



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

이종재 SCM440/SS275의  
CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접시  
와이어 종류에 따른 용접 특성

조선대학교 대학원  
용접·접합과학공학과  
방 재 호

이종재 SCM440/SS275의  
CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접시  
와이어 종류에 따른 용접 특성

Weldability of CO<sub>2</sub> Laser-GMA Hybrid Welding of  
Dissimilar Materials SCM440 / SS275 with  
Different Wire Type

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

방 재 호

이종재 SCM440/SS275의  
CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접시  
와이어 종류에 따른 용접 특성

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

방 재 호

## 방재호의 석사학위논문을 인준함

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

2018년 11월

조선대학교 대학원

## CONTENTS

List of Figures .....	IV
List of Tables .....	V
Abstract .....	VI
<b>1 장. 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.1.1 연구 배경 .....	1
1.1.2 연구 목적 .....	3
1.2 레이저-아크 하이브리드 용접 특성 .....	5
1.2.1 레이저-아크 하이브리드의 원리 .....	7
1.2.2 CO <sub>2</sub> 레이저-아크 하이브리드의 특징 .....	9
1.3 SCM440/SS275 소재 및 와이어 특성 .....	13
1.3.1 Cr-Mo강 SCM440 .....	13
1.3.2 일반구조용강 SS275 .....	15
1.3.3 와이어 종류 .....	16
가. 내열강용 솔리드 와이어(KC-80SB2) .....	16
나. 탄소강용 플렉스코드 와이어(K-71T) .....	17
<b>2 장. 연구 방법</b> .....	<b>18</b>
2.1 연구방법 .....	18
2.2 실험방법 .....	19

2.2.1	사용재료 및 와이어 .....	19
2.2.2	용접 조건 및 장비 .....	20
2.3	용접부 기계적 특성 평가 .....	24
2.3.1	비드 특성 평가 .....	24
2.3.2	비파괴 검사 .....	26
2.3.3	인장 및 피로시험 .....	27
2.3.4	경도시험 .....	29
3 장.	연구 결과 및 고찰 .....	30
3.1	공정 변수별 용접 특성 .....	30
3.1.1	BOP 용접 .....	30
가.	출력에 따른 영향 .....	30
나.	이동속도에 따른 영향 .....	31
나.	와이어에 따른 영향 .....	33
3.1.2	맞대기 용접 .....	35
3.2	용접부 기계적 특성 .....	42
3.2.1	비파괴 검사 .....	42
가.	액상침투시험 .....	42
나.	자분탐상시험 .....	44
3.2.2	인장 및 피로강도 .....	45
3.2.3	경도분포 .....	49
4 장.	결론 .....	51
	참고문헌 .....	53

## List of Figures

Fig. 1.1 Schematics of laser system .....	5
Fig. 1.2 Schematics of laser-arc hybrid welding .....	8
Fig. 1.3 Schematics of CO <sub>2</sub> laser simplified energy level .....	9
Fig. 1.4 Penetrant of laser-arc hybrid welding .....	10
Fig. 2.1 Schematics of experimental set-up for laser-arc hybrid welding .....	19
Fig. 2.2 Experimental setup for CO <sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding .....	22
Fig. 2.3 Universal testing machine .....	27
Fig. 2.4 Dimension of specimen for tensile test .....	28
Fig. 2.5 Measured location for hardness test .....	29
Fig. 3.1 Effect of laser power on bead profiles in BOP welding .....	30
Fig. 3.2 Effect of travel speed on BOP bead profiles in BOP welding and Heat resistant steel wire used joints .....	32
Fig. 3.3 Effect of wire on bead profiles in BOP welding and FC carbon steel wire used welded joints .....	34
Fig. 3.4 Results of liquid penetrant test in laser-arc hybrid welded joints ..	43
Fig. 3.5 Results of Magnetic particle test in laser-arc hybrid welded joints	44
Fig. 3.6 Comparison of tensile strength of with different wire type laser-arc hybrid welded joints .....	46
Fig. 3.7 Fractured specimens after tensile test by solid wire for Heat resistant steel .....	46
Fig. 3.8 Fractured specimens after tensile test by FC wire for carbon steel	47
Fig. 3.9 S-N Curve of FC carbon steel wire used welding joints .....	48
Fig. 3.10 Hardness distribution of Heat resistant steel wire adopted welding joints	50
Fig. 3.11 Hardness distribution of FC carbon steel wire adopted welding joints	50



## List of Table

Table. 1.1 Chemical composition of SCM440 .....	14
Table. 1.2 Mechanical properties of SCM440 .....	14
Table. 1.3 Chemical composition of SS275 .....	15
Table. 1.4 Mechanical properties of SS275 .....	15
Table. 1.5 Chemical composition of solid wire for Heat resistant steel .....	16
Table. 1.6 Mechanical properties of solid wire for Heat resistant steel .....	16
Table. 1.7 Chemical composition of FC wire for carbon steel .....	17
Table. 1.8 Mechanical properties of FC wire for carbon steel .....	17
Table. 2.1 Welding conditions for laser-arc hybrid welding .....	23
Table. 2.2 EN ISO 13919-1 Quality levels for imperfection .....	25
Table. 2.3 ASTM E8M standard for tensile test and fatigue test .....	28
Table. 2.4 Fatigue test condition .....	28
Table. 3.1 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by wire for heat resistant steel varying travel speed in 10kW .....	36
Table. 3.2 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by wire for heat resistant steel varying travel speed in 11kW .....	37
Table. 3.3 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by wire for heat resistant steel varying travel speed in 12kW .....	38
Table. 3.4 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by FC wire for carbon steel varying travel speed in 10kW .....	39
Table. 3.5 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by FC wire for carbon steel varying travel speed in 11kW .....	40
Table. 3.6 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by FC wire for carbon steel varying travel speed in 12kW .....	41
Table. 3.7 Fatigue test results of FC carbon steel wire used welding joints ..	47

## ABSTRACT

### Weldability of CO<sub>2</sub> Laser-GMA Hybrid Welding of Dissimilar Materials SCM440 / SS275 with Different Wire Type

Bang Jae Ho

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

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, materials with superior corrosion resistance and heat resistance are used due to high capacity of power plants and high temperature and pressure increase of steam conditions. In the case of power generation equipment, a high Cr - Mo steel material is applied in order to simultaneously improve mechanical efficiency, safety and durability to improve thermal efficiency.

In the case of dissimilar materials, cracks due to different physical properties occur, and strict quality control is required. During welding of dissimilar materials, damage to the dissimilar material welds often occurs, mainly due to welding defects in the welds and degradation of strength due to corrosion between dissimilar materials.

In this study, laser - arc hybrid welding test of dissimilar materials (SCM440 / SS275) was carried out to investigate the welding characteristics of dissimilar materials, and to select optimal welding conditions and to study mechanical properties. In

order to overcome the problems of FCAW, the welding characteristics of butt welds by laser - arc hybrid welding were compared and evaluated. We used heat resistant steel wire and FC carbon steel wire and observed the mechanical properties and non - destructive testing of the weld to investigate the welding characteristics and structural stability of welded part. The optimum conditions of welding were investigated by evaluating the bead shape and welding phenomenon according to the laser output and moving speed of the main variables.

For optimum welding conditions, the fused part test was performed for the surface bead and back bead. In the hybrid welding of heat resistant steel wire rather than the use of FC carbon steel wire, many low - temperature cracks occurred at a slow moving speed. As the heat input increased with different chemical composition of different species, cold cracking occurred along grain boundaries formed by recrystallization of the structure. Nondestructive tests confirmed the presence of defects in the welds, and no other welding defects were found in the welds, such as circular marks and linear markings.

The tensile, fatigue, and hardness were measured to evaluate the mechanical properties of the welds according to the type of wire. As the welding speed increases, the tensile strength increases. As the welding speed increased, the cooling rate became faster and the tensile and fatigue were increased due to the refining action by grain refinement due to the relatively rapid solidification. The tensile test was carried out at a cross-head speed of 3 mm / min according to ASTM E8M standard, and the fatigue life was considered to be indefinite life span over  $2 \times 10^6$  cycles until fracture and separation of welds.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

### 1.1.1 연구 배경

기계공업의 발전으로 자동차, 항공기 및 선박용 디젤엔진 부품의 축과 각종 공구류, 기계부품의 다양한 분야에서 이종 재료 용접에 의한 경제성 향상, 제품의 신뢰성, 자동화의 용이성, 재료의 절약, 에너지의 고 효율화 등에 하이브리드 용접을 적용하려는 연구가 활발히 추진되고 있다. [1,2]

우리나라의 전력수요 40%를 점유하고 있는 원자력발전소의 발전설비의 중고온 압력기 소재로는 2.25Cr-1Mo강이 사용되며, 발전설비의 열효율을 높이기 위해 Cr의 비율을 높인 고 크롬강의 소재도 이용된다. 이와 같은 중요 설비는 발전설비의 기계적 효율과 운전의 안전성, 내구성이 동시에 고려되어야 하며, 설비제작의 설계 초기단계에서부터 제작방법은 면밀히 검토되어야 한다. [3]

최근에는 화력발전소의 발전설비 대용량화, 증기조건인 고온·고압화, Combined Cycle System에 의한 고효율화로 보다 내식성 및 내열성이 우수한 재료가 사용되고 있으며, 또한 이러한 재질을 혼합하여 만든 이종재료 부품 적용이 확대되고 있다. 원자력 발전설비의 중요 제작수단으로는 검증된 아크용접이 적용이 되고 있으나, 용접 시 생성된 잔류응력과 운전 중 가해지는 외력의 중첩으로 시간 경과에 따른 역학적 강성 취약으로 발전운전 중 주요 관찰부위가 된다. 따라서 설비의 운전 안전성과 내구성을 동시에 만족시키기 위해, 설비제작 시 용접부에서 생성되는 잔류응력이 용접구조물의 피로에 영향을 미치는 정도를 적게 하기 위한 용접 잔류응력의 크기가 작고, 열영향부(HAZ)의 생성 영역을 적게 하는 용접법이 검토된 후

적용되고 있다. [4,5,6,7]

이종재를 채용한 구조체의 이종재료 용접 시 이종재 용접부에 손상이 종종 발생이 되며, 이는 주로 용접부의 용접결함과 이종재질간의 부식에 따른 강도저하로 발생된다. 특히 구조적으로 취약한 용접부에 대해서는 다른 어떤 공정보다 더 엄격한 관리가 요구되고 있으며, 용접 시 문제점을 토대로 품질을 충분히 만족시키고 생산성을 향상시키는 것이 용접기술의 핵심이다.

레이저 용접은 높은 에너지 밀도의 열을 이용하는 용접이기 때문에 기존의 용접법처럼 용접 에너지를 재료에 전달함에 있어 표면 기점으로 점진적인 열전달이 아니라, 재료 두께 방향으로 용접 에너지를 직접 투입하는 고속 용접법이다. 레이저 용접은 좁은 용접부 및 열영향부를 얻을 수 있는 성형성의 강점이 있고, 용접 이후에도 모재와 비슷한 물성을 유지하여 또한 질적으로 우수한 성형성 부분을 나타낼 수 있다. 주요 산업 등에서 적용되고 있는 레이저 용접은 출력에 대비해 높은 초기 투자비용과 낮은 갭 브릿지 효과, 좁은 레이저 빔의 특성에 따른 엄격한 이음부 관리가 요구되는 단점이 있다. 이러한 레이저 용접법의 단점을 보완하기 위하여 고효율·고품질의 용접방법 중 하나로써 깊은 용입과 좁은 열영향부 및 빠른 용접속도의 장점을 가진 레이저용접과 넓은 갭 허용치와 저렴하고 용이한 작업성 등의 장점을 가진 아크용접을 결합한 레이저-아크 하이브리드 용접법이 주목을 받고 있다. [8]

특히, 하이브리드 용접법은 기존 2가지의 열원을 혼합한 방법으로 각 용접법의 장점을 채택하여 레이저와 아크를 열원을 이용한 레이저-아크 하이브리드 용접법에 대한 연구가 진행되고 있다. 레이저-아크 하이브리드 용접은 용가재를 사용함으로써 용접부재의 갭 때문에 생기는 용입 부족을 완화된다. 큰 장점으로 갭브릿지 능력을 향상되며, 레이저에 의한 급속 응고를 지연시킨다. 또한 경도 상승을 완화시키고, 부족해진 성분 때문에 저하되는 기계적 성질을 완화하는 것이 가능하다. 후판에 그루브를 만들면 고속용접에서 아크를 깊은 곳까지 유도하여 용입 깊이를 증가시키고 정밀한 이음부의 설치 공차를 완화시킬 수 있다. [9]

