



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2016년 8월

석사학위 논문

# 아연도금강판 SGAPH440 소재의 MAG 및 LASER 용접특성 평가

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 종 희

# 아연도금강판 SGAPH440 소재의 MAG 및 LASER 용접특성 평가

Evaluation of Weldability in MAG and LASER  
for SGAPH440

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 종 희

# 아연도금강판 SGAPH440 소재의 MAG 및 LASER 용접특성 평가

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 종 희

## 김종희의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

# CONTENTS

List of Figures .....	III
List of Tables .....	V
Abstract .....	VI
1장. 서론 .....	1
1 . 1 연구 배경 및 목적 .....	1
1 . 2 국내 외 연구동향 .....	4
1 . 3 용접 결함의 종류와 원인 .....	8
2장. 실험 방법 .....	13
2 . 1 실험 재료 및 용접 장비 .....	13
2 . 2 용접 조건 .....	18
2.2.1 MAG 용접 조건 .....	18
2.2.2 LASER 용접 조건 .....	20
2 . 3 용접부 평가 방법 .....	21
2.3.1 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가 .....	21
2.3.2 인장-전단 시험 .....	23
2.3.3 경도 시험 .....	24
2.3.4 미세조직 관찰 .....	25
2.3.5 비파괴 검사 .....	26

3장. 연구 결과 .....	27
3 . 1 MAG 용접부의 특성 평가 .....	27
3.1.1 최적 혼합가스 비 도출 .....	27
3.1.2 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가 .....	30
3.1.3 인장-전단강도 평가 .....	38
3.1.4 경도분포 평가 .....	42
3.1.5 미세조직 평가 .....	46
3 . 2 LASER 용접부의 특성 평가 .....	47
3.2.1 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가 .....	47
3.2.2 인장-전단강도 평가 .....	49
3.2.3 경도분포 평가 .....	51
3.2.4 미세조직 평가 .....	52
3.2.5 내부결함 평가 .....	53
4장. 결 론 .....	55
참고문헌 .....	57

## List of Figures

Fig 1.1	Comparing EGI, GA and GI steel sheet .....	1
Fig 1.2	Location of Lower-Arm .....	2
Fig 1.3	Problems of Lower-Arm in MAG Welding .....	3
Fig 1.4	Application LASER welding in Audi Q7Application LASER welding in Infiniti G35 .....	5
Fig 1.5	Application LASER welding in Infiniti G35 .....	5
Fig 1.6	Comparing Volkswagens Golf IV and V .....	6
Fig 2.1	Dimensions of welding specimen .....	13
Fig 2.2	Dimensions of MAG welding specimen .....	14
Fig 2.3	Dimensions of LASER welded specimen; (a)Case 1(Single line) and (b)Case 2(Double line) .....	14
Fig 2.4	MAG welding system .....	16
Fig 2.5	LASER welding system .....	17
Fig 2.6	Tensile-shear test equipment .....	23
Fig 2.7	Hardness test equipment .....	24
Fig 2.8	Opical microscope .....	25
Fig 3.1	Load-Stroke curve of MAG welding(MC) .....	39
Fig 3.2	Fractured specimen after tensile-shear test(MC) .....	39
Fig 3.3	Load-Stroke curve of MAG welding(KC) .....	41
Fig 3.4	Fractured specimen after tensile-shear test(KC) .....	41
Fig 3.5	Hardness distributions of MAG welds(MC) .....	43
Fig 3.6	Hardness distributions of MAG welds(KC) .....	45
Fig 3.7	Micro structures in different locations of MAG welds .....	46
Fig 3.8	Load-Stroke curve of LASER welding .....	49
Fig 3.9	Fractured specimen after tensile-shear test(LASER) .....	50
Fig 3.10	Hardness distributions of LASER welds .....	51



Fig 3.11 Micro structures in different locations of LASER welds ..... 52  
Fig 3.12 Report of radiographic testing ..... 54

## List of Tables

Table 1.1	Application of LASER welding in automotive industry	6
Table 1.2	Influence of wire extension	9
Table 1.3	Undercut condition of welding parameters	10
Table 2.1	Chemical Compositions and Mechanical Properties in (a)Base metal, (b)MC solid wire and (c)KC solid wire	15
Table 2.2	Welding parameters of MAG	18
Table 2.3	Experiment chart of MAG welding	19
Table 2.4	Welding parameters of LASER	20
Table 2.5	ISO 5817 Quality levels	21
Table 2.6	ISO 13919-1 Quality levels	22
Table 2.7	Hardness testing condition	24
Table 3.1	High speed photography for shielding gas compositions	28
Table 3.2	Bead profiles of welds for shielding gas compositions	29
Table 3.3	Bead profiles of welds in MC solid wire	31
Table 3.4	Bead and cross section profiles of welds in MC solid wire	32
Table 3.5	ISO 5817 Quality levels for imperfections(MC)	33
Table 3.6	Bead profiles of KC solid wire	35
Table 3.7	Bead and cross section profiles of welds in KC solid wire	36
Table 3.8	ISO 5817 Quality levels for imperfections(KC)	37
Table 3.9	Bead and cross section profiles of welds in LASER welding	47
Table 3.10	ISO 13919-1 Quality levels for imperfections(KC)	48
Table 3.11	Radiographic test for specimen	53

## ABSTRACT

### Evaluation of Weldability in MAG and LASER for SGAPH440

Kim Jong Hee

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

Department of Welding and

Joining Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

Lower-Arm is one of the critical components in automotive suspension module. It plays an important role on the effect of absorbing and relaxing the vibration and also it influences in wheel alignment.

Generally the production of Lower-Arm is used MAG welding after fixing the component with jig system. The tails-end process is needed due to the foundational problems in the welding process such as spatters and weld defects in porosities and weld shapes. These problems increase working hours and production expenses.

Therefore, the purpose of this study is to verify the effects on welding process of MAG and LASER welding and analyze the weldability.

Lap-joint fillet was applied to weld two 2mm thick Galvannealed Steel sheets (SGAPH440) which has been used in actual Lower-Arm.

The mechanical and metallurgical properties were considered to evaluate each step of the welding process. Two solid wires with differently chemical composition rate of 0.19% and 0.22% of Silicon(Si) and Manganese(Mn) were used in MAG welding. In this case, more spatters were observed from the solid wire containing more Mn and Si.

The weldability was evaluated in terms of Bead. There is no lack of penetration, fairly fine porosity and good penetration were observed in all conditions. However, there were more spatters in KC solid wire than MC solid wire.

Welded joints quality was evaluated according to ISO 5817(Undercut, Porosity, Lack of penetration, Excessive throat thickness) and ISO 13919-1(Porosity, Lack of fusion, Deviation from specified joint axis). The result for estimate welded joints could be obtained quality level for stringent(B) in MAG and LASER.

The highest tensile-shear strength of the MAG welded joints was 18.1kN and LASER welded joints was 16.7kN. The highest hardness values were proved that 230.3Hv in MAG and 293.5HV in LASER.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

아연도금강판은 내식성과 내마모성 등의 향상을 위해 강판표면에 철(Fe)보다 희생 방식 능력이 뛰어난 아연(Zn)을 소지철의 표면에 코팅을 실시한다. 종류로는 전기 아연도금강판(EGI: Electro-galvanized steel sheet), 용융 아연도금강판(GI: Galvanized steel sheet) 및 합금화 용융 아연도금강판(GA: Galvannealed steel sheet)으로 나누어진다. 일본에서는 차체 판넬용으로 아연도금강판이 80~90%를 점유하고 있으며, 국내 자동차 사들도 아연도금강판의 사용비율이 크게 증가되고 있다. 특히 합금화 처리를 행한 합금화 용융 아연도금강판은 순 아연으로만 구성되어 있는 용융아연도금강판의 문제점인 용접성 및 도장성을 향상시킬 목적으로 제작되어, 가격이 저렴하고 내식성과 용접성이 우수하기 때문에 자동차 회사들은 원가절감 측면에서 선호되고 있고 가전, 건축용도를 중심으로 생산량이 점점 증가하고 있다.[1-4]



Fig. 1.1 Comparing EGI, GA and GI steel sheet

자동차 현가장치 부품인 로워암(Lower-Arm)은 서스펜션 모듈의 한 구성품으로 주행 중 발생하는 진동을 흡수, 완화하는 역할을 함은 물론 휠 얼라인먼트까지 영향을 주게 되어 중요한 부품에 해당한다.

여기서 휠 얼라인먼트란 자동차에 장착되어 있는 바퀴의 위치, 방향 및 상호관련성 등을 올바르게 유지하는 정렬상태를 말한다. 바퀴의 얼라인먼트가 올바르게 유지되지 않을 경우, 주행 중에 불안정이나 타이어 이상마모 등을 일으키게 되어 승객의 안전성과 직결된다.

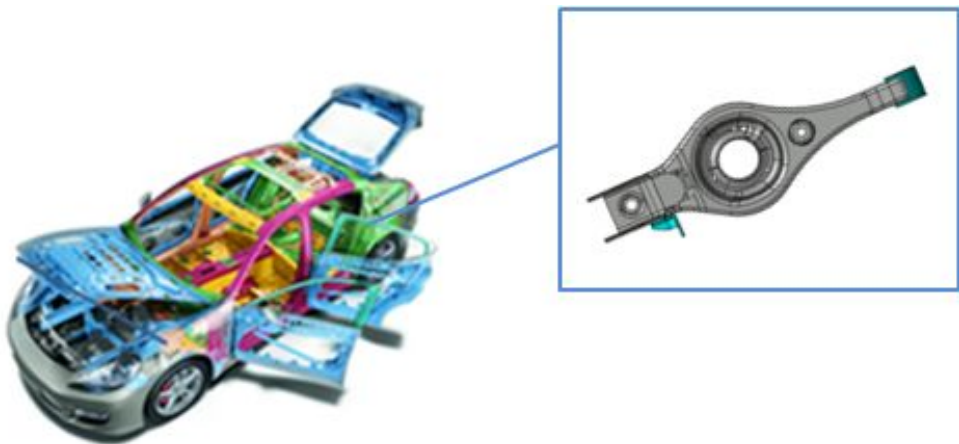
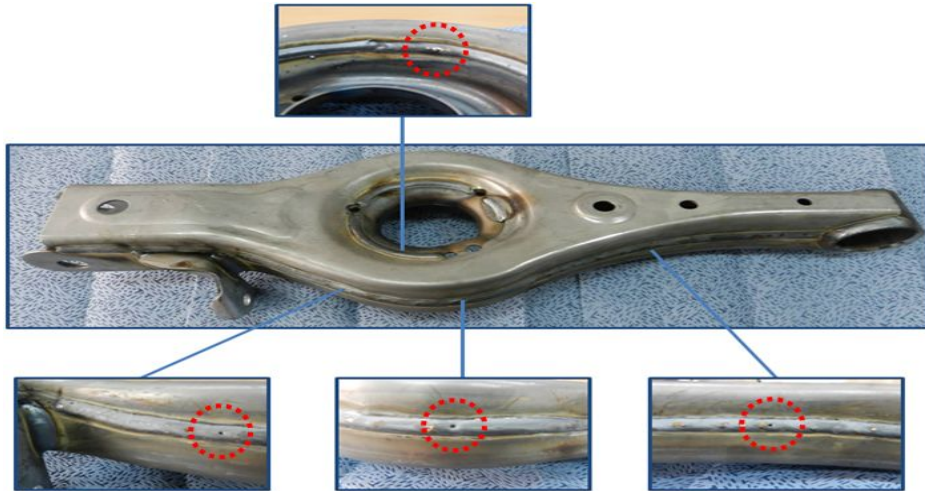


