



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](#)

2019년 2월

석사학위 논문

화력발전설비 리턴휠(Return
Wheel)의 이종재 SS400/SCM440에
대한 레이저-아크 하이브리드
용접기술 개발

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 성 훈

화력발전설비 리턴휠(Return
Wheel)의 이종재 SS400/SCM440에
대한 레이저-아크 하이브리드
용접기술 개발

Development of laser-arc hybrid welding
technology on dissimilar material SS400/SCM440 in
return wheel of thermal power generation plant

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 성 훈

화력발전설비 리턴휠(Return
Wheel)의 이종재 SS400/SCM440에
대한 레이저-아크 하이브리드
용접기술 개발

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 성 훈

김성훈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 특임교수 방한서 (인)
위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)
위 원 조선대학교 조교수 송국현 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내외 기술 동향	3
1.3 레이저-아크 하이브리드 용접 특징	6
1.4 SS400 및 SCM440 소재의 특징	10
2장. 연구 방법	11
2.1 실험방법	11
2.1.1 사용소재 및 용접법	11
2.1.2 용접조건 및 장비	14
2.2 용접부 기계적 및 금속학적 특성 평가	17
2.2.1 용접결함 품질 평가	17
2.2.2 기계적 성능 시험	20
2.2.3 미세조직 특성	21

3장 . 결과 및 고찰	22
3.1 용접결함 품질 평가	22
3.2 기계적 특성	26
3.3 미세조직 특성	32
4장 . 결론	34
참고문헌	35

List of Figures

Fig. 1.1 Return wheel of coal thermal power generation plant	2
Fig. 1.2 Application example of laser-arc hybrid welding	5
Fig. 1.3 Configuration of CO ₂ laser welding	6
Fig. 1.4 Schematic diagram of laser-arc hybrid welding	7
Fig. 1.5 Advantages of laser-arc hybrid welding	9
Fig. 2.1 Configuration of laser-arc hybrid welding	13
Fig. 2.2 CO ₂ laser-GMA hybrid welding system	14
Fig. 2.3 Dimension of tensile test specimen	20
Fig. 2.4 Universal testing machine	20
Fig. 2.5 Vickers hardness test equipment	21
Fig. 3.1 Tensile strength of laser-arc hybrid welds	28
Fig. 3.2 Hardness measurement location of laser-arc hybrid welds	30

List of Table

Table. 1.1 Advantages of laser-arc hybrid welding	8
Table. 1.2 The chemical composition of KS D 3503 SS400 (Wt%)	10
Table. 1.3 The chemical composition of KS D 3867 SCM440 (Wt%)	10
Table. 2.1 The mechanical properties of SS400 and SCM440	12
Table. 2.2 The chemical composition and the mechanical properties in K-71T (Wt%)	12
Table. 2.3 Welding conditions used in experiments	16
Table. 2.4 EN ISO 5817 quality levels for imperfections	18
Table. 2.5 EN ISO 5817 quality levels for imperfections(Stringent B)	19
Table. 3.1 Bead appearance of the laser-arc hybrid welds	23
Table. 3.2 Cross section of the laser-arc hybrid welds	24
Table. 3.3 Results of quality evaluation on laser-arc hybrid welds by ISO 13919-1	25
Table. 3.4 S-S curve and fractured specimen after tensile test	27
Table. 3.5 Vickers hardness distribution of laser-arc hybrid welds	31
Table. 3.6 Microstructure of laser-Arc hybrid welds	33

ABSTRACT

Development of laser-arc hybrid welding technology on dissimilar material SS400/SCM440 in return wheel of thermal power generation plant

Kim, Sung-Hun

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

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Coal-fired thermal power plants are made of materials that are superior in corrosion resistance and heat resistance due to high capacity of power plants, high temperature and high pressure of steam conditions, and high efficiency due to the combined cycle system, and the application of dissimilar materials made by mixing these materials is expanding. The return wheel, which is a component of coal-fired power generation plant, is produced by applying flux cored arc welding, which is advantageous for cost reduction and welding automation, to dissimilar materials of mechanical structural alloy steel and general structural alloy steel, which are excellent in abrasion resistance and toughness. However, it is required to secure the reliability of the welded part due to the occurrence of welding defects such as pores and cracks in the welded metal part and the heat affected part of the arc welding when producing the heterogeneous return wheel.

In this study, laser-arc hybrid welding was applied to heterogeneous materials (SCM440 / SS400). Laser power, feed rate, laser-arc distance, arc current and voltage were selected as main process variables and mechanical and metallurgical characteristics were evaluated according to process variables. Tensile tests and hardness tests were carried out, weld quality was evaluated according to international standards, and metallurgical properties were confirmed by optical microscope.

From a result of the tensile test of the welded joints, it was confirmed that the tensile strength increases and the elongation rate increases as the welding speed is fast and the laser power is high. Especially, the maximum tensile strength of 424MPa and the SS400 base material under the condition of laser output 12kW welding speed 2m / min (#9) showed ductile fracture and elongation of 24.5%. #5, #6 and #8 showed a low elongation of 2.7 ~ 8.5%, which is considered to have affected the elongation due to the low elongation and high hardness.

From a result of the hardness test of the welded joints, the hardness value was slightly lower at the bottom of the weld, and the maximum hardness value occurred at the heat affected zone of SCM. It is considered that the structure of acicular shape was formed at the SCM heat affected part and showed high hardness value.

From a result of observation of the microstructure of the welded joints, the arc zone was affected by the laser and the arc heat source at the same time, resulting in a relatively coarse columnar crystal due to high heat input per unit area. On the other hand, as the heat source of the arc has almost no effect on the laser zone, the microstructure of the equiaxed dendrite is observed due to the rapid cooling rate compared with the arc zone due to the influence of the heat source of the laser.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

화력발전설비는 철제 용기 내에서 수관내의 물을 유연탄의 연소열을 가하여 고온, 고압의 증기로 만드는 보일러와 이 증기가 가진 열에너지를 회전에너지로 바꾸는 터빈, 회전에너지를 커플링을 통해 전달받아 전기에너지로 바꾸는 발전기 등으로 구성되어있다. 최근에는 발전소의 대용량화, 증기조건의 고온고압화, Combined Cycle System에 의한 고효율화로 보다 내식성 및 내열성이 우수한 재료가 채용되고 있다.[1]

Fig. 1.1에 나타낸 석탄 화력발전설비의 구성품인 리턴휠(Return Wheel)의 경우 설비에서 석탄을 끌어 올리는 역할을 하며 내마모성과 연성이 우수한 기계구조용 합금강 SCM440과 일반구조용 강 SS400 이종소재로 구성되어 있다. 그러나 이종재를 채용한 구조체의 경우 이종재 용접부에서 손상이 종종 발생되는데, 이는 주로 용접부의 용접결함과 이종재질간의 부식에 따른 강도저하로 인하여 발생한다. 따라서 설비의 신뢰성 확보, 유지보수비 절감 및 대형사고 방지를 위해서는 이러한 이종재 용접부에 대한 건전성 확보와 동시에 엄격한 품질 관리 및 보증이 필요하다. [2-4]

최근 레이저-아크 하이브리드 용접(Laser-Arc Hybrid Welding)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이 용접법은 기존 아크 용접에 비해 입열량이 적으므로 용접품질이 우수하고 용접속도가 4배 이상 빨라 고품질·고생산성인 용접법이다.

따라서 본 연구에서는 석탄 화력발전설비 구성품인 이종재 SCM440/SS400 리턴휠 제작에 있어서, 기존 아크용접시의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 레이저-아크 하이브리드 용접의 적용 가능성에 대해 연구하고자 한다.