### 1.1.2 연구 목적

최근 발전소의 대용량화, 증기조건의 고온·고압화로 보다 내식성 및 내열성이 우수한 소재의 필요성이 요구되고 있으며, 또한 가혹한 환경에서 장시간 사용 되어야하고 파손 시에는 대형사고로 이어지므로 초기설계에서부터 제작에 이르기까지 엄격한 품질관리가 필요로 하고 있다. 국내·외 화력발전설비 제작시 SAW와 SMAW가 적용되고 있다. 좀 더 고급 용접공정인 FCAW, Hot Wire GTAW 등도 적용되고 있으며 일반적으로 압력배관에는 GTAW, 비주력설비에는 CO<sub>2</sub> 용접 등이 채용되고 있다. [10]

이종재의 경우 서로 다른 물성치로 인한 균열이 발생하므로 엄격한 품질 관리가 필요하다. 본 연구에서 이종재료(SCM440/ SS275) 용접 시 기존의 문제점으로는 열영향부 취화역에서 동적변형시효현상에 기인한 경도상승으로 인성이 저하된다. 이로 인해 C-0.5%의 탄소강에서는 저수소계 용접봉의 사용과 200℃의 높은 예열온도 적용으로 기공등 결함을 방지한다. 탄소강에서 나타나는 저온균열을 방지하기 위해서 구속응력을 완화시켜 강재의 예열 및 후열 등을 통해 확산성 수소량을 최소화시켜야한다. 특히, 적절한 예열은 용접 후 냉각속도를 느리게 하여 마르텐사이트와 같은 경화성 조직의 생성을 억제하고 용접부 수소 확산을 촉진시켜 저온균열을 효과적으로 방지할 수 있다. [11,12,13]

아크 용접에서는 후판 용접 시 다층용접이나 대입열 용접을 행하여야 하지만, 레이저아크 하이브리드 용접법은 단층 용접 혹은 최소한의 용접 경로를 통해 용접 패스수와 용가재가 감소하는 효과가 있고, 적은 열영향부를 가지는 고속 용접이 가능하다. 또, 입열량 감소의 효과로 비틀림과 같은 변형이 적게 발생하여 수정이 줄어드는 효과가 있으며 우수한 품질의 결함이 없는 비드 형성이 가능하다. 또 부재 사이의 갭이 일정 존재하더라도 아크에 의해 용융되거나 용가재를 사용함으로써 갭 허용치가 증가하여 레이저 용접처럼 이음부에 있어서 특별한 정밀함이 없어도 용접이 가능 한 장점이 있다. [14,15]

연구 소재인 SCM440은 Cr-Mo강의 일종으로 SM45C와 비슷한 화학적 조성에 Cr이 약 1% 이상 포함되어 내열성과 내식성을 갖춘 비교적 저렴한 강종재이다. 또한 내마모성, 내피로성 등이 우수하여 자동차의 크랭크축, 연결봉, 강력볼트, 기어, 절삭공구류, 식품 기계, 크레인 연결축 등 각종 기계 부품의 재료로 광범위하게 활용되고 있다. SS275는 연강의 일종으로 값이 저렴하고 기계적 성질이 우수하여 일반구조용 강재나 기계구조용강으로 널리 사용되고 있다. 위 두 가지 재료를 레이저-아크하이브리드 용접 적용시 내식성과 내열성이 필요한 화력발전설비 또는 기계재료의 내마모성 부품 등에 활용이 가능하며, 제조단가를 줄이고 공정을 간소화할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 이종재료(SCM440/SS275) 레이저-아크 하이브리드 용접 적용을 위하여 공정변수별 용접 특성을 파악하고, 기계적 특성 평가를 통해 최적의 용접조건을 도출하였다. [16] 특히, 레이저-아크하이브리드 용접 시 와이어 종류에 따른 용접 특성을 비교 평가하였다.

## 1.2 레이저-아크 하이브리드 용접 특성

Laser란 “Light amplification by stimulated emission of radiation”의 약자로 각 단어의 머리글자를 조합한 “유도방출 과정에 의한 빛의 증폭”이란 뜻이다. 레이저 빛은 백열전구나 형광등, 태양광등 기존의 광선에서 나오는 빛과 다른 성질을 갖게 된다.

레이저는 매질에 광자가 입사하면 그 광자를 흡수하고 다시 방출하는 과정이 일어나게 되는데, 외부에서 입사된 광자의 에너지 방향, 위상이 같은 빛이 방출하게 된다. 이런 빛의 방출을 유도방출(stimulated emission)이라 하고, 유도방출에 의해 빛을 증폭시킨 것이 레이저가 된다.

레이저를 동작하기 위해서는 Fig 1.1과 같이 세 가지의 기본조건을 만족 시켜야 한다. 첫째는, 전자파를 방출시키는 활성화된 매질이 있어야 하며, 이것은 보통 원자 혹은 분자들의 집합체로 이루어져 있다. 둘째는, 활성화된 매질 내에서 반분포상이 있어야 하며, 이것은 광학적인 펌핑 등 여기과정에 의해 이루어진다. 셋째로는 레이저 기구 내에 광학적인 증폭기구가 있어야 하며, 이것은 레이저 공진기의 반사미러 등에 의해 이루어진다.

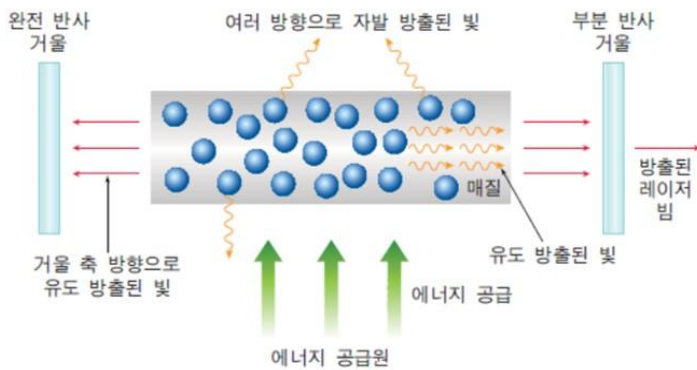


Fig 1.1 Schematics of laser system



레이저 가공의 장점으로 다음과 같다.

첫 번째, 레이저 가공 시에 레이저 빔은 수 um정도 크기로 미세가공이 가능하다.

두 번째, 레이저 폭이 좁기 때문에 재료의 소모율을 향상시킬 수가 있다.

세 번째, 비접촉 가공방식이기 때문에 오염을 줄일 수 있다.

네 번째, 잡음 발생이 적다.

다섯 번째, 열에 의한 영향을 적게 받는다.

레이저-아크 하이브리드 용접은 두 용접 프로세서를 동시에 사용함으로써 상호 간의 시너지 효과를 유도 및 극대화하여 용접하는 방법으로서 일반적으로 CO레이저 또는 Nd:YAG레이저에 MIG, MAG, TIG 및 Plasma 용접법을 복합하여 사용한다. 레이저-아크 하이브리드 용접의 장점으로 저입열, 빠른 용접속도 및 깊은 용입, 높은 효율 및 갭 브릿지 효과와 같은 아크용접의 장점을 모두 가진다.

하이브리드 용접에서 기본이 되는 보조 열원으로써 아크가 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 레이저-아크 하이브리드 용접을 사용할 경우 아크 용접 시 소모되는 용가재의 양을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 단일 패스로 용접을 행함으로써 용접횟수가 감소하기 때문에 생산성 및 경제성을 향상시킬 수 있다. 또한 고속으로 용접이 가능하므로 입열량이 감소하여 변형 및 결함 발생을 줄임으로써 우수한 용접품질으로도 달성할 수 있다. [17]

### 1.2.1 레이저-아크 하이브리드 용접의 원리

하이브리드 용접은 서로 다른 두 개 이상의 열원을 동시에 이용하여 용접을 수행, 상호간 시너지 효과를 극대화시켜 고품질·고효율의 용접을 실현하는 방법이다. 일반적으로 하이브리드 용접은 Fig 1.2에서 나타내는 바와 같이 레이저와 MIG의 결합시키는데, 피용접재와 MIG 용접 와이어 사이에서 아크를 형성시키면 아크 열에 의해 피용접재의 표면 및 와이어가 용융되며 용융지가 형성된다. 집속 광학 렌즈에 의해 용융지에 집속된 레이저빔에 의해 키홀(keyhole)이 형성되어 깊은 용입이 이루어 진다. 고에너지 레이저와 기존의 아크 열원을 결합하면 레이저의 고속 용접, 깊은 용입 및 저입열과 아크의 저렴한 원가 및 갭 브릿지 효과 등이 서로 영향을 미쳐 고속 용접 및 저변형 그리고 깊은 용입 용접이 가능하게 된다. [18]

용접 시, 레이저 용접은 고품질, 고정밀도와 고성능 등 좋은 유연성 및 낮은 변형으로 생산라인 자동화의 큰 입지를 가지지만, 그 대비 출력대비 비용이 너무 높고 열전도율이 높은 금속에 있어 정확한 간격 유지, 핏업(fit-up)을 요구하는 단점이 있어 용접 용융부에 용점결함이 쉽게 형성한다. 반면 아크 용접은 기계장치가 싸고, 작동이 쉬우며 용접 프로세서가 매우 안정적이다. 용접부의 간극이나 높이 단차에 접합 적용이 쉬우나, 단점으로 용접비드의 얇은 용입, 용접속도의 저속과 고속에서 쉽게 험핑비드 등의 결함이 자주 발생한다. 이러한 특징을 가지는 두 열원을 결합한 레이저-아크 하이브리드 용접은 각각의 프로세서의 결점을 보완할 뿐만 아니라 더 깊은 용입, 속도, 갭, 건전한 용접비드 형상 그리고 적은 양의 기공에서 기인한 감소된 용접 결함 등과 같은 많은 장점을 얻을 수 있다. 또한, 2개의 열원을 이용하여 하나의 용융풀을 형성하면 각각의 효과를 극대화시킬 수 있으나, 만약 열원의 조사지점이 상대적으로 차이가 나면 용접부에 대한 예열 및 후열처리 효과가 발생하여 용접효과를 상승시키는 역할을 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 CO2 레이저와 GMA용접의 하이브리드용접의 용접공정의 개념

은 그림 Fig 1.2와 같다. 레이저와 아크를 결합시키는 방법으로 각 공정의 역할에 따라서 다양한 구분이 있을 수 있는데 Table 1-1은 그 예를 나타내었다. [19]

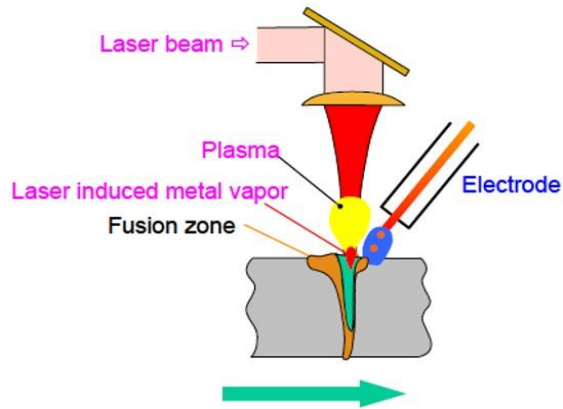


Fig 1.2 Schematics of laser-arc hybrid welding

### 1.2.2 CO<sub>2</sub> 레이저-아크 하이브리드 용접의 특징

레이저와 아크를 결합하여 하나의 프로세스로 이용하기 위한 최초의 시도는 영국 Imperial College 의 W. Steen 에 의해 이루어졌다. 그의 시도는 2kW CO<sub>2</sub> 레이저와 TIG를 이용하여 단독 레이저 용접대비 50~100% 의 용접속도 향상과 약 20%의 용입을 더 확보하면서 하이브리드 용접의 가능성을 보여줬다.

연속 발진형 탄산가스(CO<sub>2</sub>) 레이저가 최초로 개발된 것은 1964년 Patel에 의해서이며 순수한 이산화탄소만을 사용하였다. 그리고 N<sub>2</sub> 분자를 이산화탄소에 혼합하여 방전으로 여기된 질소분자의 진동에너지 전달을 통하여 이산화탄소를 여기시키도록 함으로써 더욱 효율이 높은 레이저로 발전 되었다. CO<sub>2</sub> 레이저는 CO<sub>2</sub> 분자의 진동에너지 준위를 이용하여 10.6um의 적외선을 발진시킨다. 연속발진에서의 출력은 수백 kW에 달하고 금속 가공 등 산업용으로 널리 쓰이고 있으며, 레이저 발진 효율을 높이기 위하여 매개 물질인 N<sub>2</sub> 와 He을 첨가한다.