Fig. 1.2 Location of Lower-Arm

Lower-Arm 조립은 성형된 각각의 부품을 지그시스템으로 고정시킨 후 MAG 용접을 실시한다. 이음법의 경우 복잡한 제품의 형상과 성형시에 공차발생 및 가공의 어려움으로 인해 겹치기 이음을 사용한다.[5] 여기서 아연도금강판으로 조립하는 경우 용접부에는 Pit, Blowhole 같은 결함이 다수 발생하여 용접품질 및 생산성이 저하하는 원인이 되고 있다.[6] 또한 다량의 스파터(Spatter), 기공(Porosity) 등의 용접결함 및 Bead 외관상의 문제 등으로 후처리 공정이 필요하다.[7-10]



**Fig. 1.3 Problems of Lower-Arm in MAG Welding**

이로 인한 작업공수 증가로 생산성 저하 및 비용이 소요될 뿐만 아니라, 용접 중에 발생하는 탄산가스(Fume), 소음 등에 의한 작업환경 문제는 작업자의 작업 기피현상 및 기술력 저하의 원인이 되어 제품의 불량률 증가와 기업 생산성 저하의 원인을 일으킨다.[11]

이에 본 연구에서는 Lower-Arm의 제작 시 기존에 쓰이고 있는 MAG 용접에서 기초적 문제점을 해결할 용접조건을 제안하고자 혼합가스 조성비에 따른 스파터 및 용접 결함에 대해 고찰하였다. 아울러 도출된 최적의 혼합가스 조성비를 토대로 주요변수에 따른 용접성을 평가해 최적조건을 도출하였다. 또한 MAG 용접에 비해 미려한 비드를 생성하고 좁고 깊은 용접부를 구현 할 수 있으며 열 변형을 최소화 할 수 있는 등의 높은 용접품질을 얻을 수 있는 LASER 용접의 적용가능성을 검토하였다.[12]

## 1.2 국내·외 연구동향

선진국의 용접기술 연구현황을 살펴보면, 유럽이나 일본 등에서는 저스파터화의 방안으로는 보호가스로 탄산가스 대신 혼합가스를 적절히 사용하는 MAG 용접의 적용으로 용적이행을 정확히 제어하여 만족스러운 성과를 거두고 있다.[13] 또한 단락이행에서 스파터 저감에 목적을 둔 전류 파형제어 기술을 적용한 용접전원 장치의 개발도 활발하게 이루어지고 있다. 1980년에 Pinchuk 등이 전류 파형제어 기술을 제안하였으나 실용화되지 못하였고, 1990년대 초에 미국 Lincoln 사의 STT(surface tension transfer) 및 일본 고베 사에서 인버터 용접 전원의 개발로 상용화되었다.[14-17] 그러나 이러한 전류 파형제어 기술은 단락이행 시 전류의 상승을 피할 수 없고, 이로 인한 입열 증가로 저 입열이 필요한 초 박판 용접에 적용이 어렵다. 게다가 외란이 있을 경우 정교한 파형제어가 불가하여 스파터를 줄이는 것이 어렵고 아울러 고속 용접에 적용하는 것도 쉽지 않다.[18]

LASER의 경우 유럽이나 북미, 일본의 자동차 업계에서는 LASER 용접을 수행함으로써 주로 차체 조립라인의 공정수를 줄이는 동시에 차체의 강도를 향상시키고 있다. 아우디(Audi)는 알루미늄 차체개발을 활발히 진행하면서 점용접 적용의 어려움을 인식하고 LASER 용접을 이용하여 Audi Q7의 roof side에 LASER Stitch 용접을 4.4m적용하였으며, Audi TT 모델은 5.3m길이에 LASER 용접을 적용하였다.



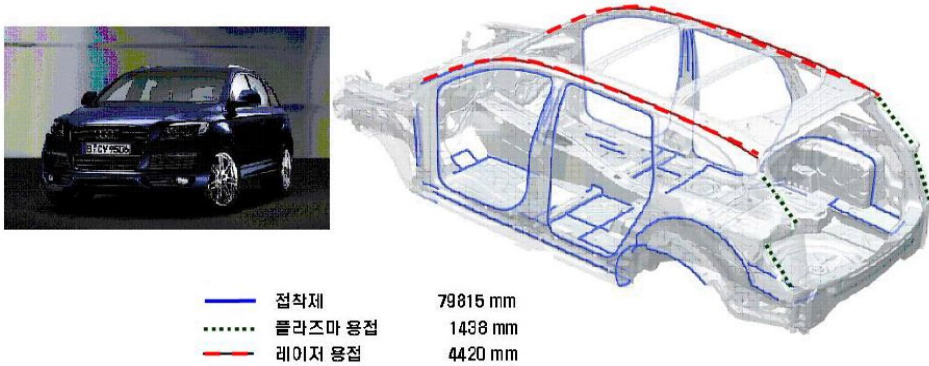


Fig. 1.4 Application LASER welding in Audi Q7

일본 인피니티(Infiniti)는 G35 모델의 차체 일부 영역을 점용접을 대체하여 roof side에 LASER STITCH 용접 및 rail, door 등에 LASER 용접을 적용하여 차체 강성을 향상되었다.

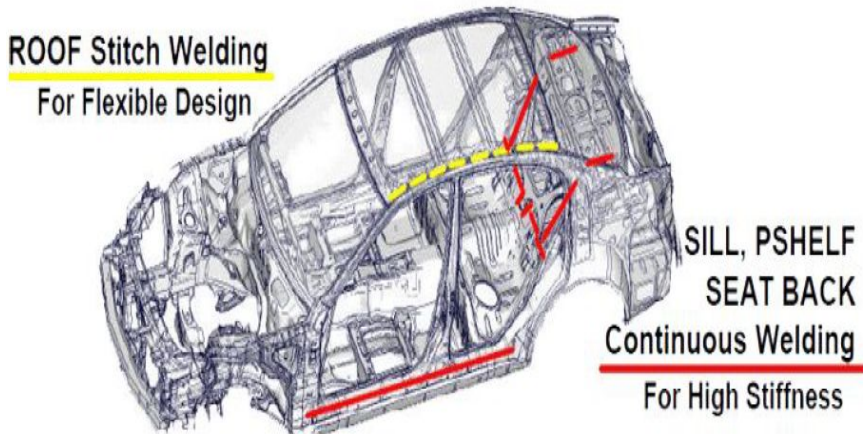


Fig. 1.5 Application LASER welding in Infiniti G35

폭스바겐사는 5세대 골프에 아연도금 및 고장력강판을 사용하였고, LASER 용접을 적용하여 기존대비 비틀림강성 15%, 휨 강성 35%, 정적 비틀림 강성은 80%까지 개선하였다.

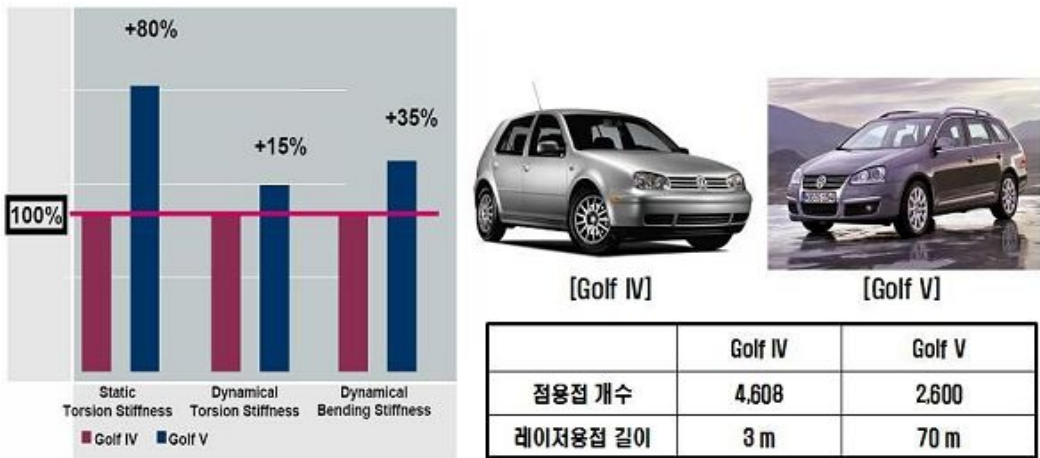


Fig. 1.6 Comparing Volkswagens Golf IV and V

국내 완성차 업체의 용접기술 연구개발 현황으로는 현대기아를 중심으로 차체에 LASER 용접된 테일러드 블랭크를 활용하고 있으며 Inner Door를 시작으로 하여 LASER 용접 응용 차체 개발에 매진하고 있다.

Table. 1.1 Application of LASER welding in automotive industry(in KOREA)

업체명	적용 부위	적용 차종	적용 LASER
현대·기아 자동차	Door side line	TUSCANI GRANDEUR XG SONATA	4kw Nd:YAG
	Tail gate	SANTAFE	6kw $Co_2$

그러나 국내 자동차 부품업체들의 경우, LASER 용접 시스템을 구축하는데 높은 설비투자비용으로 인하여 제한적이며 대부분의 부품들은 차체조립과 달리 복잡한 형상으로 인한 성형시의 공차발생 및 가공의 난해함 등으로 보다 적용하기 쉬운 저항점용접이나 MAG 용접방법이 주로 적용되어 생산되어진다.

이상의 MAG, LASER 용접기술 연구현황 및 상용화 사례에서 알 수 있는 바와 같이 선진국에서는 주로 완성차의 차체에 LASER 용접을 적용하고 있다. 그러나 완성차를 구성하는 자동차 부품의 경우, 국내와 비슷하게 대부분 MIG/MAG 용접방법을 채택하여 생산하는 실정이다.

## 1.3 용접 결함의 종류와 원인

MAG 용접의 기초적 문제점인 용접결함 중 비교적 빈도가 높은 스파터, Undercut, Humping bead, 기공에 대해 살펴보면 다음과 같다.

### 1) 스파터(Spatter)

#### 가. 원인

- 스파터 발생은 용융되는 와이어 선단이 용착될 때까지 고속으로 복잡하게 일어나는 여러 가지 현상 즉 아크방전현상, 용적이행현상, 용융지형성현상에서 기인한다.
- 저전류영역에서는 단락과 Arc발생이 교대로 일어나고 용적이행은 와이어 선단에 생긴 용적이 용융지와 단락에 의해 일어난다. 이때 스파터는 단락에서 Arc발생이 이루어지는 과정에서 주로 발생하게 되고 Arc발생 시의 전류가 높을수록 스파터 량이 많아진다.
- 자동차 산업에서는 대부분 저전류성에서 사용되고 있으므로 여기서의 스파터 발생에 영향을 미치는 인자들로서는 용접전원의 단락전류 제어, 용접조건 중의 전압, 돌출와이어의 길이, Torch 조작을 들 수 있다.

#### 나. 문제점

- Nozzle·Tip에의 부착으로 인한 차폐효과의 저해와 와이어 송급장애 유발
- Nozzle·모재·치구 등에 부착된 것의 제거 작업으로 공수
- 증대화상·화재의 위험성 증대

## 다. 대책

### ① 용접전원의 단락전류제어(Inverter 전류제어)를 통한 Spatter감축

- Inverter 전류제어에 의한 고속 전류 파형의 제어가 가능하므로 이에 의한 방법으로 스파터 감축이 가능하다.
- 즉 단락 직후에 전류증가를 억제하여 단락상태를 지속 또는 확실히 하였다가 Arc 재생시의 전류증가를 최소화함으로써, Spatter를 감축시키고 또 용적이행 수반하지 않은 미소단락시의 스파터를 감축시킨다.

### ② 아크전압

- 전압을 높게 하면 아크길이는 길어지고 와이어 선단의 용적이 커지게 되고, 또 단락은 거의 일어나지 않고 큰 입자의 스파터가 발생하게 된다.
- 이것에서 전압을 서서히 내리면 아크길이는 짧아지며 불규칙한 단락음이 귀에 들리고 더욱 전압을 내리면 단락음은 규칙적으로 들리면서 단락 횟수도 증가하여 [지-] 하는 음으로 변화하게 되는데, 이상태가 가장 안정한 전압조건이 되고 스파터도 가장 적다.