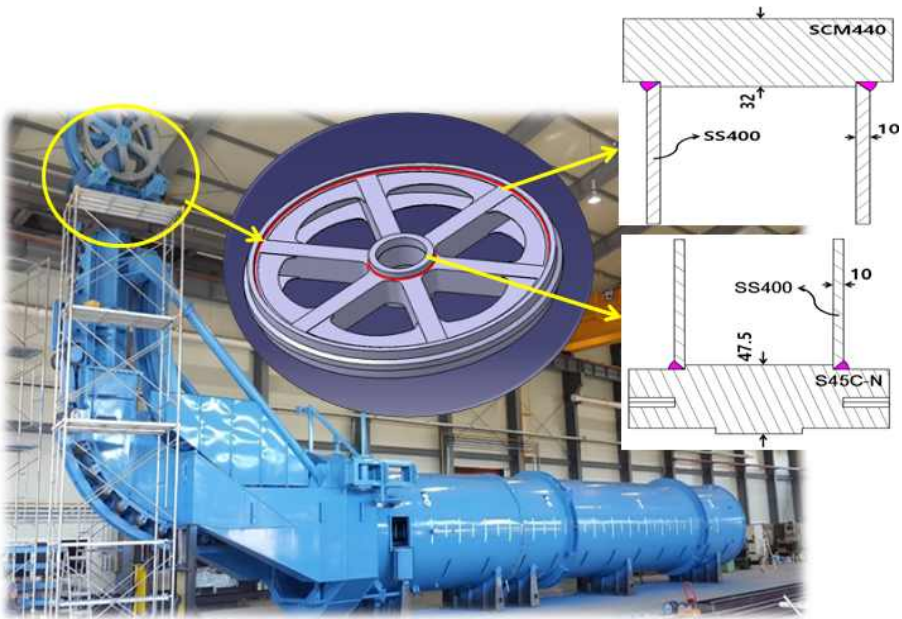


Fig. 1.1 Return wheel of coal thermal power generation plant

1.2 국내·외 기술 동향

레이저-아크 하이브리드 용접은 2000년대에 확립된 새로운 용접법으로 레이저 용접과 아크용접을 복합하여 두 용접법의 장점을 살리고 단점을 보완하여 저입열, 심용입, 고속성의 특징을 유지하면서 간격 여유도나 시공오차 여유도 등 시공성이 우수하여 가장 경제적인 용접법으로 정착되어 가고 있다.

레이저-아크 하이브리드 용접 기술개발연구 활동은 2006년 이후 세계적으로 활발하게 이루어지고 있으며, 관련 기술은 유럽, 미국, 일본에서 조선분야, 자동차 산업 분야에서 이미 실용화가 이루어지고 있다. 국내에서의 하이브리드 용접 연구는 세계적인 동향과 같이 2006년부터 비교적 활발하게 연구발표가 이루어지고 있으며, 연구 분야와 분야별 연구 건수의 비율은 조선용강, 도금강, 스테인리스강을 포함한 철강소재가 35%, 해석, 시뮬레이션 연구가 26%, 신공정 개발 연구가 15%, 알루미늄 합금에 관한 연구가 11% 순으로 나타났다. 본 연구과 관련된 이종소재 간의 레이저-아크 하이브리드 용접 연구는 전무한 현상에 있다. 또한 국내에서는 아직 실용화를 위한 검토단계에 있을 뿐, 이의 실용화에는 이르지 못하고 있는 실정이다.[5]

최근 발전소의 대용량화, 증기조건의 고온·고압화로 보다 내식성 및 내열성이 우수한 소재 채용 필요성이 요구되고 있으며 또한 가혹한 환경에서 장시간 사용되어야 하고 파손시에는 대형사고로 이어지므로 초기설계에서부터 제작에 이르기까지 엄격한 품질관리가 필요로 한다. 특히 구조적으로 취약한 용접부에 대해서는 다른 어떤 공정보다 더 엄격한 관리와 생산성을 향상시키는 것이 용접기술의 핵심이다. 현재 국내·외 화력발전설비 제작시 SAW와 SMAW, FCAW, Hot Wire GTAW 등도 적용되고 있으며 압력배관에는 GTAW, 비주력설비에는 CO₂용접 등이 채용되고 있다.[6]

본 연구의 이종재(SCM440/ SS400) 리턴휠의 용접 시 기존의 문제점으로는 열영향부 취화역에서 동적변형시효현상에 기인한 경도상승으로 인한 인성이 저하되므로 0.5%의 탄소강에서는 200℃의 높은 예열온도를 적용이 필요하며 기공을 방지하기

위해 탈산원소를 많이 함유하는 저수소계 용접봉 사용이 요구된다. 저온균열을 방지하기 위해서 구속응력을 완화시키고 강재의 예열 및 용접봉 건조 등을 통해 확산성 수소량을 최소화시켜야하며 특히 적절한 예열은 용접 후 냉각속도를 느리게 하여 마르텐사이트와 같은 경화성 조직의 생성을 억제하고 용접부 수소 확산도 촉진시켜 저온균열을 효과적으로 방지할 수 있다. [7-8]

또한 이종재의 경우 서로 다른 물성치로 인한 균열이 발생하므로 엄격한 품질 관리가 필요하며, 고온균열은 저용점 생성물 원소인 S, P등이 최종 응고되는 입계에 편석되어 잔존함으로써 입계연성이 저하하여 발생하므로 저수소계 용접재료의 적용, 용접입열의 제한, 구속조건의 완화를 통해 방지해야한다.[9]

따라서 본 연구에서는 이러한 근본적인 문제를 해결하기 위해서 빠른 용접속도와 입열량이 적고 고품질 용접을 얻을 수 있는 레이저-아크 하이브리드용접(Laser-Arc Hybrid Welding) 기술로 공정을 대체함으로써 기존 문제점을 개선하고자 한다.



Fig. 1.2 Application example of laser-arc hybrid welding

1.3 레이저-아크 하이브리드 용접

하이브리드 용접은 서로 다른 두 가지 이상의 용접공정을 결합하여 각 용접공정 간의 시너지 효과를 유도 및 극대화하여 용접하는 방법이다. 일반적으로 하이브리드 용접은 레이저와 아크를 결합시키는데, 그 가장 큰 이유로는 레이저 용접이 깊은 용입과 빠른 용접속도의 장점을 가지고 있지만 출력대비 비용이 너무 높고 자동화에 있어서 정확한 핏업(fit-up)을 요구하는 단점이 있는 반면에 아크용접은 값이 싸고 고출력을 낼 수 있으며 핏업 정도를 완화시키는 장점이 있어 용접부의 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있기 때문이다.[10]

