3 CW Nd:YAG 레이저 장치

본 연구에 사용된 CW Nd:YAG 레이저(TRUMPF-HASS LASER HL 2006D)의 파장대는 1064nm이고, 최대출력은 2.8kW, 평균출력은 2kW급 레이저이다. 레이저 빔은 600 μ m의 광섬유(Optical fiber)를 통해 이동하고 초점직경은 약 600 μ m이다. 레이저 용접 시 사용된 광학렌즈는 초점거리 $f=200$ mm이고, 렌즈의 직경은 60mm로 F#(F-number : F/D)는 3.33이다. 공작대(LASMA 1054)는 광케이블과 연결되어 있고, 작업대는 진동을 방지하기 위해 화강암으로 구성되어 있다.

레이저 가공 헤드는 켄트리 타입 로타리 축 가공장치로 되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 각각 1000, 500, 400mm이다. 레이저 용접 시 용접부와 대기 중의 오염물질 사이의 상호작용을 방지하기 위해 Ar가스를 45°각도에서 불어주었다. 아래 Fig. 3.3은 실험에 사용된 실험 장치를 보여주고 있다.



Fig. 3.3 Laser oscillator and optic head of welding processing

3.4 실험 분석장치 및 방법

3.4.1 실험시험편 제작 및 분석

실험시험편은 이차전지 내 시제품에 들어가는 크기로 제작한 후 레이저 용접을 하였다. 시험편 크기는 70×30×2mm로 제작하였고, 니켈도금된 시험편의 도금 두께는 약 30μm로 하였다. Fig. 3.4는 용접된 시험편의 단면을 관찰하기 위해 금속정밀 절단기(Linear precision saw, Buehler)를 이용하여 용접부를 절단하였다. 절단 위치는 총 60mm의 용접 길이에서 45mm지점을 절단하였으며 Fig. 3.5의 핫 마운팅(Hot mounting)을 통해 마운팅 하고, Fig. 3.6 자동연마기(Polisher)를 이용하여 표면연마를 하였다. 표면연마 된 시편을 에칭액(Nital 2%, 2% 질산 + 97% 메틸알코올)으로 에칭하여 단면분석을 준비하였다.

실험결과를 분석하기 위해 종횡비, 입열량 및 출력밀도를 나타낼 때는 다음 식을 이용하여 공정변수 변화에 대한 용접특성을 분석하였다.

$$\delta(\text{Aspectratio}) = \frac{\text{Depth}}{\text{Width}} \dots\dots\dots (1)$$

$$E(\text{Heatinput}) = \frac{P}{w \times v} [\times 10^3 \text{ J/cm}^2] \dots\dots\dots (2)$$

$$P_0 = \frac{P}{A} [\text{W/cm}^2] \dots\dots\dots (3)$$

δ 는 종횡비를 나타내고, E 는 입열량, P_0 는 출력밀도를 나타낸다. P 는 레이저 출력, w 는 비드폭, v 는 빔 이송속도를 나타낸다. A 는 비드폭 절반을 반경으로 하여 계산한 면적이다.



Fig. 3.4 Linear precision saw



Fig. 3.5 Hot mounting press



Fig. 3.6 Automatic grinder/polisher

3.4.2 광학 및 전자현미경 분석

표면용접부의 단면은 Fig. 3.7의 광학현미경을 이용하여 최소 25배에서 용접상태를 분석하였다. 주로 분석한 내용은 용입단면의 크기, 용입깊이, 용접단면의 결합 등을 분석하여 용접의 건전성을 판단하였다. 저탄소강 시험편에 니켈도금 했을 때 용접특성을 분석하여 니켈도금 했을 때 레이저 용접에 미치는 영향을 분석하였다.

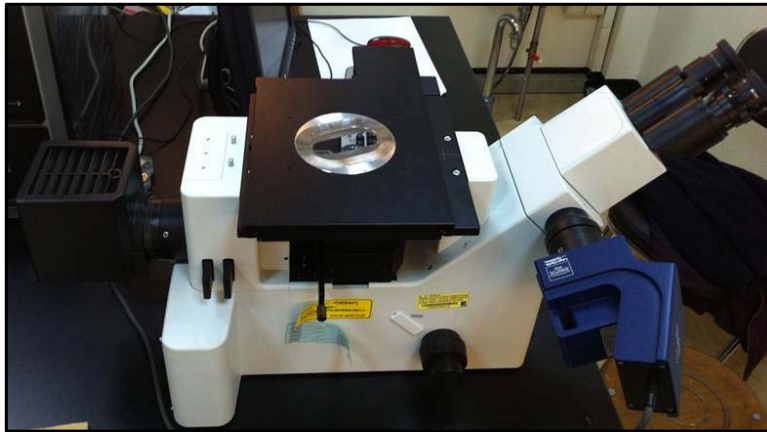


Fig. 3.7 Micro analysis system of optic-materials

제 4장 실험결과 및 고찰

4.1 노즐 형상에 대한 비드 온 플레이트 용접 특성

4.1.1 초점위치 변화에 따른 에너지 흡수 특성

레이저 용접은 열전도 용접과 다르게 초점렌즈로 레이저빔을 집속하여 매우 작은 구역에 열을 집중시켜 국부적으로 용접하기 때문에 부품의 배치나 레이저 출력, 빔 이송속도, 초점위치 및 보호가스의 영향을 많이 받게 된다.

그 중 초점위치는 레이저 용접에서 용접비드의 단면폭을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. Fig. 4.1은 초점위치를 변화시키면서 초점위치별 초점크기 변화를 나타내고 있다. 레이저빔을 시편에 조사한 시간은 180ms이고 레이저 출력은 500, 600, 700W로 변화시키면서 시편에 레이저빔을 조사하였다. 레이저빔을 시편 표면에 가깝게 위치한 다음 위쪽 방향으로 초점렌즈를 이동하면서 레이저빔을 조사한 결과를 나타내고 있다. 초점크기가 가장 작은 위치를 0으로 하고 아래 방향은 (-), 위 방향은 (+)로 표시하여 실험결과를 나타냈다. 작업거리가 같은 위치에서 레이저 출력을 증가시키면 초점크기가 증가하고 있는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 4.2는 출력을 500, 600, 700W로 하고 초점위치에 따라 실험한 단면을 나타낸 것이다. 0의 위치에서 용접단면의 표면적이 가장 작게 형성되었고 깊이 또한 깊게 들어갔다. 용접단면의 특성을 분석하기 위해 Fig. 4.2의 결과를 식(1)로 종횡비를 계산하여 Fig. 4.3에 나타냈다.

레이저의 출력이 작을 때는 초점위치를 벗어난 위치에서 레이저빔을 조사할 때 집속된 에너지 밀도가 적어 시편 주변부로 열전도 되어 손실되는 양이 많기 때문에 종횡비가 작게 나타났다. 그러나 레이저의 출력이 증가하면 초점거리에서 집중되는 에너지 밀도가 높아져 순간적으로 시편 깊이 방향으로 흡수되는 에너지양이 증가하면서 종횡비가 크게 나타났다. 그러나 초점거리에서 벗어나면 레이저의 에너지 밀도가 급속하게 감소하여 시편 깊이방향으로 침투되는 에너지양보다 시편 표면에서 에너지가 전도되는 양이 증가하기 때문에 종횡비가 감소하고 있다. 레이저빔의 특성을 고려할 때 작업거리가 초점거리에서 벗어나면 에너지가 크게 감소되기 때문이다. 레이저빔의 중심파장에서 $\frac{1}{e}$ 정도 벗어나면 대부분의 에너지가 손실되는 특성이 있기 때문에 나타나는 현상이다.

그리고 초점거리에서 아래방향과 위방향으로 벗어난 같은 위치에서의 초점크기가 다르게 형성되고 있는 실험결과를 확인할 수 있다. 예를 들면 +3의 위치와 -3의 위치에서 초점크기가 다르게 형성되었다. 초점거리보다 높은 위치에서 레이저빔이 시편에 조사된 초점크기가 낮은 위치에서 조사된 경우보다 작게 형성되었다. 이와 같이 형성된 이유는 초점거리를 중심으로 레이저빔이 수렴한 뒤 발산하는 형태로 전달되는 레이저빔의 성질이 있기 때문인 것으로 생각된다. 레이저빔이 수렴하면서 시편에 조사되면 시편 표면에서 주변으로 발산되는 에너지보다 깊이방향으로 진행하는 에너지양이 많기 때문인 것으로 생각된다. 반대로 레이저빔이 초점거리보다 아래방향으로 진행하면서 시편표면에 조사되면 시편표면에서 레이저빔이 발산하며 조사되기 때문에 시편표면에서 레이저빔의 에너지가 발산되고 시편표면 주위 방향으로 열이 전도된다. 이러한 원인에 근거하여 나타나는 현상으로 생각된다.⁽³⁷⁾

Laser power (W)	Focal position (mm)						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
500							
600							
700							

Fig. 4.1 The beam spot size configuration of focal position

Laser power (W)	Focal position (mm)						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
500							
600							
700							

Fig. 4.2 The depth configuration of focal position

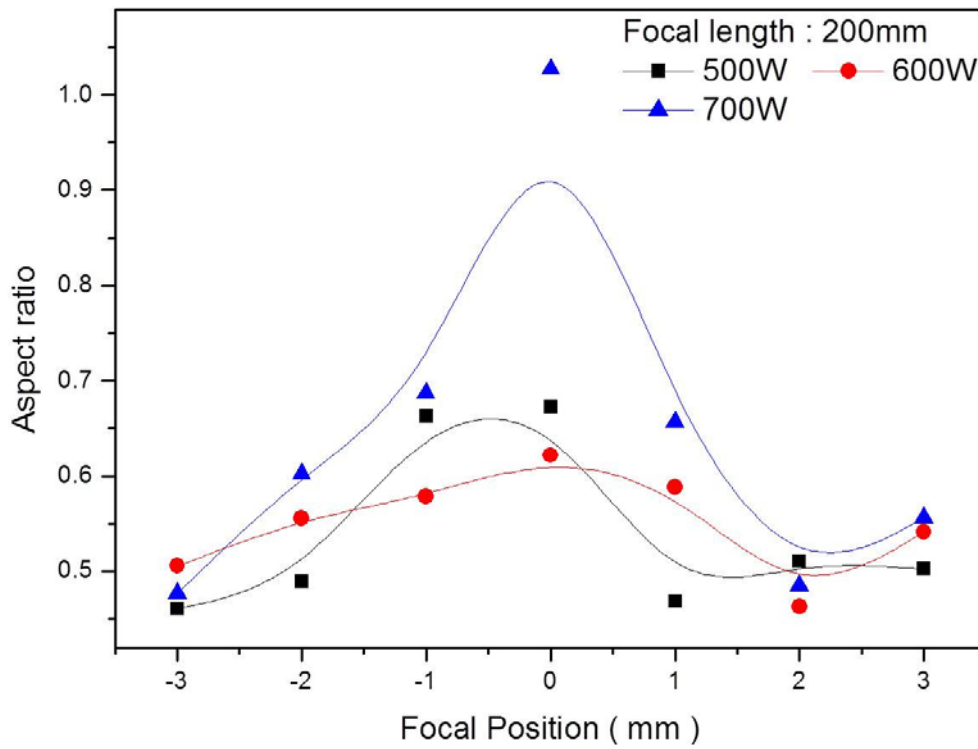


Fig. 4.3 Variations in Aspect ratio with focal position of the welding lens

4.1.2 노즐 형상별 비드 온 플레이트 용접특성

앞 장에서 초점위치를 결정하기 위한 기초실험 결과를 바탕으로 작업거리를 선정하였다. 이번 실험으로는 초점거리에서 동축노즐과 크로스노즐로 용접했을 때 용접특성을 비교하였다. 이때 사용한 시편은 저탄소강 SS41로 두께는 2mm이다. 실험 방법은 레이저빔의 이송속도는 고정하고 레이저빔의 출력을 변화시키면서 비드 온 플레이트(BOP, Bead on Plate) 용접하였다. 레이저빔의 이송속도는 1.2m/min으로 고정하고 레이저 출력을 900W부터 후면비드(back bead)가 형성되는 1500W까지 실험하였다.

크로스노즐은 보호가스 분사각도가 45°이고 양쪽에서 분사하는 형식으로 고정되어 있다. 크로스노즐은 레이저빔이 조사되는 광학헤드에 고정되어 있기 때문에 작업거리가 변하면 크로스노즐의 높이도 함께 이동하는 구조로 되어 있다.

반면에 동축노즐은 레이저빔이 전달되는 광학헤드에 부착되어 있지 않고 임으로 노즐의 위치를 변화시킬 수 있도록 구성되어 있다. 크로스노즐은 선행연구에서 최적의 위치로 장착되어 있기 때문에 크로스노즐을 사용하여 용접했을 때와 동축노즐의 높이 변화에 따른 용접특성을 비교하고자 한다.

Fig. 4.4는 보호가스 분사압력을 1bar로 하고 레이저빔의 이송속도를 1.2m/min으로 고정한 다음 레이저의 출력을 900W에서 1500W까지 증가시키면서 용접한 결과를 나타내고 있다. 레이저빔의 출력이 1500W부터는 관통용접이 되기 때문에 더 이상 출력은 증가시키지 않았다. 이때 사용한 보호가스는 Ar이고, 동축노즐의 높이는 21mm로 하여 실험하였다.

크로스노즐이나 동축노즐을 사용했을 때 레이저 출력이 900W로 낮을 때는 전면비드(Front bead)에 구슬모양으로 비드가 형성되고 용접성이 균일하지 못하여 용접단면이 양호하게 형성되지 못하고 있다. 이는 출력이 낮을 경우 충분치 못한 입열량 때문에 응고할 때 열역학적 평형상태가 되지 못하고 시편 표면에서 용융된 용융물이 표면장력과 점성력의 영향으로 불안정하게 이동하면서 발생한 현상으로 생각된다. 레이저의 출력을 1100W로 증가시키면 충분하게 키홀이 형성되고 레이저빔이 이동하면서 용융된 용융물이 키홀을 채우면서 양호한 용접비드를 형성하고 있다. 이후 출력을 1300W로 증가시키면 두께가 2mm인 시편 후면에 선명하게 열흔적이 나타나기 시작 한 뒤, 1500W에서는 후면비드가 나타났다. 출력이 900W로 출력이 낮을 때는 전면비드에서 용접단면이 불규칙한 모양으로 동축노즐의 경우에는

발생이 적었다. 동축노즐의 입구부분의 직경은 11mm이고 출구부분의 직경은 5mm로 되어 있다. 동축노즐을 통과하는 유량은 유체의 연속방정식을 만족하면서 유동하기 때문에 노즐 출구에서는 입구보다 속도가 매우 빠르게 분사된다. 출구에서 보호가스가 빠르게 분사되면서 노즐 출구에서는 보호가스 분자의 회절에 의한 확산 성질이 발생하기 때문에 용접비드가 균일하지 못한 크로스노즐의 경우에 용접단면 비드폭은 약 817.6 μm , 동축노즐의 용접단면 비드폭이 약 1056 μm 로 약 200 μm 정도 크게 형성되었다.




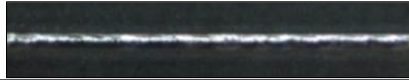







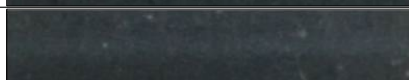

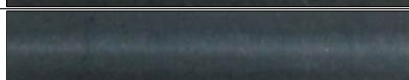
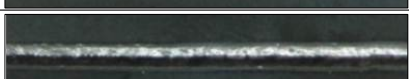
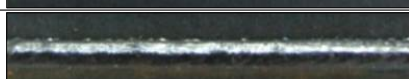
Beam welding speed : 1.2m/min, Shielding gas : Ar, 1bar			
Bead	Power (Watt)	Nozzle type	
		Cross nozzle	Coaxial nozzle
Front bead	900W		
	1100W		
	1300W		
	1500W		
Back bead	900W		
	1100W		
	1300W		
	1500W		

Fig. 4.4 Comparison of welding bead and penetration bead with nozzle type and laser power

Fig. 4.4의 크로스노즐과 동축노즐을 사용하여 용접했을 때 용접단면의 변화를 분석하기 위해 용접단면을 Fig. 4.5에 나타냈다. 전체적으로 레이저 출력이 증가하면서 용입깊이가 증가하고 있음을 나타내고 있다. 출력이 900W로 작을 때는 깊이방향으로 레이저빔의 에너지가 침투하기 보다는 시편의 표면으로 전도되는 에너지가

많아 깊이방향으로 용입깊이가 침투되는 것에 비해 표면에 전도되는 크기가 더 크게 나타나고 있다. 비드폭과 용입깊이를 측정된 결과, 크로스노즐의 비드폭은 약 $817.5\mu\text{m}$ 이고, 동축노즐의 비드폭은 약 $1056\mu\text{m}$ 이다. 깊이는 약 $100\mu\text{m}$ 정도 동축노즐이 깊게 들어갔다. 동축노즐의 특성상 입구측 직경보다 노즐 출구측 직경이 작아서 시편에 조사되는 보호가스의 속도강도분포가 가우시안 형태로 분사되기 때문에 용융물을 시편의 깊이방향으로 이동하도록 도와준 것으로 판단한다.

레이저의 출력변화에 대한 용접단면의 변화를 분석하기 위해 용접단면의 폭에 대한 깊이의 비인 종횡비(δ , Aspect ratio)를 Fig. 4.6에 나타냈다. 종횡비를 분석할 때 출력이 900W로 낮은 경우에는 형성된 비드상태가 양호한 형태가 아니기 때문에 양호한 부분의 폭을 측정하였다.

레이저의 출력이 증가하면 빔의 에너지가 시편표면에 전도되는 에너지보다 용접입열량이 충분해지면서 키홀이 형성되어 용입깊이가 증가하고 있다. 레이저빔이 가우시안 강도분포로 조사되기 때문에 키홀은 시편 중앙부에 에너지가 집중되면서 증발이 발생하고, 증발에 의한 반발력으로 용융물이 밀려나면서 키홀의 깊이가 증가하게 된다. 레이저빔이 이동하면 키홀 주변부의 용융물이 키홀 중심부로 함몰되면서 용접단면을 매우며 용접단면을 형성하게 된다. 그러나 레이저빔의 출력이 1500W로 증가하여 관통용접이 되면 후면비드의 열이 더 이상 침투될 곳이 사라지기 때문에 시편내부로 에너지가 축적되면서 상대적으로 전면비드의 폭이 증가하게 되고 종횡비 값은 감소한 것으로 생각한다.