### ③ 와이어 돌출길이

Table. 1.2 Influence of wire extension

항 목	길어질 경우	짧아질 경우	비 고
전류	감소	증가	와이어 돌출길이는 적정하여야함
아크길이	길어짐	짧아짐	대개 와이어직경의 10배
아크 안정성	불량	불량	정도가 좋음
용입	얕아짐	깊어짐	사용전류가 높을 때
스패터 발생	대입, 다량	다량	는 조금 길게 하는 것이 좋음

④ Torch 운봉법의 전진법

- 전진법과 후진법중 스파터 감축에 유리한 것은 후진법으로, 다소 스파터가 적어지며 전진법에 비해 용입은 다소 깊어지고 비드형상은 볼록형이 되기 쉽다.

## 2) Undercut

### 가. 원인

- 용접전류, 용접속도, 용접전압, Torch겨냥각도, Torch겨냥위치, Wire 송급불안정, 주행의 불규칙, 이음부의 정밀도 불량, 자기불림 등을 들 수 있다.

### 나. 대책

Table. 1.3 Undercut condition of welding parameters

용접조건		발생빈도	비고
용접전류	고	다	
	저	소	
용접전압	고	다	용접전압은 높을 때도 낮을 때도 많이 발생 되므로 적정해야함
	저	다	
용접속도	고	다	
	저	소	

### 3) Humping bead

#### 가. 원인

- Ar을 적용한 용접에서 Humping bead가 발생하기 쉬우며 표면장력, 용융비드의 흐름 등이 발생 원인이다.
- 대체로 고전류에서 용접속도가 빠른 경우에 발생하기 쉽고 또 고전압에서도 아크가 넓어져 이 현상을 쉽게 일으키는 경향이 있다.

#### 나. 대책

- 용접속도와 Torch각도의 조종에 의해 개선시킬 수 있다.

### 4) 기공

#### 가. 원인

- 용접금속 중에 기포상태로 내재해 있는 질소, 수소, CO<sub>2</sub>, Ar, CO등의 가스구멍, 비드표면까지 뚫린 구멍인 Pit, 슬래그가 덮인 비드 상에 생기는 가스구, Wormhole등을 가리킨다.
- 아연도금강재의 경우 아연이 기화된 상태에서 용융금속을 미처 부상하지 못하고 잔존해 용융금속 안에 기공으로 존재한다.
- 모재 표면상태, 용접기기, 부품의 상태, 용접조건, 보호가스 종류와 품질, 용접 와이어 성분 및 표면상태, 용접사의 기량 등이 있다.

## 나. 대책

- Press 가공시에 표면에 부착된 오염물질을 세척함에 따라 오염물질에서 연유됨을 감소시킨다.
- 아연도금강재의 용접부에서 증발된 아연증기와 표면에서 발생된 수소가스가 응고 시에 미처 부상하지 못하고 잔존된 것으로, 이에 대해서는 Gap을 주는 것이 유효하고, 또한 혼합가스에 의한 방법으로는 CO<sub>2</sub> 함유량을 높이는 것이 기공을 줄이는데 유효하다.



## 제 2 장 실험방법

### 2.1 실험재료 및 용접 장비

본 연구에 사용된 재료는 실제 Lower-Arm에 쓰이는 합금화 용융 아연도금강판인 SGAPH440을 사용하였다. 시험편의 제원으로는 Fig. 2.1에 나타난 바와 같이 두께 2mm의 박판재를 250(L) x 100(B)mm 크기로 선정하였다.

MAG 용접의 이음법은 Fig. 2.2와 같이 두 모재를 10mm 오버랩 시켜 엮지 부분에 용접하는 겹치기 필릿이음(Lap-joint Fillet)을 실시하였다. LASER 용접의 경우에는 Fig. 2.3와 같이 Single line(Case-1) 조건과 Double line(Case-2) 조건으로 시험편을 제작하여 용접성을 비교·평가 하였다.

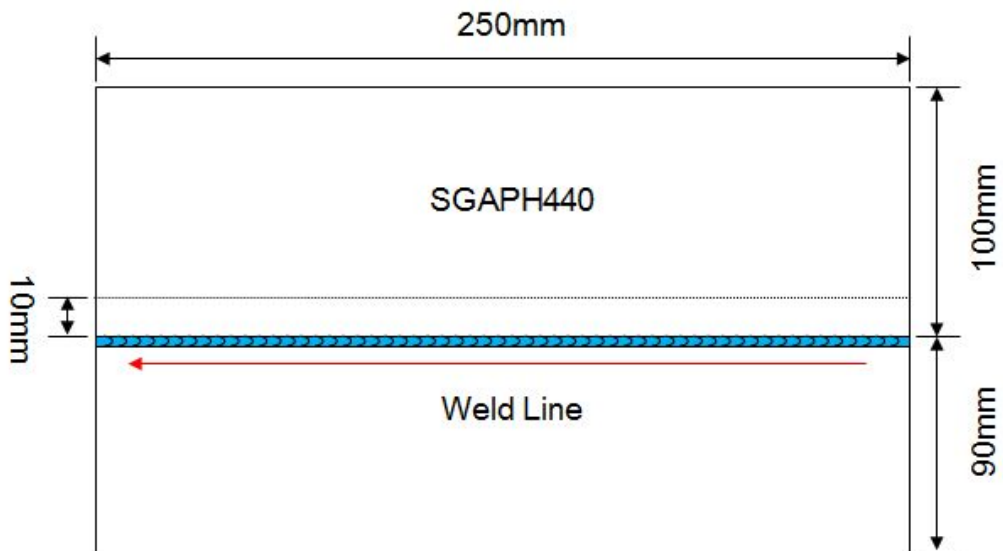


Fig. 2.1 Dimensions of welding specimen

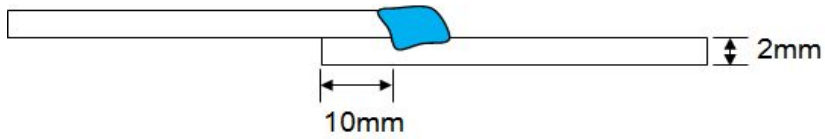


Fig. 2.2 Dimensions of MAG welding specimen

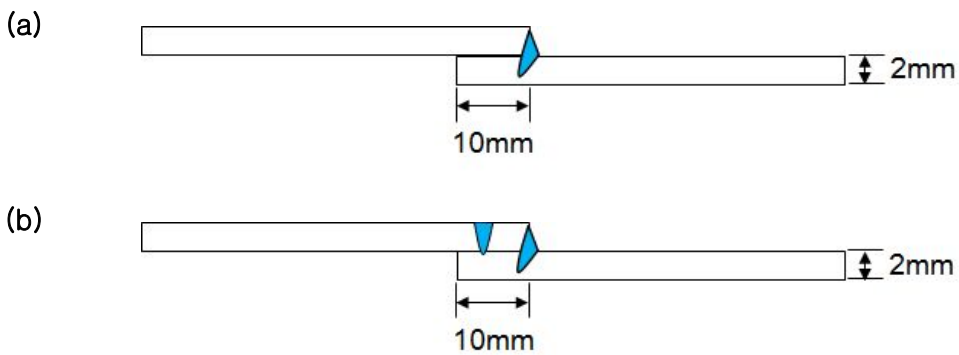


Fig. 2.3 Dimensions of LASER welded specimen;  
(a)Single line(Case-1) and (b)Double line(Case-2)

그리고 MAG 용접에 사용된 와이어는 스패터 저감용 솔리드 와이어 1.2 $\phi$ 를 사용하였다. 사용된 솔리드 와이어는 실리콘(Si)과 망간(Mn)의 함유량이 약간 다른 2가지 종류를 사용하였다.

문헌에 따르면 솔리드 와이어 성분 중 망간과 실리콘이 함유량에 따라 스패터 발생량이 증가한다고 밝히고 있다. 이에 따른 원인은 실리콘 함유량이 증가하면 재아크 전류치를 증가시켜 아크 불안정으로 스패터 발생률이 증가한다고 나타내고 있다. 탈산원소인 망간 또한 실리콘과 같은 작용으로 망간과 실리콘 함유량이 감소할수록 스패터를 저감시키는 경향이 있다고 보고되어 진다.[19-21]

따라서 망간과 실리콘 함량이 차이나는 두 종류의 솔리드 와이어를 이용하여 실험하였다. 사용된 재료 및 솔리드 와이어의 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table. 2.1에 나타내었다.

Table. 2.1 Chemical Compositions and Mechanical Properties in  
(a)Base metal, (b)MC solid wire and (c)KC solid wire

(a)

Chemical Compositions (wt%) of SGAPH440					
C	Si	Mn	P	S	Sol-Al
0.0791	0.01	1.227	0.01	0.003	0.031
Mechanical Properties of SGAPH440					
Yield stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile stress (MPa)	Hardness(HV)		
362.8	33	471.7	172		

(b)

Chemical Compositions of MC(%)				
C	Si	Mn	P	S
0.08	0.48	0.98	0.014	0.012
Mechanical Properties of MC				
Yield stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile stress (MPa)		
450	30	540		

(c)

Chemical Compositions of KC(%)				
C	Si	Mn	P	S
0.07	0.67	1.20	0.015	0.011
Mechanical Properties of KC				
Yield stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile stress (MPa)		
440	30	540		

본 연구의 MAG 용접을 수행하기 위해 MAG 용접기, 이송시스템(Carriage), Feeder를 구축하였으며, 용접 시스템을 Fig. 2.4에 나타내었다.

박판용접을 위해 정격출력전류가 350A인 Inverter 용접기와 고속이송 (150cm/min)이 가능한 이송시스템을 사용하였고 모터용량 130W, 출력전압 24V로 고속 송급(30m/min)이 가능한 Feeder를 사용하였다.

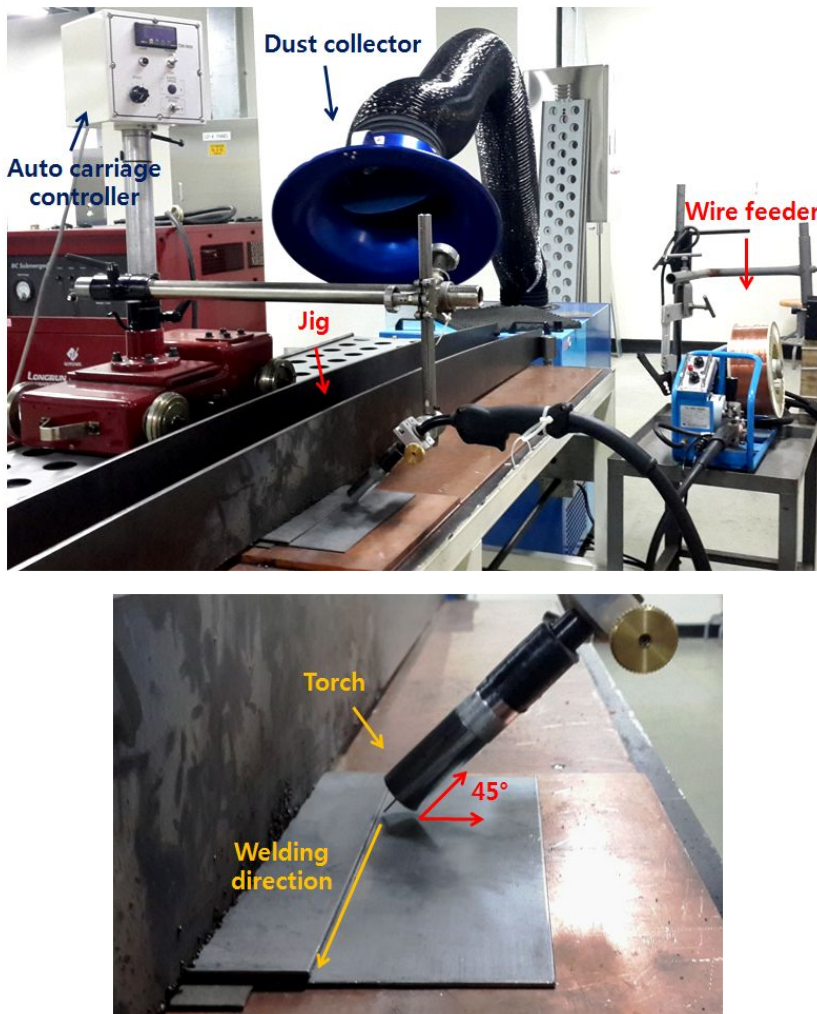


Fig. 2.4 MAG welding system

LASER 용접을 수행하기 위한 용접 시스템을 Fig. 2.5에 나타내었다.