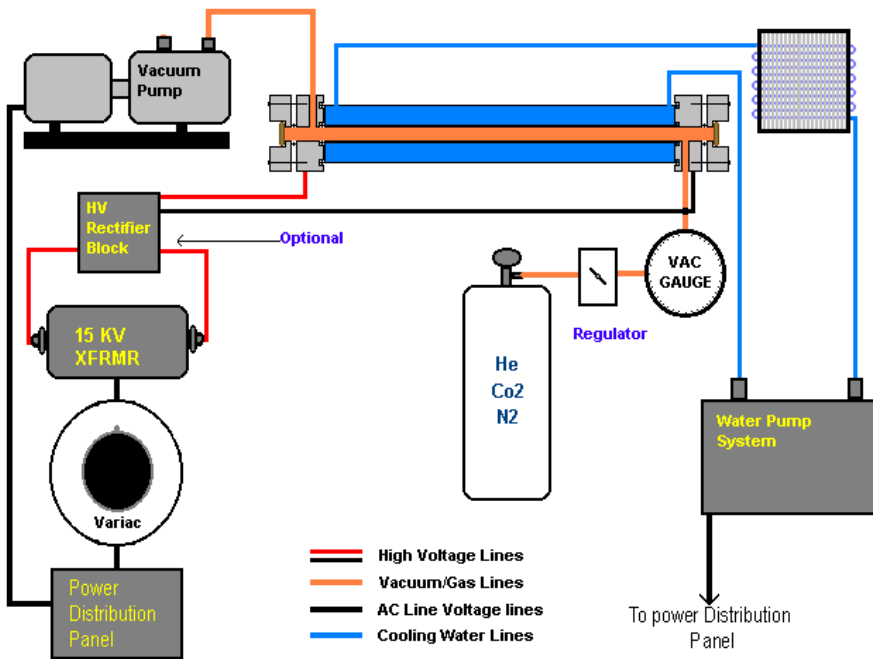


Fig. 1.3 Configuration of CO2 laser welding

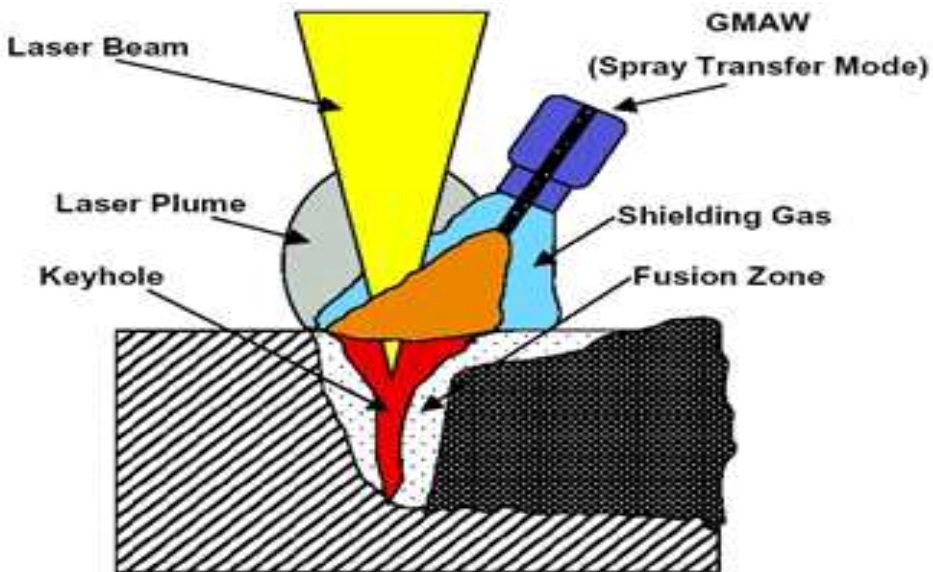


Fig. 1.4 Schematic diagram of laser-arc hybrid welding

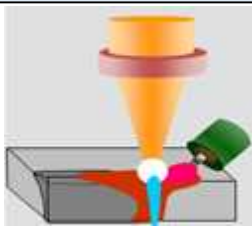
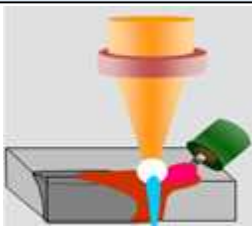
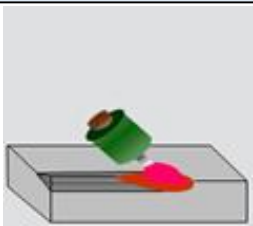
아크와 레이저 빔 간의 상호작용으로 빠른 용접속도와 깊은 용입, 레이저 단독 용접에 비해 갭 브리징 능력이 좋다. 또한 입열량이 적어 열영향부가 좁고 변형이 감소하여 사후 교정 필요시간을 단축 할 수 있다.[11]

레이저와 아크를 결합시키는 방법으로는 아크의 공정에 따라 크게 레이저-GMAW 하이브리드 용접 레이저-GTAW 하이브리드 용접, 레이저-PAW 하이브리드 용접으로 나눌 수 있다.

레이저와 아크를 결합시키는 방법으로는 각 공정의 역할에 따라서 다양한 구분이 있을 수 있는데 레이저가 주열원이 되고 아크가 선행하면서 예열효과를 나타나게 된다. 따라서 깊은 용입과 용접속도를 빠르게 할 수 있으며 아크가 주열원이면 레이저가 아크의 안정성을 높이는 보조수단으로 사용되는 경우이다. 아크에 의한 적절한 합금원소를 첨가하여 레이저 용접부에서 발생하는 용접부 경화현상을 완화시켜 충격치를 향상시키기 위한 목적이다.[12-13]

두 열원을 모두 주열원으로 이용하면서 열원의 상이한 열밀도를 이용하여 용접부에 나타나는 용접결함을 감소시키려는 목적으로 이용되며 레이저 용접의 깊은 용입 특성과 갭에 대한 레이저의 민감성을 아크로써 저하시키는 공정으로서 본 연구에서 언급하고 있는 하이브리드 용접공정이다.[14-15]

Table. 1.1 Advantages of laser-arc hybrid welding

	Laser-Arc Hybrid Welding	Laser Welding	Arc Welding
Item			
Efficiency	◎ : 깊은용입, 빠른속도	○	△
Weldability	○ : 갭 허용량	△	◎
Properties	◎: Filler wire	△	◎

◎ : Very good ○ : Good △ : Normal

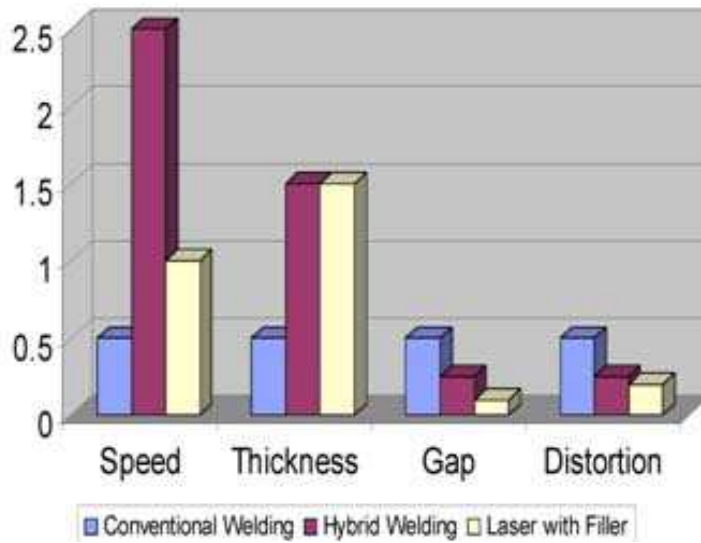


Fig. 1.5 Advantages of laser-arc hybrid welding

1.4 SS400 및 SCM440 소재의 특징

일반 구조용 압연 강재인 SS400은 탄소함량이 0.25%이하인 저탄소강으로 건조, 습기, 수중 어느 환경에서도 뛰어난 내마모 특성을 나타내는 강재이다. SS400은 용접성과 가공성 및 경제성 등으로 인해 주요부품을 제외한 건축용 자재, 자동차용, 선박용, 해양 구조물, 건축 교량용과 같은 기계 및 구조물의 보조 부재로 흔히 사용되고 있으며 그 활용도가 높은 강종이다.

기계 구조용 합금강 강재인 SCM440은 열간 압연, 열간 단조 등 열간 가공에 의해 만들어진 것으로, 보통 다시 단조, 절삭, 냉간 인발 등의 가공과 퀴칭 템퍼링, 노멀라이징, 침탄 퀴칭 등의 열처리를 하여 주로 기계구조용으로 사용되는 합금강 강재이다. 탄소함량이 0.38~0.43%인 Cr-Mo계 중탄소강으로 높은 강도와 좋은 고온 특성 및 부식저항성을 가진 강재이다. 또한 SCM440은 절삭 가공성과 열처리성, 고주파 표면경화 성질이 우수하다.

Table. 1.2 The chemical composition of SS400 (Wt%)

Composition Material	C	Si	Mn	P	S
SS400	≤ 0.25	≤ 0.45	≤ 1.40	≤ 0.050	≤ 0.050

Table. 1.3 The chemical composition of SCM440 (Wt%)

Composition Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440	0.38 ~ 0.43	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.85	≤ 0.03	≤ 0.03	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.30

제 2 장 연구 방법

2.1 실험방법

2.1.1 사용소재 및 용접법

본 연구에서는 이종재 SS400과 SCM440에 대하여 레이저-아크 하이브리드 용접 적용시 용접공정변수에 따른 용접특성을 고찰하고자 하였다.

사용한 강재는 일반 구조용 압연 강재인 SS400과 기계구조용 합금강 강재인 SCM440이며 화학적 조성은 Table. 2.1와 Table. 2.2, 기계적 물성은 Table. 2.3와 Table. 2.4에 각각 나타내었다. 실험에 사용된 와이어는 직경 1.2mm의 플렉스 코어드 와이어(K-71T)를 사용하였으며 사용한 와이어의 화학적 조성과 기계적 물성은 Table. 2.5와 Table. 2.6에 나타내었다.