또 하나 특이한 사항은 출력이 1500W로 충분한 입열량으로 시편의 용융체적이 많아지면 고점성유체 유동을 하게 되는데 앞에서 언급한 바와 같이 동축노즐은 노즐 출구 측에서 확산하며 분사되는 유동특성으로 시편 표면에서 용융물의 유동은 중앙에서 양방향으로 밀리면서 유동하지만, 크로스노즐은 양쪽 방향에서 중앙으로 보호가스를 분사하기 때문에 중앙선 부근으로 용융물이 유동하여 시편표면에서 용융비드폭이 상대적으로 작게 나타나 종횡비가 약간 우수하게 측정되었다.

1500W일 때 후면비드를 관찰해 보면 크로스노즐보다 동축노즐의 경우 용융물에 의한 후면비드가 더 크게 형성되어 있음을 알 수 있다. 이는 출력을 더 크게 하고 분사속도를 증가시키면 이들 용융물이 시편 아래방향으로 떨어질 수 있어 시편을 절단할 때 유리하게 작용할 수도 있음을 의미한다.

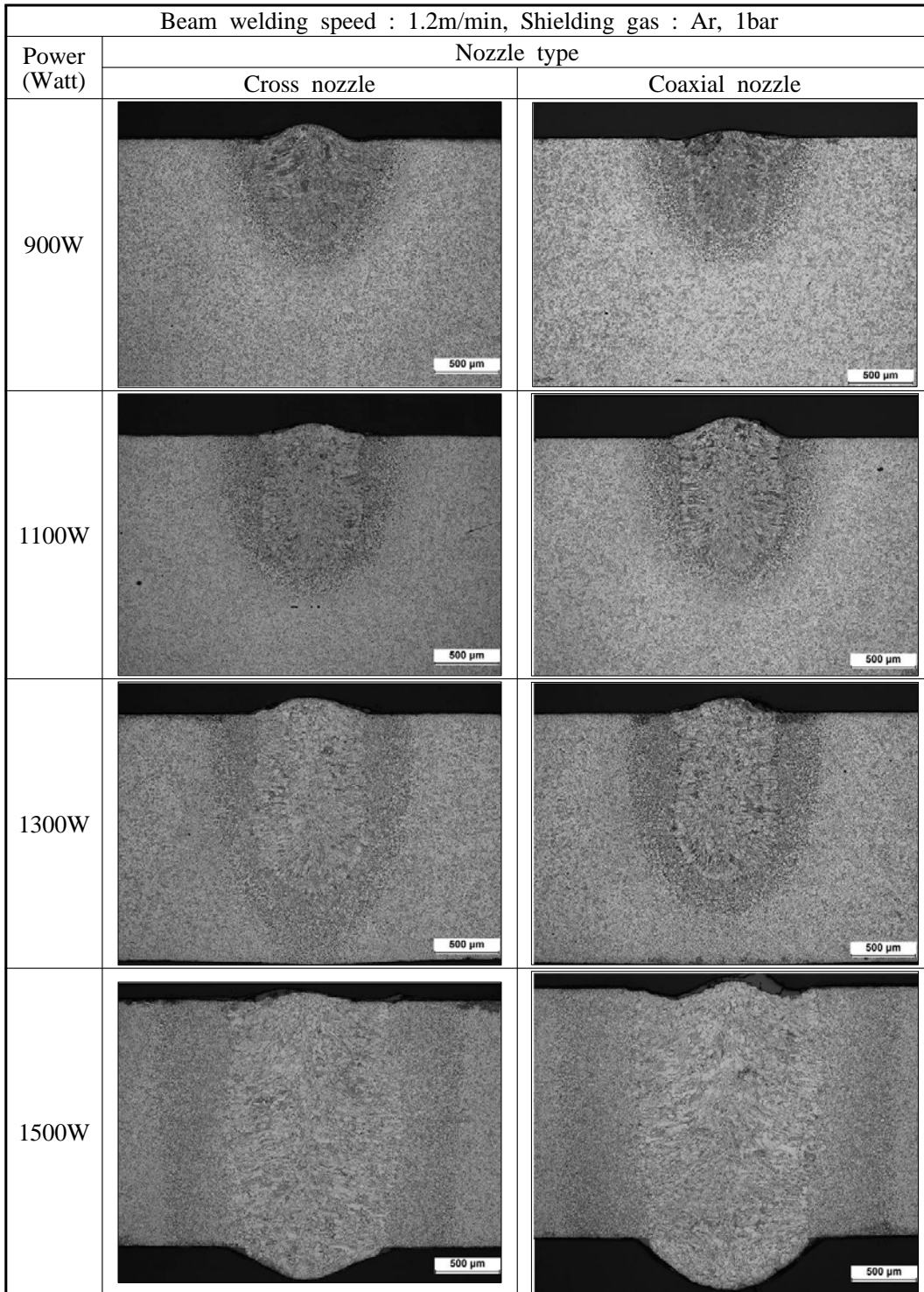


Fig. 4.5 Cross-section of welding zone after nozzle type and laser power

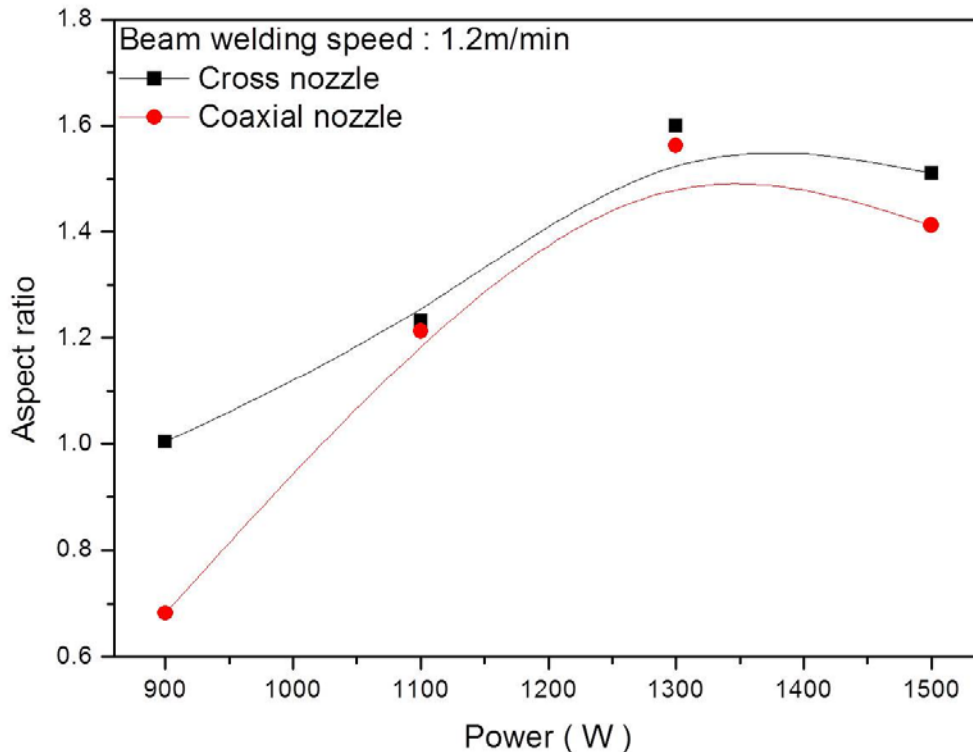


Fig. 4.6 Aspect ratio of nozzle type and laser power

노즐형상별 종횡비를 보면 레이저 출력이 900W일 때 가장 작은 종횡비 값을 갖고 있다. 레이저 출력이 증가할수록 종횡비 또한 증가하는데, 출력증가로 인해 용입깊이가 깊어져 나타난 것으로 판단된다. 1500W일 때 1300W보다 감소하는 이유는 비드폭이 급격히 증가하여 종횡비 값이 감소함을 확인할 수 있다.

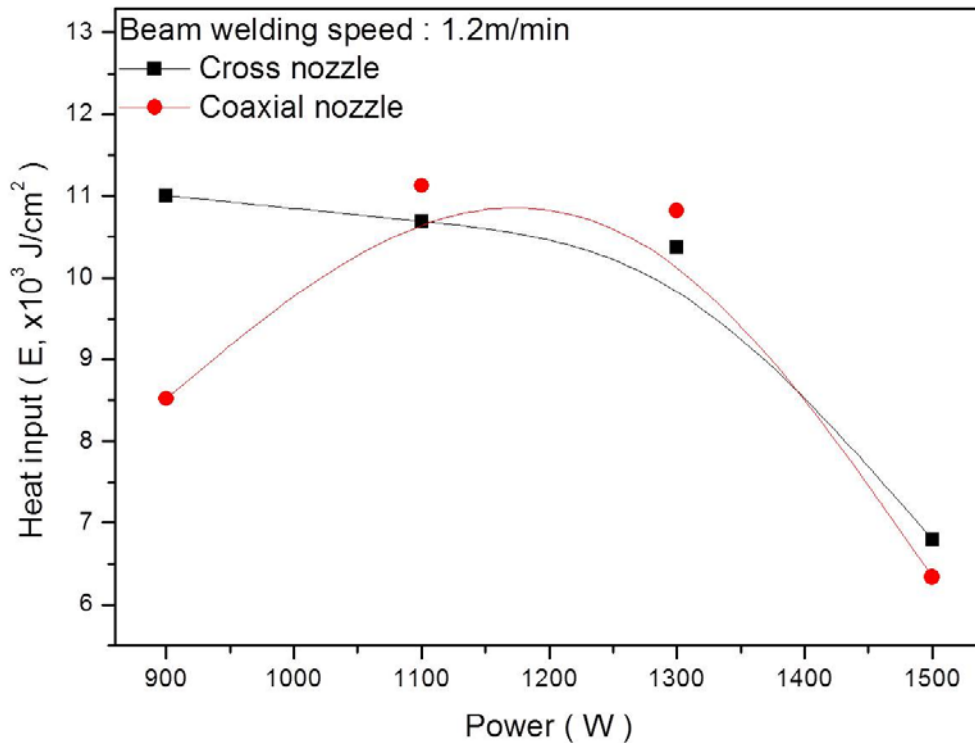


Fig. 4.7 Heat input of nozzle type and laser power

크로스노즐과 동축노즐로 용접했을 때 입열량의 변화를 분석하기 위해 Fig. 4.7에 나타냈다. 입열량은 레이저빔의 출력을 변화시키면서 용접했을 때 시편의 전면비드의 폭으로 레이저빔의 출력을 나누어 계산했다. 전체적으로 레이저빔의 출력을 증가시키면 용접단면의 폭이 증가하기 때문에 입열량이 감소하고 있다. 이는 레이저빔의 출력 증가에 비해 용접단면 폭의 증가가 더 급격하게 나타나기 때문이다.

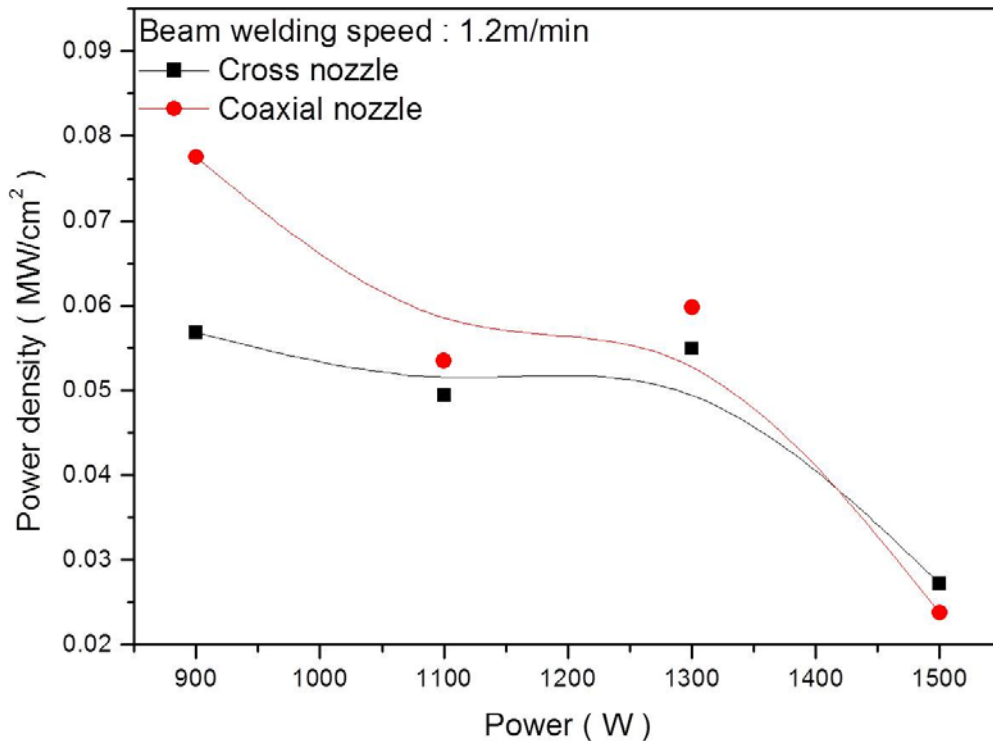


Fig. 4.8 Power density of nozzle type and laser power

식(3)의 계산식을 이용하여 비드 온 플레이트 용접결과를 바탕으로 출력밀도에 대해 Fig. 4.8에 나타냈다. 노즐형상별 출력밀도의 경향성은 저출력인 900W일 때 용접부 단면이 작게 형성되어 값이 크게 나타났다. 1300W에서 출력밀도 값이 증가한 이유는 1100W보다 단면적이 조금 작게 형성되어 이와 같은 결과값이 나타났고, 1500W에서는 완전관통용접 되면서 비드폭이 급격히 크게 형성되어 계산값이 작게 나타났다.

이차전지의 경우 전해질에 의한 부식을 방지하기 위해 표면에 Ni도금을 하여 사용하는 경우가 많다. 그래서 Ni도금했을 때 용접특성을 연구하기 위해 SS41시편 표면에 도금하여 레이저 용접한 시편을 Fig. 4.9에 나타냈고 이들 시편의 용접단면의 변화를 관찰하기 위해 Fig. 4.10에 나타냈다. 출력이 900W이고 크로스노즐을 사용했을 때 도금되지 않은 시편과 비교해 보면 전면비드에 구슬모양의 불안정한 비드가 형성되지 않았다. 이것은 Ni도금층의 영향으로 생각되는데 저탄소강 SS41의 주성분인 Mn의 경우 열전도율과 용융점이 300K일 $7.81 W/(m \cdot K)$, $1244^{\circ}C$ 인데 비하여 Ni의 열전도율과 용융점은 $90.9 W/(m \cdot K)$, $1455^{\circ}C$ 이기 때문에 나타나는 현상으로 생각한다. 크로스노즐로 보호가스를 분사했을 때 비드폭은 도금되지 않았을 때 약 $817.6\mu m$, 도금된 시편의 비드폭은 약 $1025.9\mu m$ 으로 약 $200\mu m$ 정도 약간 크게 형성되었다. 동축노즐을 사용하여 용접했을 때 도금되지 않은 경우 약 $1056.04\mu m$ 이고 Ni도금 한 경우의 비드폭은 약 $688.3\mu m$ 이었다.

레이저 출력이 1500W이고 Ni도금의 경우 크로스노즐로 분사하여 용접한 비드폭은 약 $1333.3\mu m$ 였고 도금을 하지 않았을 경우 비드폭은 약 $1324.7\mu m$ 였다. 동축노즐을 사용하여 용접하였을 경우 Ni도금 했을 경우 비드폭은 약 $1451.2\mu m$ 였고 도금하지 않았을 경우 비드폭은 약 $1416.8\mu m$ 으로 도금하였을 경우 약 $40\mu m$ 정도 증가하였다.

레이저의 출력이 900W이고 크로스노즐을 사용하여 분사하였을 경우 Ni도금을 했을 때 용입깊이는 약 $751.4\mu m$ 이었는데 도금을 하지 않았을 경우 용입깊이는 약 $820.4\mu m$ 였다. 동축노즐을 사용하고 Ni도금을 했을 경우 용입깊이는 약 $734.3\mu m$ 이고 도금을 하지 않았을 경우 용입깊이는 약 $719.8\mu m$ 였다. 출력이 1500W인 경우에는 완전관통용접이 되기 때문에 용입깊이를 비교할 수 없어 레이저빔의 출력이 1300W일 경우 용입깊이를 비교하였다. 용입깊이는 열영향부를 제외한 용접비드 단면의 깊이를 측정하였다. 크로스노즐을 사용했을 때 Ni도금의 경우 용입깊이는 약 $1485.6\mu m$ 이고 도금하지 않았을 때 용입깊이는 약 $1388.4\mu m$ 였다. 동축노즐을 사용했을 경우 도금된 시편의 용입깊이는 약 $1396.6\mu m$ 이고 도금하지 않았을 때 용입깊이는 약 $1300.3\mu m$ 였다. 이와 같이 도금했을 때와 도금하지 않았을 때 차이가 발생하는 것은 저탄소강 SS41의 주성분인 Mn의 용융점(melting point)은 $1244^{\circ}C$, 비중은 7.2, 열전도율은 $7.81 W/(m \cdot K)$ 인데 비하여 Ni은 용융점이 $1455^{\circ}C$, 비중은 8.845, 열전도율 $90.9 W/(m \cdot K)$ 의 차이에서 발생하는 것으로 생각된다.

특히 레이저빔 출력이 900W일 때 용입 입열량이 충분치 못하면 키흔 형성이 안

정적이지 못하여 용접단면에 기포가 상대적으로 많이 포획되어 있다. 앞 절에서 언급한 것처럼 레이저빔의 에너지강도는 가우시안 분포로 전달되는데 레이저빔 중앙부의 고에너지 밀도가 레이저빔과 상호작용하는 용접단면의 중앙부에 집중되면서 용융과 기화가 동시에 일어나며 키홀이 형성되는데 키홀 내 증기압이 증발하면서 반발압력의 영향으로 키홀의 깊이가 증가하게 된다. 이 키홀은 레이저빔이 이동하면서 키홀 주변부의 용융물이 함몰하며 용접단면을 형성하는데 용접 입열량이 작으면 키홀 형성이 불안정하여 키홀이 빨리 닫히면서 배출하지 못한 기포가 포획된 것으로 판단한다.

레이저의 출력이 1500W이고 Ni을 도금하지 않았을 때와 비슷하게 후면비드가 형성되는 면적은 크로스노즐보다 동축노즐을 사용했을 때 더 크게 형성되었다.