CO<sub>2</sub> 분자는 한 개의 탄소원자와 두 개의 산소원자로 이루어져 있고, 가장 낮은 전자에너지 준위상태에서는 세가지 진동 모드를 가진다. 대칭 신장 모드(symmetric stretching mode)에서는 탄소원자 중심으로 산소원들이 대칭으로 진동한다. 굴곡 모드(bending mode)에서는 탄소원자와 산소원자들이 반대방향으로 움직여 분자가 휨 상태가 된다. 비대칭 신장 모드(asymmetric stretching mode)에서는 두 개의 산소원자가 같은 방향으로 움직이고 탄소원자는 반대로 운동한다. 질소분자 N<sub>2</sub> 는 단지, 대칭 신장 모드(symmetric stretching mode)에 진동상태만 존재하고, 방전 관내에서 전자와 충돌하여 높은 에너지 준위로 여기된다.

Fig. 1.3과 같이 펌핑을 통해 CO<sub>2</sub> 분자의 전자들과 충돌과 진동 에너지의 충돌 전파를 통해 CO<sub>2</sub> 분자의 상위준위 밀도를 증가시키는 역할을 하게 된다. 이러한 충돌과정은 에너지 전달에 매우 효율적이다. He원자는 CO<sub>2</sub> 와 N<sub>2</sub> 외에 항상 냉각 가스 및 에너지 천이를 위해 헬륨이 사용된다. He은 직접 레이저과정에 참여하진

않고, 레이저관에서 압력을 높이는 역할을 한다. 레이저 하위 준위에 있는 CO<sub>2</sub> 분자와 충돌하여 기저 준위로 빠른 전이가 일어나 큰 밀도 반전분포가 유지되도록 하기 때문에 레이저의 효율을 증가시킨다.

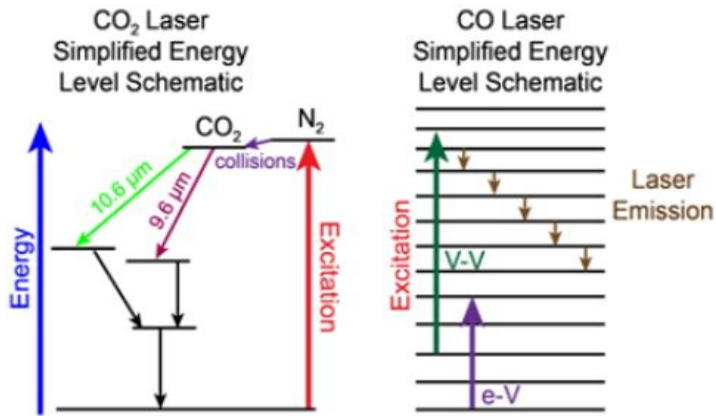


Fig. 1.3 Schematics of CO<sub>2</sub> laser simplified energy level

레이저-아크 하이브리드 용접 도입에 있어 근본적인 목적은 각각의 장점을 유지하고 레이저 용접뿐만 아니라 일반적인 아크 용접과 관련된 단점을 극복하는 것이다. 레이저빔과 아크는 매우 다른 용접 열원이지만, 두 열원은 실드가스 분위기에서 레이저-아크 하이브리드 용접이라 불리는 독특한 용접 기술로 결합될 수 있다. 기존레이저용접에서 아크용접법을 결합하기에 큰 이점으로 3가지로 아래와 같이 요약 할 수가 있다.

1. 부착하기 용이함
2. 용융면적이 넓어 갭에 대한 대응력이 좋음
3. 높은 에너지 효율

단점으로, 레이저 기반 프로세서와 관련된 높은 투자 및 운용 비용이 들기 때문에 하이브리드 용접의 잠재적인 이점과 대조하여 특정한 적용에 대해 신중하게 선

택할 필요가 있다. 레이저-아크 하이브리드 용접에서 아크와 레이저빔의 결합으로 발생하는 잠재적인 이점을 충분히 살릴 수 있기 위하여 다양한 매개변수가 최적화되어야 한다. 또한, 레이저-아크 용접의 주어진 적용에 대한 다양한 상호작용 변수를 최적화해야 하는 문제를 해결해야 한다. 용접 결과에 상당히 영향을 미치는 주요 매개변수는 공정 매개변수와 재료 매개변수 그리고 설계 매개변수로 나뉘는데 주요 매개변수로 용접속도, 실드가스(량, 종류, 전송방법)와 두 열원의 상대적인 공간 배치이다. 레이저빔과 아크간의 각도와 거리, 레이저 선행 및 아크 선행의 용접 방향이 가장 중요하다. [20]

레이저-아크 하이브리드 용접에 대해서 주목할 점은 레이저 열원과 부가되는 하나 혹은 2가지의 열원을 사용하기 때문에 재료에 공급되는 입열량이 레이저 단독의 열원에 비해 더 많다. 증가된 입열량에 비례해서 용접 속도를 점차 증가시키지 않으면 전체적인 경제성, 비드의 형상과 설치 공차가 본래의 취지와 다르게 될 것으로 생각되기 때문에, 각 열원의 입열과 용입 깊이에 관한 상관관계를 고려하여 GMAW에서 만들어지는 용입 깊이에 필요한 입열량보다 하이브리드 용접시의 용입깊이에 대한 입열량이 더 적도록 할 필요가 있다. 아래의 Fig. 1.4는 레이저-GMA 용접의 용입성을 나타낸 것이다.

일반적으로 레이저 용접에는 용가재를 사용하지 않기 때문에 갭이 존재하는 맞대기용접 시 용접부에 언더필이 발생되며 또한 레이저의 작은 스폿으로 인하여 갭에 대한 대응력도 미약하다. 그러나 GMA 용접은 소구경의 용접와이어에 고밀도의 에너지를 집중시킬 수 있기 때문에 갭이 있는 맞대기용접에 용융금속을 효과적으로 공급할 수 있다. 또한 아크의 유효반경이 비교적 넓으므로 갭에 대한 대응력도 상당히 양호하다. 이러한 특성으로 인하여 최근에는 레이저-GMA 하이브리드 용접에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

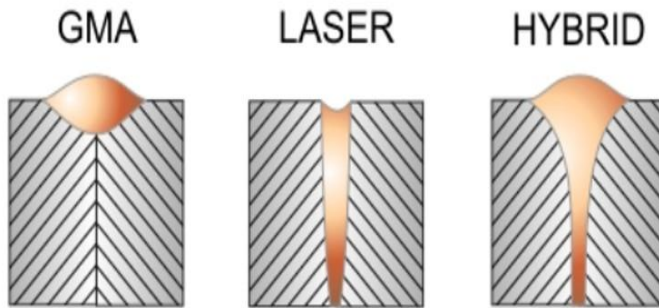


Fig 1.4 Penetrant of laser-arc hybrid welding

## 1.3 SCM440/SS275의 소재 및 와이어 특성

### 1.3.1 Cr-Mo강 SCM440

구조용 합금강은 구조용 탄소강의 기계적 성질을 가지면서도 강의 성질을 향상시키기 위해 소정의 성질을 구비하기 위하여 합금원소를 2종 이상 함유시킨 강이다. 크롬-몰리브덴강이라고도 불리며, SCM440강은 구조용 합금강의 하나로서 강에 기본적으로 포함된 5대 원소 외에 Cr, Mo을 첨가하여 기계적 성질(경화특성)을 향상시켰다.

경도와 항장력을 높이기 위해 0.9~1.20%의 Cr을 첨가하였고, 강도와 충격치를 높이기 위해 0.15~0.3%의 Mo을 첨가 하였다. 불순물로서 Cu 0.3%, Ni 0.25%를 초과 해선 안 된다. 일반적으로 열처리(Normalizing, Annealing, Quenching, Tempering)를 통해 강의 성질을 개선한다. SCM440은 높은 강도와 강인성을 필요로 하는 기계 부품인 축류, 기어류, 고장력 부품, 연결 로드, 볼트, 너트류 등의 제조에 널리 사용되고 있다.

크롬-몰리브덴강의 큰 특징으로 SCM440강재는 열처리 강재이기 때문에, 용접 시 입열에 의해 용접부의 열처리 풀림 현상이 일어난다. 용접부의 확산성 함유량을 저감시켜 저온균열의 용접결함이 발생할 수 있어 예열을 실시하여야 한다. 특히, 탄소함량이 많은 탄소강에서 나타나는 용접 결함 현상이며, 지연균열을 방지하기 위해 예열과 층간온도를 준수하여야 한다. 아래 Table. 1.1에 SCM440의 화학성분을, 기계적 성질은 Table. 1.2와 같이 나타내었다.



**Table. 1.1 Chemical composition of SCM440**

Material	Chemical composition (wt.%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440	0.38 ~0.43	0.15 ~0.35	0.6 ~0.85	0.0014	0.032	0.9 ~1.20	0.15 ~0.3

**Table. 1.2 Mechanical properties of SCM440**

Mechanical properties			
Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SCM440	830	980	12

### 1.3.2 일반구조용강 SS275

일반적인 구조연강은 건축, 교량, 차량, 선박 등에서 넓은 범위에 걸쳐 판재, 형강, 볼트 등으로 사용되는 대표적인 강재이다. KS규격에는 보통 인장강도에 따라 분류하면 SS330 ~ 540의 범위로 4강종이 있으며, 이들에 대한 화학성분 조성에 대해서는 제한 규정은 없다. 그러나 불순물로 일정 함량 이상 있을 경우에 발생하는 취성파괴의 원인이 되는 인과 황에 대해서만 상한을 정해 놓고 있다. P,S 함량이 max 0.5 이다. 아래 Table. 1.3과 Table. 1.4는 소재의 화학성분과 기계적 성질을 나타내었다.

**Table. 1.3 Chemical composition of SS275**

Chemical composition (Wt%)						
Material	C	Si	Mn	P	S	Cr
SS275	0.15	0.19	0.42	0.012	0.0021	0.0016

**Table. 1.4 Mechanical properties of SS275**

Mechanical properties			
Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SS275	297	425	28

### 1.3.3 와이어 종류

#### 가. 내열강용 솔리드 와이어(KC-80SB2)

본 연구의 소재 SCM440의 내열강용 솔리드 와이어는 Cr, Mo을 첨가한 저수소계 솔리드 와이어이며 전자세에서 우수한 용접성을 나타낸다. 600Mpa급 1.25%Cr -0.5%Mo 내열강용으로 화력발전, 석유정제공업의 장치, 보일러 가열관, 고온합성 화학기기 등의 1.25%Cr - 0.5%Mo 강관이나 고탄소 Cr-Mo 강 구조물에 적당하다. 용착금속에 경화 특성을 높이는 1.25%Cr, 0.5%Mo 성분이 함유하고 있어 내열성 및 내부식성이 우수하며, 피포성이 우수하여 비드형상이 양호하다.

내열강용 와이어의 특징으로 용접 열영향부와 용접금속의 냉각속도를 지연시켜서 경화도를 낮추고, 용접부의 확산성 수소 함유량을 저감시켜 저온균열 발생이 생길수가 있다. 용접 결함의 방지방안으로 예열 및 후열을 실시하는 것이다. 아래 Table. 1.5와 Table. 1.6은 내열강용 솔리드 와이어(KC-80SB2)의 화학성분과 기계적 성질을 나타내었다.

**Table. 1.5 Chemical composition of solid wire for Heat resistant steel**

Chemical composition (wt.%)							
KC-80SB2	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0.09	0.54	0.51	0.015	0.006	1.26	0.45

**Table. 1.6 Mechanical properties of solid wire for Heat resistant steel**

Mechanical properties			
KC-80SB2	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
	470	550	19

## 나. 탄소강용 플럭스코드 와이어(K-71T)

기존 현장에서는 GMAW 용접을 이용한 이중재료 SCM440/SS275의 용접 시, 탄소함량의 구조물 등에 탄소함량이 적고 물성치가 낮은 SS275에 적합한 탄소강용 플럭스코드 와이어가 많이 쓰여진다. 연강 및 50킬로급 고장력강의 티타니아계 플럭스코드 와이어이며, 솔리드 와이어에 비해 아크가 안정적이며 스파터가 적고 용접작업성이 우수하다. 또한, 용접 시 슬래그 박리성 및 피포성이 우수하며, 양호한 비드외관 형상의 용접을 나타낸다. 주요 용도로는 교량, 철골, 건축, 기계, 차량 등의 각종 구조물에서 쓰여지고 있다. 아래 표 Table. 1.7과 Table. 1.8은 탄소강용 플럭스 코드 와이어(K-71T)의 화학성분과 기계적 성질을 나타내었다.

**Table. 1.7 Chemical composition of FC wire for carbon steel**

Chemical composition (wt.%)					
K-71T	C	Si	Mn	P	S
	0.04	0.55	1.25	0.015	0.012

**Table. 1.8 Mechanical properties of FC wire for carbon steel**

Mechanical properties			
K-71T	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
	520	580	29

## 제 2 장 연구방법

### 2.1 연구방법

1장에서는 본 연구를 진행하기에 앞서 연구 배경 및 목적, 필요성, 용접공정의 시스템, 재료의 특성에 대해서 나타내었다.