시험편 제원은 SS400과 SCM440 길이 (L)=200mm, 폭(B)=150mm, 판두께 (t)=9mm로 시험편을 제작하였다. 용접은 갭이 없는 맞대기로 진행하였으며 레이저 초점은 모재 표면으로부터 2mm 내려간 지점으로 선정하였다. 아크 토치각도는 45도, 레이저 아크 간 거리는 3mm로 고정하여 실험을 진행하였으며 모식도는 Fig. 2.1에 나타내었다.

Table. 2.1 The mechanical properties of SS400 and SCM440

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SS400	297	425	28
SCM440	830	980	12

Table. 2.2 The chemical composition and the mechanical properties of K-71T(Wt%)

Chemical composition					
Composition Material	C	Si	Mn	Cr	Mo
K-71T	0.04	0.55	1.25	0.015	0.011
Mechanical properties					
Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)		Elongation (%)		
520	29		29		

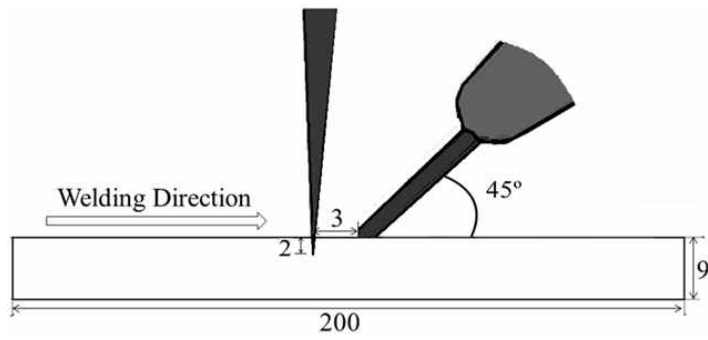
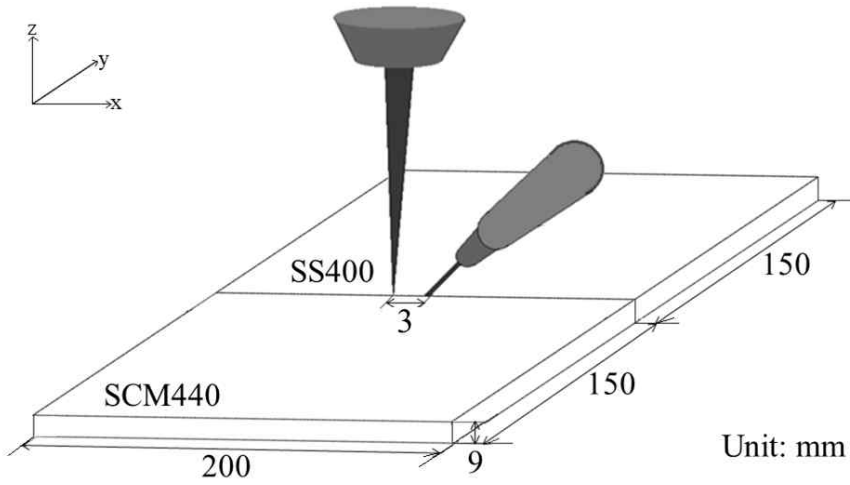


Fig. 2.1 Configuration of laser-arc hybrid welding

2.1.2 용접조건 및 장비

본 연구에서 사용된 CO2레이저 용접기는 독일 Trumpf社 12kW급 CO2 레이저이며, GMA 용접기는 국산 월드웰社의 500A급을 사용하였고 장비는 Fig. 2.2에 나타내었다.

하이브리드 용접헤드는 레이저 용접헤드와 동일한 축으로 회전을 할 수 있고 X와 Z 축은 마크로와 마이크로 조절의 2 중 구조로, Y 축은 마이크로 조절기능이 가능하며 X와 Z의 마크로 조절축은 1mm 단위의 정밀도를 가지고 있고 하부의 마이크로 조절축은 0.01mm 정밀도로 조절이 가능하다.

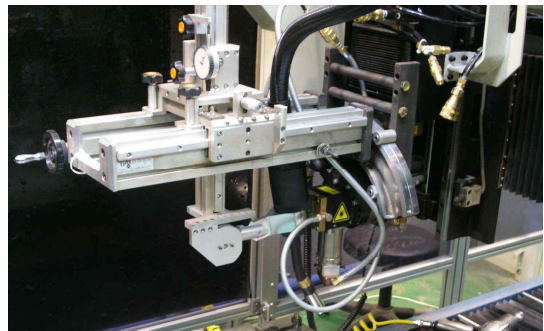


Fig. 2.2 CO2 Laser-GMA hybrid welding system

레이저-아크 하이브리드 용접의 용접변수로는 레이저 출력, 아크 용접전류, 아크 용접전압, 이송속도, 레이저 아크간 거리(DLA), 레이저 디포커싱, 와이어 돌출길이(CTWD), 와이어 직경, 레이저 조사각, 아크토치 각도, 선행방식, 보호가스 및 유량 등으로 많은 공정변수가 있어 최적의 용접조건을 설정하기가 매우 까다롭다.[16-17]

본 연구에서는 9mm의 이중소재 SCM440과 SS400에 대하여 I형 맞대기 용접을 갭이 없이 진행하였으며 깊은 용입 특성을 보이는 아크 선행방식을 채택하였다. 레이저 출력 및 이송속도만 변수로 두고 나머지 용접변수인 레이저 조사각 90도, 아크토치 각도 45도, 와이어 돌출길이 18mm, 레이저 디포커싱 -2mm, 레이저 아크간 거리 3mm, CTWD 18mm, 아크 용접전류 200A, 아크 용접전압 20V를 고정하였다. 보호가스는 He65% + Ar 32% + CO₂ 3% 혼합가스를 25l/min의 유량으로 공급하였으며 용접조건은 Table. 2.4에 나타내었다. 주요변수로 레이저 출력의 경우 10~12KW 조건과 이송속도의 경우 1~2m/min 조건에 대한 실험을 실시하였다.

Table. 2.4 Welding conditions used in experiments

Laser power(kW)	10, 11, 12
Travel speed(m/min)	1, 1.5, 2
Focal point(mm)	-2
Laser-Arc distance(mm)	3
Shielding gas	He 65%, Ar 32%, CO ₂ 3%
Shielding gas flow rate(L/min)	25
Contact tip to work distance(mm)	18
Laser head angle(deg.)	90
Torch angle(deg.)	45
Leading type	Arc leading
Electrode type	K-71T(flux cored wire)
Electrode diameter(mm)	1.2
Arc voltage(V)	20
Arc current(A)	200
Gap(mm)	0

2.2 용접부 기계적 및 금속학적 특성 평가

2.2.1 용접결함에 대한 품질 평가

레이저-아크 하이브리드 용접에서 표면비드, 이면비드 등에 대한 육안검사를 실시하였다. 주안점으로 표면 육안검사의 경우 이면비드의 유무와 표면비드의 처짐, 험핑비드 등을 확인하였다.

용접부의 단면 시험은 EN ISO 13919-1 용접-전자 빔 및 레이저 빔 용접이음-결함의 품질등급에 대한 지침 - 제1부 강에 의거하여 실시하였다. 레이저-아크 하이브리드 용접은 진행한 시험편에 대하여 용접선과 수직인 방향으로 절단하였으며 이를 연마, 부식시킨 후 용입깊이, 언더컷 유무, 선형 단차, 균열, 기공 등에 대하여 조사하였다. EN ISO 13919-1 규격은 Table. 2.5에 나타내었으며 각 검사항목 별 결함 허용 기준은 엄격 B를 적용하였고 이를 Table. 2.6에 나타내었다.[18]

Table. 2.5 EN ISO 5817 quality levels for imperfections

No	Imperfection, designation	Limits for imperfections for quality levels		
		moderate D	intermediate C	Stringent B
1	Incomplete penetration	$h_1 \leq 0.15s$ or 1mm, whichever is the smaller	not permitted	not permitted
2	Undercut	$h \leq 0.15t$ or 1mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.05t$ or 0.5mm, whichever is the smaller
3	Excess weld metal	$h \leq 0.2mm + 0.3t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.2t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.15t$ or 5mm, whichever is the smaller
4	Excessive penetration	$h \leq 0.2mm + 0.3t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.2t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.15t$ or 5mm, whichever is the smaller
5	Incompletely filled groove	$h \leq 0.3t$ or 1mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2t$ or 0.5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, whichever is the smaller
6	Porosity and gas pores	l or $h \leq 0.5t$ or 5mm, whichever is the smaller	l or $h \leq 0.4t$ or 3mm, whichever is the smaller	l or $h \leq 0.3t$ or 2mm, whichever is the smaller
7	Linear misalignment	$h \leq 0.25t$ or 3mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.15t$ or 2mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 2mm, whichever is the smaller

Table. 2.6 EN ISO 5817 quality levels for imperfections(Stringent B)

Imperfection, designation	Limits for imperfections for quality levels
	Stringent B
Incomplete penetration	not permitted
Undercut	$h \leq 0.45\text{mm}$
Excess weld metal	$h \leq 1.55\text{mm}$
Excessive penetration	$h \leq 1.55\text{mm}$
Incompletely filled groove	$h \leq 0.5\text{mm}$
Porosity and gas pores	$h \leq 2\text{mm}$
Linear misalignment	$h \leq 0.9\text{mm}$

2.2.2 기계적 성능 시험

인장강도는 시험은 각각 ASTM E8M(Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)규격에 따라 Fig. 2.3과 같이 시험편을 제작하여 시험하였다.