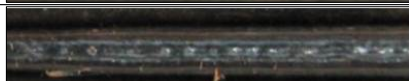
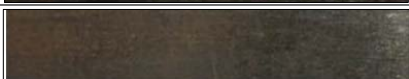
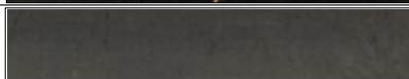
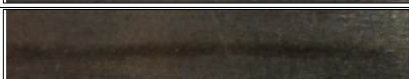
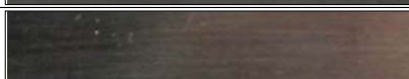
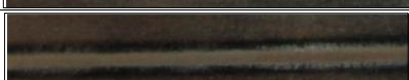



Beam welding speed : 1.2m/min, Shielding gas : Ar, 1bar			
Bead	Power	Nozzle type	
		Cross nozzle	Coaxial nozzle
Front bead	900W		
	1100W		
	1300W		
	1500W		
Back bead	900W		
	1100W		
	1300W		
	1500W		

Fig. 4.9 Comparison of welding bead and penetration bead with nozzle type and laser power

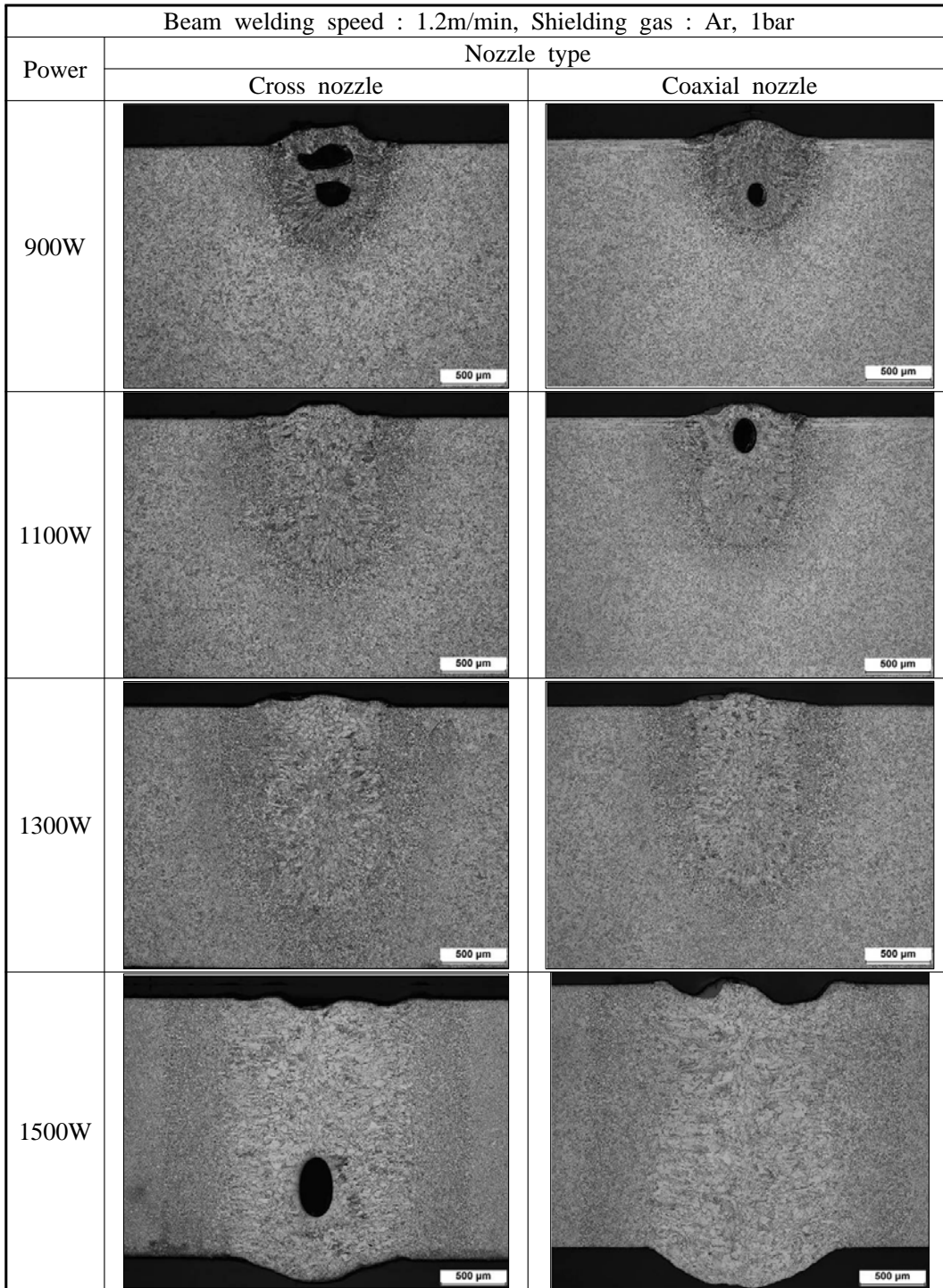


Fig. 4.10 Cross-section of welding zone after nozzle type and laser power

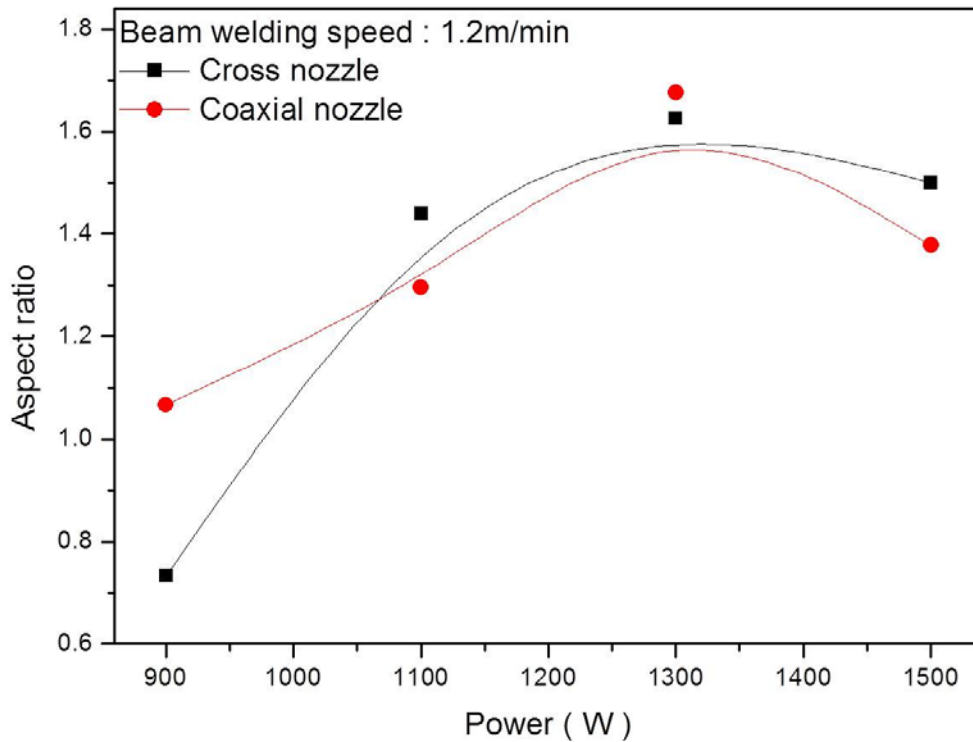


Fig. 4.11 Aspect ratio of nozzle type and laser power

Ni도금된 시험편의 용접 후 종횡비를 크로스노즐과 동축노즐을 사용했을 때 실험결과를 바탕으로 정리하여 Fig. 4.11에 나타냈다. 출력이 900W일 때 크로스노즐로 보호가스를 분사하면서 용접한 결과 니켈도금을 했을 때 종횡비는 0.732이고 니켈도금을 하지 않았을 때는 1.004였다. 동축노즐을 이용하여 보호가스를 분사하면 니켈도금 했을 때 종횡비는 1.067이고 니켈도금을 하지 않았을 때는 0.682였다.

종횡비 계산에 의해 레이저의 출력이 증가하면서 종횡비도 함께 증가하는데 출력이 1500W인 경우에는 관통용접으로 인하여 종횡비를 비교할 수 없어 1300W인 경우를 비교하였다. 크로스노즐을 사용하였을 때 Ni도금한 경우 종횡비는 1.626이고, 동축노즐을 사용하였을 경우 종횡비는 1.676이었다. Ni을 도금하지 않고 크로스노즐을 사용한 경우 종횡비 1.6이고 동축노즐을 사용했을 때 종횡비는 1.563을 얻을 수 있었다. 실험결과를 정리한 Fig. 4.6과 Fig. 4.11의 그래프를 서로 비교하면 Ni도금한 경우가 도금하지 않은 경우보다 종횡비가 약 0.026~0.1정도 감소하였다.

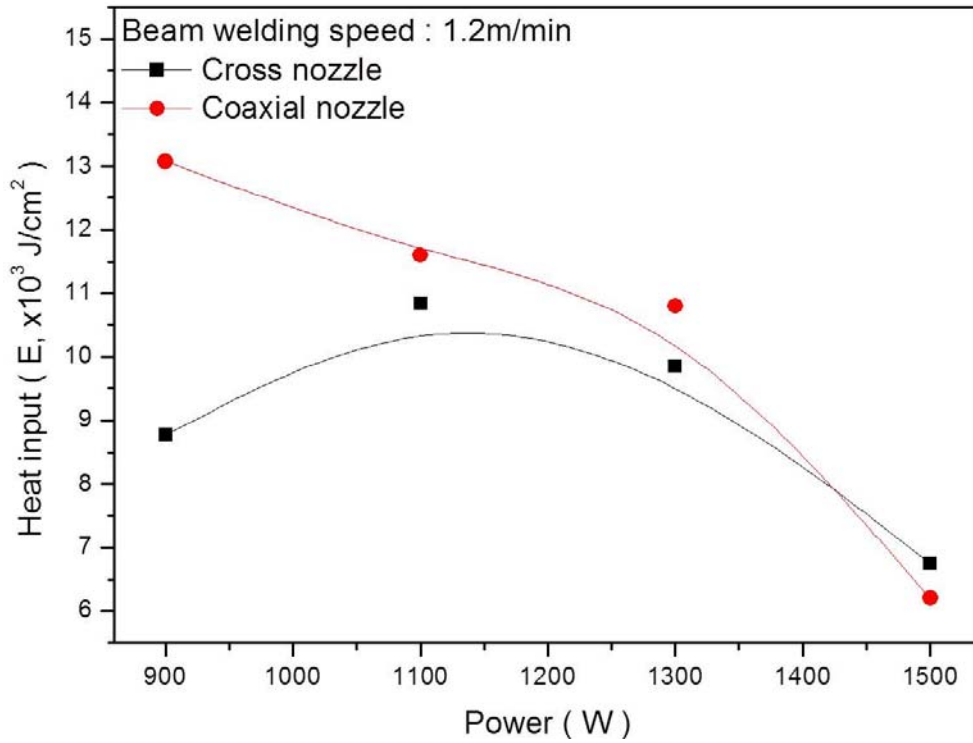


Fig. 4.12 Heat input of nozzle type and laser power

Ni도금한 시편을 동축노즐과 크로스노즐을 이용하여 용접했을 때 실험결과를 바탕으로 입열량 계산 후 Fig. 4.12에 나타냈다. 입열량은 레이저빔의 출력이 증가면서 감소하는 경향을 띄고 있다. 이는 레이저빔의 출력증가에 비해 용접단면폭 증가가 작기 때문에 나타나는 현상이다. 전체적으로 동축노즐을 사용했을 때 입열량이 크게 나타나고 있다. 1500W일 경우에는 관통용접 되었을 때 입열량을 나타내고 있다. 동축노즐로 보호가스를 분사하며 용접했을 때 후면비드가 크게 형성되면서 시편 후면의 주변부로 열이 전달되어 내부로 에너지가 축적되고, 전면비드의 폭이 크게 형성되었다. 식(2)로 계산한 결과 상대적으로 입열량 값이 작게 계산되었다.

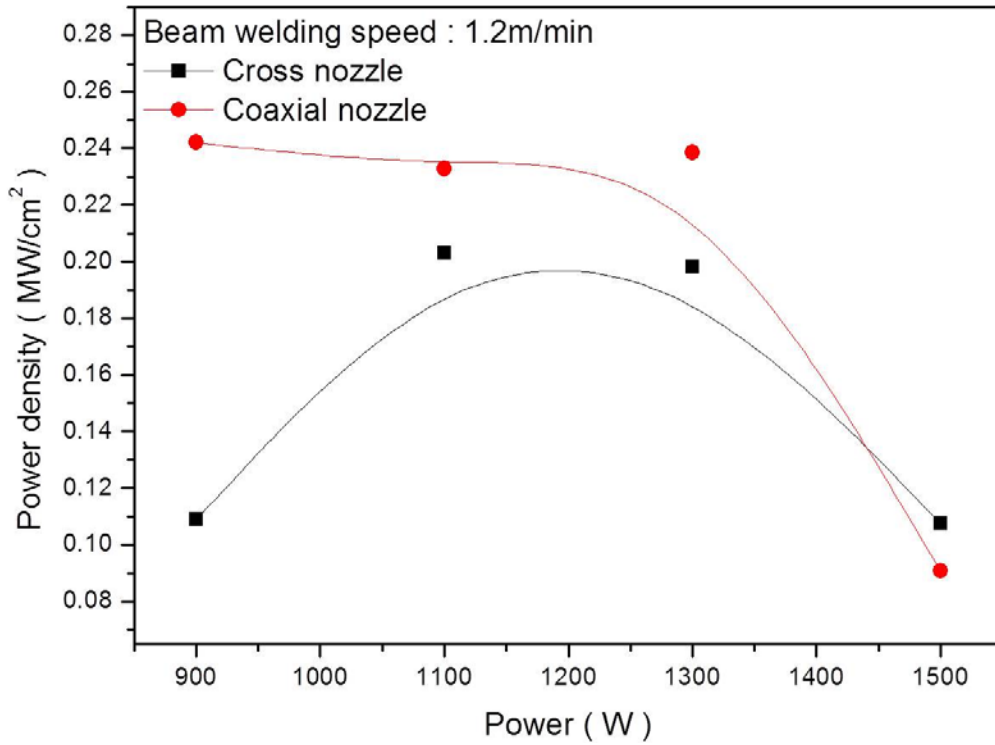


Fig. 4.13 Power density of nozzle type and laser power

출력변화에 따라 전면비드에 형성되는 용접폭의 절반을 반경으로 하여 단위면적으로 계산한 다음 식(3)의 계산식을 이용해 Fig. 4.13에 출력밀도로 나타냈다. 출력이 900W로 낮은 경우 크로스노즐로 분사하면서 용접한 결과 전면비드의 표면적에서 용융의 유동이 커져 면적증가로 출력밀도가 작게 계산되었다. 크로스노즐의 경우에는 출력이 증가하면 출력밀도가 증가한 뒤 1300W를 정점으로 다시 감소하였다. 출력밀도가 증가하는 구간은 레이저빔의 출력증가에 비해 비드단면적의 증가가 작기 때문에 출력밀도가 크게 계산된 것이다. 출력이 1500W로 증가하면 관통용접으로 인해 용융풀의 체적도 증가하면서 시편의 고체면적에 대한 유동이 자유롭게 되어 용융단면적이 상대적으로 증가한 결과 다시 급격하게 출력밀도가 감소하였다.

반면 동축노즐을 이용한 경우 레이저빔이 조사되는 중심축과 같은 방향에서 보호가스가 분사되기 때문에 노즐의 유동특성으로 방사형으로 분사되어 출력이 낮은 경우 충분한 용융풀이 형성되지 않게 된다. 이에 출력에 대한 전면 비드폭이 작아 출력밀도가 크게 계산되었다. 출력밀도가 증가할지라도 레이저빔의 출력증가에 대

한 용융단면적 증가로 인해 출력밀도 계산 시 값이 감소하지만 레이저빔의 출력이 1500W로 용융풀의 체적이 증가하여 시편의 표면이 앞에서 언급한 이유로 고 점성 유체유동으로 변화하면서 방사상으로 유동하는 동축노즐의 영향이 증가하여 용접 비드단면적이 증가하면서 출력밀도가 감소하고 있다.

4.1.3 동축노즐 위치변화에 따른 용접특성

동축노즐을 사용하여 보호가스를 분사하며 용접할 때의 용접특성을 고찰하고자 한다. 동축노즐은 보호가스가 유입되는 입구부의 지름에 비해 출구부의 지름이 상대적으로 작기 때문에 입구부에 비해 출구부에서의 유동속도가 증가하게 된다. 증가된 유동속도는 노즐의 출구부에서 보호가스의 분자가 회절의 영향을 받아 방사상으로 분사되기 때문에 속도강도분포가 중심부에서는 매우 크고 주변부는 상대적으로 감소하게 된다.