사용된 Nd:YAG LASER 용접기는 유효출력이 3kW인 연속파(CW: continuous wave)로 빔 품질 25mm·mrad, 광 케이블 600 $\mu$ m인 Trumpf 사의 HL3006D 장비를 사용하였다.

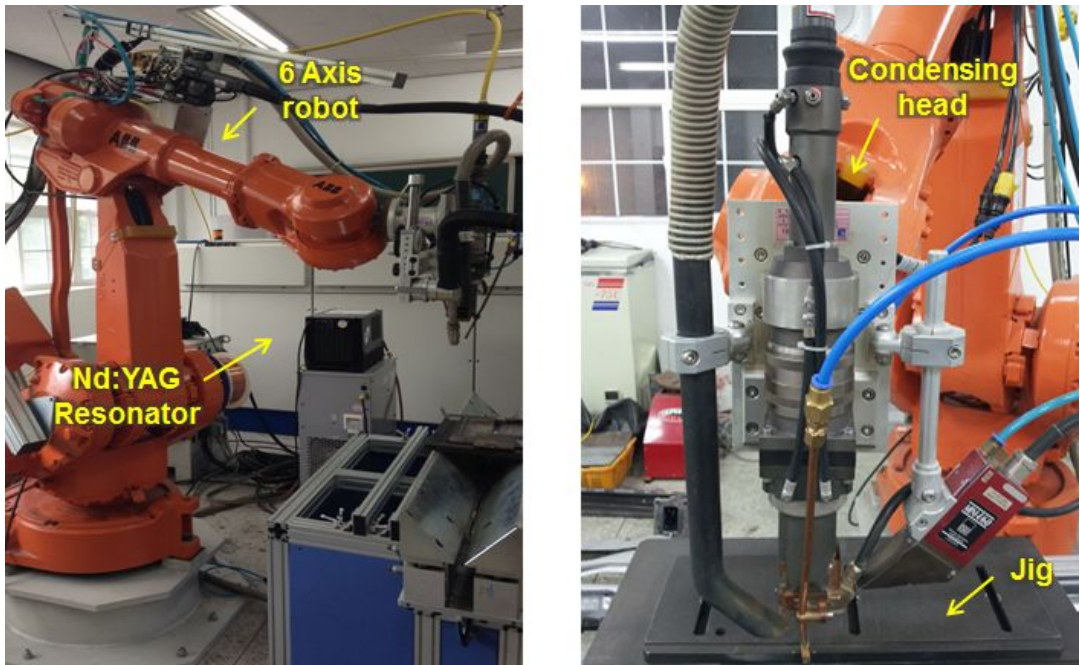


Fig. 2.5 LASER welding system

## 2.2 용접 조건

### 2.2.1 MAG 용접 조건

MAG 용접의 용접공정 주요 변수로 전류, 전압, 용접속도, 혼합가스, 티칭거리, CTWD, 토치 각 등을 선정 하였다. 우선 주요 변수 중 혼합가스는 Ar 7:CO<sub>2</sub> 3, 8:2, 9:1 비율로 변화시켜 최적 혼합가스비율을 선정하였다. 또한 비드 형상과 용입깊이, 스파터량 등에 관련있는 전류는 160A에서 190A 까지 10A씩 변화시켰고 용접속도는 50cm/min부터 70cm/min까지 10cm/min씩 변화시켰다. 티칭거리도 입열량에 맞게 적절히 조절하였으며 전압, CTWD와 Torch Angle, 혼합가스 유량은 고정 값으로 두고 실험하였다.

Table. 2.2 Welding parameters of MAG

Welding parameter	Values
Current (A)	160-190
Voltage(V)	20
Welding speed (cm/min)	50-70
Shielding Gas (ℓ/min)	Ar 7~9:CO <sub>2</sub> 3~1 (20)
Teaching distance(mm)	0.5-1.5
CTWD(mm)	15
Torch Angle	45°

MAG 용접의 상세 용접 조건표를 Table. 2.3에 나타내었다. MC 솔리드 와이어와 KC 솔리드 와이어를 이용하여 이 12가지 MAG 용접 조건별로 실험을 진행하였다.

Table. 2.3 Experiment chart of MAG welding

Number	Current(A)	Welding speed (cm/min)	Teaching distance (mm)
1	160	50	1
2		60	1
3		70	0.5
4	170	50	1.5
5		60	1
6		70	0.5
7	180	50	1.5
8		60	1
9		70	1
10	190	50	1.5
11		60	1.5
12		70	1.5

## 2.2.2 LASER 용접 조건

LASER 용접의 용접 공정 변수로 LASER 출력, 전압, 용접속도, 보호가스, 각도 등을 선정하였다. Table. 2.4에 나타낸 바와 같이 출력 2kW 전압 20V 용접속도 1m/min, 보호가스 Ar, 유량 15ℓ/min을 용접 조건으로 선정하여 실험하였다.

LASER 용접은 두 가지 방법으로 진행하였는데 MAG 용접과 같은 이음법으로서 용접한 Single line(Case-1)조건과 아울러 용접부 강도를 향상시키기 위해 Double line(Case-2) 조건으로 용접을 실시하여 두 가지 방법의 용접성을 비교·평가 하였다.

Table. 2.4 Welding parameters of LASER

Welding parameter	Values
Power(kW)	2
Voltage(V)	20
Welding speed (m/min)	1
Shielding Gas (ℓ/min)	Ar(15)
Angle	20°



## 2.3 용접부 평가 방법

### 2.3.1 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가

MAG 용접조건에 따른 용접부의 용접특성을 고찰하기 위해 ISO 5817(용접결함의 품질수준)[22]에 의거하여 조건별 비드의 특성을 3가지 관점(언더컷, 기공, 용입부족)과 3단계 수준(매우나쁨, 나쁨, 양호)으로 평가하였다.

Table. 2.5 ISO 5817 Quality levels

Imperfection designation	Limits for imperfections for quality levels		
	Moderate(D)	Intermediate(C)	Stringent(B)
Undercut	Short imperfections: $h \leq 0.2t$	Short imperfections: $h \leq 0.1t$	Not permitted
Porosity	$d \leq 0.4a$ , but max. 4mm	$d \leq 0.3a$ , but max. 3mm	$d \leq 0.2a$ , but max. 2mm
Excessive throat thickness	Unlimited	$h \leq 1\text{mm} + 0.2a$ , but max. 4mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.2a$ , but max. 3mm

MAG 용접과 동일한 방식으로 LASER 용접 조건에 따른 용접부의 용접특성을 고찰하기 위해 ISO 13919-1(용접-전자빔 및 LASER빔 용접이음-결함의 품질등급에 대한 지침)[23]에 의거하여 3가지 관점과 3단계 수준으로 평가하였다.

Table. 2.6 ISO 13919-1 Quality levels

Imperfection designation	Limits for imperfections for quality levels		
	Moderate(D)	Intermediate(C)	Stringent(B)
Porosity	$h \leq 0.5t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.4t$ or 3mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.3t$ or 2mm, whichever is the smaller
Lack of fusion	$h \leq 0.15s$ or 1mm, whichever is the smaller	not permitted	not permitted
Deviation from specified joint axis	$h \leq 0.15s$ or 1mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1s$ or 0.5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.05s$ or 0.3mm, whichever is the smaller

### 2.3.2 인장-전단 시험

MAG 와 LASER 용접부의 인장-전단강도를 평가하기 위해 Fig. 2.6에 나타난 ShinGang사 SGA-E-100AD 기계식 인장시험 장치를 사용하였다.

인장 시험편은 KS 규격에 의거하여 와이어 커팅 방식으로 채취하였다. 시험 속도는 cross-head 속도로 KS 규격(KS B 0801 13-B)에 의거하여 0.0833mm/sec로 설정하였다.



Fig. 2.6 Tensile-shear test equipment

### 2.3.3 경도 시험

MAG 용접부와 LASER 용접부의 경도 측정은 Fig. 2.7에 나타난 Akashi사의 HM-112 비커스 경도 시험기를 사용하였다. 현미경 배율은 50 $\mu$ m이며, 136° 다이아몬드 피라미드 입자를 사용하였다.

경도 측정 조건은 Table. 2.7에 나타난 바와 같이 하중 0.2kgf, 하중유지시간 10sec로 고정하여 시험하였다. MAG 용접은 용접부 상부표면으로부터 1mm 위치인 용접부 중앙에서 수평방향으로 0.3mm 간격마다 미소경도를 측정하였고 LASER 용접은 용접부가 좁게 형성되는 특징을 고려하여 MAG 용접의 경도측정 방법과 달리 계단식으로 측정하였다.



Fig. 2.7 Hardness test equipment

	Values
Model	Akashi HM-112
Type	Vickers hardness tester
Load	0.2kgf
Loading time	10sec

Table. 2.7 Hardness testing condition

### 2.3.4 미세조직 관찰

각 공정별 용접부의 금속학적 특성을 평가하기 위해 Fig. 2.8에 나타난 광학현미경(Optical Microscope)을 이용하여 MACRO 및 MICRO 조직검사를 실시하였다.

용접부에서 단면을 채취하여 질산(nitric acid) 4ml와 메탄올(Methanol) 96ml를 혼합시킨 나이탈(Nital) 4% 용액을 이용해 각 공정별 용접부를 4~5초간 에칭 후에 미세조직을 관찰하였다.

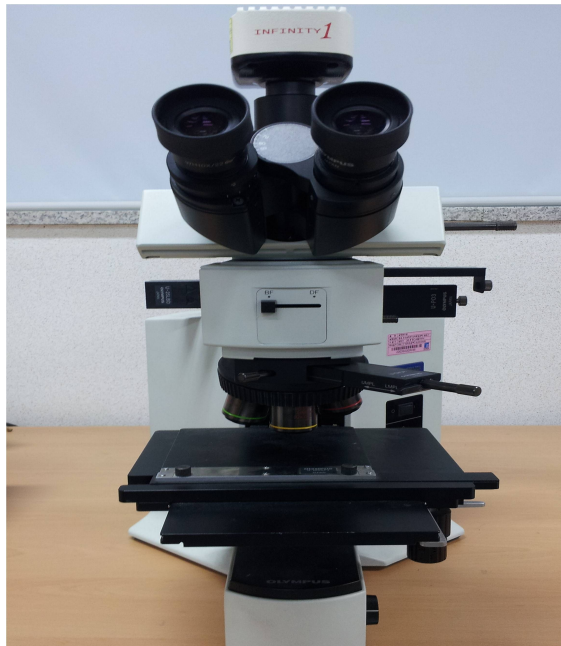


Fig. 2.8 Optical microscope

### 2.3.5 비파괴 검사

비파괴 검사는 구조물의 품질관리나 품질보증의 수단에 주로 이용되는 계측기법으로써 재료, 제품, 구조물등의 종류에 상관없이 대상물을 손상, 분리, 파괴시키지 않고 시험체의 표면이나 내부의 결함유무 또는 그 상태 등을 검사하기 위한 시험이다. 그 종류로는 표면결함 검출을 위한 비파괴검사인 육안검사(VT), 자분탐상검사(MT), 침투탐상검사(ET) 등이 있고 내부결함 검출을 위한 방사선 투과검사(RT), 초음파 탐상검사(UT)가 있다. 그리고 기타 비파괴검사로 음향방출시험(AET), 누설 시험(LT), 중성자 방사선시험(NRT)이 있다.[24]

육안으로 확인되지 않는 용접부 내부의 결함을 확인하기 위해 비파괴검사 방법 중 하나인 방사선 투과검사(RT: Radiographic Testing)를 실시하였다.