인장시험에 사용된 장비는 Fig. 2.4의 일본 시마즈社의 UTM(Universal Testing Machine)이며, 인장시험 속도는 3mm/min으로 수행하였다.

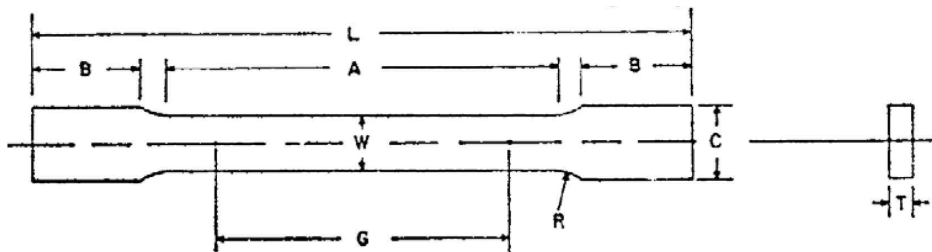


Fig. 2.3 Dimension of tensile test specimen



Fig. 2.4 Universal testing machine

경도시험은 Fig. 2.5의 AkAshy社의 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 0.5 kgf로 실시하였다. 경도 측정위치는 레이저-아크 하이브리드 용접부의 아크 영향을 주로 받는 용접부의 상부인 아크영역(27포인트)과 레이저 영향을 주로 받는 용접부 하부인 레이저 영역(17포인트)으로 나누어 측정하였다. 경도 측정 포인트 간 거리는 0.5mm, 유지시간은 10초로 하여 진행하였다.

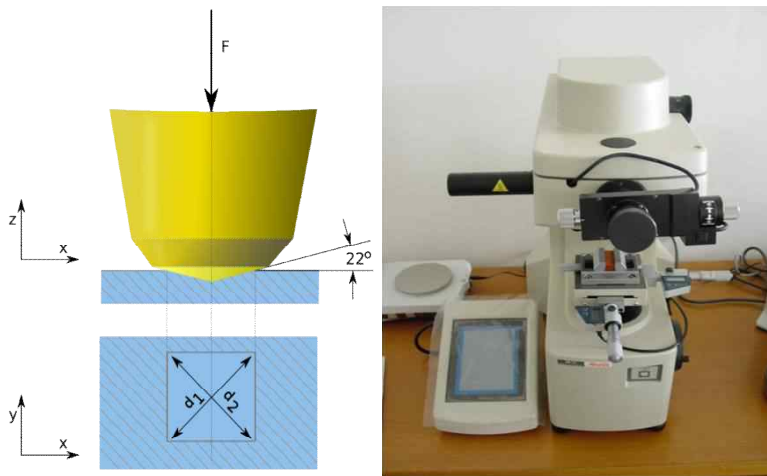


Fig. 2.5 Vickers hardness test equipment

2.2.3 미세조직 특성

용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 EN ISO 15614에 의거하여 시험편 절단을 실시하고 핫 마운팅, 미세연마를 실시하였다. 핫 마운팅을 실시하고 연마지를 사용하여 #400 ~ #4000 순서로 연마를 수행하고, 아울러 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m를 이용하여 미세연마를 수행하였다. 연마된 시험편은 나이탈 부식액으로 30~50초간 etching을 실시하였다. 나이탈 부식액은 질산 3%와 에탄올 97%의 비율을 사용하였다. 레이저-아크 하이브리드 용접부의 각 영역별(용접금속, 열영향부, 모재) 미세조직 특성을 고찰하고자 하였다.

3장. 결과 및 고찰

3.1 용접결함 품질 평가

Table. 3.1는 용접 공정변수 레이저 출력 10~12kW, 이송속도 1~2m/min 변화에 따른 각 용접 조건별 용접부 비드외관을 나타낸 것으로 고찰한 결과, 모든 용접조건에서 표면비드 처짐, 험핑비드(Humping bead)가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

Table. 3.2는 각 용접 조건별 단면사진을 나타낸 것으로 EN ISO 13919-1에 의거하여 각 결함에 대해 측정된 결과를 나타내었다. #1번 조건의 경우 용락이 발생하였으며 #2번 조건은 균열과 용입불량이 발생하였다. #3번 조건의 경우 조건 중 가장 적은 입열량에 의해 용입불량이 발생하였다. #4번 조건의 경우 균열, 용락, 언더컷이 발생하였으며 #7번 조건의 경우 SCM 모재와 용착금속부 사이의 계면을 따라 균열이 발생하였으며 단면시편 채취 시 파손되었다. 이는 과도한 입열로 인하여 균열이 발생한 것으로 판단된다. #5, #6, #8, #9번 조건의 경우 EN ISO 13919-1 엄격 B 기준을 만족하여 단면형상으로는 건전한 용접부를 확보하였다. 또한 Table. 3.3에 용접조건별 EN ISO 13919-1 평가 결과를 표시하였다.

Table. 3.1 Bead appearance of the laser-arc hybrid welds




No.	Laser power (kW)	Travel speed(m/min)	Bead appearance
#1	10	1	SS400  SCM440 
#2		1.5	
#3		2	
#4	11	1	
#5		1.5	
#6		2	
#7	12	1	
#8		1.5	
#9		2	

Table. 3.2 Cross section of the laser-arc hybrid welds

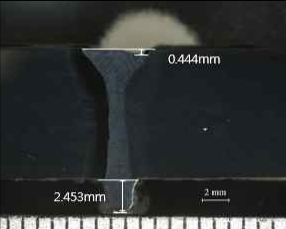
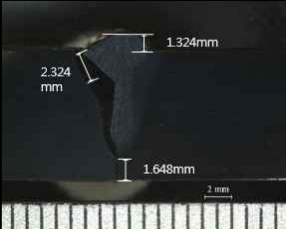
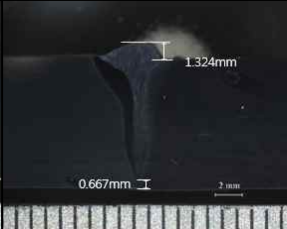
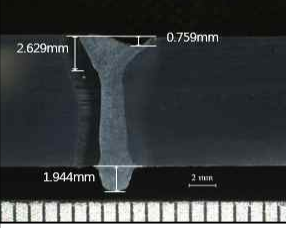
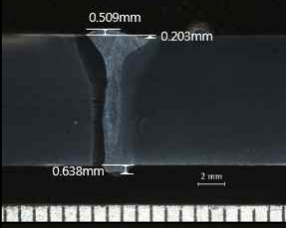
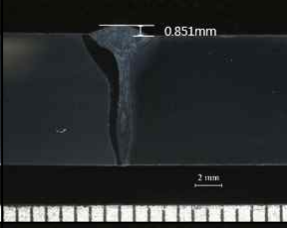
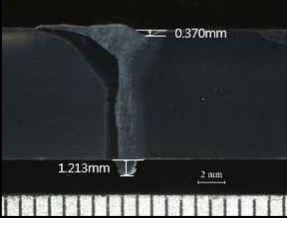
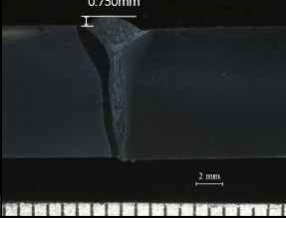
Travel speed Laser Power	1m/min	1.5m/min	2m/min
10 kW			
11 kW			
12 kW	-		