본 연구에서 동축노즐의 높이가 변하면 시편에 분사되는 보호가스 유동의 속도 분포가 변화하기 때문에 노즐의 높이변화에 따른 용접특성을 고찰하고자 한다. 동축노즐을 사용해서 보호가스를 분사하면서 용접하는 실험 개략도는 Fig. 4.14에 나타냈다. 크로스노즐은 양 옆에서 보호가스를 불어주는 형태이고, 동축노즐은 레이저빔과 동일선상에서 보호가스를 불어주는 형태이다. 본 실험에서는 동축노즐의 높이(H)를 조절하여 보호가스의 영향에 대한 실험을 하고자 한다. 여기서 H는 시편과 동축노즐 까지 거리이다. 레이저로 용접할 때 보호가스는 동축노즐과 크로스노즐에서 불어주는 압력이 같을지라도 용접부를 감싸주는 보호가스의 속도분포나 분사각도 등이 다르기 때문에 플라즈마 제어와 밀접한 관계가 있을 수 있다고 판단하였다. 이와 같은 이유로 선행연구로 노즐형상을 변경함으로 기공발생을 억제하고 용접품질을 개선하고자 하는 연구가 다양하게 진행되어 왔다.^(26,47,48)

이번 연구에서는 레이저 출력과 빔 이동속도를 동일한 조건으로 고정하고, 높이를 3mm간격으로 변화시키면서 실험을 하였고, 보호가스의 압력은 1bar와 2bar로 각각 실험하였다. 보호가스는 고온의 용접부가 산화되는 것을 방지하는 역할을 담당하나 레이저 용접에 있어서는 대기의 영향을 억제하는 차폐막 역할 이외에 플라즈마 제어작용도 하므로 보호가스는 레이저 용접부 성능 및 용입형상에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 또한, 보호가스의 유량이 적으면 쉘드효과가 감소하며 용접부에 블로우홀(Blowhole)이 발생하기 쉽다. 유량이 많아도 용접부에 언더컷(Undercut)나 험핑(Humping)등이 발생하게 된다. 따라서 보호가스 압력에 따라 동축노즐의 높이를 조절하여 시편에 분사되는 속도강도를 변화시켜 겹치기 용접특성을 고찰하고자 한다.^(22,49)

동축노즐의 높이를 변화시키면서 겹치기 용접한 결과를 Fig. 4.15에 나타냈다. 레이저빔 출력은 1800W, 빔 이동속도는 1.2m/min으로 고정하고 보호가스는 Ar을 사

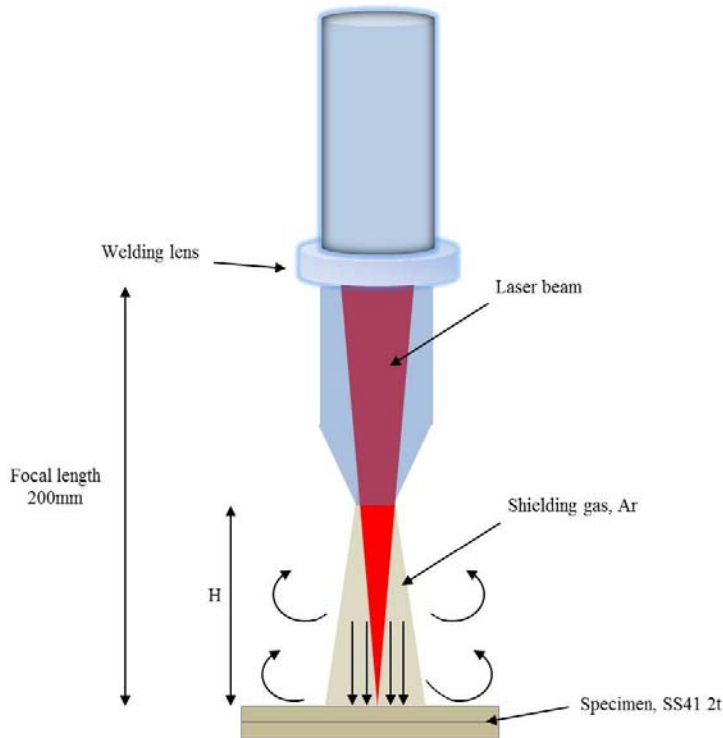


Fig. 4.14 Schematic diagram of Coaxial nozzle height change




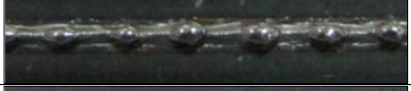
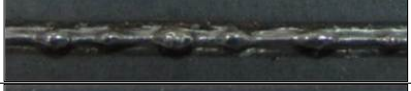








용하였다. 용접 결과를 확인하여 보면 보호가스 압력이 1bar이고 동축노즐의 높이가 시편으로부터 3mm로 비교적 가까울 때는 용접단면의 전면비드 형상이 양호하게 형성되지 못하고 있다. 이는 용접할 때 형성된 키홀 중심부를 주변부의 용융물이 이동하는 레이저빔에 의해 키홀 중심부로 함몰되면서 용접비드를 형성해야 하는데 동축노즐의 중심부 속도강도가 크기 때문에 용접단면의 키홀을 매우는데 장애가 되도록 영향을 주기 때문인 것으로 판단한다. 동축노즐의 높이를 증가시키면 동축노즐에서 분사하는 중심부의 속도분포 영향이 감소하면서 키홀을 매우는 주변부의 용융물 유동에 영향을 작게 미치기 때문에 용접비드 단면이 양호하게 형성되고 있음을 관찰할 수 있다.⁽²²⁾

보호가스의 압력을 2bar로 하였을 경우에는 1bar로 분사하였을 때와 동일한 높이에서는 용접단면에서 언더컷 형상이 심하게 나타나서 본 실험결과에는 나타내지 않았다. 보호가스의 압력을 증가시키면 레이저빔의 중심부는 높은 에너지 밀도에 의해 증발되는 가스압력이 외부로 분출되면서 비산되는 용융물이 증가되고 이로

인해 발생하는 현상으로 생각한다. 이는 동축노즐을 사용할 경우에는 용접보다는 절단에 매우 효과적이고, 만일 동축노즐을 사용할 경우에는 용접시편과 충분한 거리를 확보하고 용접해야 함을 의미한다. 만일 레이저 용접을 할 때 용접 광학헤드를 시편에 가깝게 접근시키지 못할 경우에는 크로스노즐보다는 동축노즐을 사용하여 용접하는 것이 대안이 될 수도 있음을 생각해 볼 수 있다. Fig. 4.15에서 분사압력이 2bar일 때 노즐의 높이가 15mm까지는 실험결과를 도출하지 않은 이유는 분사압력이 지나치게 커서 용접단면의 헐림 현상이 심하게 발생하였기 때문이다.

보호가스 압력이 1bar일 때 유량을 실측한 결과 약 25~30 l/min 정도였다. 보호가스가 부족하면 블로우홀이 발생하게 되고, 많으면 언더커팅이나 키홀에서 시편의 비산이 많아져 커팅현상 등이 발생하기 쉽다. 본 실험은 동축노즐의 높이변화에 대한 보호가스의 영향으로 분사압력이 1bar, 2bar일 때 용접특성을 연구하였다. 시편에서 노즐의 높이가 3mm부터 18mm까지는 표면비드에 물방울처럼 비드가 형성되었고, 비드를 관찰하여 보면 규칙적인 간격으로 형성되어 있다. 크기를 측정하여 보면 높이는 약 1.15mm 정도이고, 이것을 반경으로 표면적을 계산하면 약 8.034mm² 정도 측정되었다. 노즐의 높이가 시편표면으로부터 올라갈수록 형성되는 간격이 조금씩 늘어날 뿐, 크기와 높이는 비슷하게 형성되었다. 동축노즐의 높이가 21mm일 때는 거의 형성되지 않았다. 2bar의 경우도 마찬가지로 높이 27mm부터는 비드상태가 양호함을 확인할 수 있다.

이와 같이 비드에 물방울모양처럼 형성되는 것은 레이저빔이 시편표면에 조사될 때 동축노즐의 출구끝단에서 속도분포가 방사형으로 분사되기 때문인 것으로 생각된다. 동축노즐 끝단에서 방사상으로 분사되는 속도분포는 중앙부의 속도강도가 상대적으로 매우 크고, 중앙부에서 $\frac{1}{e}$ 부분 외곽지역은 속도강도가 매우 약하기 때문에 키홀이 형성되어 레이저빔이 이동하면서 키홀 주변부의 용융물이 키홀 중앙부위를 매워야 하는데 이와 같은 유동현상을 강제적으로 저지하기 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 레이저빔으로 금속표면을 조사하면 표면은 마란고니(Marangoni) 유동을 하고, 이 유동은 열확산계수, 표면장력, 점성마찰력 등의 영향을 받는다. 또한편으로 고려해 볼 수 있는 것은 레이저빔의 강도가 가장 큰 중심부의 에너지가 시편에 조사되면서 기화된 시편의 일부가 외부에서 강하게 분사되는 보호가스의 영향으로 분출되지 못하고 키홀이 닫히면서 포획된 기포의 영향 때문에 발생할 수도 있다고 생각된다.

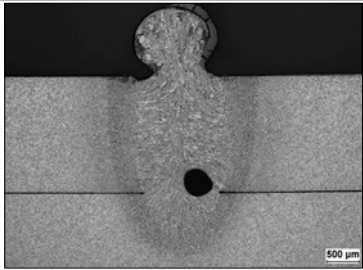
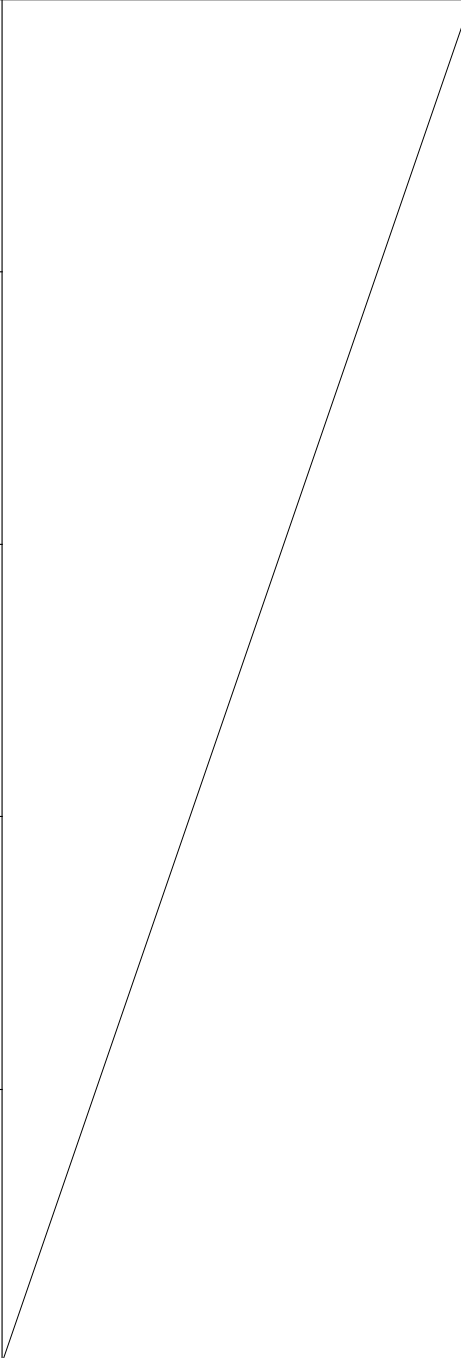
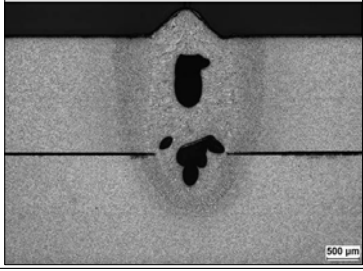
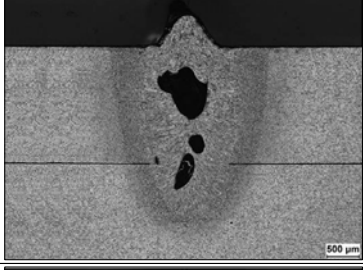
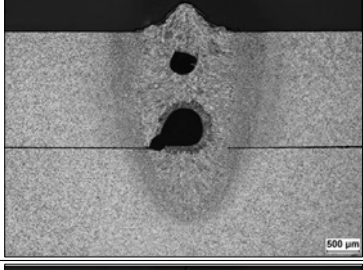
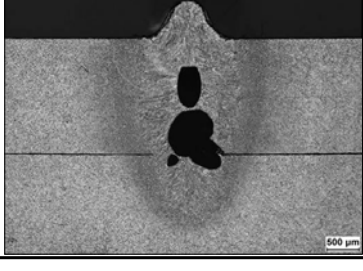
Power : 1800W, Beam welding speed : 1.2m/min, Shielding gas : Ar		Power : 1800W, Beam welding speed : 1.2m/min, Shielding gas : Ar	
Coaxial nozzle		Coaxial nozzle	
H(mm)	1bar	H(mm)	2bar
3		3	-
6		6	-
9		9	-
12		12	-
15		15	-
18		18	
21		21	
24		24	
27		27	

(A)

(B)

Fig. 4.15 Comparison of welding bead with coaxial nozzle height change and shielding gas pressure, (Welding bead with shielding gas pressure, A:1bar, B:2bar)

Power : 1800W, Beam welding speed : 1.2m/min, Shielding gas : Ar

Nozzle type	Coaxial nozzle	
H(mm)	1bar	2bar
3		
6		
9		
12		
15		

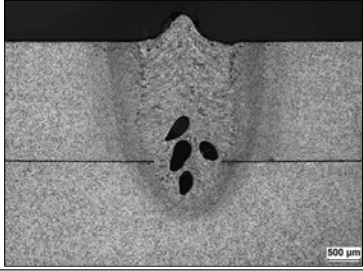
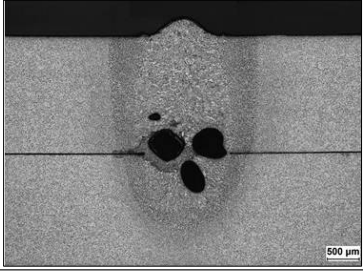
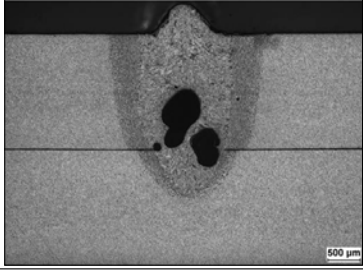
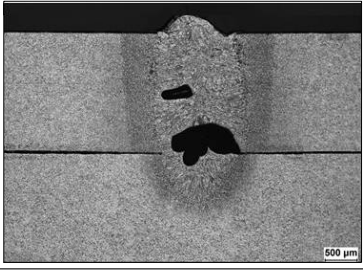
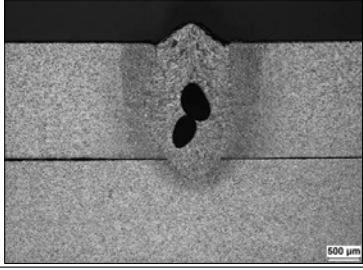
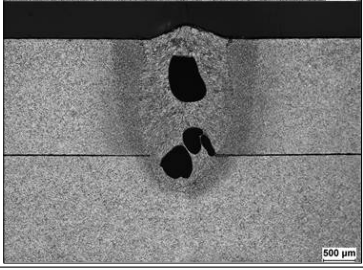
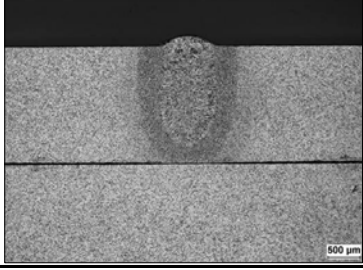
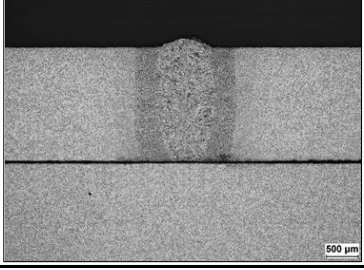
Power : 1800W, Beam welding speed : 1.2m/min, Shielding gas : Ar		
Nozzle type	Coaxial nozzle	
H (mm)	1bar	2bar
18		
21		
24		
27		

Fig. 4.16 Cross-section of welding zone after coaxial nozzle height change and shielding gas pressure

Fig. 4.16은 동축노즐의 높이를 시편표면으로부터 일정 간격으로 높이면서 겹치기 용접한 용접단면을 나타낸 것이다. 전체적으로 용접단면에 많은 기공이 관찰되었다. 기공이 관찰되는 이유는 여러 가지가 있는데, 레이저 용접에서 기공이 관찰되는 이유로는 기름이나 먼지 같은 이물질이 시편표면에 부착되어 용접도중 용접단면에 유입됨으로 인해 생길수도 있고, 시편을 구성하는 일부 조성분 중에 용융온도가 상대적으로 낮은 성분이 기화되어 분출할 때 기홀이 닫히면서 포획되고 이로 인해 기공이 발생할 수도 있다. 또는 주위 대기 중에 있는 수분이 높은 열로 분해되어 수소가 용접단면에 유입되어 기공이 발생할 수도 있다.⁽⁵⁰⁾

다른 이유로는 겹치기 용접할 때 시편과 시편의 경계면의 대기가 용접할 때 용융단면에 유입되면서 기공이 발생할 수도 있다. 레이저 용접 단면에서 기공이 발생하는 여러 가지 이유가 있으나 크로스노즐에 비해 동축노즐에서 기공이 더 많이 발생하는 것은 동축노즐의 중심부에서 분사되는 보호가스의 속도강도가 크기 때문에 용융풀에서 분출하는 기포를 억제하고 일부는 오히려 외부 보호가스가 기포를 생성하는데 효과적으로 작용하기 때문인 것으로 생각된다. 이상의 실험으로 미루어 볼 때 용접 시 동축노즐은 보다 세밀하게 제어하지 않으면 용접품질이 좋지 않을 수 있음을 나타내고 있다. 그러므로 동축노즐은 용접보다는 유동속도를 높여서 절단하는 공정에 적용하는 것이 효과적이라고 생각한다. 다만 크로스노즐을 사용할 수 없고 광학헤드의 접근성이 좋지 않을 경우에는 동축노즐을 사용하여 시편과 광학헤드 사이의 작업거리를 충분히 확보하고 용접한다면 양호한 용접품질을 얻을 수 있을 것으로 판단한다.

동축노즐에서 분사하는 노즐압력에 따라 용입깊이에 미치는 영향을 고찰하기 위해 비교하였다. 비교하기 위한 조건은 동일한 높이인 18mm를 기준으로 하였다. 동축노즐에서 분사압력이 1bar일 때는 용입깊이가 약 2498.1 μ m이고 분사압력이 2bar일 때는 용입깊이는 약 2844.8 μ m이었다. 용융풀의 깊이방향으로 진행하는 것은 기본적으로 출력이 높아야 하지만 레이저빔은 빛의 성질을 가지고 있어 대부분 금속표면에서 반사하게 된다. 금속표면에서 레이저빔이 반사되기 때문에 심입용접(Deep penetration welding)이 어렵게 된다. 레이저의 출력이 같은 조건에서는 동축노즐을 활용하여 분사압력을 높여주면 심입용접이 어느 정도 해소될 것으로 생각된다. 하지만 H=21mm에서는 용입깊이의 차이가 크게 나타나지는 않았는데 이것은 노즐에서 분사되는 보호가스 압력이 시편과 거리가 증가하면 대기와의 경계층 마찰이 증가하면서 운동량이 손실하기 때문인 것으로 생각된다.

동축노즐의 높이를 변화시키면서 용접한 결과를 이용해서 종횡비와 입열량을 분석했다. 종횡비와 입열량은 각각 식(1)과 (2)로 계산하였다.

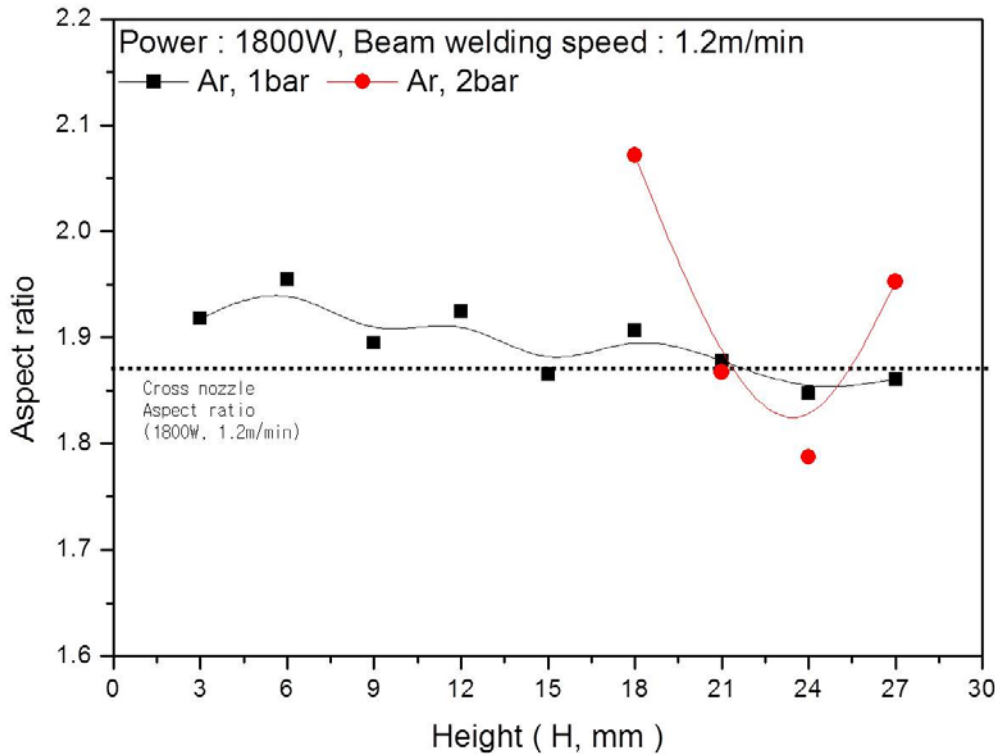


Fig. 4.17 Aspect ratio of Coaxial nozzle height change

Fig. 4.17에서 크로스노즐인 경우 동일한 조건일 때 종횡비는 약 1.888이 나왔는데, 1bar의 경우 종횡비가 약간씩 증가와 감소를 반복하는 경향성을 보이고 있다. 2bar일 때는 보호가스의 압력이 강해서 종횡비 차이가 많이 나타났다. 2bar, 24mm인 경우에는 크로스노즐 및 1bar일 때보다 값이 작지만, 용입깊이나 비드폭에서 좋은 조건임을 확인할 수 있었다.