2장에서는 본 연구에 사용된 실험 방법 및 실험 조건에 대하여 언급하였으며, 실험의 주안점인 이종재 SCM440과 SS275의 와이어 종류에 따른 각각의 조건(레이저 출력, 이송속도 등)이 용접부 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위한 방법을 제시하였다. 공정 변수로는 레이저 출력, 용접 이송속도, CTWD, GMAW 전류와 전압, 보조가스 유량 등이 있다.

3장에서는 용접부의 기계적 특성과 금속학적 특성을 평가하였다. 이종재료 SCM440과 SS275에 대해 와이어 종류에 따른 레이저-아크 하이브리드 I형 맞대기 용접 실시 후, 용접 특성을 비교하였다. 용접 결함을 평가하기 위해 EN ISO 13919-1규격에 의거하여 조건별 용접 외관 비드검사와 용접 용입 특성을 평가하였으며, 비파괴 검사를 통해 용접부 내부의 결함 유무를 확인하였다. 이음의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 및 피로강도 시험, 경도 시험을 실시하였다.

4장에서는 본 연구를 위해 진행된 실험에 대해 결론을 나타내었다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 사용 재료 및 와이어

본 연구에 사용된 재료는 이종재 SCM440과 SS275이며 1형 맞대기 용접(butt weld) 시 시험편면을 밀링 처리 하였다. 시험편 150mm(L) X 200mm(W) X 9mm(t)의 이종재 (SCM440/SS275)에 갭 없이 CO<sub>2</sub> 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 실시하였다. 용접 시 아크 선행의 레이저 무빙방식을 적용하고 와이어 종류에 따른 용접부 용입 특성을 고찰하였다. [16]

와이어는 두 가지 타입의 Cr과 Mo을 첨가한 내열강용 솔리드 와이어와 탄소함량이 적은 탄소강용 플렉스코드 와이어를 사용하였다. Fig. 2.1에는 사용된 시험편의 모식도를 나타내었다.

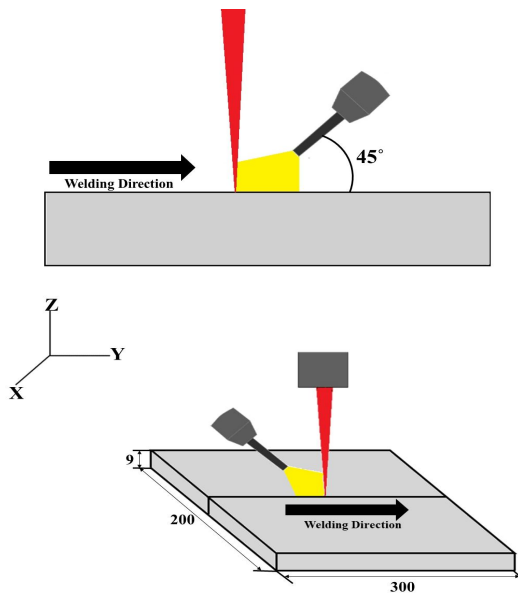


Fig 2.1 Schematics of experimental set-up for laser-arc hybrid welding

## 2.2.2 용접 조건 및 장비

이종재료 (SCM440/SS275)의 CO<sub>2</sub> 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 수행하기 위해 Fig. 2.2와 같이 I형 맞대기로 갭 없이, 열에 의한 변형을 고려하여 지그로 양쪽에 고정하였다. 레이저 용접 헤드의 초점거리는 250mm으로, 레이저 디포커싱 -2mm, 백킹제는 사용하지 않았다.

레이저-아크 하이브리드 용접시 주요 용접변수로 레이저 출력, 초점 거리, 이송 속도, 레이저-아크 거리, 보호가스, CTWD, 보호가스 등이 있다. 많은 용접 변수를 고려하여 와이어 종류에 따른 각각의 조건(레이저의 출력과 이송속도 등)에 따른 각각의 용접부의 용입 특성에 대해 실험하였다. [16] 레이저 조사각 90°, 아크토치 각 45°, CTWD 18mm, 디포커싱 -2mm, 레이저 아크간 거리 3mm, GMA 전압은 21V, 전류 210A로 고정하였으며, 정확도를 위하여 Digital clamp meter기와 Data logger를 이용하여 전압과 전류를 측정하였다. 그리고 보호가스는 He65% + Ar 32% + CO<sub>2</sub> 3% 혼합가스로 20L/min의 유량으로 공급하였으며, 와이어는 Cr 1.25% - Mo 0.5% 함량의 내열강용 솔리드 와이어(KC-80SB2)와 탄소강용 플렉스코드 와이어(K-71T)의 두 가지 와이어를 사용하여 비교하였다. 마지막으로 레이저-아크 하이브리드 용접 프로세스 방식으로는 예열효과와 깊은 용입 특성을 보이는 아크 선행방식을 사용하였다.

하이브리드 용접을 진행하기 앞서 먼저 실험 조건을 선정을 위해 예비 BOP 실험을 진행하였으며, 용접 조건(레이저 출력과 이송속도)을 결정하기 위해 레이저 출력은 10kW ~ 12kW와 이송속도는 1.0m, 1.25m, 1.5m/min의 각각의 조건으로 BOP 실험을 진행하였다. 실험 후 용접부 단면 분석을 통해 일열량 차이에 따른 용접부의 용입 깊이 및 HAZ(Heat affected zone)의 영역 변화를 파악하였다. 도출된 레이저 출력과 용접속도를 기준으로 CO<sub>2</sub> 레이저 하이브리드 용접을 이용한 와이어 종류에 따른 조건별 맞대기 용접을 실시하였다. 실험조건은 Table. 2.1에 간단히 나타내었다.

최적 용접조건을 위해 표면비드, 이면비드 등에 대한 외관검사를 실시하였다. 용접부의 단면 시험은 EN ISO 13919-1 규격에 의거하여 비드특성을 구분하였으며, 용접을 마친 후에는 용접 결함을 확인하기 위해 비파괴 검사를 하였다.

와이어 종류별 조건에 따른 용접부의 기계적 특성 평가를 위해 인장강도, 피로 강도, 경도를 실시하였다. 인장 시험은 ASTM E8M 규격에 따라 cross-head 속도는 3mm/min으로 실험하였고, 피로 수명은 용접부가 파단 및 분리 될 때까지  $2 \times 10^6$  사이클 이상에서의 수명을 무한 수명으로 고려하였다.

본 실험의 주요 변수로 레이저 출력과 이송속도의 영향은 다음과 같다.

첫번째, 레이저 출력(laser beam power)으로 용접시 용입깊이는 레이저빔의 출력 밀도(세기와 직경), 동일한 빔의 반경에 세기가 증가 할수록 용입깊이는 증가 된다. 출력이 증가함에 따라 금속은 가열-용융-증발-플라즈마 발생의 단계를 거친다.

두 번째, 이송속도(scanning speed)로 금속재료의 표면에 조사되는 시간을 조절하여 용접부 형상과 용접부 조직을 결정한다. 속도가 증가할수록 용융부의 유형과 크기는 변하며, 용접부 중심으로 강한 유체흐름이 생겨 언더컷(undercut)현상이 발생된다. 에너지 밀도가 감소하여 용입은 작아지게된다. 속도가 느릴수록 용융부가 커지고 드롭 아웃(drop out)이 일어나 표면이 움푹 파여진다. 또한, 용접 속도는 냉각 속도와 비례하여 용접부와 열영향부의 조직을 조절할 수 있다.

본 연구를 수행하기 위해 CO<sub>2</sub> 레이저 용접기는 독일 Trumpf- 12kW급 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였으며, GMAW 용접기는 국산 월드웰의 500A급을 사용하였다. 전류와 전압은 정확성을 위해 Digital clamp meter 기와 Data logger를 이용하여 측정하였다. Fig. 2.2는 Trumpf-12kW급 CO<sub>2</sub> 레이저용접 시스템의 구성으로 발전기로부터 생성된 레이저빔은 경로를 따라 스캐너로 이송되고 master computer에 의해 용접



위치 및 조건이 제어되어 피용접물에 조사된다.



Fig. 2.2 Experimental setup for CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding

**Table. 2.1 Welding conditions for laesr-arc hybrid welding**

Welding condition	Values
시편길이	150mm(L) X 200mm(W) X 9mm(t)
갭(Gap)	0mm
레이저 초점거리 기준	250mm
디포커싱(Defocusing)	-2mm
보호가스 및 유량	He 65%, Ar 32%, CO2 3% 유량 20L/min
레이저 아크간 거리(DLA)	18mm
와이어 돌출길이	3mm
토치각	45°
레이저 출력(kW)	10, 11, 12kW
용접 이동속도	1.0, 1.25, 1.5m/min
전압(V)/전류(A)	21V / 210A
와이어 종류	내열강용 솔리드 와이어(KC-80SB2), 탄소강용 플럭스코드 와이어(K-71T)

## 2.3 용접부 기계적 특성 평가

### 2.3.1 비드 특성 평가

CO<sub>2</sub> 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 통한 이중재 SCM440/SS275의 맞대기 용접부의 비드형상과 횡단면을 고찰하고자, 각 조건별로 용접된 시험편을 육안으로 용접 여부 및 용접부 외관의 비드형상을 1차로 관찰하였다. 그리고 최적 용접조건을 위해 표면과 이면비드 등을 중점으로 용입깊이, 언더컷 유무, 선형 단차, 균열, 기공 등 결함 유무를 확인하였으며, 용접부 단면 시험은 EN ISO 13919-1 규격을 사용하였다. 평가항목으로는 언더컷(Undercut), 과도용입(Excessive penetration), 용입불량(Incomplete penetration), 선형단차(Linear misalignment) 등 7가지 측면으로 검사항목은 Table. 2.2에 나타내었다.

Table. 2.2 EN ISO 13919-1 Quality levels for imperfection

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

## 2.3.2 비파괴 검사

용접부 및 강재의 구조물 사용에 대한 적절성을 판단하는 방법으로, 용접부 및 강재에 대한 각종 기계적 특성을 평가하는 파괴 시험이 있다. 그러나, 파괴 시험은 시편을 상대로 한 특정 조건에서만 가능하고 실제 용접 구조물에 적용할 수는 없다. 이런 단점을 보완하기 위해 실험 대상물의 손상 없이 적절성을 판단 할수 있는 방법의 비파괴 검사가 있다. 비파괴 검사의 장점으로 간접적인 평가 방법이 지만, 확실하게 부품 또는 제품에 대한 건전성을 입증해 줄 수가 있다. [21]

비파괴 검사(Non destructive inspection))란 물리적 현상을 이용한 특수방법으로 검사물을 파괴나 분리, 손상을 입히지 않고 결함의 유무와 상태 등 알아내는 검사를 말한다. 재료나 제품의 재질, 형상 치수에 변화를 주지 않은 상태에서 진행되는 검사법이며 압연재료, 주조품, 용접 구조물의 검사로 많이 쓰이고 있다. [22]

본 연구에서는 액체침투 시험과 자분탐상 시험을 실시하였다. 용접부의 액체침투 시험은 KS B 0816에 의거하여 실험을 진행하였다. 침투액 적용 전 용접부 표면에 잔류해 있는 녹, 스케일 등의 표면 부착물 및 수분을 충분히 제거 후 용접부에 침투액을 분무하였다. 그리고 용접부의 표면 및 표면 부근에 있는 균열, 기타 흠을 검출하기 위하여 자분탐상 시험을 진행하였다. 용접부 자분탐상 시험은 KS D 0213에 의거하여 실시하였다. 시험에 앞서 용접부에 부착된 유지, 오염 등의 부착물들을 제거하여 시험체를 청정하게 하였으며, 자분모양의 관찰은 자분모양이 형성된 직후에 실시하였다.

### 2.3.3 인장 및 피로 시험

인장시험은 금속이 가진 성질 중 인장 응력(Tensile Stress)에 대한 저항성 평가방법이다. 그림 Fig. 2.3의 만능재료시험기(UT100F)를 사용하였으며, 인장시험편은 ASTM E8M 규격에 의거하여 Fig. 2.4와 같이 시험편을 제작하였다. 인장 시험 속도 cross-head 속도는 3mm/min로 설정하였다.

피로 시험은 ASTM E8M E466 규격에 의거하여 응력 범위 65-225MPa, 응력비  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.1$ , 반복하중 속도  $f = 40 \sim 50 \text{ Hz}$ , 파형은 정현파로 실시하였으며, 반복횟수는 용접부가 파단 및 분리 될 때까지  $2 \times 10^6$  사이클 이상에서의 수명을 무한 수명으로 고려하였다. Table. 2.3과 Table. 2.4에 시험편의 규격 및 조건을 나타내었다.