Table. 3.3 Results of quality evaluation on laser-arc hybrid welds
by ISO 13919-1

Imperfection, designation	number of specimens								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Incomplete penetration		X	X				X		
Undercut		X		X			X		
Excess weld metal							X		
Excessive penetration	X			X			X		
Incompletely filled groove				X			X		
Porosity and gas pores							X		
Linear misalignment							X		

3.2 기계적 특성

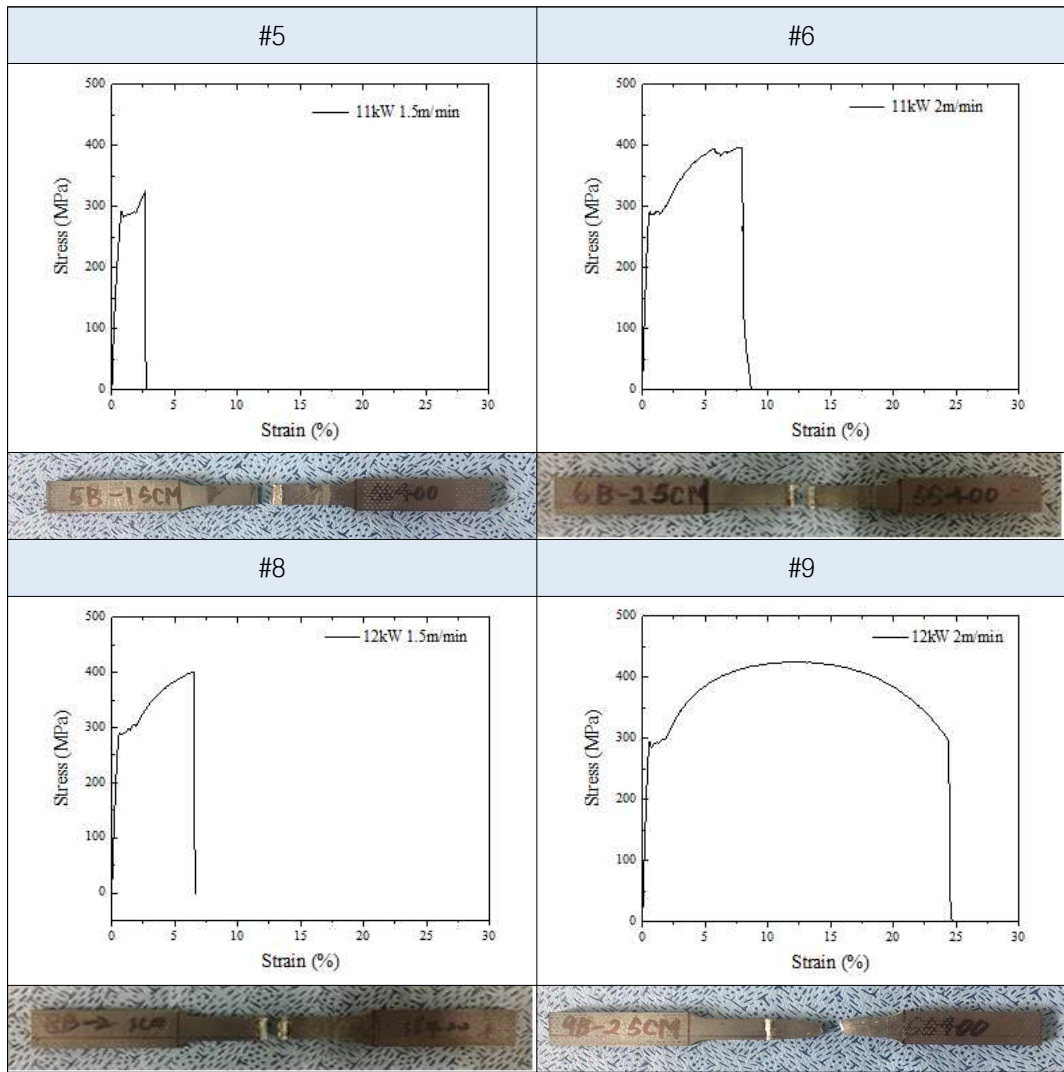
레이저-아크 하이브리드 용접부에 대한 인장강도는 EN ISO 13919-1의 용접 결합 평가에서 품질 등급이 가장 높은 B 등급에 부합한 #5, #6, #8, #9번 조건에 대해 ASTM E8M 규격에 의거하여 각 용접조건에 대해 3회의 인장강도 시험을 실시하였다.

Table. 3.4에 나타낸 것과 같이 인장강도 시험 결과, 모든 조건에서 SS400 모재 인장강도 대비 90% 이상의 인장강도를 나타내었다. 최대 인장강도는 #9번 조건에서 424MPa을 나타내었고, #5번 조건의 인장강도는 324MPa, #6번 조건의 인장강도는 396MPa, #8번 조건의 인장강도는 401MPa을 나타내었다.

인장시험 후 파단면 관찰 결과, #9번 조건에서 SS400 모재에서 연성파단이 일어났으며 나머지 조건인 #5, #6, #8번 조건에서는 모두 용접부에서 취성파단이 일어났다.

12kW 출력 조건에서 인장강도가 상승하고 또한 연신율이 증가하는 것을 확인하였다. 특히 #9번 조건에서 SS400 모재와 유사한 연신율 24.5%를 나타내었다. #5, #6, #8번 조건에서는 2.7~8.5%의 낮은 연신율을 나타내었는데 이는 용접부가 연신율이 낮고 경도가 높은 조직으로 형성되어 신율에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

Table. 3.4 S-S curve and fractured specimen of laser-Arc hybrid welds after tensile test



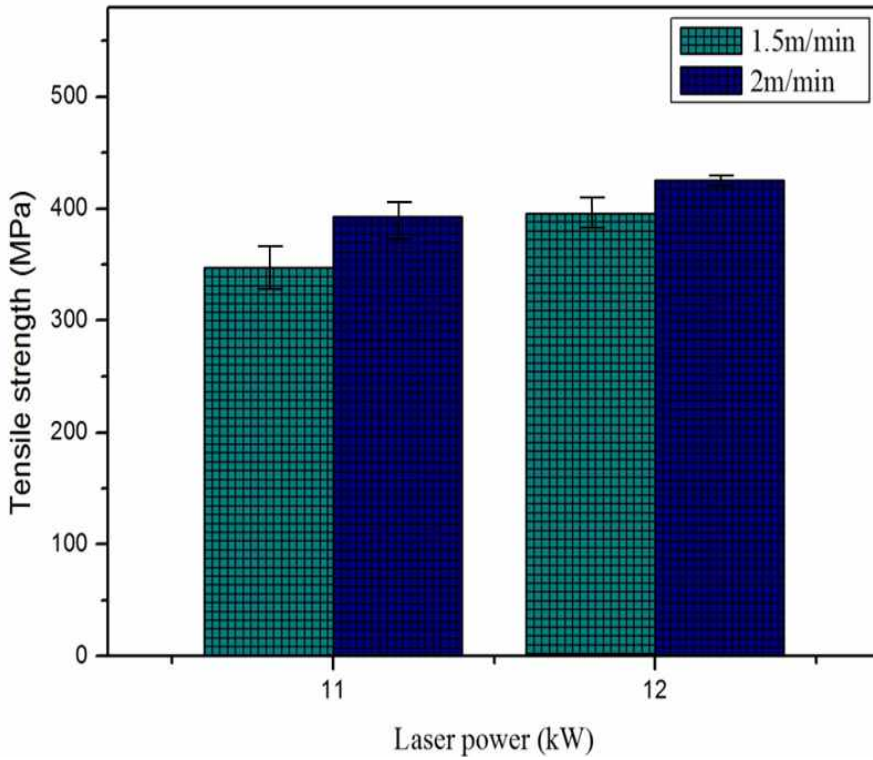


Fig. 3.1 Tensile strength of laser-arc hybrid welds

경도 시험 또한 EN ISO 13919-1의 용접 결함 평가에서 엄격 B에 부합한 #5, #6, #8, #9번 용접조건에 대해 EN ISO 22826 경도 시험 규격에 의거하여 각 용접조건 별 경도 시험을 실시하였다. 경도측정은 Fig. 3.2에 나타낸바와 같이 시험편의 상·하부에서 1mm 떨어진 위치에서의 경도값을 측정하였다.