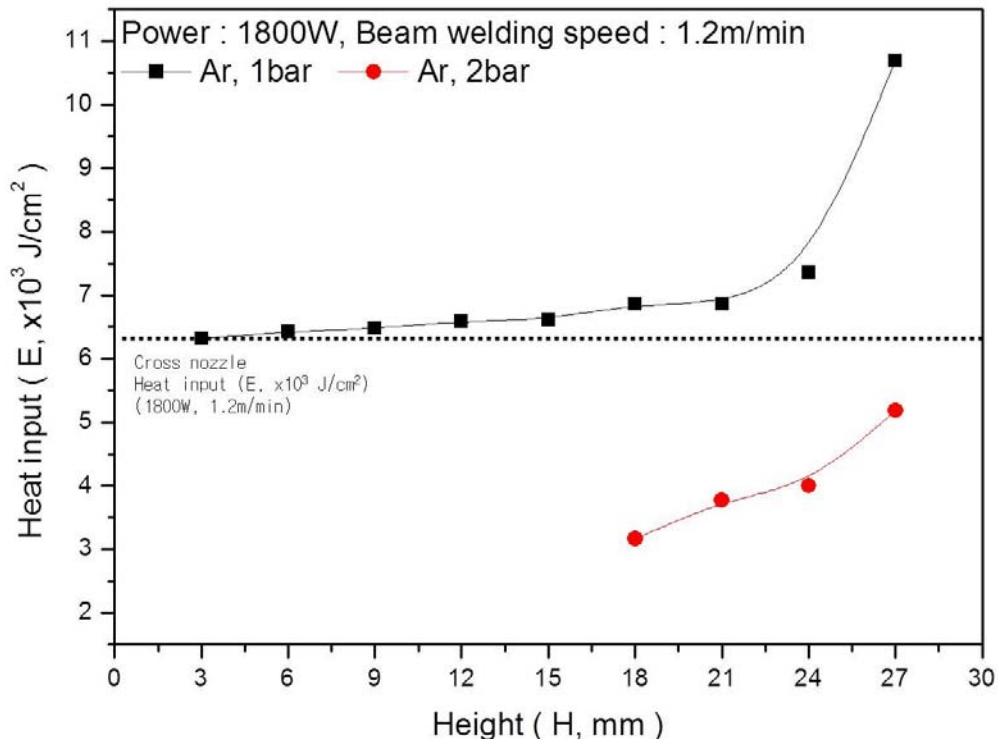


Fig. 4.18 Heat input of Coaxial nozzle height change

입열량을 계산한 결과는 Fig. 4.18과 같다. 동축노즐의 높이가 올라갈수록 비드폭이 줄어들기 때문에 입열량이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 비드폭이 줄어들수록 입열량 값이 증가하는데, 1bar, 2bar일 때 비드의 상태가 좋은 조건의 입열량 값은 각각 약 $6.869 \times 10^3 J/cm^2$, 약 $3.99 \times 10^3 J/cm^2$ 로 계산되었다. 1bar의 경우에는 H=21mm, 2bar일 때는 H=24mm로 선정하였고, 압력별 입열량 그래프의 경향성으로는 높이가 증가할수록 비드폭 감소로 인해 증가함을 보여주고 있다.

4.2 SS41 겹치기 용접특성

4.2.1 크로스노즐의 용접영향

크로스노즐 타입으로 저탄소강 SS41속도별 겹치기 용접 결과를 Fig. 4.19에 나타냈고, 이때 용접단면은 Fig. 4.20에 나타냈다. 겹치기 용접을 실시한 이유는 이차전지의 극주로 사용하는 SS41에 극판으로 사용하는 두께 100 μ m의 박판 40장을 일정 간격으로 세운 뒤, T형상으로 용접하기 위한 최적의 입열량을 결정하기 위해서이다. 극주로 사용되는 SS41의 용융깊이에 따라 극주 아래에 세워져있는 박판을 레이저 용접할 수 있을 정도의 입열량을 결정해야 본 연구에서 하고자 하는 T형상 용접을 할 수 있기 때문이다.

레이저 출력은 1800W로 하고 빔의 이송속도는 1.2m/min에서 2.2m/min까지 증가시키면서 용접하였다. 레이저빔의 이송속도가 1.2m/min일 때 겹치기 용접한 아래 시편의 용입깊이는 약 320 μ m정도였고, 이송속도가 증가할수록 아래 시편의 용입깊이가 감소하고 있다. 이송속도가 2.2m/min에서는 겹치기 용접할 때 아래 시편은 용접되지 않았다. 극주에 T자로 용접되는 박판의 두께가 100 μ m이기 때문에 박판의 용입깊이는 100 μ m 정도 되면 충분할 것으로 판단된다.

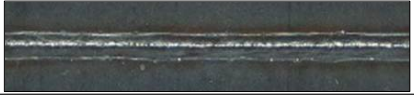





Power : 1800W, Shielding gas : Ar, 1bar			
Cross nozzle			
Beam welding speed (m/min)		Beam welding speed (m/min)	
1.2		1.8	
1.4		2.0	
1.6		2.2	

Fig. 4.19 Comparison of welding bead with beam welding speed

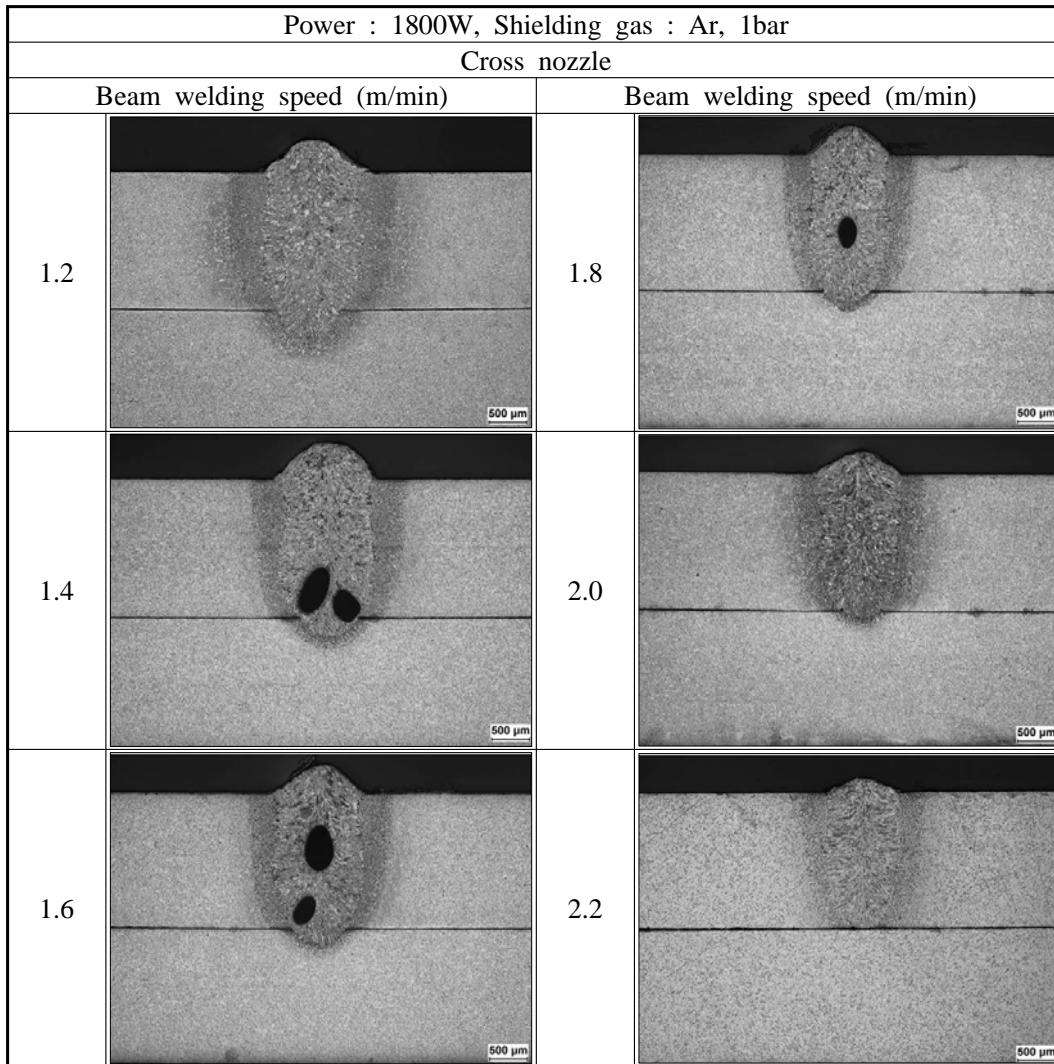


Fig. 4.20 Cross-section of welding zone after beam welding speed

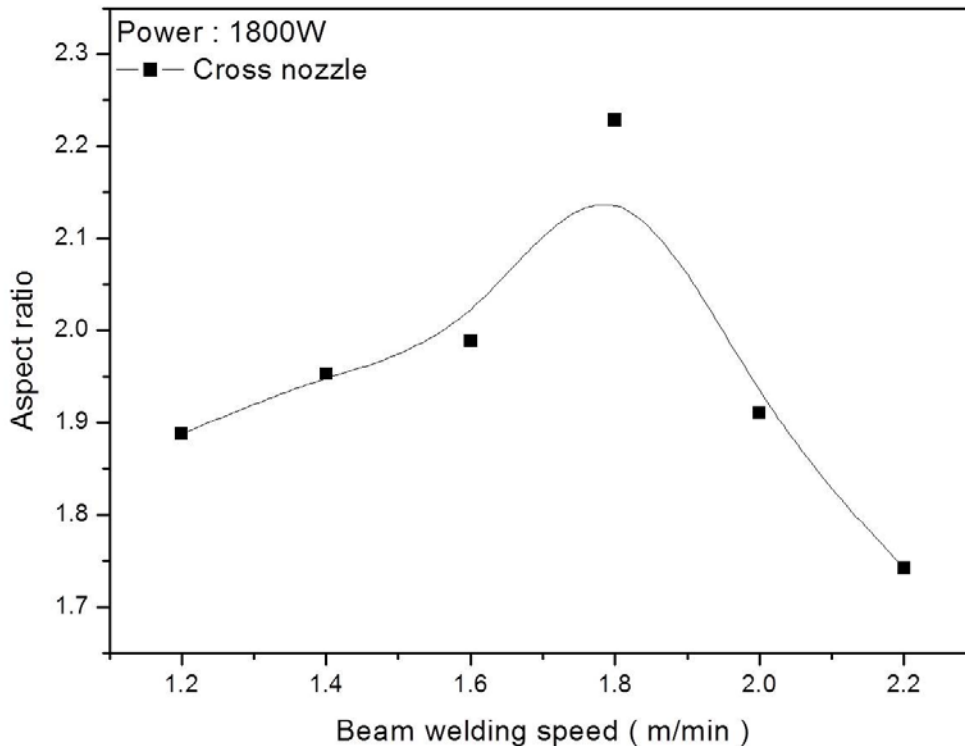


Fig. 4.21 Aspect ratio of beam welding speed

크로스노즐 겹치기 용접 결과를 바탕으로 종횡비와 입열량을 식(1)과 (2)로 계산하여 각각의 그래프로 나타내었다. Fig. 4.21은 종횡비를 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. 레이저빔의 이송속도가 증가하면 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 짧아져 용접단면의 폭이 감소하기 때문에 종횡비가 1.8m/min까지 증가하였다. 그러나 이송속도가 2.0m/min이상 증가하게 되면 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 더욱 감소하여 충분한 입열량이 되지 못하기 때문에 용입깊이 감소로 인해 종횡비 계산결과 감소하고 있다.

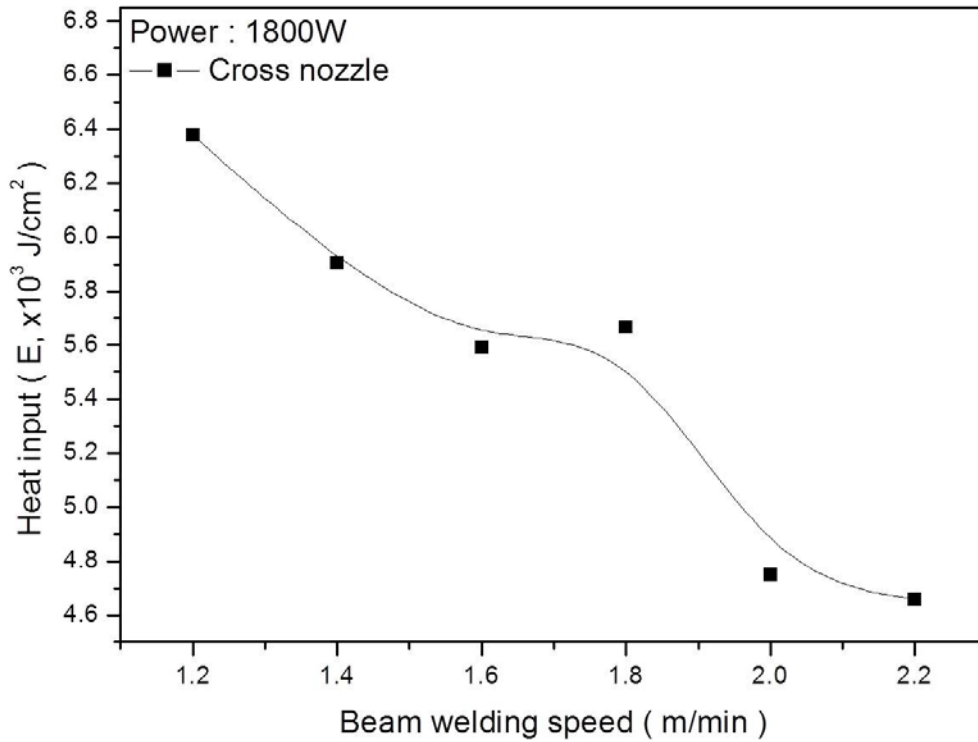


Fig. 4.22 Heat input of beam welding speed

식(2)로 계산한 입열량 값을 Fig. 4.22에 나타냈다. 식(2)로 표현되는 입열량은 비드폭과 이송속도의 함수로 표현된다. 레이저빔의 이송속도가 빠르고 비드폭이 증가하면 입열량은 감소하게 된다. 실험결과를 바탕으로 입열량을 계산하여 그래프로 나타낸 Fig. 4.22를 고찰해보면 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 입열량이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 레이저빔으로 겹치기 용접을 하면 레이저빔의 이송속도가 빨라질수록 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 짧아 용접단면의 폭이 감소하기 때문에 식(2)로 계산하는 입열량이 증가해야 하지만, 입열량 계산에서는 레이저빔의 이송속도가 더 많은 영향을 주기에 속도증가에 따라 감소경향이 발생하는 현상으로 생각된다.

4.2.2 동축노즐의 용접영향

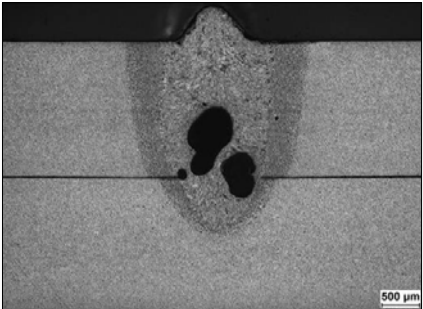
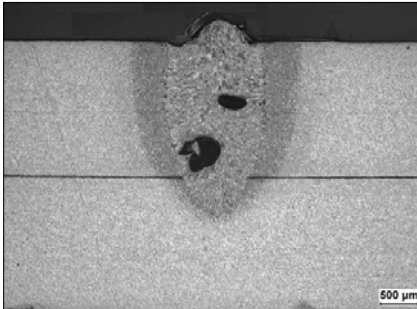
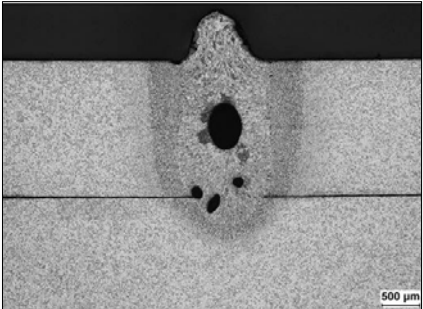
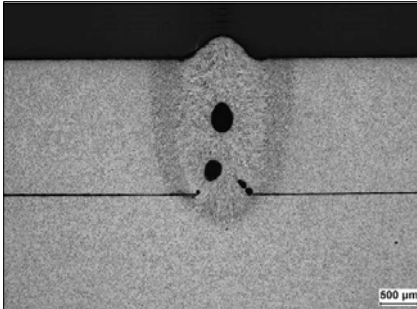
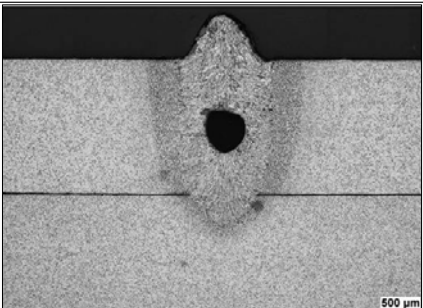
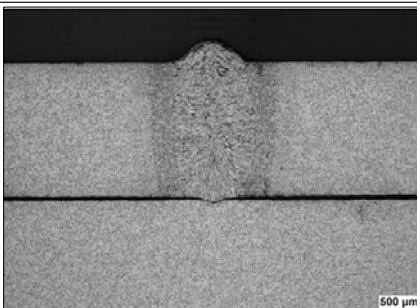
앞서 언급한 것처럼 동축노즐을 시편에 가깝게 하여 용접할 경우 용접단면이 불균일하게 형성되기 때문에 동축노즐과 시편사이에 충분한 거리를 두고 겹치기 용접하였다. 이때 레이저빔의 출력은 1800W로 하였고 보호가스의 압력이 1bar일 경우에는 높이를 21mm로 하고, 2bar일 경우에는 높이를 24mm로 하여 속도별로 용접한 결과를 Fig. 4.23에 나타내었다. 동축노즐을 사용하여 용접할 때 입열량은 레이저빔 이송속도를 변화시키면서 조절하였다. 레이저빔의 이송속도가 느린 경우 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 길어져 과입열로 인해 용접단면에 구슬모양의 비드가 형성되었다.