MAG 용접에서는 MC 솔리드 와이어와 KC 솔리드 와이어의 최적조건을 도출하여 방사선 투과검사를 실시하였고, LASER 용접에서도 Single line과 Double line 두 가지 방법에서 최적조건을 도출하여 방사선 투과검사를 실시하였다.

## 제 3 장 연구 결과

### 3.1 MAG 용접부의 특성 평가

#### 3.1.1 최적 혼합가스 비 도출

MAG 용접의 최적 혼합가스 비를 선정하기 위해 조건별로 고속카메라 촬영 사진과 단면을 관찰하였다. 고속카메라는 Photron FASTCAM을 이용하여 초당 4000프레임의 속도로 촬영하였고 PFV(Photron FASTCAM Viewer)를 이용해 촬영 이미지를 확보하였다.

혼합가스는 아크 안정성, 비드형상과 용입깊이, Undercut 발생정도, 용착금속의 기계적 성질 및 비용, 청정효과 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[25-26] 혼합가스 조성비별 아크 안정성과 이행모드를 관찰한 결과를 Table. 3.1에 나타내었다.

Ar 7:CO<sub>2</sub> 3 조성비의 경우 순간단락에 의한 강한 반발력을 관찰하였고 이로 인해 다량의 스파터가 생성되었을 것으로 사료된다. 혼합가스 조성비가 8:2 일 때와 9:1 일 때 안정적인 아킹 현상을 관찰하였고 모든 조건에서 단락이행 모드를 확인하였다.

혼합가스 조성비 별 단면 관찰결과, Ar 7:CO<sub>2</sub> 3 조성비의 경우 용접부에서 기공이 발생함을 관찰 할 수 있었다. 이는 기화된 아연증기가 용접부에서 빠져 나가지 못해 그림과 같이 기공으로 형성되었을 것으로 판단된다. 혼합가스 조성비가 8:2 일 때와 9:1 일 때 결함 없는 단면을 관찰 할 수 있었다.

이들 조건 중 Ar 8:CO<sub>2</sub> 2 조건이 아크 안정성 측면이나 경제적인 면에서 적합할 것으로 판단되어 최적 혼합가스 비율로 선정하였다.

Table. 3.1 High speed photography for shielding gas compositions



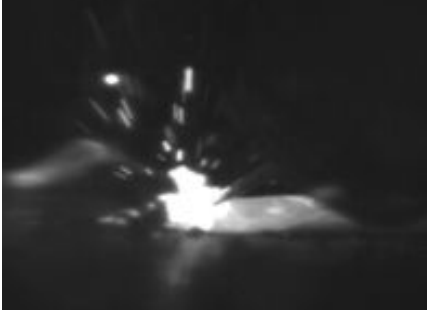

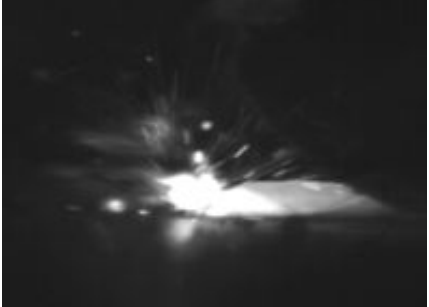
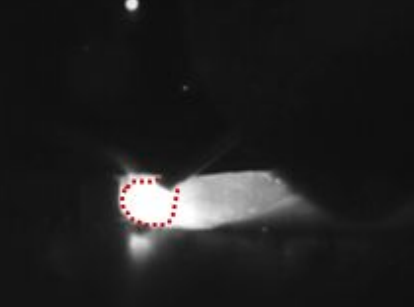

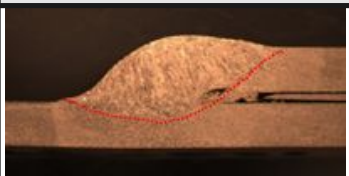




Ratio of shielding gas	Arc stability	Transfer mode
Ar 7: CO <sub>2</sub> 3		
Ar 8: CO <sub>2</sub> 2		
Ar 9: CO <sub>2</sub> 1		



Table. 3.2 Bead profiles of welds for shielding gas compositions

Ratio of shielding gas	Bead characteristics	Cross section
Ar 7: CO <sub>2</sub> 3		
Ar 8: CO <sub>2</sub> 2		
Ar 9: CO <sub>2</sub> 1		

### 3.1.2 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가

#### 1) MC-50A 솔리드와이어

MC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접의 주요 변수에 따른 실험 결과로 Table. 3.3에 12가지 조건별 비드형상을 나타내었다. 스파터, pit, undercut, porosity, humping bead 등의 외관으로 확인 가능한 용접결함을 관찰하여 160~190A 까지 각 전류대별 최적의 비드형성 조건을 도출하였다.

비드 관찰 결과, 전류가 증가 할수록 다소 크고 많은 스파터가 발생함을 볼 수 있었고 특히 4,7,9번 조건의 비드표면에 작은 기공이 발생하였음을 관찰하였다. 전류 160A, 용접속도 70cm/min으로 입열량이 가장 낮은 3번 조건에서는 undercut 이 발생하였는데 이는 낮은 입열량으로 인해 충분한 용융이 이루어지지 않아 생성 되었을 것으로 판단된다. 또한 전류 190A, 용접속도 50cm/min으로 입열량이 가장 높은 10번 조건에서는 다소 많은 양의 스파터가 관찰되었고 190A 이상의 전류 조건인 10,11,12번 조건에서는 기공과 비드 모양이 균일하게 형성되지 않는 함몰현상(Humping)을 관찰 할 수 있었다.

Table. 3.3 Bead profiles of welds in MC solid wire


















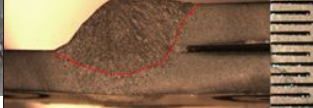
Number	Bead characteristics
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Table. 3.4는 MC 솔리드 와이어의 전류대 별 최적조건별 비드와 MACRO 단면을 관찰한 것이다.

대부분 용접결함이 발견되지 않았지만 2번, 8번 조건에서 비드 주변에 미세한 스파터가 발생하였음을 볼 수 있다. 또한 용접부의 단면을 관찰한 결과 모든 조건에서 기공 없는 양호한 단면을 확인하였다.

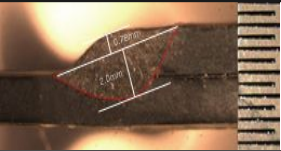
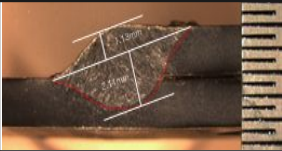
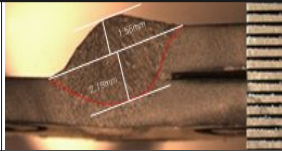
Table. 3.4 Bead and cross section profiles of welds in MC solid wire

Number	Bead characteristics	Cross section
2		
5		
8		

MC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접부의 품질을 ISO 국제규격에 의거해 평가한 결과를 Table. 3.5에 나타내었다.

ISO 5817에 의거한 평가 결과, 모든 조건에서 Undercut이 발생하지 않아 [B]등급을 확보하였고 모든 조건에서 Blowhole이나 Wormhole 등의 기공도 발생하지 않아 [B]등급임을 확인하였다. 또한 모든 조건에서 Lack of penetration이 발생하지 않아 [B]등급을 확보하였지만 Excessive throat thickness 평가에서는 180A 60cm/min 조건에서 과도한 목두께로 인해 [D]등급을 얻어 160A, 170A 조건에서 [B]등급을 확보한 것과 차이를 보였다. 160A 60cm/min, 170A 60cm/min 조건에서 ISO 5817 4가지 항목 모두 [B]등급에 해당하는 준수한 기공률과 용입성을 관찰하였다.

Table. 3.5 ISO 5817 Quality levels for imperfections(MC)

Welding condition	160A 60cm/min	170A 60cm/min	180A 60cm/min
Cross section			
Undercut	[B] none	[B] none	[B] none
Porosity	[B] none	[B] none	[B] none
Lack of penetration	[B] none	[B] none	[B] none
Excessive throat thickness	[B] h:0.78mm a:2.0mm	[B] h:1.13mm a:2.11mm	[D] h:1.56mm a:2.19mm

## 2) KC-50A 솔리드 와이어

KC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접의 주요 변수에 따른 실험 결과로 Table. 3.6에 12가지 조건별 비드형상을 나타내었다.

비드 관찰 결과, 거의 모든 조건에서 MC 솔리드 와이어를 사용했을 때 보다 KC 솔리드 와이어를 사용하였을 때 다소 많은 양의 스패터를 관찰하였다. 전류대가 높을수록 더 많은 스패터를 관찰하였고 특히 190A 에서는 지름 2mm 이상의 스패터가 다수 생성됨을 알 수 있었다. 이는 실리콘과 망간 성분이 탈산원소로서 작용해 용융금속 내에 산소량을 감소시켰고, 이로 인해 용융금속의 표면장력 증가로 용적의 성장에 주된 원인이 되었을 것으로 판단된다. 또한 이것이 MC 솔리드 와이어 조건 보다 KC 솔리드 와이어 조건에서 크고 많은 스패터 발생에 기인한 것으로 사료된다.

MC 솔리드 와이어의 경우와 마찬가지로 3번 조건에서 undercut이 발생하였고 4,6,10,11번 조건에서 기공이 발생하였으며 7,10,11번 조건에서는 비드에 pit가 형성되었음을 확인하였다.



Table. 3.6 Bead profiles of KC solid wire
















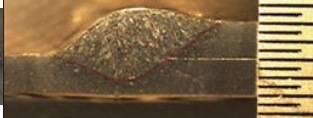


Number	Bead characteristics
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Table. 3.7은 KC 솔리드 와이어의 전류대 별 최적조건의 비드와 MACRO 단면을 관찰한 것이다.

대부분의 조건에서 MC 솔리드 와이어 조건보다 많은 스파터를 관찰하였다. 특히 전류 180A 용접속도 60cm/min인 8번 조건에서 비드 표면 및 주변에 다소 많은 양의 스파터가 발생하였음을 볼 수 있었다. 용접부의 단면에서는 기공없는 비교적 양호한 단면을 관찰하였다.

Table. 3.7 Bead and cross section profiles of welds in KC solid wire

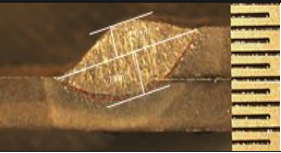
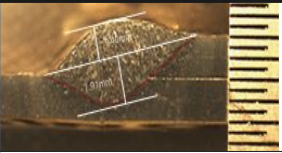
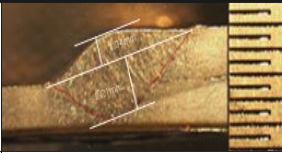
Number	Bead characteristics	Cross section
2		
5		
8		



KC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접부의 품질을 ISO 국제규격에 의거해 평가한 결과를 Table. 3.8에 나타내었다.

ISO 5817에 의거한 평가 결과, MC 솔리드 와이어와 마찬가지로 모든 조건에서 Undercut이 발생하지 않아 [B]등급을 확보하였고 모든 조건에서 기공, Lack of penetration 발생하지 않아 [B]등급임을 확인하였다. 하지만 Excessive throat thickness 평가에서는 170A 60cm/min, 180A 60cm/min 조건에서 [C]등급을 얻었고 160A 60cm/min 조건에서만 유일하게 [B]등급을 확보하였다. KC 솔리드 와이어의 전류대 별 최적조건 중 ISO 5817 4가지 평가 항목에서 모두 [B]등급을 얻은 160A 60cm/min 조건이 가장 양호한 것을 확인하였다.