Table. 3.5는 각 용접조건별 경도 측정 결과로, SS400 모재 경도는 136~146Hv, SCM440 모재 경도는 280~321Hv이며 용융부의 경도는 212~302Hv가 측정되었다. 아크 영역의 SS400 열영향부 경도는 159~172Hv, SCM440 열영향부 경도는 624~641Hv가 측정되었다. 레이저 영역의 SS400 열영향부 경도는 158~175Hv, SCM440 열영향부 경도는 600~607HV가 측정되었다.

용접부의 상부 경도분포와 하부 경도분포 양상이 유사함을 확인하였고 최대 경도값은 600HV로 SCM 열영향부 측에서 관찰되었다. 이는 SCM 열영향부에서 침상형태의 조직이 관찰되었고 이것이 높은 경도값에 영향을 준 것으로 판단된다.

용접부 하부의 레이저 영역과 상부의 아크 영역의 경도 값이 차이를 보이는 것은 레이저 영역에서는 오직 레이저만 직접적으로 작용하므로 아크 영역보다 상대적으로 응고속도가 증가하여 경도가 높은 조직이 형성되었고, 이에 따라 아크 영역의 용융부에 비해 경도값이 다소 상승한 것으로 판단된다.

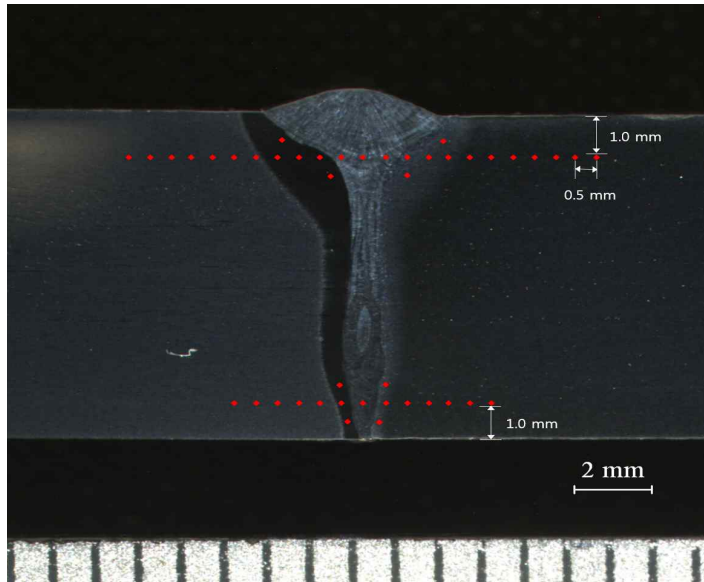
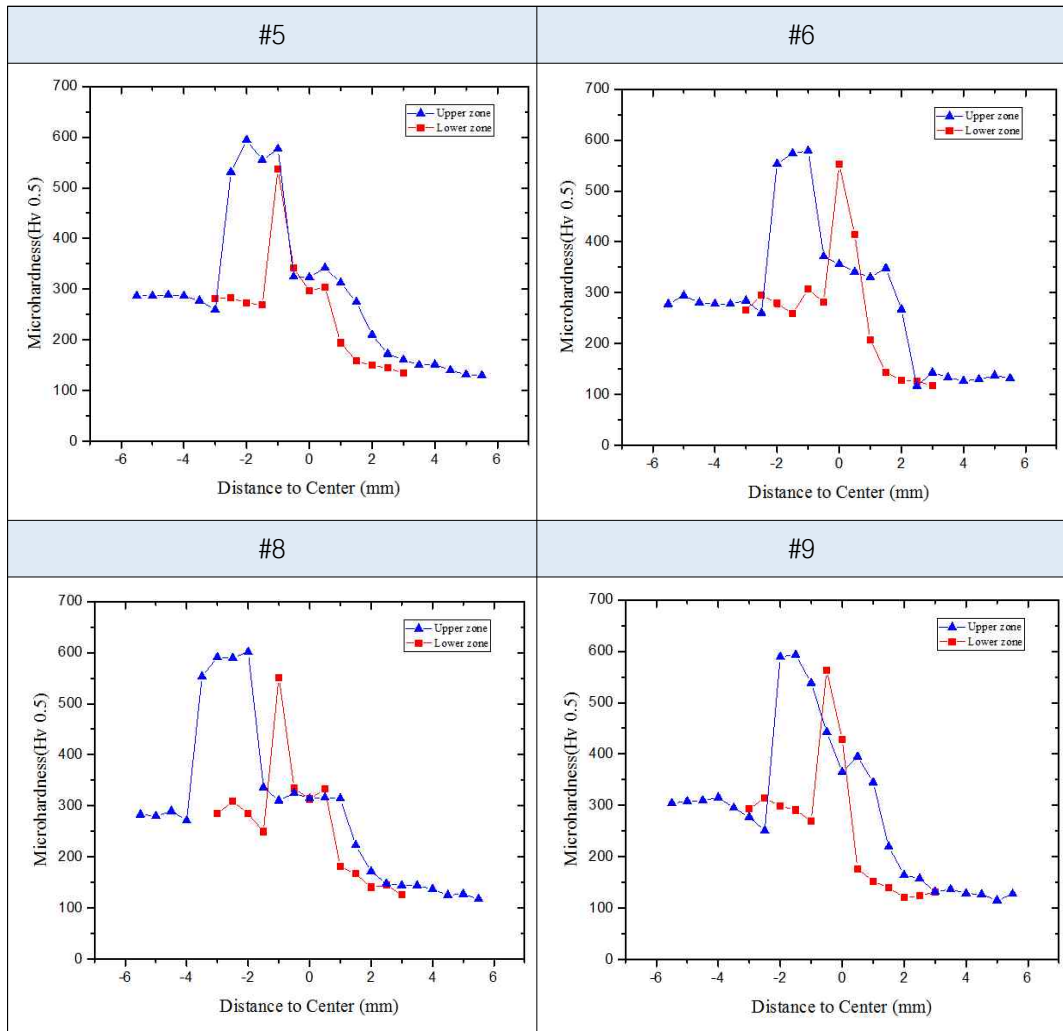


Fig. 3.2 Hardness measurement location of laser arc hybrid welds

Table. 3.5 Vickers hardness distribution of laser-arc hybrid welds



3.3 미세조직 특성

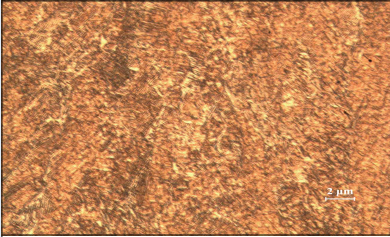
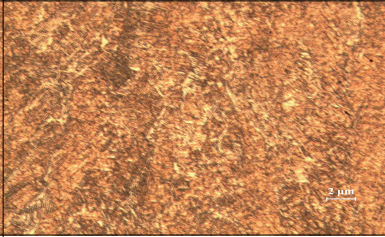
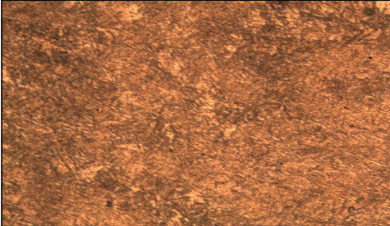


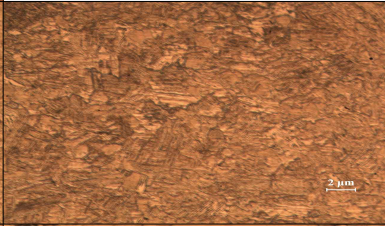
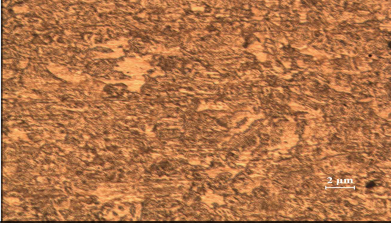
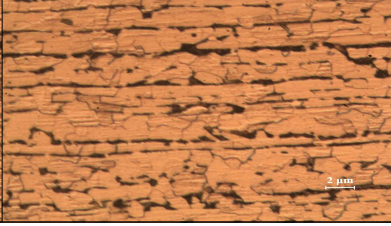
이종재 SS40/SS440 레이저-아크 하이브리드 용접부에 대한 금속학적 특성을 비교하기 위하여 용접부의 미세조직을 관찰하였다. 용접부의 각 영역 용접금속, 열영향부, 모재에 대한 미세조직 사진은 Table. 3.6에 나타내었다.