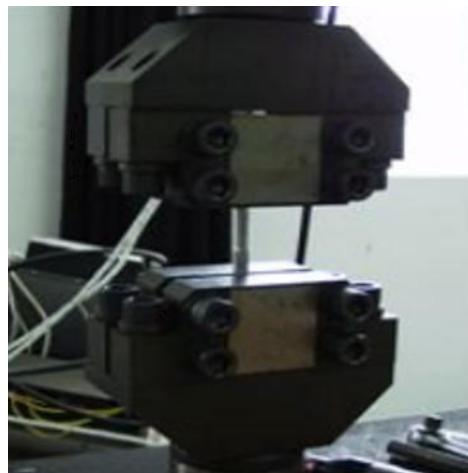


Fig. 2.3 Universal testing machine

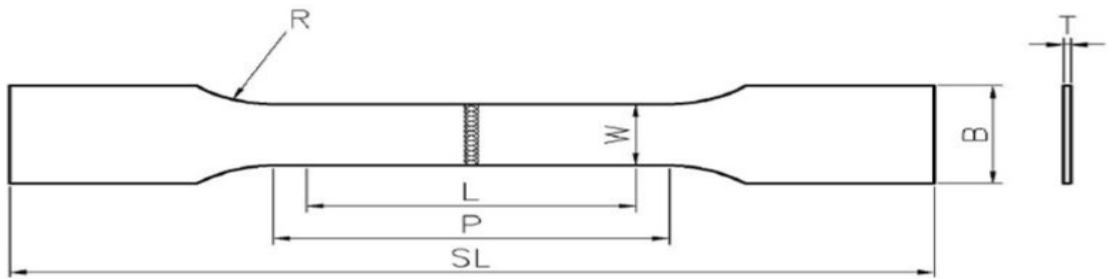


Fig. 2.4 Dimension of specimen for tensile test

Table. 2.3 ASTM E8M standard for tensile test and fatigue test

Type	W	L	P	R	T	B	SL
Tensile	12.5mm	50mm	57mm	12.5mm	9mm	20mm	200mm
Fatigue	8mm	-	24mm	70mm	9mm	20mm	200mm
Values	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ W : Width</li> <li>○ T : Thickness</li> <li>○ L : Gauge length</li> <li>○ B : length of grip section</li> <li>○ P : Length of reduced section</li> <li>○ SL : Over-all length</li> <li>○ R : Radius of fillet</li> </ul>						

Table. 2.4 Fatigue test condition

Materials	Control mode	Temperature	Load pattern	Stress ratio	Frequency (Hz)
SCM440 /SS275	Load control	Ambient	Sinusoidal wave	0.1	40~50

### 2.3.3 경도시험

경도 시험은 널리 쓰이고 있는 Akashi사 HM-112 micro Vickers 경도기를 사용하여 용접 시편의 경도 분포를 측정하였다. 비커스 경도기는 136° 다이아몬드 피라미드 압자를 이용하는 장비로, 하중 0.5kgf, 하중시간 10초의 조건으로, 시험편은 EN ISO 22826 금속재료 용접부에 대한 파괴시험 - 레이저와 전자빔으로 형성된 협소 용접부의 경도시험(비커스 및 누프 경도시험)에 따라 비커스 경도시험을 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 2.5와 같이 아크영역과 레이저영역으로 구분하고, 측정 거리는 0.5mm로 진행하였다.

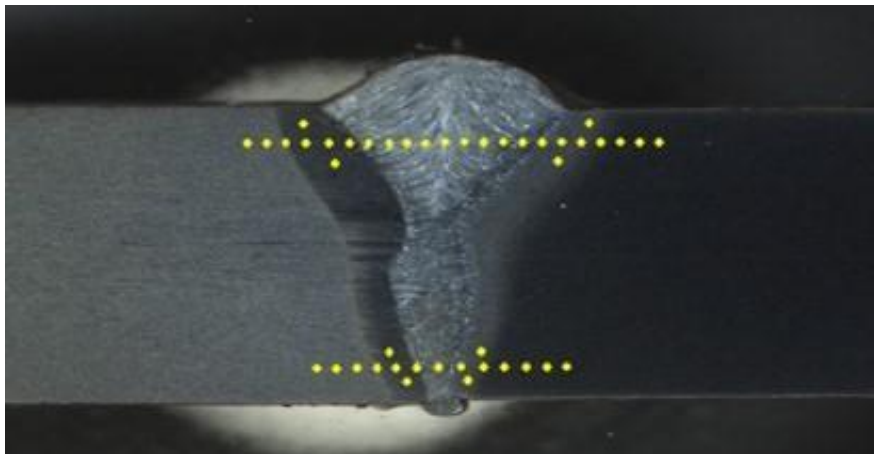


Fig. 2.5 Measured location for hardness test



## 제 3 장 연구 결과 및 고찰

### 3.1 공정변수별 용접 특성

#### 3.1.1 BOP 용접

##### 가. 출력에 따른 영향

$CO_2$  레이저-GMAW 하이브리드 용접을 이용한 이종재 SCM440/SS275의 맞대기 용접 시 용입 특성을 파악하기 위해 예비 BOP실험을 실시하였다. 시험편은 9mm 두께의 SCM440의 200mm(W) X 150mm(L)로 상부 표면에 130mm 길이방향으로 내열강용 솔리드 와이어를 이용해 하이브리드 용접을 실시하였다. 전압과 전류를 21V/210A의 고정으로 하고, 이송속도 1.5m/min, 레이저 출력 10kW ~ 12kW 조건에서 변화를 확인하였다. 시편의 비드표면과 비드단면을 Fig. 3.1에 나타내었다. 10kW와 11kW조건에서 비드표면은 양호하였으나, 12kW조건에서는 비드 끝단부위에서 언더컷이 발생됨을 확인할 수 있었다.

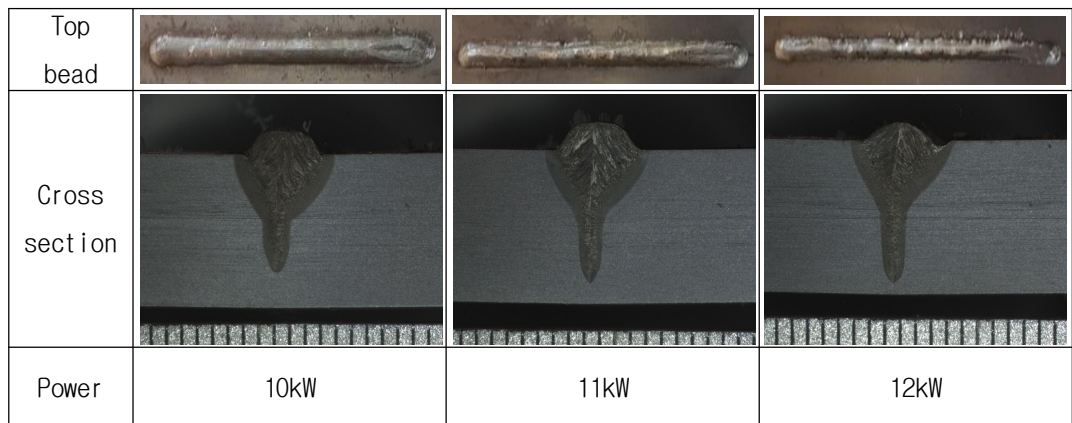


Fig. 3.1 Effect of laser power on bead profiles in BOP welding

## 나. 이송속도에 따른 영향

시편 SCM440에 내열강 솔리드 와이어를 이용하여 레이저 출력별 이송속도에 따른 용입 특성을 고찰하기 위해, 이송속도는 1.0m/min, 1.25m/min, 1.5m/min의 변화에 따른 비드표면 및 단면을 비교 관찰하였다. 비교적 높은 12kW출력의 이동속도 변화에서 안정적인 용입을 보였으며, 전체적으로 1.5m/min의 이동속도에서 용접 결함이 없고 양호한 비드로 관찰되었다. Fig. 3.2에 나타낸 바와 같이 10kW 1.0m/min, 10kW 1.25m/min, 11kW 1.25m/min에서 비드균열이 관찰되며 탄소가 많은 탄소강에서 나타나는 균열발생으로 고탄소강의 급속 냉각에 따른 경화로 균열이 유발된 것으로 판단이 된다.




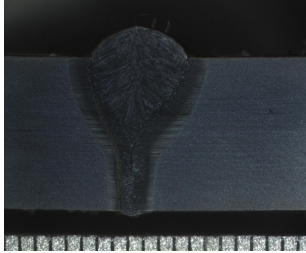
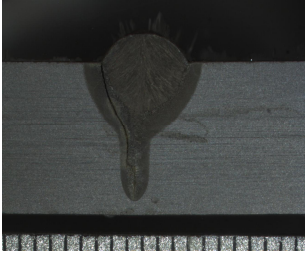
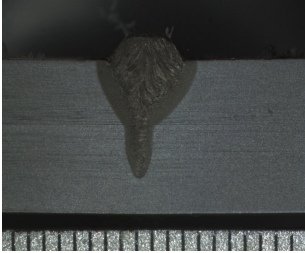



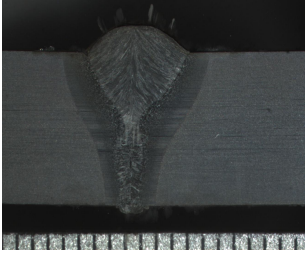
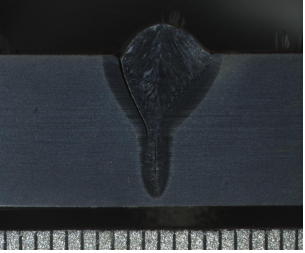
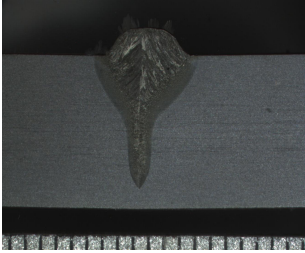
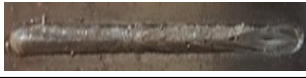


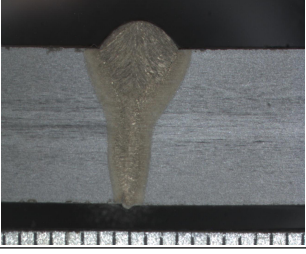
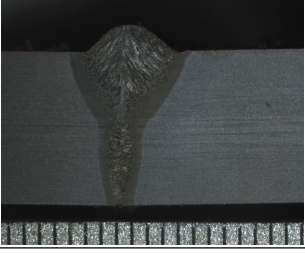
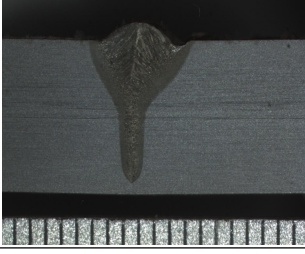



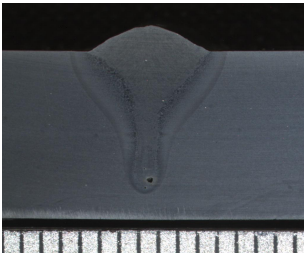
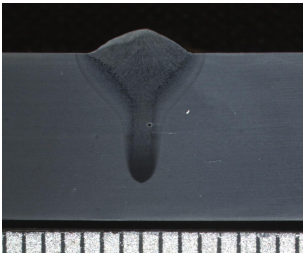
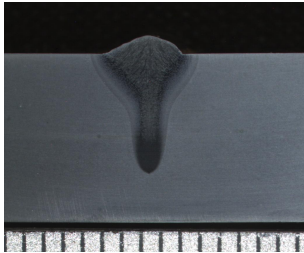
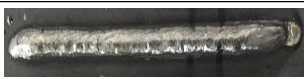


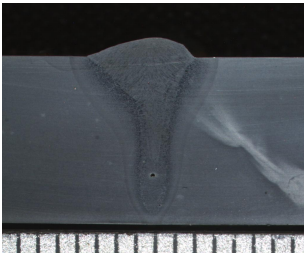
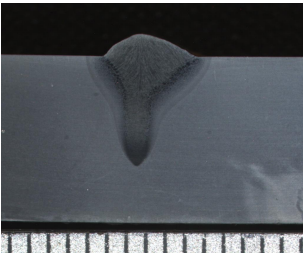
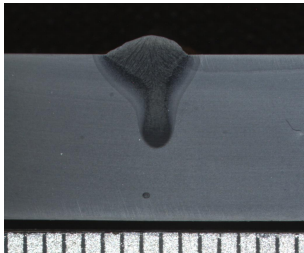
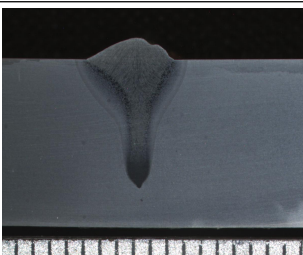
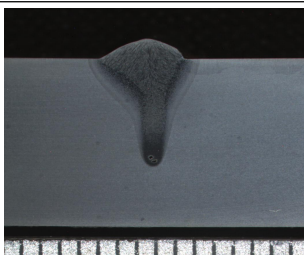
Top bead			
Cross section			
Welding condition	10kW 1.0m/min	10kW 1.25m/min	10kW 1.5m/min
Top bead			
Cross section			
Welding condition	11kW 1.0m/min	11kW 1.25m/min	11kW 1.5m/min
Top bead			
Cross section			
Welding condition	12kW 1.0m/min	12kW 1.25m/min	12kW 1.5m/min

Fig. 3.2 Effect of travel speed on BOP bead profiles in BOP welding  
 and Heat resistant steel wire used joints

## 다. 와이어에 따른 영향

기존 현장에서는 이종재료 SCM440과 SS275의 용접 시 탄소강용 플럭스코드 와이어를 많이 사용하고 있다. 이종재 용접은 모재간의 서로 다른 물성치로 인해 용접부의 용접결함과 이종재질간의 부식에 따른 강도저하가 발생하므로, 본 연구에서는 좀 더 이종재 SCM440/SS275의 용접에 적합한 와이어를 찾기 위해 화학조성이 다른 내열강용 솔리드 와이어와 탄소강용 플럭스코드 와이어의 하이브리드 용접 특성을 비교하였다.