Power : 1800W, Shielding gas : Ar Coaxial nozzle		Power : 1800W, Shielding gas : Ar Coaxial nozzle	
Beam Welding Speed (m/min)	1bar (H=21mm)	Beam Welding Speed (m/min)	2bar (H=24mm)
1.2		1.2	
1.4		1.4	
1.6		1.6	
1.8		1.8	
2.0		2.0	
2.2		2.2	

Fig. 4.23 Comparison of welding bead with coaxial nozzle and beam welding speed,
(Welding bead with shielding gas pressure; A:1bar, B:2bar)

레이저빔의 이송속도가 증가하면 동축노즐에서 시편의 용융플에 분사하는 시간이 감소하면서 동축노즐에서 분사하는 노즐의 속도강도 영향이 감소하고, 용접비드에 구슬모양의 용접부가 서서히 사라지고 있는 실험결과를 도출하였다.

Fig. 4.23의 실험결과에 따른 용접단면의 변화를 관찰하기 위해 Fig. 4.24에 나타냈다. 앞서 언급한 것처럼 용접단면에 많은 기공이 나타나고 있다. 크로스노즐을 사용했을 때 보다 기공을 많이 포함하고 있고, 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 아래 시편으로 용입되는 깊이가 감소하고 있음을 나타내고 있다. 보호가스의 압력이 2bar일 때는 노즐과 시편사이의 높이가 24mm로 1bar일 때 보다 높기 때문에 노즐 출구에서 방사상으로 유동할 때 속도강도가 급격하게 감소하고, 이에 영향을 받아 겹치기 용접 시 1.6m/min부터는 아래 시편으로 용입이 발생하지 않았다. 이는 레이저빔으로 용접할 때 보호가스가 대기의 영향으로부터 보호해주는 것뿐만 아니라 보호가스가 분사되면서 운동량과 함께 에너지도 전달하는 것이 아닌가 생각하게 된다. 또 하나 생각해 볼 수 있는 사항은 동축노즐 출구에서 분사하는 유동은 jet유동 형태를 띠고 있기 때문에 대기 중으로 유동하는 분사유동의 경계층 부분에서 와류가 발생하면서 운동량을 감소시켜 시편표면에 발생하는 플라즈마를 효과적으로 제어하지 못하여 깊이방향으로 에너지가 전달되지 못한 것이 아닌가 생각한다.

Power : 1800W, Shielding gas : Ar			
Coaxial nozzle			
1bar (H=21mm)		2bar (H=24mm)	
Beam welding speed (m/min)		Beam welding speed (m/min)	
1.2		1.2	
1.4		1.4	
1.6		1.6	

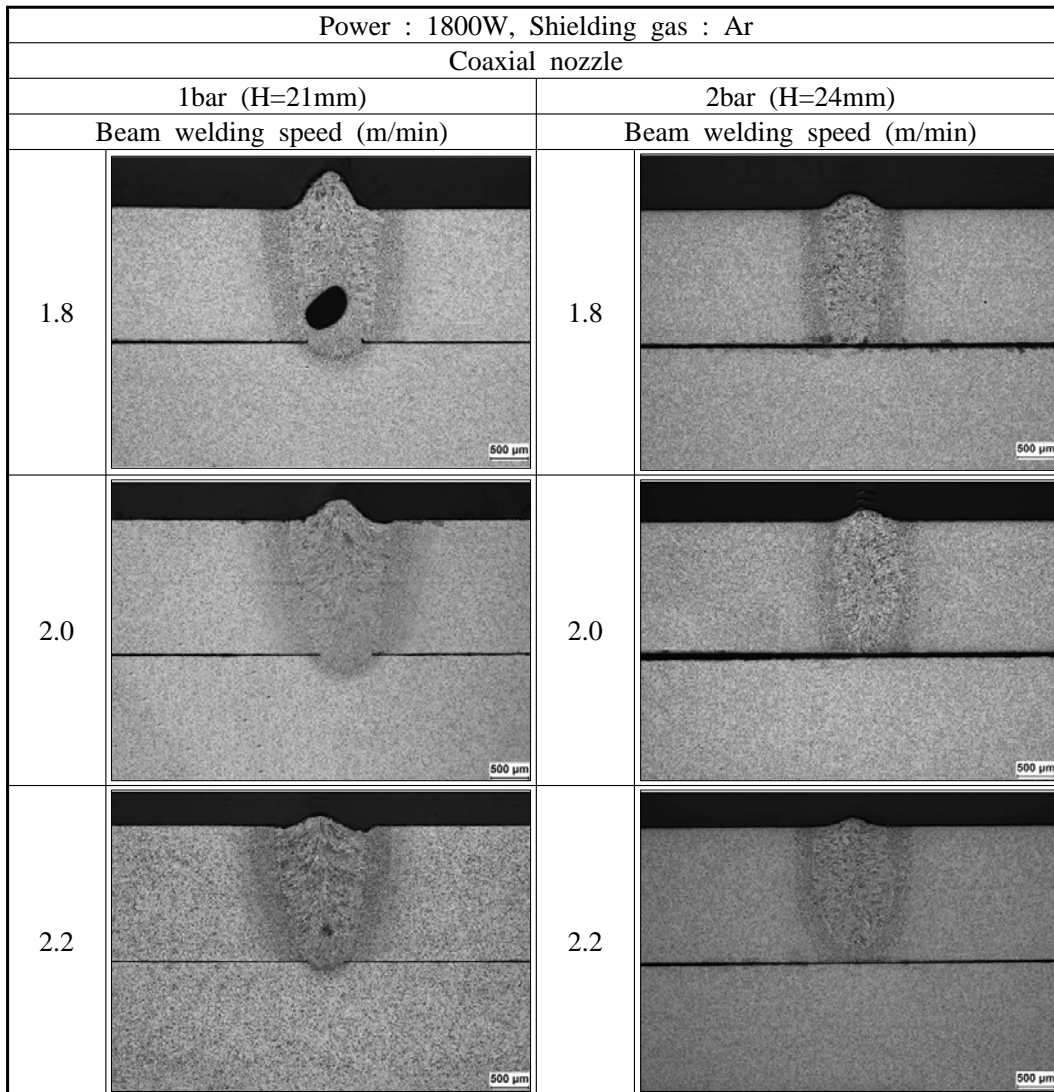


Fig. 4.24 Cross-section of welding zone after coaxial nozzle and beam welding speed

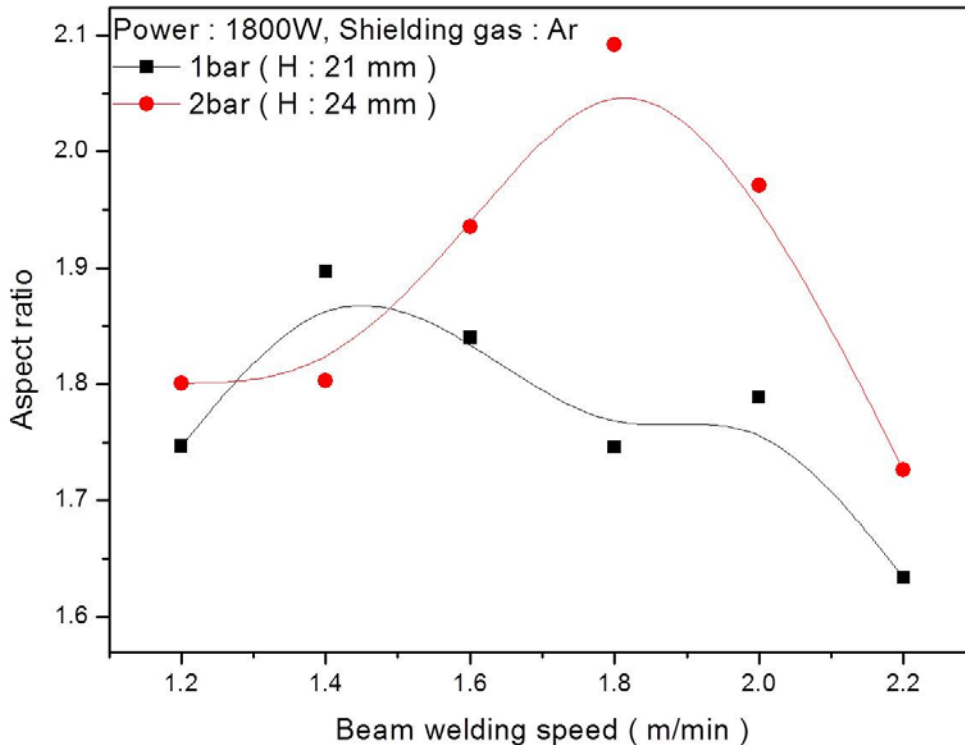


Fig. 4.25 Aspect ratio of coaxial nozzle and beam welding speed

동축노즐에서 분사하는 압력을 1bar와 2bar로 하여 레이저빔의 이송속도 변화에 따른 종횡비를 Fig. 4.25에 나타냈다. 동축노즐에서 분사하는 압력이 1bar일 경우 레이저빔의 이송속도가 증가하면 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 짧아져 입열량이 감소하기 때문에 용입깊이가 감소하고 종횡비도 감소하고 있다.

그러나 분사압력이 2bar일 경우 레이저빔의 이송속도가 1.8m/min까지는 종횡비가 증가한 다음 2.0m/min부터는 종횡비가 크게 감소하고 있다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 겹치기 용접할 때 아래 시편으로 용입이 진행되지 않기 때문에 종횡비가 감소한 것이다.

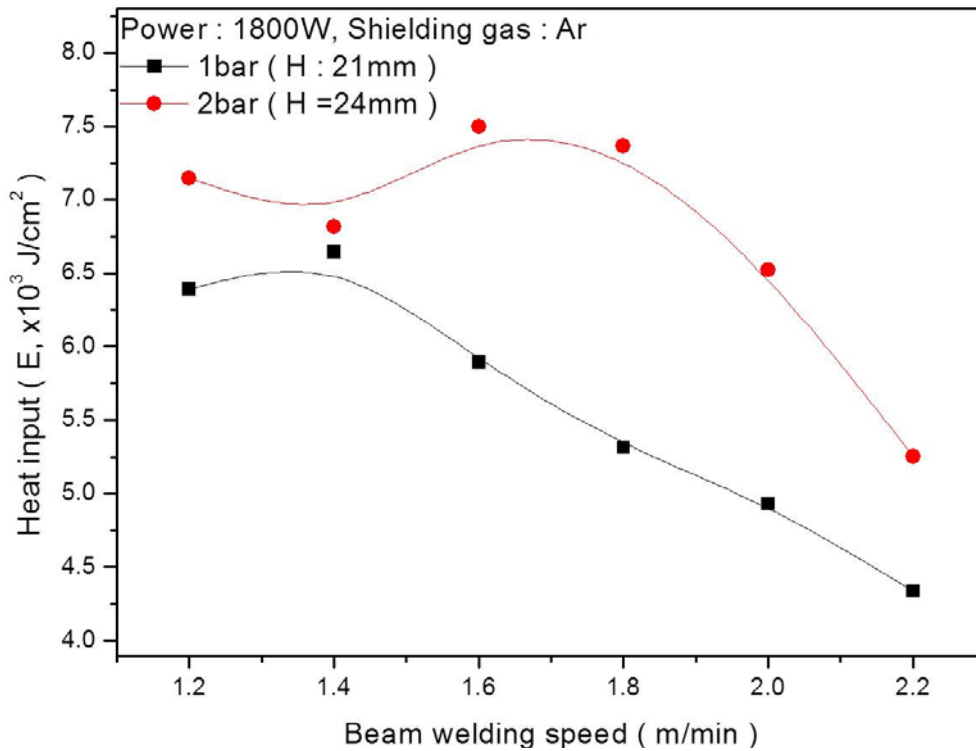


Fig. 4.26 Heat input of coaxial nozzle and beam welding speed

Fig. 4.26은 동축노즐에서 분사하는 압력을 1bar와 2bar로 하고 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 실험했을 때 입열량을 식(2)로 계산하여 나타냈다. 입열량을 계산하는 식(2)가 용접단면의 폭과 이송속도로 계산되기 때문에 시편과 동축노즐과의 높이가 큰 위치에서 2bar의 압력으로 분사하면서 실험했을 때 입열량이 크게 측정되었다. 이것은 레이저빔의 이송속도가 같을 경우 용접단면의 폭은 분사압력을 2bar로 하여 용접했을 때 폭이 더 작게 형성되었기 때문이다.

4.3 니켈도금 된 SS41의 겹치기 용접 특성

4.3.1 크로스노즐의 용접영향

니켈은 치밀한 금속상태에서 상온의 공기 또는 물에 침식되기 어려워, 보호막으로서 전기도금에 이용된다. 분말상태에서는 공기에 대한 반응성이 커서 자연발화하는 경우도 있다. 묽은 질산에는 쉽게 녹지만, 진한 질산에는 철과 같이 부동태를 만들기 때문에 녹지 않는다. 이와 같은 이유로 이차전지에 사용하는 극판이 전해질에 용해되지 않도록 극판과 극주를 Ni로 도금하여 사용하면 이차전지의 수명이 길어질 것이다. 그래서 본 연구에서는 이차전지의 극주로 사용하는 SS41시편 표면을 Ni도금하여 용접특성을 분석하고자 한다. 통상적으로 니켈은 고온 환경에서 우수한 내부식성을 가지고 있어서, 상온에서 가공성이 우수하기 때문에 일반적으로 Ni도금하여 각종 기계부품의 내부식성을 강화시킨다. 따라서 부피가 큰 기계부품의 내부식성 강화를 위해 Ni도금으로 표면개질을 한다.

위에서 언급한 것처럼 Ni을 시편에 도금했을 경우 많은 강점을 가지고 있기 때문에 Ni도금한 시편을 크로스노즐로 속도별 겹치기 용접하여 Fig. 4.27에 나타냈다. 앞 장에서 실험한 도금되지 않은 SS41겹치기 용접과 용접성을 비교하기 위해 동일 조건으로 실험을 실시하였다. 레이저 출력은 1800W로 하고 레이저빔의 이송속도를 1.2m/min에서 2.2m/min까지 변화시키면서 입열량을 조절하였다.







Power : 1800W, Shielding gas : Ar, 1bar			
Cross nozzle			
Beam welding speed (m/min)		Beam welding speed (m/min)	
1.2		1.8	
1.4		2.0	
1.6		2.2	

Fig. 4.27 Comparison of welding bead with beam welding speed

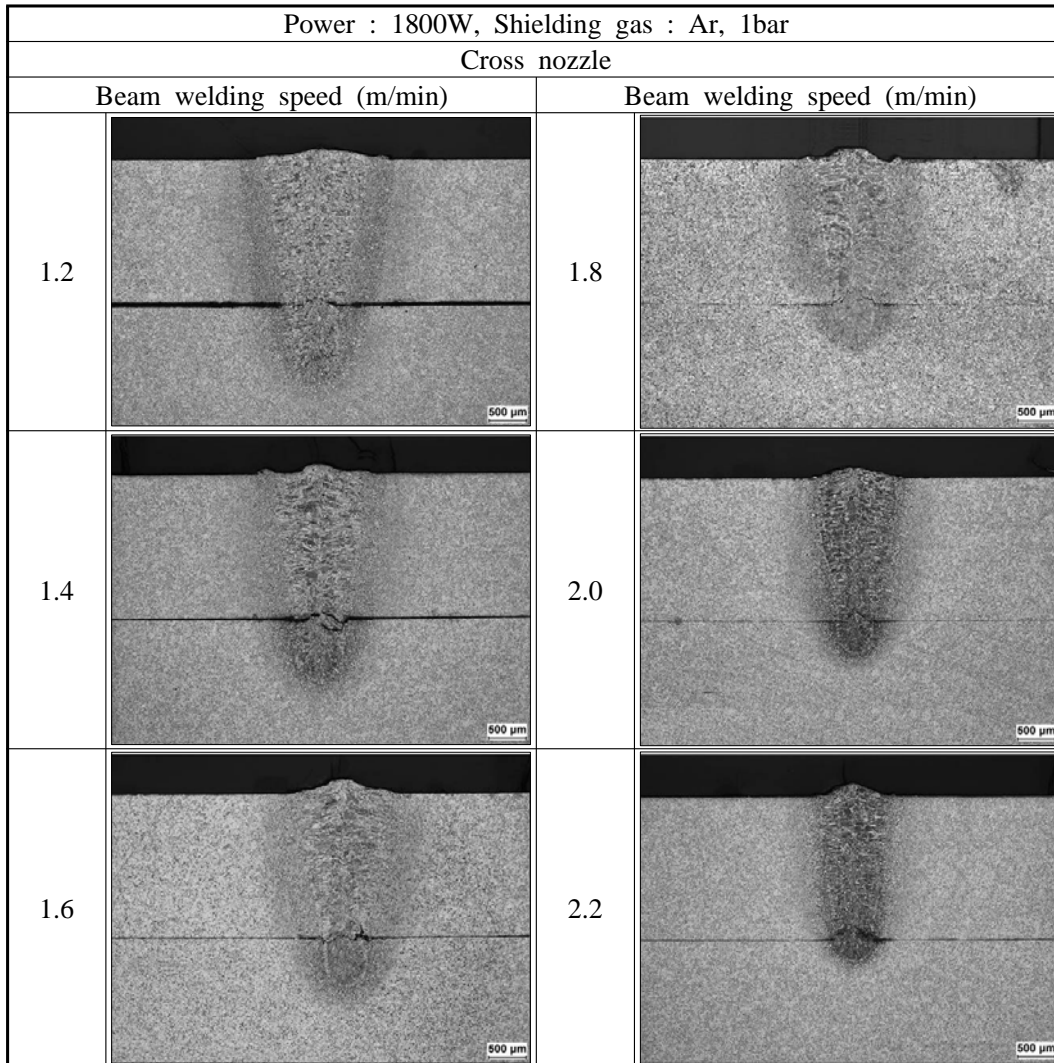


Fig. 4.28 Cross-section of welding zone after beam welding speed

Fig. 4.27에 나타낸 겹치기 용접 결과를 분석하기 위해 용접단면을 Fig. 4.28에 나타냈다. 도금하지 않고 겹치기 용접했을 때 차이는 있지만 용접단면에 기공이 많이 관찰되었는데, Ni로 도금하여 겹치기 용접하면 용접단면에 기공이 발견되지 않았다. 이는 SS41시편의 대부분을 차지하는 Mn의 경우 용융온도가 1246℃인데 도금층을 형성하는 Ni의 경우 용융온도가 1453℃로 Mn보다 고온의 Ni이 용융풀에 혼합되면서 용융풀에 형성된 기포를 키홀 외부로 분출시킬 수 있도록 용융풀의 유동상태를 유지하고 있기 때문이라고 판단한다. 이와 같은 현상이 가능한 이유는 Mn의 비

중은 7.43인데 비하여 Ni의 비중은 8.90이기 때문에 고온의 Ni성분이 중력의 영향으로 아래로 내려가면서 용융풀의 유동상태를 지속시키면서 기포를 외부로 분출할 수 있었을 것이라고 생각한다. 따라서 이차전지의 극주로 이용하고 있는 SS41의 재료에 Ni을 도금하면 내식성 향상뿐만 아니라 용접특성도 개선됨을 관찰하였다.