SS400 모재의 미세조직은 대부분 페라이트로 구성되어 있으며 소량의 펄라이트가 관찰되었다. SCM440 모재는 페라이트, 펄라이트 압연조직과 미소한 펄라이트 밴드가 관찰되었다.

용착금속부 아크 구역에서는 조대한 주상정 조직이 관찰되었고 레이저 구역에서는 미세한 등축 수지상정을 관찰하였다. 아크 구역의 경우, 레이저의 입열과 아크의 입열이 동시에 작용하는 영역으로 단위면적당 입열량이 높아 조대한 주상정이 생성되었다. 반면 레이저 구역의 경우, 아크의 입열은 영향을 거의 미치지 못하고 레이저의 입열이 주로 작용하였다. 이에 따라 레이저 구역의 단위면적당 입열량이 작아 상대적으로 빠른 냉각속도로 인해 미세한 등축 수지상정이 관찰되었다.

SCM440쪽의 열영향부의 미세조직은 기지 오스테나이트 조직에 베이나이트와 마르텐사이트의 중간조직에 가까운 침상형태의 조직을 나타내었다. SS400쪽의 열영향부의 미세조직은 페라이트, 베이나이트와 소량의 마르텐사이트 조직이 관찰되었다.

Table. 3.6 Microstructure of laser-Arc hybrid welds

Location	SCM440 side	SS400 side
WM	Arc zone 	Arc zone 
	Laser zone 	Laser zone 
HAZ		
BM		

4장 결론

본 연구에서는 9mm 두께의 이종재 SS400/SCM440에 대한 CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접 특성을 고찰하고자 하였다. 용접부 결함 및 기계적·금속학적 특성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) EN ISO 13919-1 품질평가 등급 중 가장 높은 B 기준을 만족한 용접조건 레이저 출력 11, 12kW와 이송속도 1.5, 2m/min의 조건에 대해 인장시험을 실시한 결과, 에리저 출력 12kW, 이송속도 2m/min 조건의 용접부 인장강도가 가장 높고 또한 연신율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이 때 최대 인장강도인 424MPa과 SS400 모재에서 연성파단이 일어났고 연신율 24.5%를 나타내었다. 나머지 조건에서는 2.7~8.5%의 낮은 연신율을 나타내었는데 이는 용접부가 연신율이 낮고 경도가 높은 조직으로 형성되어 신율에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

2) 용접부의 경도 측정 결과를 고찰해 보면, 용접부의 하부에서 경도 값이 다소 상승하였으며 최대 경도값은 SCM측 열영향부에서 발생하였다. 이는 SCM 열영향부에서 침상형태의 조직이 형성되어 높은 경도값을 나타낸 것으로 판단된다.

3) 용접부의 미세조직 관찰 결과, 아크 영역의 경우 레이저와 아크 열원에 영향을 동시에 받음에 따라 단위면적당 입열량이 높아 상대적으로 조대한 주상정이 생성되었다. 이에 비해 레이저 영역은 아크의 열원은 거의 영향을 미치지 못하고 레이저의 열원의 영향이 주로 작용함에 따라 아크 영역에 비해 빠른 냉각속도로 인해 미세한 등축 수지상정이 관찰되었다.

4) 따라서 본 연구에서 이종재 SCM440/SS400의 레이저-아크 하이브리드 맞대기 용접시 용접성과 생산성을 고려한 결과, 가장 적합한 용접조건으로는 레이저 출력 12KW, 이송속도 2m/min, 아크 용접전류 200A, 아크 용접전압 20V으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김정식, 김광희, 이종선. (2013). 화력발전설비의 과열증기저감용 가변오리피스 분사 특성. 한국산학기술학회논문지 제 14권 제1호, pp63-68.
- [2] 방한서, 오종인, 방희선, 김형. (2005). 용접공정에 따른 2.25Cr-1Mo강 용접이음부의 특성 변화에 관한 연구. 한국해양공학회지 제 19권 제1호, pp49-56.
- [3] 윤병현, 장웅성, 권영각, 김영천, 김주석. (2003). 발전설비용 Cr-Mo강의 용접재료 국산화 개발. 대한기계학회 압력기기 기술대회 논문 및 강연집, pp38-43.
- [4] 김광수, 노기식. (2000). Cr-Mo계 압력용기 강 용접부의 금속학적 고려 사항. 대한용접접합학회지 제18권 제1호, pp30-37.
- [5] 김영식, 길상철. (2013). 레이저/아크 하이브리드 용접기술의 최신 동향. 대한용접접합학회지 제31권 제2호, pp4-15.
- [6] 홍석주, 홍성호. (2005). 발전설비에 적용되는 보수용접 조건 및 사례분석. 대한용접접합학회지 제23권 제1호, pp26-29.
- [7] 방국수, 정호신, 박찬. (2015). 다층용접한 저합금 용접금속의 강도와 인성에 미치는 입열량 및 예열/패스간 온도의 영향. 한국해양공학회지 제 29권 제6호, pp481-487.
- [8] 김성종, 김진경, 김종호, 김기준, 김영식, 문경만. (2000). SCM440강 용접부의 내식성에 미치는 용접후 열처리효과에 관한 전기화학적 연구. 한국마린엔지니어링학회지 제24권 제6호, pp750-760.
- [9] 용접접합편람 제1편 (2008). pp 35-42
- [10] 채현병, 김철희, 김정한, 이세헌. (2006). 조선용 강재의 CO2레이저 GMA 하이브리드 용접에서 갭 브리징 능력 향상기술 개발. 대한용접접합학회지 제24권 제5호, pp 49-56.
- [11] 김준형, 방한서, 엠.에스.비조이, 전근홍, 유재선, 방희선. (2010). 하이브리드(CW Nd:YAG Laser + MIG) 용접을 이용한 A5052-H32 맞대기 용접부의 역학적 특성에 관한 연구. 한국해양공학회지 제24권 제6호, pp92-96.

- [12] 방한서, 오종인, 방희선, 노찬승, 이윤기, 봉현수, 이정수. (2008). 조선용 후판 AH32 강에 대한 SAW 및 Hybrid(CO₂ Laser + MIG) 맞대기 용접부의 열 및 역학적 특성 비교. 대한용접접합학회지 제26권 제5호, pp29-35.
- [13] 김종도, 명기훈, 박인덕. (2015). 강의 레이저-아크 하이브리드 용접시 공정 변수에 따른 비드용접특성 (II) - 용접 입열 변수의 영향 -. 대한용접접합학회지 제33권 제2호, pp91-96.
- [14] 홍승갑, 이종봉. (2004). CO₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접부의 용입깊이에 미치는 용접변수의 영향. 대한용접접합학회지 제22권 제1호, pp38-42.
- [15] 김종도, 명기훈, 송무근, 오재환, 서정. (2015). 강의 레이저-아크 하이브리드 용접시 공정변수에 따른 비드용접특성 (I) - 보호가스 유량 및 레이저 아크간 거리의 영향 -. 대한용접접합학회지 제33권 제2호, pp85-90.
- [16] 한준의. (2014). 자동차 카울 부품(SGACC60/60) 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접부 기계적 특성. 조선대학교 대학원 선박해양공학과.
- [17] 김성욱, 이목영. (2014). API X-100의 레이저-아크 하이브리드 용접성에 미치는 용접와이어의 영향. 대한용접접합학회지 제32권 제5호, pp7-12.
- [18] KS B ISO 13919-1 용접-전자 빔 및 레이저 빔 용접이음-결함의 품질등급에 대한 지침 - 제 1부 강