두 종류의 와이어의 용입 깊이를 비교 관찰하기 위해 시편 SS275에 탄소강용 플럭스코드 와이어를 이용하여 레이저 출력별 이동속도에 비드표면 및 단면을 비교 관찰하였다. [16] 상대적으로 물성치가 낮은 모재와 모재기준의 탄소강용 플럭스코드 와이어를 사용하였기 때문에 용접 조건에서 차이를 두었다. Fig. 2.8의 관찰에서 비드 표면의 균일한 비드폭을 나타내며 느린 이동속도에서 기공 결함이 보인다. 그리고 모재 SCM400의 내열강용 솔리드 와이어 하이브리드 용접보다 안정적인 용접부 용입 깊이를 보였다. 하지만, 12KW 1.0m/min의 조건에서는 높은 입열로 인해 고온균열로 인한 용접부 파단이 일어났다.

Top bead			
Cross section			
Welding condition	10kW 1.0m/min	10kW 1.5m/min	10kW 2.0m/min
Top bead			
Cross section			
Welding condition	11kW 1.0m/min	11kW 1.5m/min	11kW 2.0m/min
Top bead			
Cross section	X		
Welding condition	12kW 1.0m/min	12kW 1.5m/min	12kW 2.0m/min

※ X : Unwelded

Fig. 3.3 Effect of wire on bead profiles in BOP welding and FC carbon steel wire used welded joints

### 3.1.2 맞대기 용접

와이어 종류별 이종재(SCM440/SS275)의 조건별 CO<sub>2</sub> 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 실시하였으며, 실험 후 용접부 비드형상과 횡단면부 용입 특성을 비교 관찰하였다. 내열강용 솔리드 와이어를 이용한 용접에서는 Table. 3.1과 Table. 3.2에서 나타낸 바와 같이 용접 이송속도 1.0m/min과 1.25m/min 에서 종 방향 균열(Crack)이 발생하였지만, 전체적으로 상부비드와 하부비드는 안정적인 형상을 나타내었다. 균열 발생율이 높은 이유로 입열량이 많을수록 와이어의 조성과 SCM440의 다량의 합금원소(Cr-크롬)에 따른 높은 C-탄소 당량에 경화되고, 이종간의 다른 화학성분으로 입열량이 증가할수록 조직의 재결정에 의해 형성된 결정입계를 따라 균열이 발생된 것으로 판단이 된다. 전체적인 용접부 단면 시험 검사를 통해 10kW 1.5m/min과 11kW 1.5m/min에서 결함없는 가장 건전한 완전용입의 EN ISO 13919-1 Quality [B] 등급임을 확인하였다.

그리고 Table. 3.3과 Table. 3.4의 탄소강용 플렉스코드 와이어를 이용한 이종재(SCM440/SS275)의 용접부에서는 용접부 과다용입이 발생하여 비드형성이 적고, 용접부 백비드의 용락 발생과 용입불량, 언더컷 등 용접결함이 발생하였다. 내열강용 솔리드 와이어의 하이브리드 용접부와 동일한 용착금속부 사이의 계면을 따라 균열이 발생함을 확인할 수 있었다. 하지만, 내열강용 솔리드 와이어보다 많은 조건 11kW 1.5m/min와 11kW 2.0m/min, 12kW 1.5m/min와 12kW 2.0m/min에서 결함 없는 건전한 완전용입의 EN ISO 13919-1 Quality [B] 등급임에 해당됨을 확인할 수 있었다.

Table. 3.1 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by wire for heat resistant steel varying travel speed in 10kW

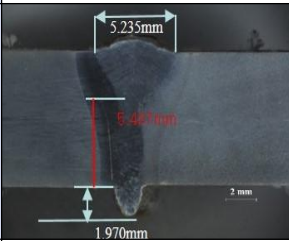
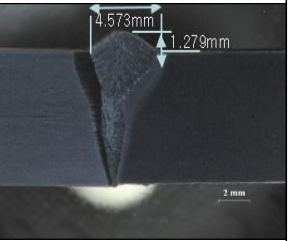
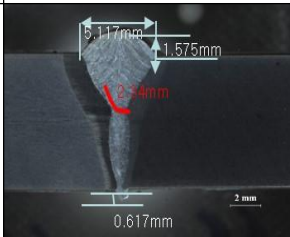
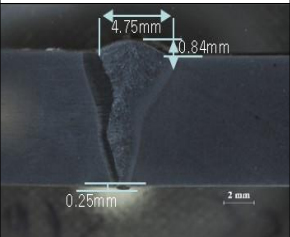
Welding condition		10kW 1.0m/min	10kW 1.25m/min	10kW 1.5m/min
Cross section				
Continuous under cut	h(mm)	None	None	None
	Level	B	B	B
Excess weld metal	h(mm)	h=0.581	h=1.188	h=1.279
	b(mm)	b=5.235	b=5.029	b=4.573
Level	Level	B	B	B
	Excessive penetration	h(mm)	1.97	0.485
Level	Level	C	B	B
	Cracks	h(mm)	5.481	8.815
Level		규격미달	규격미달	B
Incomplete penetration	h(mm)	None	None	None
	Level	B	B	B
Linear misalignment	h(mm)	None	None	None
	Level	B	B	B

Table. 3.2 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by wire for heat resistant steel varying travel speed in 11kW

Welding condition		11kW 1.0m/min	11kW 1.25m/min	11kW 1.5m/min
Cross section		X		
Continuous under cut	h(mm)	×	None	None
	Level	×	B	B
Excess weld metal	h(mm)	×	h=1.575	h=0.84
	b(mm)	×	b=5.117	b=4.75
Level	Level	×	B	B
	h(mm)	×	0.617	0.25
Excessive penetration	Level	×	B	B
	h(mm)	파 단	2.34	None
Cracks	Level	규격미달	규격미달	B
	h(mm)	×	None	None
Incomplete penetration	Level	×	B	B
	h(mm)	×	0.1	None
Linear misalignment	Level	×	B	B

※ X : Unwelded



Table. 3.3 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by wire for heat resistant steel varying travel speed in 12kW

Welding condition		12kW 1.0m/min	12kW 1.25m/min	12kW 1.5m/min
Cross section		X		
Continuous under cut	h(mm)	×	None	None
	Level	×	B	B
Excess weld metal	h(mm)	×	h=1.441	h=1.647
	b(mm)	×	b=5.206	b=4.777
Level	Level	×	B	B
	h(mm)	×	0.575	0.38
Excessive penetration	Level	×	B	B
	h(mm)	파 단	2.654	2.30
Level	Level	규격미달	규격미달	규격미달
	h(mm)	×	None	None
Incomplete penetration	Level	×	B	B
	h(mm)	×	None	None
Linear misalignment	Level	×	B	B

※ X : Unwelded

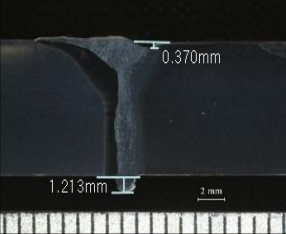
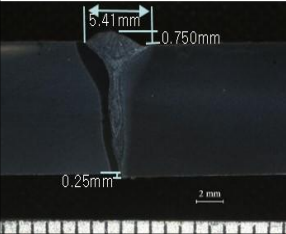
Table. 3.4 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by FC wire for carbon steel varying travel speed in 10kW

Welding condition		10kW 1.0m/min	10kW 1.5m/min	10kW 2.0m/min
Cross section				
Continuous undercut	h(mm)	0.444	None	None
	Level	B	B	B
Excess weld metal	h(mm)	h=0	h=1.748	h=1.604
	b(mm)	b=6.598	b=6.222	b=5.869
Level		규격미달	B	B
Excessive penetration	h(mm)	2.453	-	-
	Level	D	-	-
Cracks	h(mm)	None	3.026	None
	Level	B	규격미달	B
Incomplete penetration	h(mm)	None	1.977	0.749
	Level	B	규격미달	D
Linear misalignment	h(mm)	None	None	0.2
	Level	B	B	B

Table. 3.5 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by FC wire for carbon steel varying travel speed in 11kW

Welding condition		11kW 1.0m/min	11kW 1.5m/min	11kW 2.0m/min
Cross section				
Continuous under cut	h(mm)	0.759	0.206	None
	Level	C	B	B
Excess weld metal	h(mm)	b=6.930	h=0.584	h=0.851
	b(mm)		b=6.306	b=5.891
Level	Level	규격미달	B	B
	Excessive penetration	h(mm)	2.372	0.638
Level	Level	D	B	B
	Cracks	h(mm)	2.861	None
Level		규격미달	B	B
Incomplete penetration	h(mm)	None	None	None
	Level	B	B	B
Linear misalignment	h(mm)	None	None	None
	Level	B	B	B

Table. 3.6 Comparison of ISO Quality levels and weldability of laser-arc hybrid welded joints by FC wire for carbon steel varying travel speed in 12kW

Welding condition		12kW 1.0m/min	12kW 1.5m/min	12kW 2.0m/min
Cross section		X		
Continuous under cut	h(mm)	×	0.370	None
	Level	×	B	B
Excess weld metal	h(mm)	×	h=0.15	h=0.75
	b(mm)	×	b=9.0	b=0.541
Excessive penetration	h(mm)	×	1.213	0.0
	Level	×	B	B
Cracks	h(mm)	파단	None	None
	Level	규격미달	B	B
Incomplete penetration	h(mm)	×	None	None
	Level	×	B	B
Linear misalignment	h(mm)	×	None	0.25
	Level	×	B	B