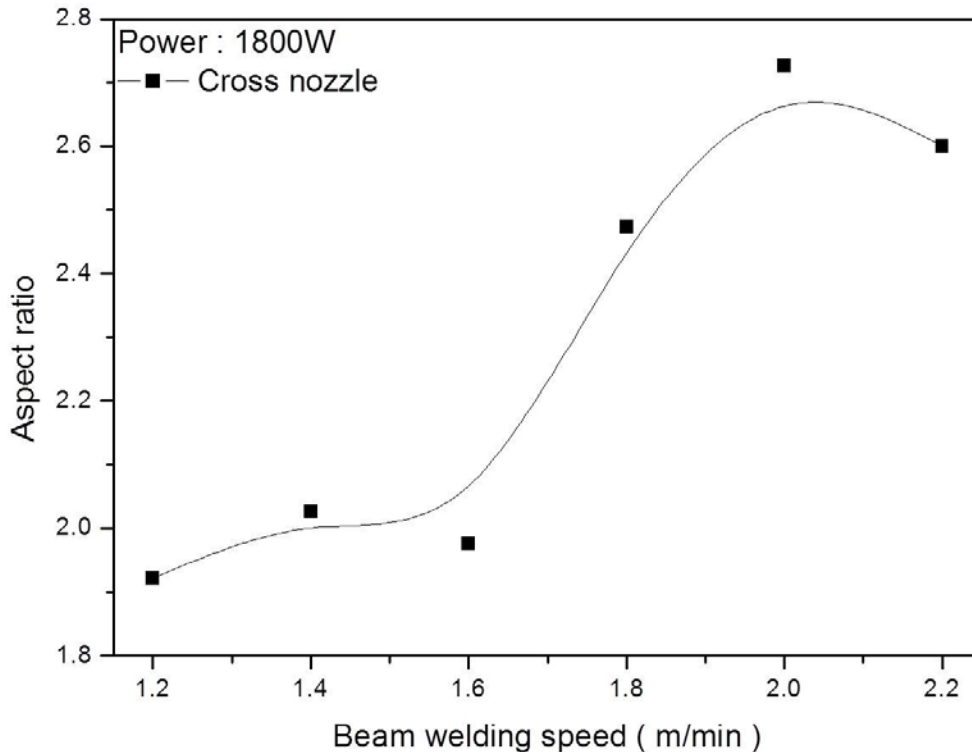


Fig. 4.29 Aspect ratio of cross nozzle and beam welding speed

Fig. 4.28의 Ni도금하여 접이기 용접단면을 나타낸 결과를 바탕으로 레이저빔의 이송속도의 변화에 대한 종횡비의 변화를 Fig. 4.29에 나타냈다. 레이저의 출력을 1800W로 하고 레이저빔의 이송속도를 1.2m/min에서 2.2m/min로 변화시키면서 입열량을 변화시켰을 때 종횡비의 변화를 나타낸 것이다. 레이저빔의 속도를 2.0m/min까지 증가시키면 레이저빔이 시편과 상호작용하는 시간이 줄어들면서 용접단면의 폭이 감소하지만 용입깊이의 변화가 상대적으로 작아 종횡비가 증가하고 있다. 이송속도가 2.2m/min에서는 레이저빔이 시편에 조사하는 시간이 상대적으로 더 작아져 용입깊이 감소로 종횡비 값은 감소하였다.

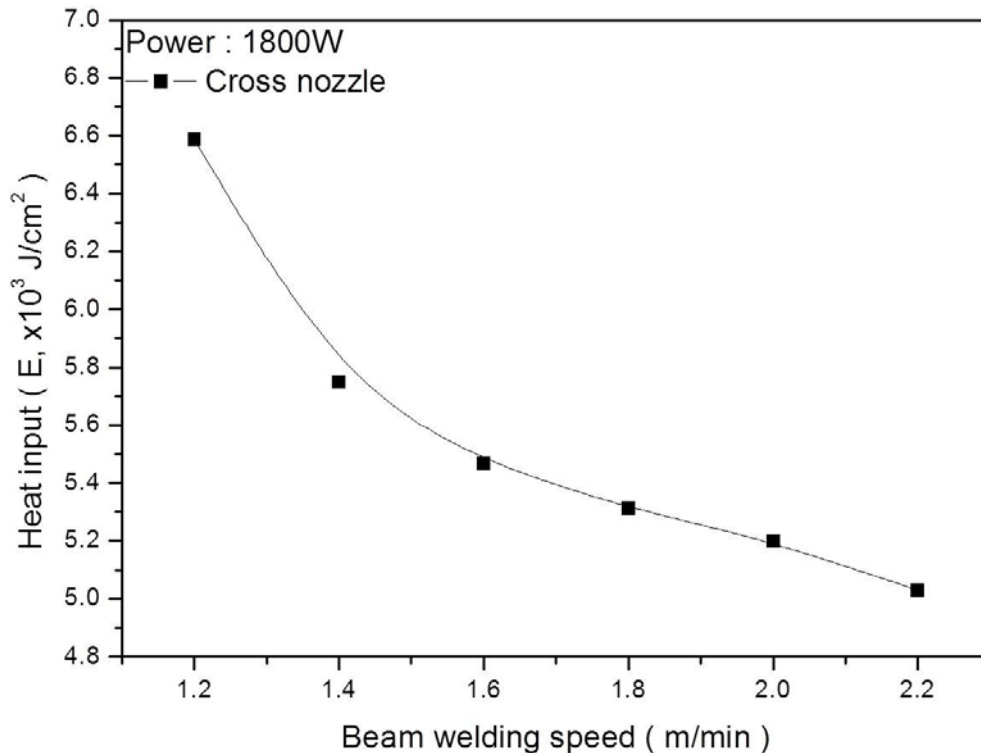


Fig. 4.30 Heat input of cross nozzle and beam welding speed

Fig. 4.30은 레이저 출력을 1800W로 하고 레이저빔의 이송속도와 용접단면의 변화에 따른 입열량을 나타낸 것이다. 일반적으로 이송속도가 증가하면 입열량은 감소하는 것이 레이저 용접의 특징 중 하나이다. 그러나 Ni을 표면에 도금한 후 용접을 하면 SS41의 주성분인 Mn의 열전도율이 300K일 때 $7.81 W/(m \cdot K)$ 인데 비하여 Ni의 열전도율은 $90.9 W/(m \cdot K)$ 이기 때문에 레이저빔의 이송속도가 증가할지라도 입열량의 변화가 크지 않게 나타났다.

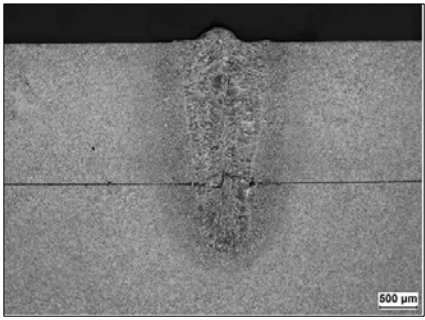
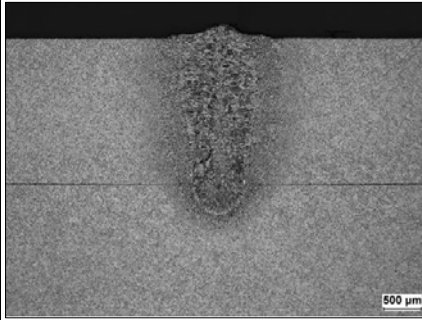
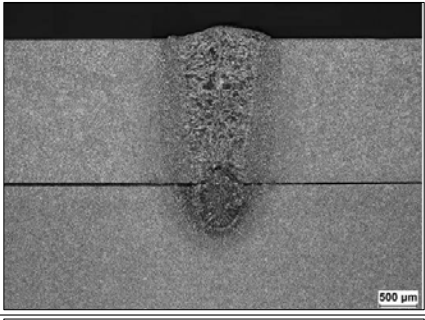
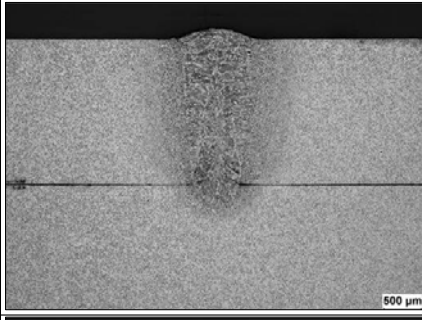
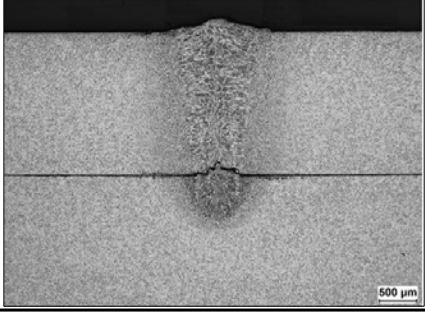
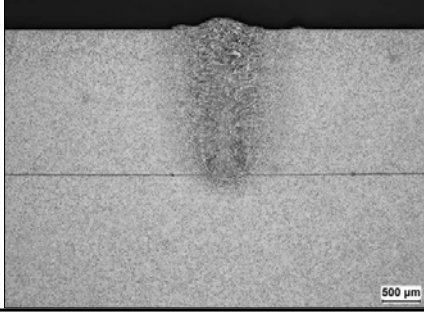
4.3.2 동축노즐의 용접영향

노즐타입별로 용접성을 관찰하고자 앞 장에서 크로스노즐로 실험한 동일한 공정 조건으로 동축노즐을 사용해서 보호가스를 분사하면 겹치기 용접을 실시하였다. 동축노즐을 이용한 SS41겹치기 용접 결과에서는 용접단면에서 기공이 많이 관찰되었다. 이에 SS41의 표면을 Ni로 도금한 후 겹치기 용접했을 때 용접특성을 분석하기 위해 실험결과를 Fig. 4.31에 나타냈다. 앞 절에서 실험한 용접조건과 동일하게 레이저빔의 출력은 1800W, 보호가스 압력은 1bar와 2bar로 하고 동축노즐과 시편과의 사이는 거리는 압력별로 각각 21mm와 24mm로 고정하였고, 레이저빔의 이송속도를 1.2m/min에서 2.2m/min로 변화시키면서 입열량을 변화시켰다. Ni을 도금하지 않고 용접한 실험결과를 나타낸 Fig. 4.15와 비교하면 용접단면이 양호하게 형성되어 있음을 관찰할 수 있다.

Power : 1800W, Shielding gas : Ar Coaxial nozzle		Power : 1800W, Shielding gas : Ar Coaxial nozzle	
Beam Welding Speed (m/min)	1bar (H=21mm)	Beam Welding Speed (m/min)	2bar (H=24mm)
1.2		1.2	
1.4		1.4	
1.6		1.6	
1.8		1.8	
2.0		2.0	
2.2		2.2	

Fig. 4.31 Comparison of welding bead with coaxial nozzle and beam welding speed,
(Welding bead with shielding gas pressure; A:1bar, B:2bar)

Fig. 4.31에 나타낸 겹치기 용접단면을 관찰하기 위해 Fig. 4.32에 용접단면을 나타냈다. Ni도금하지 않고 겹치기 용접했을 때 용접단면에 기공이 많이 발견되었던 Fig. 4.24의 결과와는 다르게 전체적으로 기공은 발견되지 않았다. 이는 앞에서 설명한 것처럼 비중이 8.90이고 용융온도가 1455℃인 Ni성분이 비중이 7.43이고 용융온도가 1245℃인 Mn보다 용융풀을 중력의 작용으로 침하하면서 용융풀의 유동시간을 길게 하고 기포가 용융풀 외부로 분출되어 기포가 없어진 것으로 생각된다.

Power : 1800W, Shielding gas : Ar			
Coaxial nozzle			
1bar (H=21mm)		2bar (H=24mm)	
Beam welding speed (m/min)		Beam welding speed (m/min)	
1.2		1.2	
1.4		1.4	
1.6		1.6	

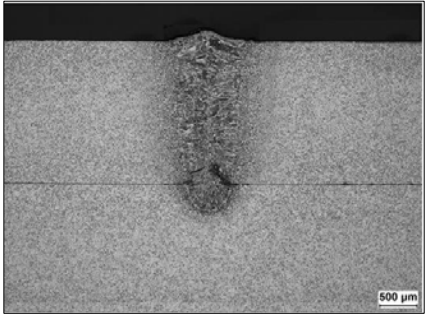
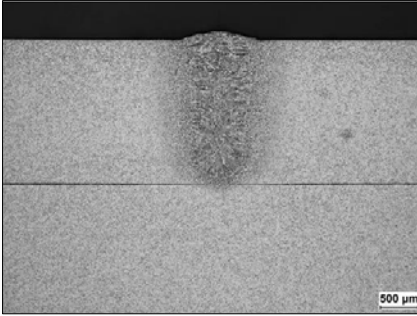
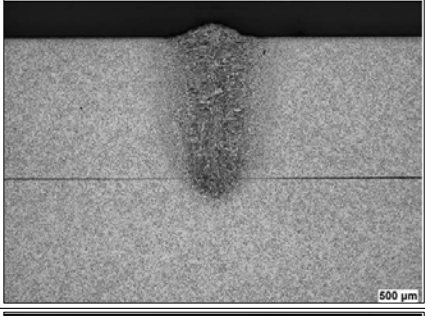
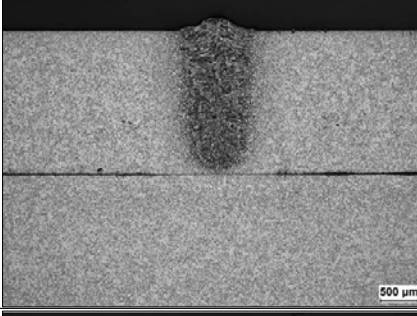
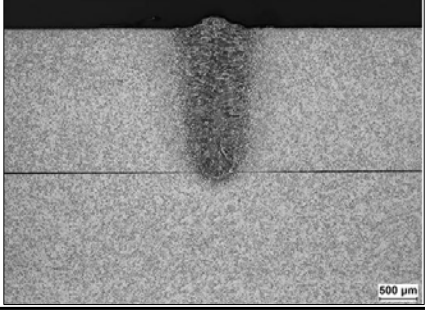
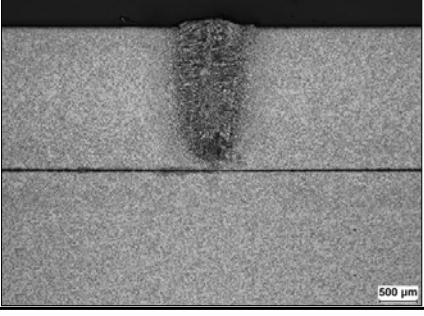
Power : 1800W, Shielding gas : Ar			
Coaxial nozzle			
1bar (H=21mm)		2bar (H=24mm)	
Beam welding speed (m/min)		Beam welding speed (m/min)	
1.8		1.8	
2.0		2.0	
2.2		2.2	

Fig. 4.32 Cross-section of welding zone after coaxial nozzle and beam welding speed

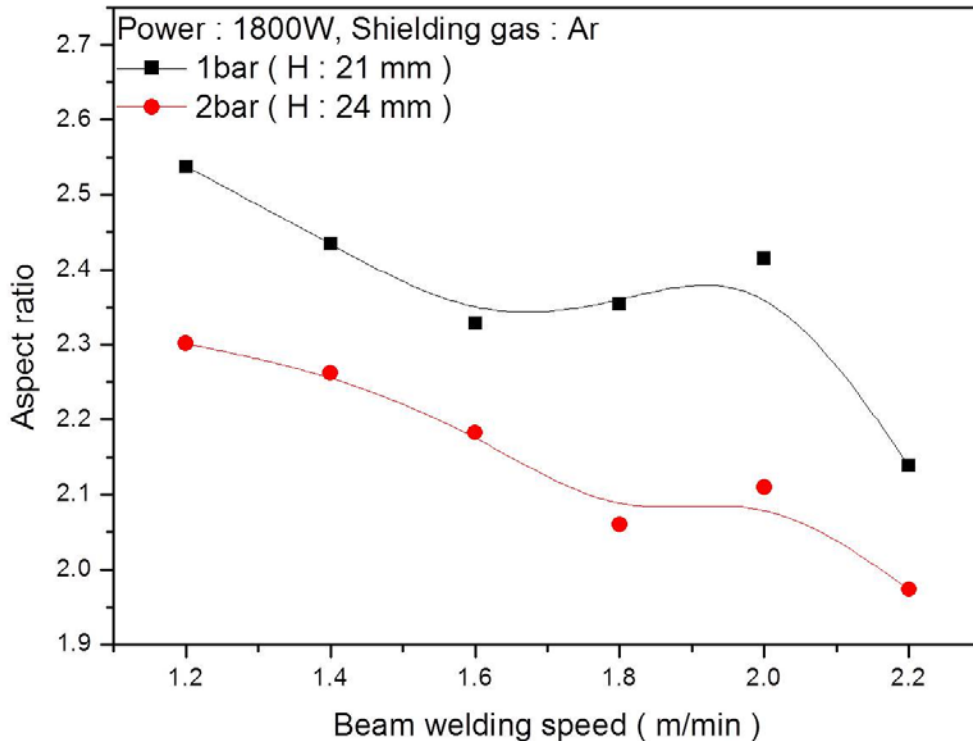


Fig. 4.33 Aspect ratio of coaxial nozzle and beam welding speed

Fig. 4.32에 나타낸 용접단면을 기준으로 레이저빔의 이송속도 변화에 따른 종횡비의 변화를 Fig. 4.33에 나타냈다. Ni의 열전도율이 Mn에 비해 약 11.64배 높기 때문에 Ni도금하면 레이저빔의 이송속도에 따라 용접단면의 폭이 민감하게 반응하는 것으로 판단한다. 그 결과 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 용입깊이 감소에 대해 용접단면의 폭이 조금씩 줄어들면서 종횡비가 감소하고 있다.