Table. 3.8 ISO 5817 Quality levels for imperfections(KC)

Welding condition	160A 60cm/min	170A 60cm/min	180A 60cm/min
Cross section			
Undercut	[B] none	[B] none	[B] none
Porosity	[B] none	[B] none	[B] none
Lack of penetration	[B] none	[B] none	[B] none
Excessive throat thickness	[B] h:1.13mm a:1.66mm	[C] h:1.40mm a:1.91mm	[C] h:1.34mm a:2.21mm

### 3.1.3 인장-전단강도 평가

#### 1) MC 솔리드 와이어

MC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접의 기계적 특성 평가를 위하여 인장-전단 시험을 수행하였다. 최적 조건별로 인장-전단 시험을 3회씩 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3.1에 나타내었다.

MC 솔리드와이어의 인장-전단 시험 결과, 각 전류대 별 최고 인장-전단강도 중 전류 170A 용접속도 60cm/min인 5번 조건에서 18.1kN으로 가장 높은 인장-전단 강도를 얻었고 160A 60cm/min 조건에서 가장 낮은 인장-전단강도인 16.8kN을 얻었다. 앞서 국제규격에 의한 평가에서 과도한 목두께로 [D]등급을 얻은 180A 60cm/min 조건은 17.6kN을 얻어 인장-전단강도에 미치는 영향을 미치는 목두께의 영향은 적은 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서 얻어진 결과로 Fig. 3.2에 나타낸 바와 같이 인장-전단 시험 후 모든 조건에서는 모재부에서 연성파단이 일어나 양호한 인장-전단강도를 나타내었다.

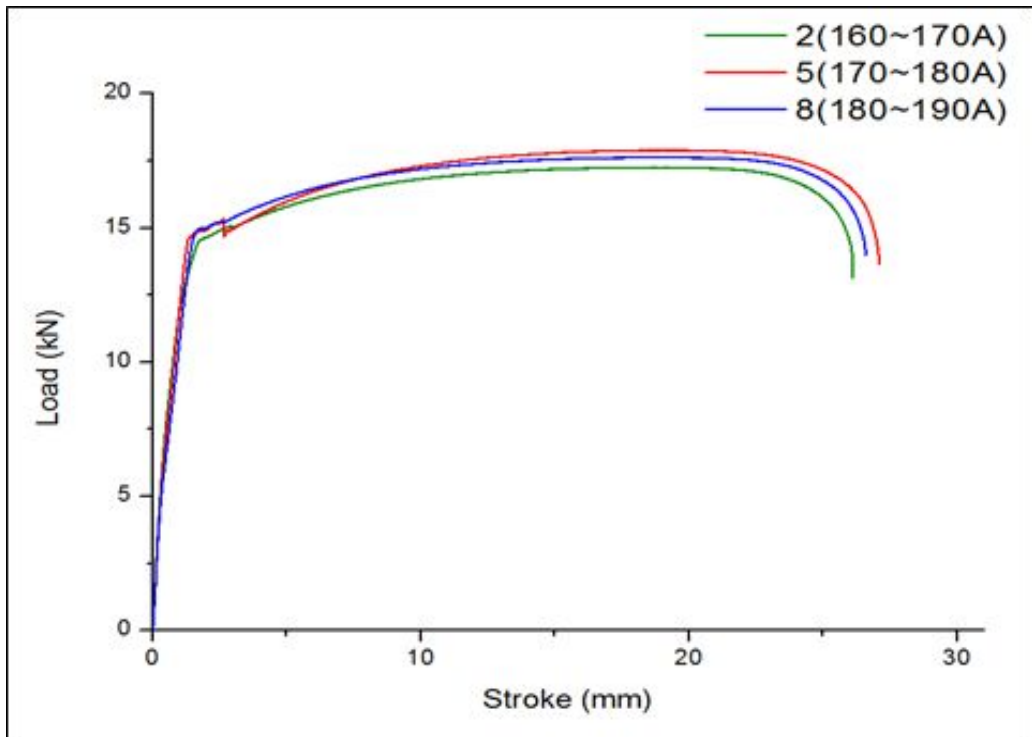


Fig. 3.1 Load-Stroke curve of MAG welding(MC)

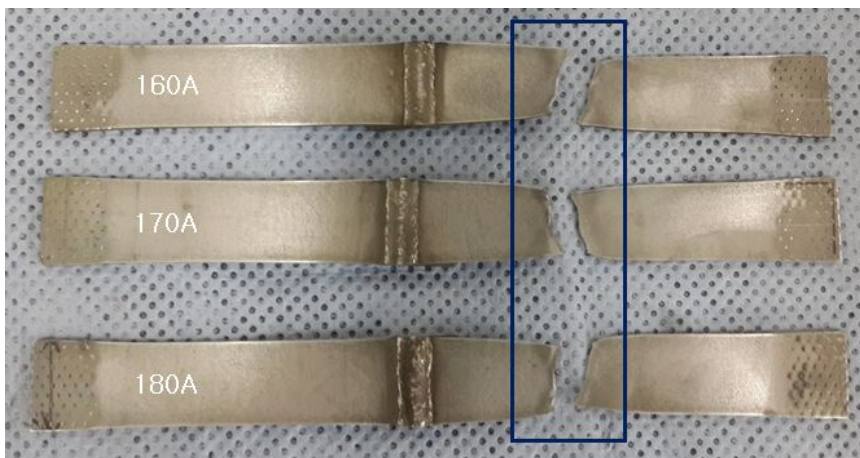


Fig. 3.2 Fractured specimen after tensile-shear test(MC)

## 2) KC 솔리드 와이어

KC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접의 기계적 특성 평가를 위하여 인장-전단 시험을 수행하였다. 전류대 별 최적 조건으로 인장-전단 시험을 3회씩 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3.3에 나타내었다.

KC 솔리드와이어의 인장-전단 시험 결과, 180A, 60cm/min인 8번 조건에서 17.5kN으로 최고 인장-전단강도를 얻었고 160A 조건에서 가장 낮은 16.9kN을 얻었다. 국제규격 평가 중 Excessive throat thickness 항목에서 양호한 등급을 얻은 160A 조건보다 [C]등급을 얻은 170,180A 조건에서 높은 인장-전단강도를 확보해 목두께에 의한 인장-전단강도의 영향은 미미한 것으로 판단된다.

인장-전단 시험 후 본 연구에서 얻어진 결과를 Fig 3.4에 나타내었고, MC 솔리드 와이어 조건과 마찬가지로 모든 조건에서 모재부에 연성파단이 일어난 양호한 접합강도를 나타내었다.

MC 솔리드 와이어와 KC 솔리드 와이어의 전류대 별 최적조건인 인장-전단강도 평가 결과, 두 솔리드 와이어의 강도 차이는 1kN 미만으로 실리콘과 망간의 조성비가 다른 솔리드 와이어가 인장-전단강도에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

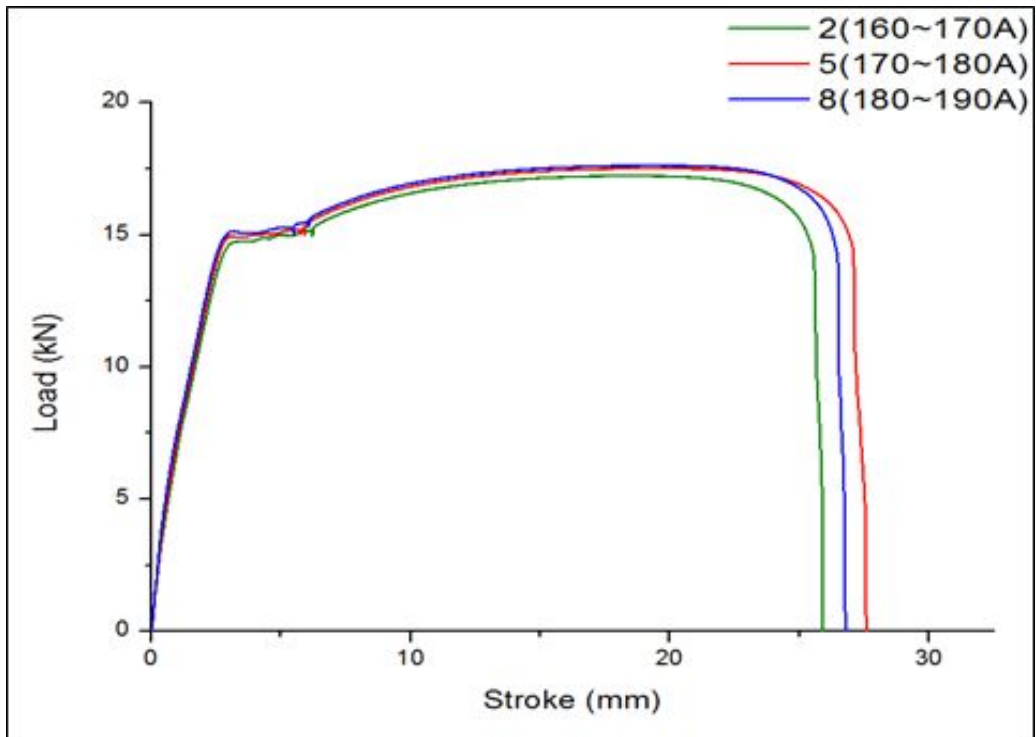


Fig. 3.3 Load-Stroke curve of MAG welding(KC)

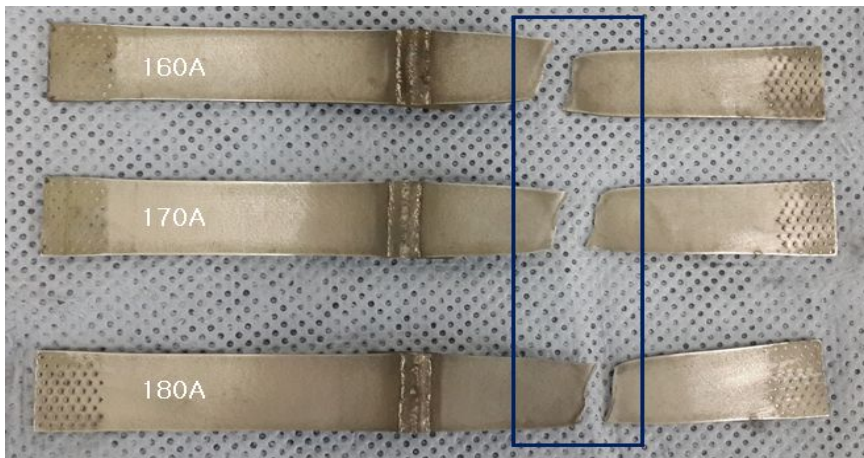


Fig. 3.4 Fractured specimen after tensile-shear test(KC)

### 3.1.4 경도분포 평가

#### 1) MC 솔리드 와이어

Fig. 3.5는 MC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접부의 경도 분포를 나타낸 것이다.

경도 시험 결과, 모재부(Base metal)의 경도보다 용접금속부(Weld metal)의 경도가 높은 것을 확인 하였다. 용접금속부에서 최고 경도 값은 230.3HV로 측정되었으며, 평균 경도 값은 약 226.1HV로 확인되었다. 모재부의 평균 경도 값은 173.6HV로 측정되었으며, 모재부와 비교하였을 때 용접금속부의 경도 값이 평균적으로 큰 이유로는 모재가 용융되어 식는 과정에서 보다 강한 경도를 갖는 조직으로 재결정되었기 때문인 것으로 사료된다. 또한 용접금속부와 모재부 사이에서 경도 값이 상승하는 것으로 보아 열영향부(Heat Affected Zone)로 사료된다. 열영향부의 최고 경도 값은 209.6HV로 측정되었으며, 평균 경도 값은 200.4HV로 확인되었다.