※ X : Unwelded

## 3.2 용접부 기계적 특성

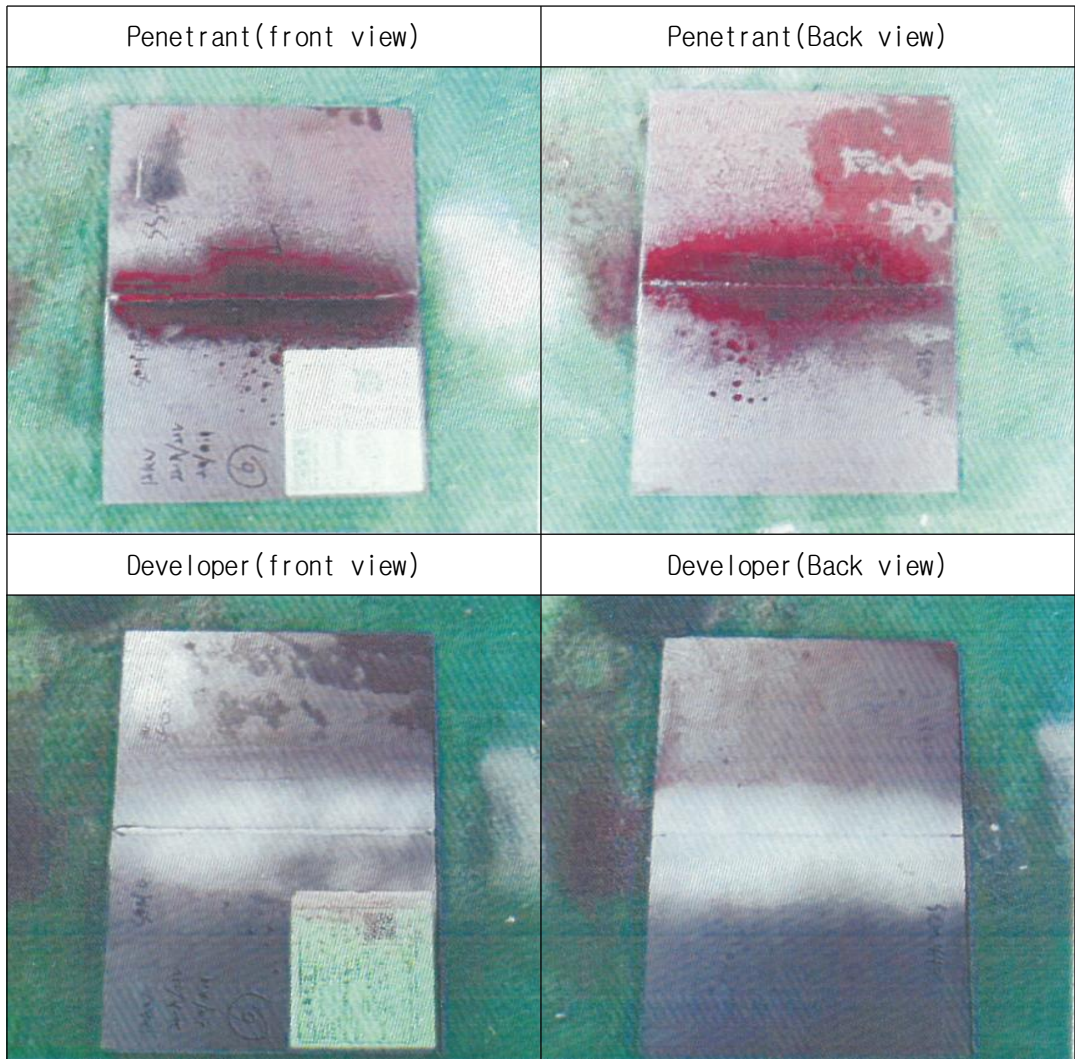
### 3.2.1 비파괴 검사

#### 가. 액상침투시험

침투 탐상 검사는 시험편의 표면 위에 침투제를 적용하여 균열 등 불연속부에 침투시키고 충분한 시간의 경과 후에 과잉된 침투제를 제거한다. 그 후 현상제를 도포하여 침투된 침투제를 추출 시켜 불연속의 위치, 크기 및 지시모양을 검출하는 비파괴 검사 방법이다.

본 연구의 내열강용 솔리드 와이어를 이용한 이종재(SCM440/SS275)의 하이브리드 맞대기(11kW 1.5m/min)조건 용접부에 대해 액체침투시험 KS B 0816에 의거하여 검사를 실시하였다. 침투액 적용 전 용접부 표면에 잔류해 있는 녹, 스케일 등의 표면 부착물 및 수분을 충분히 제거 후 용접부에 침투액을 분무하였다. 검사체의 표면온도는 16~52℃ 범위내 있어야 하며, 그 범위를 초과 시에는 인공균열 시편에 의한 평가시험을 통하여 검사품질이 사전확인 되어져야 한다. 침투액은 용제 제거성 염색 침투탐상 시험법에 한하여 적용하여야 한다. 침투시간은 5분으로 하였으며 침투 지시 모양의 관찰은 현상제 적용 후 7~60분 사이에 실시하였다. 아래의 Fig. 3.4의 액상침투시험 결과로, 용접부에 원형지시 및 선형지시와 기타 용접결함이 발견 되지 않았으며, 원형지시 $\leq 5.0\text{mm}$ , 선형지시 $\leq 1/16\text{inch}$ 의 측정결과를 관찰할 수 있었다.

Fig. 3.4 Results of liquid penetrant test in laser-arc hybrid welded joints

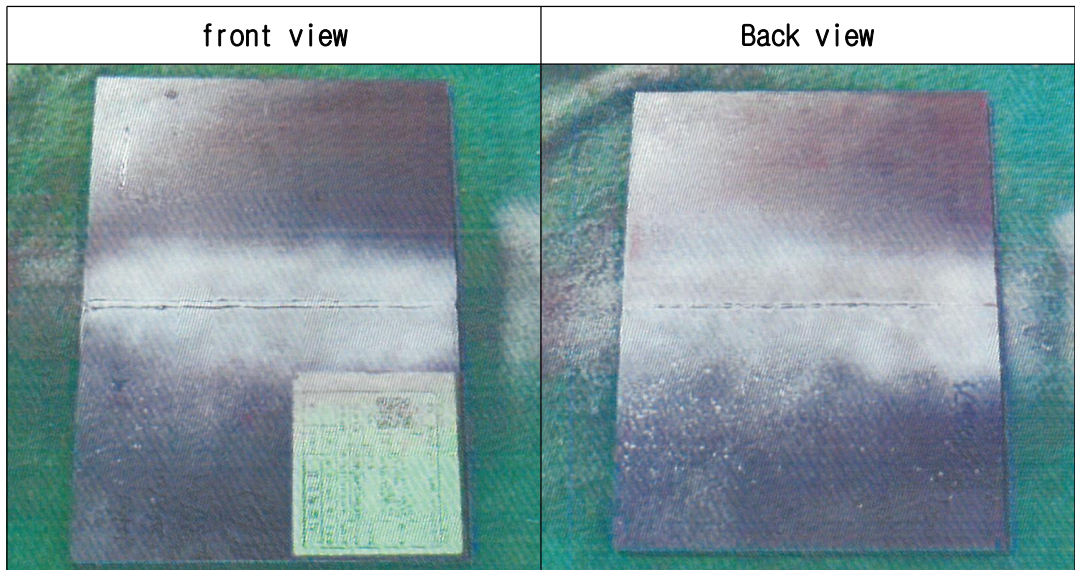


## 나. 자분탐상시험

자분탐상시험 강자성체의 표면 그리고 표면 하에 있는 불연속부를 검출하기 위해 강자성체를 자화 및 자분을 적용시켜 누설자장에 의해 자분이 집적되어 불연속부의 위치, 크기, 형태 등 검사하는 비파괴 검사 방법이다.

본 연구에서 탄소강용 플렉스코드 와이어를 이용한 이종재(SCM440/SS275)의 하이브리드 맞대기(11kW 1.5m/min의 조건) 용접부의 표면 및 표면 부근에 있는 균열, 기타 흠을 검출하기 위하여 자분탐상시험을 실시하였다. 용접부 자분탐상시험은 KS D 0213에 의거하여 실시하였으며, 시험에 앞서 용접부에 부착된 유지, 오염 등의 부착물들을 제거하여 시험체를 청정하게 하였다. 또한 자분모양의 관찰은 자분모양이 형성된 직후에 실시하였다. 아래의 그림 Fig. 3.2의 자분탐상시험결과, 용접부에 원형지시 및 용접결함이 발견되지 않았으며, 형지시 $\leq 5.0\text{mm}$ 를 만족한 건전한 용접부를 확인 관찰할 수 있었다.

Fig. 3.5 Results of Magnetic particle test in laser-arc hybrid welded joints



### 3.2.2 인장강도 및 피로강도

용접부의 건전성을 확인하기 위하여 ASTM E8M 인장시험 규격에 의거하여 인장시험을 실시하였다. Fig. 3.6은 도출된 최적 조건으로 실험을 수행한 내열강용 솔리드 와이어와 탄소강용 플렉스코드 와이어를 이용한 하이브리드 용접부의 인장강도를 나타내었다. 시험은 Quality B등급을 확보한 내열강용 솔리드 와이어 적용 하이브리드 용접부(10kW 1.5m/min, 11kW 1.5m/min), 탄소강용 플렉스코드 와이어 적용 하이브리드 용접부(11kW 1.5m/min, 11kW 2.0m/min, 12kW 1.5m/min, 12kW 2.0m/min)의 대해 조건별 3회의 인장강도 시험을 진행하였다.

내열강용 솔리드 와이어 하이브리드 용접의 경우, 물성치가 낮은 SS275의 모재 파단으로 10kW 1.5m/min의 조건에서는 453MPa, 11kW 1.5m/min의 조건에서는 495MPa로 나타났다. SS2745의 최대인장강도 425MPa 이상의 인장강도를 나타내었다. 반면, 탄소강용 플렉스코드 와이어 하이브리드 용접부는 11kW 1.5m/min, 11kW 2.0m/min, 12kW 1.5m/min의 세 조건에서 용접부 파단이 일어났으며, 인장강도는 각각 324MPa, 396MPa, 401MPa의 값으로 나타났다. 그리고 12kW 2.0m/min의 조건에서는 SS275의 모재 파단으로 SS275 최대인장강도 425MPa로 나타났다. 각각의 조건에서 용접의 출력 및 속도가 증가할수록 인장강도가 증가하는 특성을 보이며, 용접속도가 증가하게 되면 냉각속도가 빨라짐에 따라 상대적으로 응고속도가 증가하여 결정립 미세화에 의한 강화 효과로 인해 인장강도가 증가한 것으로 판단된다. 아래 Fig. 3.7과 Fig. 3.8은 인장시험 후의 파단된 시편 파단부 사진을 나타내었다.

Table. 3.5은 탄소강용 플렉스코드 와이어를 이용한 하이브리드 용접의 용접부 피로시험 결과를 나타내었다. 피로시험 결과, 응력 범위 68~113MPa, 135#3MPa, 158#4 MPa 조건에서 반복횟수  $2 \times 10^6$ 을 확보 하였으며, 특히 158#3 MPa 조건은 항복응력의 약 70%의 응력범위에서 매우 우수한 피로강도 특성을 나타내었다. 그리고 피로시험 후 파단은 대부분 조건에서 비드 표면의 토우부에서 발생하였다. Table.



3.7과 Fig. 3.9는 피로강도 결과 및 S-N Curve를 나타내었다.

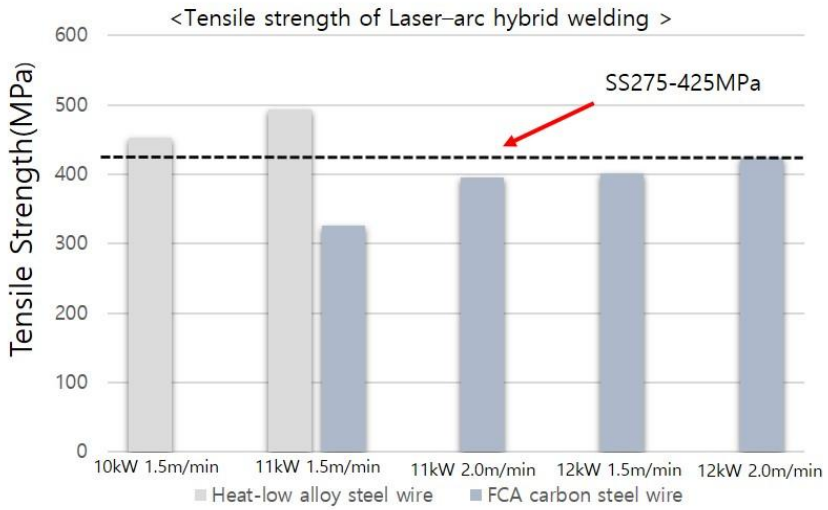


Fig. 3.6 Comparison of tensile strength of with different wire type laser-arc hybrid welded joints

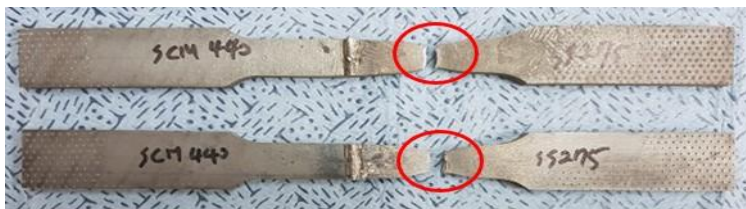


Fig. 3.7 Fractured specimens after tensile test by solid wire for Heat resistant steel



Fig. 3.8 Fractured specimens after tensile test by FC wire for carbon steel

Table. 3.7 Fatigue test results of FC carbon steel wire used welding joints

Stress range(MPa)	Number of cycle	Fracture area
90	2,000,000	Run-out
113	2,000,000	Run-out
135#1	467,753	SCM 440 face toe
135#2	860,875	SCM 440 face toe
135#3	2,000,000	Run-out
158#1	96,870	SCM 440 face toe
158#2	1,274,001	SCM 440 face toe
158#3	1,475,590	SCM 440 root toe
158#4	2,000,000	Run-out
180#1	68,092	SCM 440 face toe
180#2	98,608	SCM 440 face toe
180#3	100,938	SCM 440 face toe
203	50,087	SCM 440 face toe

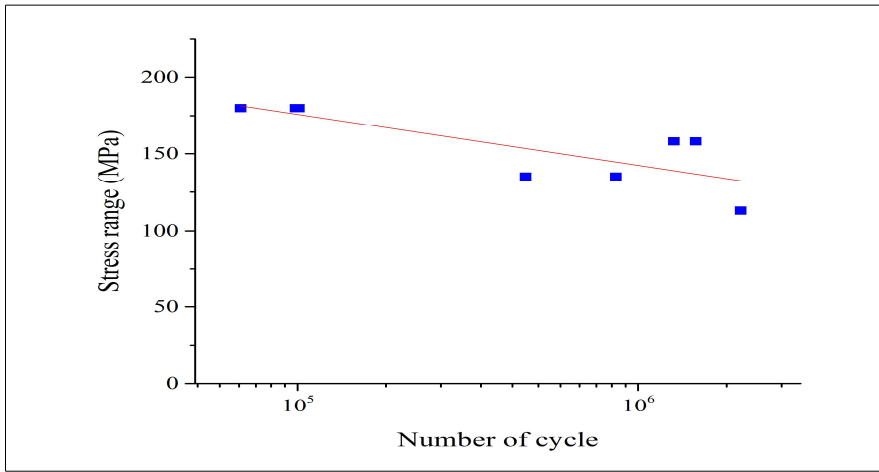


Fig. 3.9 S-N Curve of FC carbon steel wire used welding joints

### 3.2.3 경도분포

Fig. 3.10과 Fig. 3.11은 내열강용 솔리드 와이어와 탄소강용 플렉스코드 와이어의 하이브리드 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 용접부 경도 분포는 시편의 상부(아크영역)와 하부(레이저 영역)를 나누어 0.5mm간격으로 횡방향 측정하였다. 시험편은 EN ISO 22826 금속재료 용접부에 대한 파괴시험 - 레이저와 전자빔으로 형성된 협소 용접부의 경도시험(비커스 및 누프 경도시험)에 따라 비커스 경도시험으로 측정하였다.