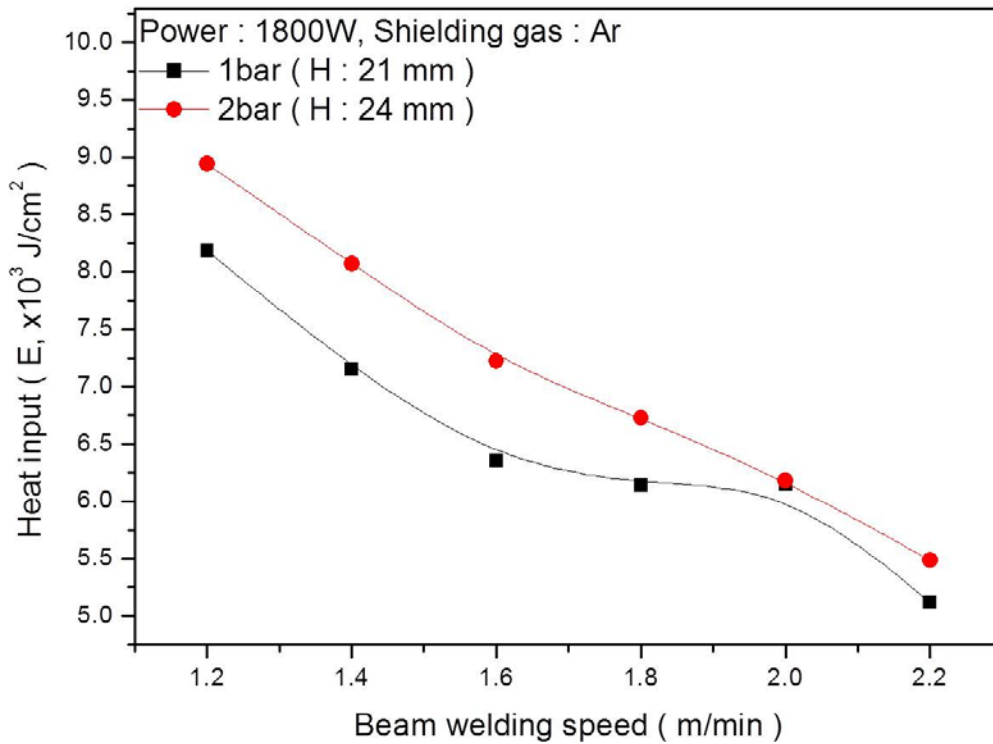


Fig. 4.34 Heat input of coaxial nozzle and beam welding speed

Fig. 4.34는 레이저빔의 이송속도에 따라 입열량을 Fig. 4.32의 실험결과를 기초로 하여 입열량을 계산하여 나타냈다. 출력이 일정할 때 입열량은 식(2)에 나타난 것처럼 레이저빔의 이송속도와 용접단면의 폭에 매우 밀접한 관계가 있다. Ni도금 했을 때의 입열량 그래프로서 Ni을 도금하지 않았을 때의 입열량 그래프 Fig. 4.26과 비교해보면 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 입열량이 감소하고 있어 이송속도 변화에 민감하게 반응하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Ni의 열전도율이 Mn에 비해 크기 때문에 용접단면의 폭 변화보다 레이저빔의 이송속도의 변화에 따라 입열량이 제어됨을 나타내고 있다.

4.4 노즐 형상별 T형상 용접 특성

이번 연구의 주된 목적으로 극주 SS41 2mm시편 아래에 $30\mu\text{m}$ 로 구성된 탭 40장을 수직으로 세워 T형상으로 레이저 용접하였다. 앞 절에서 언급한 최적의 공정조건을 선택하여 크로스노즐과 동축노즐을 사용하여 용접특성을 비교하였다. 2mm의 극주는 저탄소강 SS41과 Ni도금된 SS41이다. Fig. 4.35는 산업현장에서 사용하고 있는 Argon TIG용접결과와 본 연구에서 레이저로 용접한 결과를 나타내고 있다. 레이저 용접 시 선택한 최적의 공정조건은 출력은 1800W, 이송속도는 1.8m/min으로 하였다. 기존의 Argon TIG용접은 원활한 용접을 위해 탭이 극주 틈에 끼워지도록 가공하여 용접하고 있다. 때문에 용접단면이 크고 불균일하며 용접비드가 크게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 반면에 레이저 용접을 하면 극주 가공이 불필요하고 용접비드도 균일하게 형성되어 있다. 특히 Argon TIG용접을 하면 용접단면의 날카로운 부분이 많아 이 부분에서 전류밀도가 집중되고 스파크가 발생할 수 있는데 레이저 용접은 스파크 발생으로 인한 불균일한 전류손실 발생을 억제할 수 있어 매우 우수한 특성을 나타내고 있다.



Fig. 4.35 Comparison of Argon TIG welding and laser welding

Fig. 4.36은 크로스노즐과 동축노즐을 사용해서 보호가스를 분사하면서 용접한 후 극주의 표면을 나타내었다. Ni도금을 했을 때와 도금하지 않았을 때를 비교해보면 앞 절에서 설명한 것처럼 Ni의 용융온도, 열전도도 때문에 비드폭이 약간 크게 형성되었다.

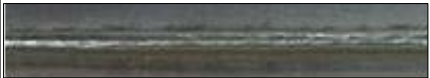



Power : 1800W, Beam welding speed : 1.8m/min, Shielding gas : Ar, 1bar			
Nozzle type			
Cross nozzle		Coaxial nozzle	
SS41		SS41	
Ni coated SS41		Ni coated SS41	

Fig. 4.36 Comparison of welding bead with nozzle type and beam welding speed

Fig. 4.37은 극주 아래에 박판 40장을 세워 T형상 용접한 후 용접단면을 나타내고 있다. Fig. 4.37에 나타낸 용접단면 아래에 세운 박판이 굴절된 이유는 일정한 간격으로 박판이 용접되었지만, 마운팅하는 과정에서 얇은 박판이 마운팅 압력에 의해 굴절되었기 때문이다. 그러나 전체적으로 극주에 박판 40장이 잘 용접되었음을 나타내고 있다.

특이한 사항은 저탄소강인 SS41을 Ni도금하지 않았을 경우에는 극주에 기공이 형성되었는데 Ni도금의 경우 극주에 기공은 포획되지 않고 있음을 관찰할 수 있다. Ni도금 하였을 때 용접단면에서 기공이 형성되지 않은 이유는 앞 절에서 충분히 설명하였기 때문에 본 절에서는 생략하였다.

다만 Ni을 도금하지 않고 T형상으로 용접하였을 때 극주 아래면에 있는 박판의 용융현상이 거의 발견되지 않았지만, Ni도금한 극주를 이용해 용접하였을 때는 Ni의 높은 용융온도와 비중의 영향을 받아 박판도 용융시키면서 용접되었다. 그리고 극주 표면은 동축노즐을 사용해서 분사시켰을 때 앞 절에서 설명한 것처럼 노즐 중심부의 유동장 분포와 주변부의 속도강도 차이에서 발생하는 현상 때문에 용접 표면에 불균일한 단면이 형성되어 있다.

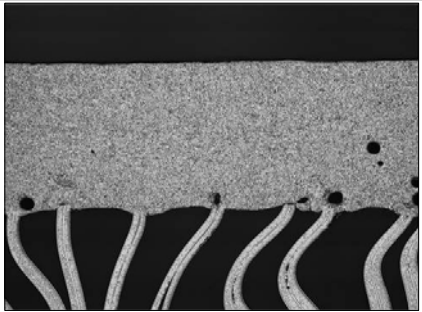
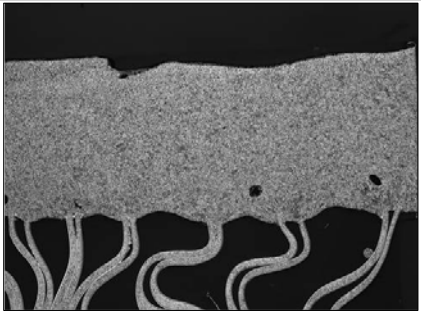
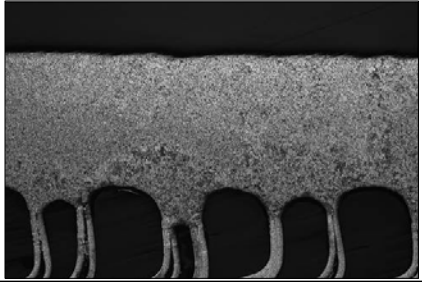
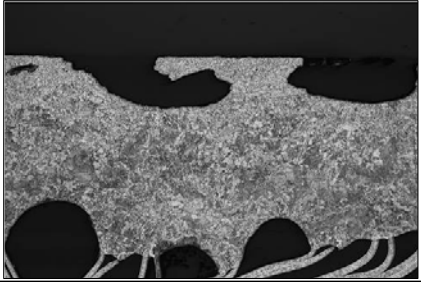
Power : 1800W, Beam welding speed : 1.8m/min, Shielding gas : Ar, 1bar			
Nozzle type			
Cross nozzle		Coaxial nozzle	
SS41		SS41	
Ni coated SS41		Ni coated SS41	

Fig. 4.37 Cross-section of welding zone with nozzle type

제5장 결 론

이번 연구는 저탄소강 SS41을 크로스노즐과 동축노즐을 사용해서 보호가스를 분사하며 용접했을 때 용접특성을 연구하였다. 크로스노즐과 동축노즐을 사용해서 용접할 때의 최적 공정변수를 결정하였고, Ni을 도금하여 극주와 탭을 T형상으로 용접했을 때 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 비드 온 플레이트 용접을 실시하였을 때, 시편 한 장이 완전용입될 때 출력밀도는 약 $0.095\sim 0.109\text{MW/cm}^2$ 값이었다.
2. 동축노즐을 이용해 보호가스를 분사하면서 용접하면 노즐의 3차원 유동특성 때문에 노즐의 높이변화에 따라 용접특성이 매우 민감하게 반응하고 있음을 확인하였다.
3. 동축노즐과 크로스노즐을 이용해 용접한 결과를 비교하면 동축노즐을 사용했을 때 크로스노즐 보다 용접단면에 기공을 포획되고 있어 동축노즐을 사용해서 용접할 때는 신중하게 결정해야 함을 확인하였다.
4. 저탄소강 레이저 용접 시 용접단면에 기포가 포획되는 현상은 Ni을 도금하여 제어할 수 있음을 고찰하였다.

Reference

- [1] Hassan, E. H., 2005, Advanced machining process, McGraw-Hill, New York.
- [2] 김환태, 2003, viewed 8 October 2012, “고밀도 에너지를 이용하는 정밀 용접공정의 기술동향,” <<http://www.kisti.re.kr>>
- [3] 조영희, 2005, viewed 8 October 2012, “Laser-arc 하이브리드 용접기술의 응용과 발전동향,” <<http://www.kisti.re.kr>>
- [4] 박찬진 외 14명, “금형기술시장동향분석 보고서,” 산업자원부, 2005.
- [5] Johnson, J. L. and Leone, F. C., 1977, Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences, John Willey & Sons, New York, 2nd ed.
- [6] 김환태, 2004, viewed 8 October 2012, “첨단 레이저 정밀가공 기술현황 및 과제,” <www.reseat.re.kr>
- [7] 박장선, 2009, viewed 8 October 2012, “레이저 가공기술 동향,” <www.reseat.re.kr>
- [8] Hoon, M. Y. and Seoung, B. W., “Technical reports : Surface hardening technology for Die materials,” Journal of the Korean Society for Heat treatment, Vol. 14, pp. 42-48, 2001.
- [9] Henderson, M. B., Arrell, D., Heobel, M., Larsson, R. and Marchant, G., “Nickel-Based superalloy welding practices for industrial Gas turbine Applications,” Science and technology of welding and joining, Vol. 9, No. 1, pp. 13-21, 2004.
- [10] NDSL, 2012, viewed 8 October 2012, “중국의 전기자동차 산업화 전망 분석,” <<http://radar.ndsl.kr/radDetail.do?cn=GTB2012060750>>

- [11] 권영일 외 36명, “미래기술 정보 탐색 및 분석 보고서,” 교육과학기술부, 2009.
- [12] 여인국 외 8명, “산업원천기술로드맵의 ‘자동차’ 최종보고서,” 지식경제부, 2009.
- [13] KISTI, 2011, viewed 8 October 2012, “일본, 다양한 분야에 응용 전개되는 레이저 가공기와 가공 기술 동향,” <<http://www.nikkan.co.jp/adv/gyoukai/2011/110112c.html>>
- [14] NDSL, 2012, viewed 15 October 2012, “세계 자동차용 부품 시장 조사,” <<http://radar.ndsl.kr/radDetail.do?cn=GTB2012100117>>
- [15] 양병태, 2006, viewed 8 October 2012, “레이저 가공기술동향,” <<http://www.kisti.re.kr>>
- [16] Lee, B. J., 2010, A Study on Development of Aluminum Fuel Filler Neck by Laser Welding, A master’s thesis, Ulsan University, Republic of Korea.
- [17] Orazio, S. and Hanna, D. C., “Principles of Lasers,” Plenum Press, 1998.
- [18] Kuhn, K. J., “Laser Engineering,” Prentice-Hall, 1997.
- [19] 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.
- [20] 남시도, 2004, viewed 8 October 2012, “레이저 가공기술의 최근동향과 적용 사례,” <www.reseat.re.kr>
- [21] Walter, K., “Solid-state Laser Engineering,” Springer Verlag, 2007.
- [22] Kanaoka, M., 2000, 레이저 가공기술, 한국산업정보센터.
- [23] John, F. R., “Industrial Applications of Lasers,” Academic Press, pp. 316, 1997.

- [24] Lee, J. H., 1996, A Study of the Welding between Low Carbon Steel and Martensitic Stainless Steel by CO₂ Laser Beam, A master's thesis, Yonsei University, Republic of Korea.
- [25] Eroglu, M., Aksoy, M. and Orhan, N., "Effect of coarse initial grain size on microstructure and mechanical properties of weld metal and HAZ fo a low carbon steel," Material Science and Engineering, Vol. A269, pp. 59-66, 1999.
- [26] Katayama, S., Yoshida, D., Yokoya, S. and Matsunawa, A., "Development of Tornado Nozzle for Reduction in Porosity during Laser Welding of Aluminum Alloy," ICALEO 2001, pp. 15-18, 2001.
- [27] Ahn, S. H., Jeong, J. H. and Nam, K. W., "Evaluation of Characteristic for SS400 and STS304 steel by Weld Thermal Cycle Simulation," The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 19, No. 6, pp. 64-71, 2005.
- [28] Miles, M. P., Pew, J., Nelson, T. W. and Li, M., "Comparison of formability of friction stir welded and laser welded dual phase 590 steel sheets," Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 11, No. 4, pp. 384-388, 2006.
- [29] Ueji, R., Fujii, H., Cui, L., Nishioka, A., Kunishige, k. and Nogi, K., "Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process," Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties Microstructure and Processing, Vol. 423, No. 1-2, pp. 64-71, 2006.
- [30] Gural, A., Bostan, B. and Ozdemir, A. T., "Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel," Materials & Design, Vol. 28, No. 3, pp. 897-903, 2007.
- [31] Oh, Y. S., Yoo, Y. T. and Shin, H. J., "A Study on T-Joint Welding by High Power Fiber Laser of SAPH Steel Plate for Automobile," The Korean Society of

Automotive Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 35-44, 2009.

- [32] Gharibshahiyan, E., Raouf, A. H., Parvin, N. and Rahimian, M., “The effect of microstructure on hardness and toughness of low carbon welded steel using inert gas welding,” *Materials & Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2042-2048, 2011.
- [33] Ruggiero, A., Tricarico, L., Olabi, A. G. and Benyounis, K. Y., “Weld-bead profile and costs optimisation of the CO₂ dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI316,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 43, pp. 82-90, 2011.
- [34] Torkamany, M. J., Sabbaghzadeh, J. and Hamed, M. J., “Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels,” *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 666-672, 2012.
- [35] Zhao, Y., Zhang, Y., Hu, Wei. and Lai, X., “Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology,” *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 50 pp. 1267-1273, 2012.
- [36] Yang, Y. S., Hwang, C. Y. and Yoo, Y. T., “T-joint Welding Characteristics of Multi-thin Plate Dissimilar Thickness of SS41 of Automobile Battery by using Nd:YAG Laser,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 10, pp. 1078-1088, 2012.
- [37] 김도훈, 2009, 레이저가공학, 경문사.
- [38] Rowe, M. D., Nelson, T. W. and Lippold, J. C., “Hydrogen-induced cracking along the fusion boundary of dissimilar metal welds,” *Supplement to the welding Journal-Welding Research*, pp. 31-37, 1999.

- [39] 한봉희, 1997, 금속재료, 반도출판사.
- [40] Kang, J. I., 2005, Nd:YAG laser weldability of aluminum alloy, A master's thesis, Dongeui University, Republic of Korea.
- [41] Majumdar, J. D. and Manna, I., "Laser processing of materials," Sadhana : Printed in India, Vol. 28, pp. 495-562, 2003.
- [42] Kumar, N., Dash, S., Tyagi, A. K. and Raj B., "Hydrodynamical Phenomena during laser welding," Science and technology of welding and joining, Vol. 12, No. 540, pp. 66-67, 2007.
- [43] John, F. R., "LIA Handbook of Laser Materials processing," LIA, Magnolia Publishing Inc., pp. 223-262, 2001.
- [44] Kim, H. T., "Lasers Manufacturing Engineering," Kyungmoon Publishers, 2002.
- [45] Naver, n.d, viewed 10 October 2012, "일반구조용 압연강재," <<http://terms.naver.com/entry.nhn?cid=200000000&docId=1262983&mobile&categoryId=200000499>>
- [46] Lim, J. Y., Yun, M. J., Kim, T. H. and Kim, T. G., "A Study on the CO₂/MIG Welding of Mechanical Properties of General Structural Rolled Steel and Stainless Steel," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2011, pp. 43-47, 2011.
- [47] Dausinger, F., Beck, M. and Rudiaff, T., 1988, Laser in Manufacturing, Stuttgart, West Germany.
- [48] Arata, Y., 1986, Plasma, Electron and Laser Beam Technology, ASM.
- [49] Yoshiaki, A., 1986, Plasma Electron and Laser Beam Technology: Development

and Use in Materials Processing, ASM, pp. 407.

- [50] Cho, W. I., Na, S. J., Thomy, C. and Vollertsen, F., “Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 262-275, 2012.