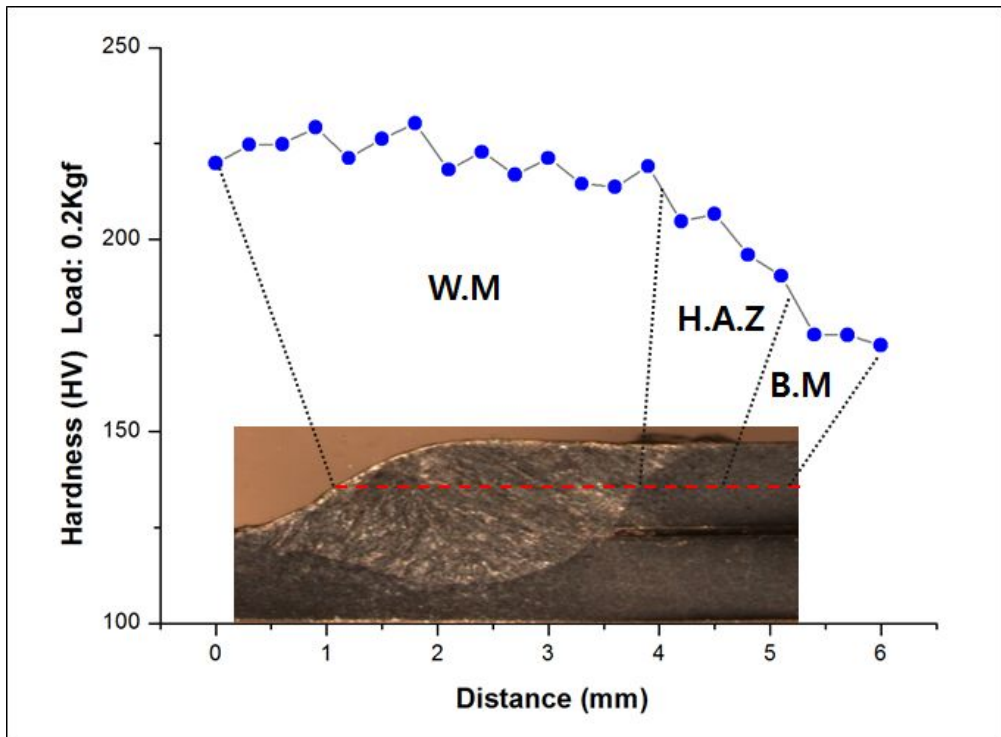


Fig. 3.5 Hardness distributions of MAG welds(MC)

## 2) KC 솔리드 와이어

Fig. 3.6은 KC 솔리드 와이어를 이용한 MAG 용접부의 경도 분포를 나타낸 것이다.

경도 시험 결과, MC 솔리드 와이어 조건과 마찬가지로 모재부(Base Metal)의 경도보다 용접금속부(Weld Metal)의 경도가 높은 것을 확인 하였다. 용접금속부에서 최고 경도 값은 226.9HV로 측정되었으며, 평균 경도 값은 약 224.2HV로 확인되었다. 모재부의 평균 경도 값은 172.5HV로 측정되었으며, 열영향부(Heat Affected Zone)의 최고 경도 값은 207.3HV로 측정되었고 평균 경도 값은 198.7HV로 확인되었다.

문헌에 따르면 인장강도가 상승할수록 경도는 높아지는 경향을 보인다고 밝히고 있다.[27] KC 솔리드 와이어 조건의 경도 값이 MC 솔리드 와이어 조건의 경도 값보다 다소 낮은 경도 값이 측정되었다. 이는 인장-전단 시험에서 MC 솔리드 와이어 조건이 더 높은 강도를 얻은 이유라 판단된다. 하지만 평균 경도 값이 용접금속부 1.9HV, 열영향부 1.7HV, 모재부 1.1HV로 거의 차이가 나지 않아 솔리드 와이어에 의한 경도의 영향은 미미한 것으로 판단된다.



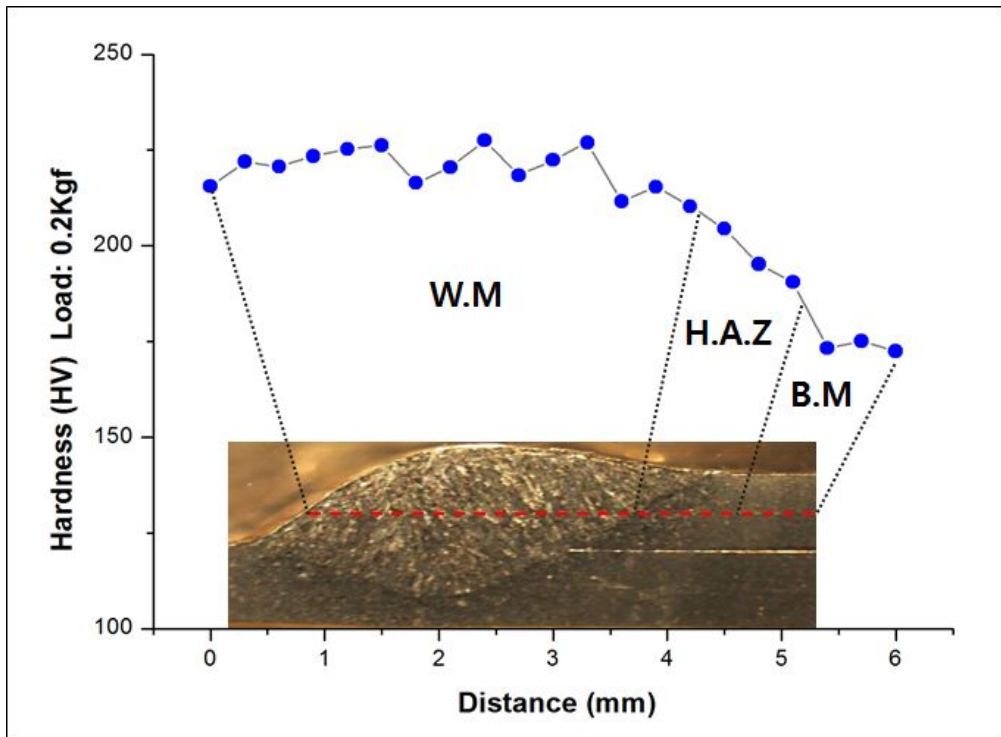


Fig. 3.6 Hardness distributions of MAG welds(KC)

### 3.1.5 미세조직 평가

Fig. 3.7에 나타낸 아래 세 그림은 MC 슬리드 와이어 조건에서 입열량 3.4kJ/cm의 5번 시편을 광학현미경으로 관찰한 미세조직 사진이다.

용접금속부에서는 주상정조직과 acicular ferrite, ferrite side plate조직이 열영향부에 비해 발달하여 있어 이 때문에 모재부나 열영향부 보다 경도가 약 18~26% 이상 상승했을 것으로 판단된다. 열영향부에는 모재부에 비해 조직의 크기가 조대해 짐을 알 수 있었고 acicular ferrite 조직이 존재하고 있음이 확인된다.

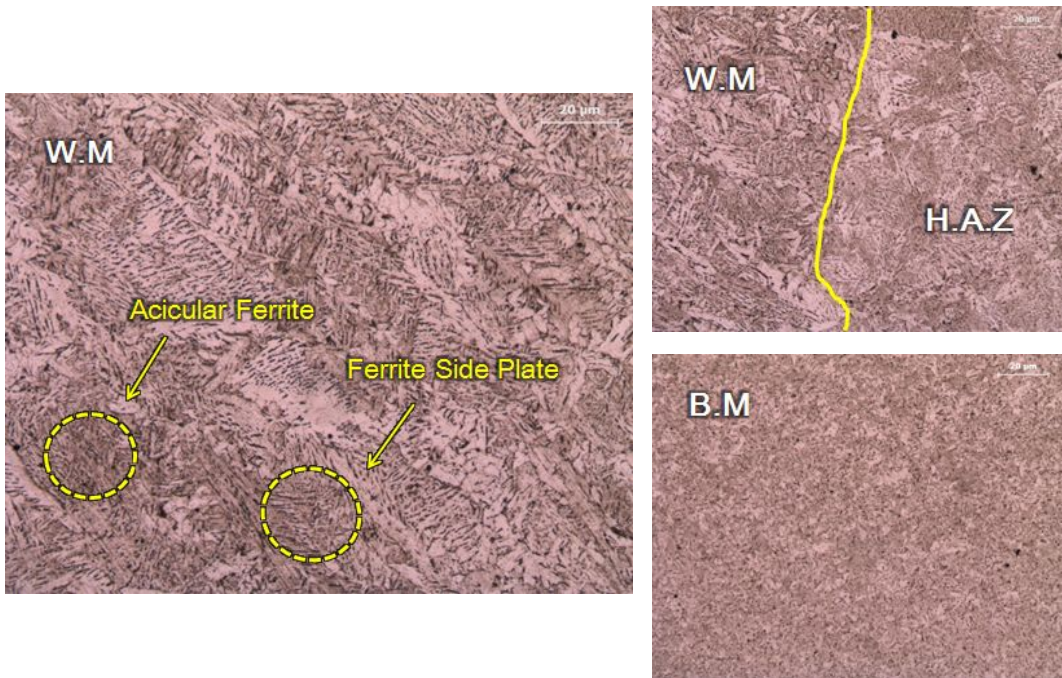


Fig. 3.7 Micro structures in different locations of MAG welds

## 3.2 LASER 용접부의 특성 평가

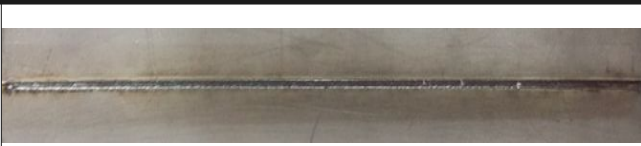



### 3.2.1 ISO 국제규격에 따른 용접부 품질 평가

LASER 용접의 주요 변수에 따른 조건별 실험결과를 Table. 3.9에 나타내었다.

조건별 비드형상 및 용접부 단면을 나타낸 것으로 Duoble line 조건에서는 겹친 부위 위쪽에 용접한 부분에서 아연폭발로 인해 용접부가 부분적으로 파여 건전한 비드가 생성되지 않음을 확인하였다. 이는 아연 성분의 비점과 철 성분의 융점 차에 의해 아연폭발이 일어난 것으로 판단된다.[28-29]

LASER 용접을 이용한 두 조건 모두 MAG 용접을 이용한 조건에서 다량 나타났던 스패터와 용접결함이 발생하지 않아 미려한 표면을 확보 할 수 있었다.

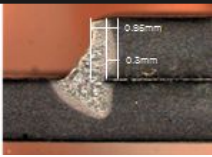
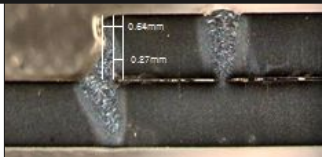
Table. 3.9 Bead and cross section profiles of welds in LASER welding

	Bead characteristics	Cross section
Single line		
Duoble line		

두 가지 방법을 이용한 LASER 용접부의 품질을 ISO 국제규격에 의거해 평가한 결과를 Table. 3.10에 나타내었다.

ISO 13919-1에 의거한 평가 결과, 두 조건 모두 기공이 발생하지 않아 [B]등급을 확보하였고 모든 조건에서 Lack of fusion이 발생하지 않아 [B]등급임을 확인하였다. 또한 Deviation from specified joint axis 평가에서도 두 조건 모두 [B]등급을 얻었다. ISO 13919-1 3가지 평가 항목에서 두 조건 모두 [B]등급을 확보함으로써 양호한 용접 품질을 확인하였다.

Table. 3.10 ISO 13919-1 Quality levels for imperfections(KC)

Welding condition	Single line	Double line
Cross section		
Porosity	[B] none	[B] none
Lack of fusion	[B] none	[B] none
Deviation from specified joint axis	[B] h=0.3 s=0.86	[B] h=0.27 s=0.64

### 3.2.2 인장-전단강도 평가

Single, Double line 두 가지 방법을 이용하여 LASER 용접의 인장-전단 시험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 3.8에 나타내었다.