각 와이어별 용접부 경도분포를 살펴보면, 경도 측정결과로 위치에 따라 큰 차이를 보이며 열영향부로 갈수록 현저히 높아짐을 알 수 있다. 그리고 FCA 탄소강 와이어보다 내열강용 와이어를 사용했을때, SCM440의 열영향부(HAZ)영역이 넓게 분포되었다. SCM440의 화학적 조성- 탄소(C) 함량이 더 많아짐에 따라 경도가 증가하게 되고, 탄소(C) 함량이 적은 SS275의 화학적 조성 비율이 더 많아지므로 용접부의 경도가 감소한 것으로 판단된다.

경도분포 특징으로 내열강용 와이어 용접에서 하단부의 레이저 영역이 상부 아크 영역보다 경도값이 현저히 높게 나타나는데, 아크의 영향이 적어 빠른 냉각속도로 결정립 미세화가 된 것으로 판단된다. 그리고 레이저 영역에서 최고 경도값이 아크영역에 비해 다소 높게 나타났지만, 그 차이는 크지 않았다. 반면, 고집적 선형열원의 특성을 지니고 있으므로 좁고 균일한 용착금속량과 열영향부로 인해 최고 경도값의 분포 영역대가 좁게 형성되고 있음을 확인하였다. SCM440은 Q.T이후의 나타나는 경도 값인 250HV 이상의 값을 나타내었다.

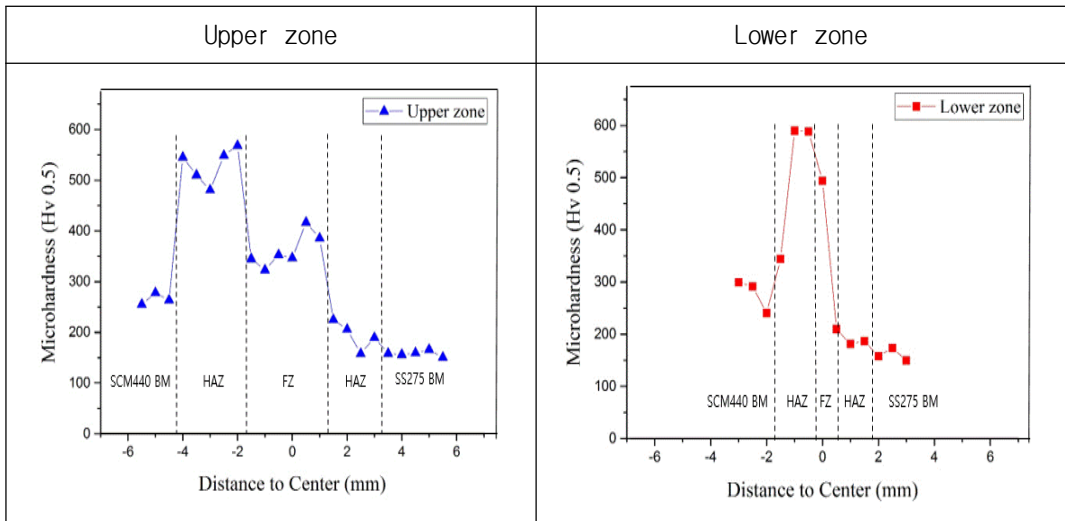


Fig. 3.10 Hardness distribution of Heat resistant steel wire adopted welding joints

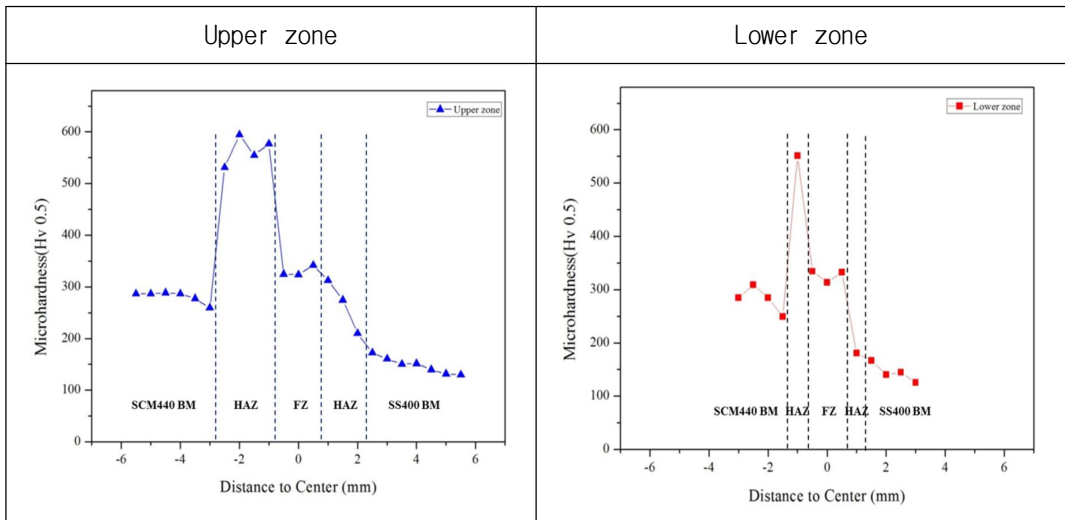


Fig. 3.11 Hardness distribution of FC carbon steel wire adopted welding joints

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 이종재 SCM440/SS275의 CO<sub>2</sub> 레이저- GMA 하이브리드 용접 시 와이어 종류에 따른 용접 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이종재 SCM440/SS275의 하이브리드 용접에서는 내열강용 솔리드 와이어와 탄소강 플렉스코드 와이어 모두 저온균열이 발생하였다. 입열량이 많을수록 SCM440의 다량의 합금원소(Cr-크롬)에 따른 높은 탄소(C)당량에 경화되고, 입열량이 증가할수록 조직의 재결정에 의해 형성된 결정입계를 따라 저온균열 발생이 관찰되었다.

2) 와이어 조건별 최적조건으로 액상침투시험(PT), 자분탐사시험(MT)를 실시하여 용접부 내부 결함유무를 확인하였다. 비파괴 검사 결과로 용접부에 원형지시 및 선형지시와 기타 용접결함이 관찰 되지 않았다.

3) 내열강용 솔리드 와이어 적용 용접부는 11k 1.5m/min, 11k 1.5m/min의 조건에서, 탄소강용 플렉스코드 와이어 적용 용접부 12kW 2.0m/min의 조건에서 SS275의 모재파단으로 최대인장강도 425MPa 이상의 인장강도를 나타내었다. 두 와이어의 공통점으로 용접속도가 증가할수록 인장강도가 증가하는 특성을 보이며, 용접속도가 증가하게 되면 냉각속도가 빨라짐에 따라 상대적으로 응고속도가 증가하여 결정립 미세화에 의한 강화 효과로 인해 인장강도가 증가한 것으로 판단된다.

4) 최적의 용접조건을 보인 내열강용 와이어를 이용한 하이브리드 용접 시험편 피로시험 결과 파단은 대부분 조건에서 비드 표면의 토우부에서 발생하였으며, 응력 범위 68~113MPa, 135#3MPa, 158#4 MPa 조건에서 반복횟수 2x10<sup>6</sup>을 확보 하였다.

5) 각 와이어별 용접부 경도 측정결과, 위치에 따라 큰 차이를 보였으며, 레이

저 영역에서 최고 경도값이 아크영역에 비해 다소 높게 나타났다. 높은 경도값은 탄소의 확산과 크롬-몰리브덴강 SCM440내부에 포함된 크롬성분의 탄화물이 입계에 석출로 용접부의 강도 및 경도를 상승시킨 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 민변훈. SCM440과 SS400의 마찰용접부 접합특성 연구 (SCM440과 SS400의 摩擦 熔接部 接). 충남대학교. 석사 2008
- [2] 방한서, 방희선, 전근홍, 마찰교반접합기술을 이용한 이종재료 접합에 관한 최근 연구동향, 대한용접접합학회지, 2011, Vol.29 Vo.5, pp37-40
- [3] O. Wachter and G. Brummer, "Experiences with austenitic steels in boiling water reactors ", Nuclear Engineering and Design, 168, 35-52, 1997
- [4] 김정식, 김광희, 이종선. (2013). 화력발전설비의 과열증기저감용 가변 오리피스분사 특성. 한국산학기술학회논문지 제 14권 제1호, pp63-68.
- [5] D. P. G. Lidbury, "The significance of residual stresses in relation to the integrity of LWR pressure vessels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 17, 197-328, 1984
- [6] T. Chapman, H. Offer, W. Sanders and G. Rusack, "Reduced stress welding process for nuclear plant piping", Nuclear Engineering and Design, 170, 81-88, 1997
- [7] 방한서, 오종인, 방희선, 김형. (2005). 용접공정에 따른 2.25Cr-1Mo강 용접 이음부의 특성 변화에 관한 연구. 한국해양공학회지 제 19권 제1호, pp49-56.
- [8] 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.
- [9] 阿部信行, 梶田泰司, 林雅一, 土谷良明, "導光路付きレーザ・アーク複合高速度 溶接の研究", 第29回 高エネルギー・ビーム加工研究委員会, HEB-312-98, p1-6, 1998
- [10] 홍석주, 홍성호. (2005). 발전설비에 적용되는 보수용접 조건 및 사례분석. 대한용접접합학회지 제23권 제1호, pp26-29.
- [11] 방국수, 정호신, 박찬. (2015). 다층용접한 저합금 용접금속의 강도와 인성



- 에 미치는 입열량 및 예열/패스간 온도의 영향. 한국해양공학회지 제 29권 제 6호, pp481-487.
- [12] 김성종, 김진경, 김종호, 김기준, 김영식, 문경만. (2000). SCM440강 용접부의 내식성에 미치는 용접후 열처리효과에 관한 전기화학적 연구. 한국마린엔지니어링학회지 제24권 제6호, pp750-760.
- [13] 용접접합편람 제1편 (2008). pp 35-42
- [14] 阿部信行, 林雅一, “レーザ・アーク複合溶接法の現状と将来”, 溶接学会誌 第70巻 第4号, p7-11, 2001
- [15] Claus Bagger and Flemming O. Olsen, "Review of laser hybrid welding", Journal of Laser Applications, Vol.17, No.1, p2~14, 2005
- [16] 김종희, 방한서, 배재용, 방희선. (2018) 석탄화력발전설비 리턴휠(SCM440-SS40)의 레이저-아크 하이브리드 용접시 맞대기 용접성 평가. 대한용접접합학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집. pp 130-130.
- [17] 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.
- [18] 채현병, 김철희, 김정한, 이세현. (2006). 조선용 강재의 CO2레이저-GMA 하이브리드 용접에서 갭 브리징 능력 향상기술 개발. 대한용접접합학회지 제24권 제5호, pp 49-56.
- [19] 채현병 : 선박 상부데크의 버트용접에서 갭 대응력 향상을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접공정 개발. 한양대학교. 석사 2007
- [20] 박용호 : 하이브리드 용접을 위한 아크 열원의 기초적 연구. 한국해양대학교. 석사 2012
- [21] 이진희. 용접기술 실무(2014). pp 576-577
- [22] 박종우. 정밀용접공학(2017). pp 411