인장-전단 시험 결과, Single line 조건에서 최대 인장-전단강도가 약 15.6kN으로 측정되었고 겹치는 부분에 한번 더 용접한 Double line 조건에서는 최대 인장-전단강도가 약 16.7kN으로 MAG 용접에 약 93% 해당하는 강도를 확보하였다. 하지만 Fig. 3.9에 보인바와 같이 Single line과 Double line 모두 시험 후 파단이 열 영향부에서 발생한 것으로 확인된다.

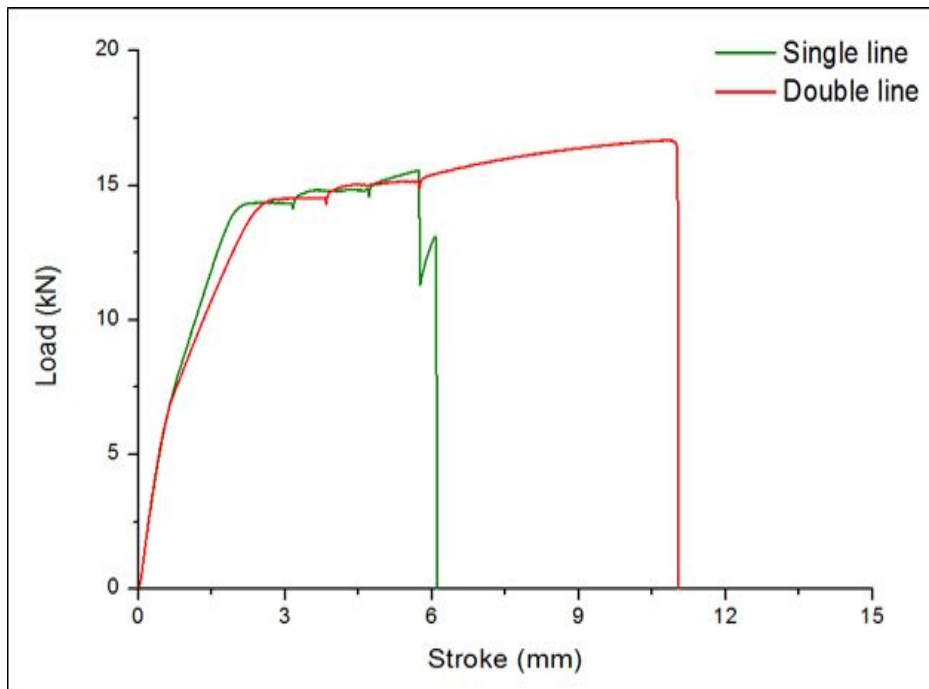


Fig. 3.8 Load-Stroke curve of LASER welding

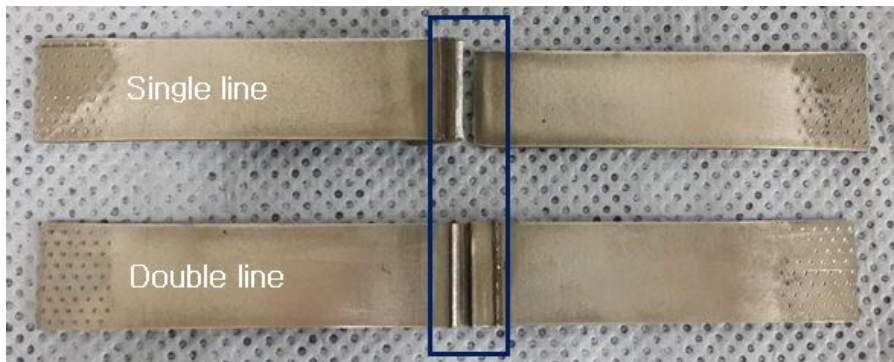


Fig. 3.9 Fractured specimen after tensile-shear test(LASER)

### 3.2.3 경도분포 평가

Fig. 3.10은 LASER 용접의 용접부 경도분포를 나타낸 것이다. 좁은 용접부를 형성하는 LASER 용접의 특징으로 인해 계단형으로 경도를 측정하였다.

경도 시험 결과, 용접부에서 최고 경도 값 293.5HV로 측정되었으며 평균 경도 값은 278.8HV로 나타내었다. MAG 용접과 비교하였을 때 용접부에서 약 64HV로 27% 높은 경도값을 확보하였다. 이는 LASER 용접이 MAG 용접의 용접 후 냉각속도 차이로 인해 보다 강한 경도를 갖는 조직으로 변태 되었을 것으로 보인다.

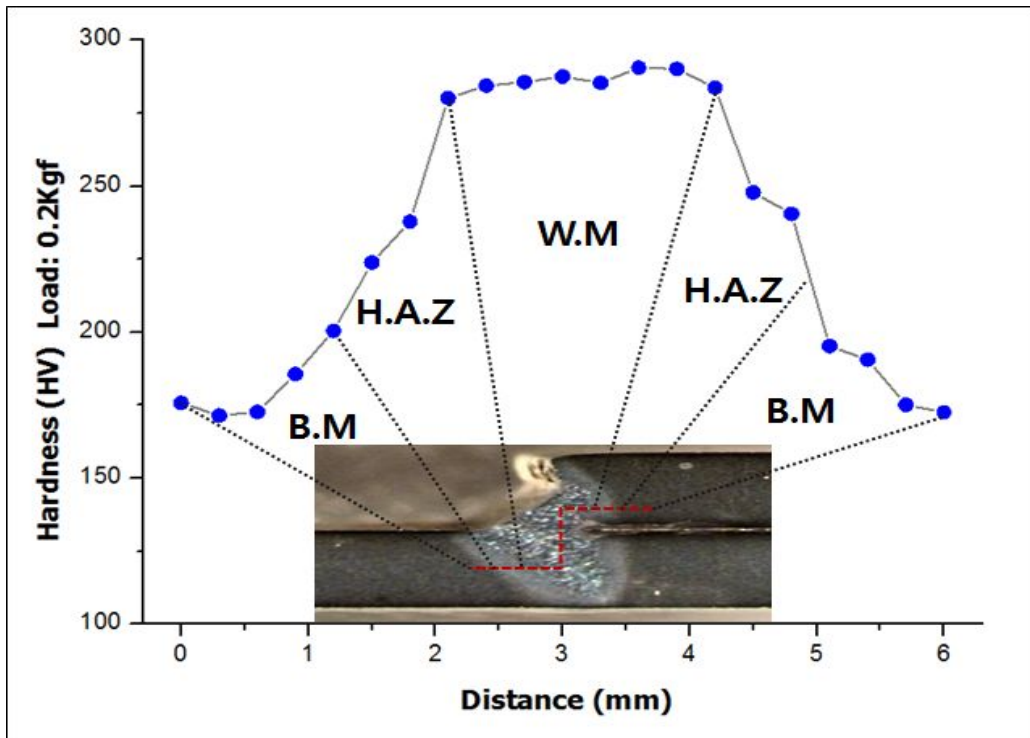


Fig. 3.10 Hardness distributions of LASER welds



### 3.2.4 미세조직 평가

광학현미경을 이용한 LASER 용접의 미세조직을 관찰 결과를 Fig. 3.11에 나타내었다. 각 영역별 용접금속부, 열영향부, 모재부를 관찰하였다.

MAG 용접에 비해 좁은 열영향부를 확인하였고 모재부에서 열영향부로 갈수록 조대화 되는 것을 관찰하였고 또한 용접부에서는 Martensite 조직을 관찰하였다.[30-32]

이는 용접 후 빠르게 냉각하는 LASER 용접의 특징으로 인해 Martensite 조직으로 변태되었고 이러한 미세조직 특성으로 인해 용접부의 연성과 경도 값에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 열영향부에서는 Polygonal Ferrite 조직이 관찰되었다.

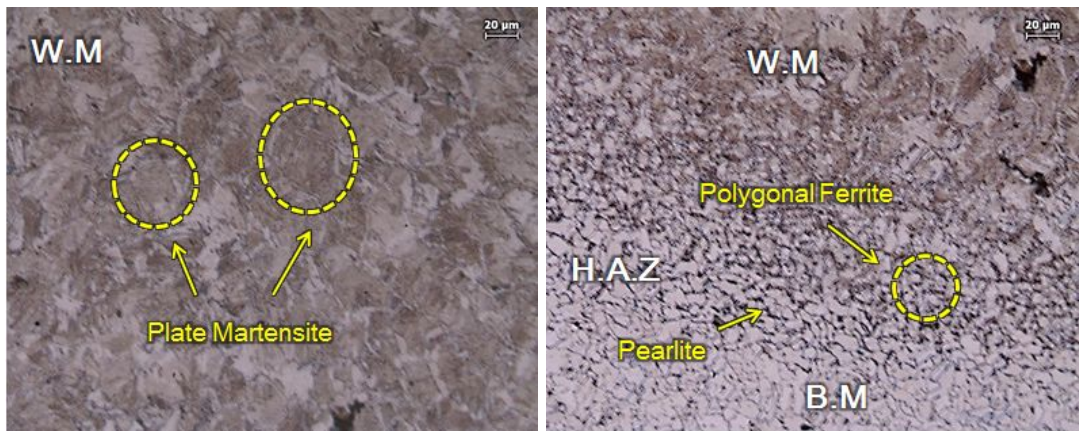


Fig. 3.11 Micro structures in different locations of LASER welds






### 3.2.5 내부결함 평가

MAG 용접의 MC 솔리드 와이어의 최적 조건과 KC 솔리드 와이어의 최적조건 그리고 LASER 용접의 최적 조건별 비드형상을 Table. 3.11에 나타내었고, 각 공정의 최적조건별 방사선 투과 검사 결과를 Fig. 3.12에 나타내었다.

방사선 투과 검사 결과, 각 공정별 모든 조건에서 기공이나 기타 용접 결함이 발생하지 않음을 확인하였다.

Table. 3.11 Radiographic test for specimen

Optimal welding conditions	Bead characteristics
170A 60cm/min (MC)	
170A 60cm/min (KC)	
Double line (LASER)	

Page 1 of 1






 <b>REPORT OF RADIOGRAPHIC TESTING</b>																																						
Hull No. : -	Report No. : WS160218	Date : 2016-02-18																																				
Material : SGAPH40	Equipment : R-200 EGS2	I.Q.I. : ASTM																																				
Radiation : Ir-192	Technique : SWH	Source : Pn-0.127 mm																																				
Procedure : HSGD-G4-001 24		Source Size : 3 X 1.5 mm																																				
		Welding Process : MAG, LASER																																				
Reference Report : Refer to RT Report No.																																						
Total : 3 Films																																						
Repair : 0 Films																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Misc. No</th> <th rowspan="2">Total Films</th> <th rowspan="2">Repair Films</th> <th colspan="2">Contents</th> <th rowspan="2">Welder No.</th> <th colspan="2">Thickness</th> </tr> <tr> <th>Film No.</th> <th>Interpret Result</th> <th>T1</th> <th>T2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TEST-1 (LAP JOINT FILLET)</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>A</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>TEST-2 (LAP JOINT FILLET)</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>A</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>TEST-3 (LAP JOINT FILLET)</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>A</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>			Misc. No	Total Films	Repair Films	Contents		Welder No.	Thickness		Film No.	Interpret Result	T1	T2	TEST-1 (LAP JOINT FILLET)	1	-	-	-	A	2	2	TEST-2 (LAP JOINT FILLET)	1	-	-	-	A	2	2	TEST-3 (LAP JOINT FILLET)	1	-	-	-	A	2	2
Misc. No	Total Films	Repair Films				Contents			Welder No.	Thickness																												
			Film No.	Interpret Result	T1	T2																																
TEST-1 (LAP JOINT FILLET)	1	-	-	-	A	2	2																															
TEST-2 (LAP JOINT FILLET)	1	-	-	-	A	2	2																															
TEST-3 (LAP JOINT FILLET)	1	-	-	-	A	2	2																															
																																						
<b>Abbreviations</b> A: Azept    *DN: Sing Inclusion    *LF: Lack Of Fusion Or Linear Flow    *FM: Film Mark    *PO: Porosie R: Repair																																						
Reviewed by Level II <input checked="" type="checkbox"/> Approved by Level II <input type="checkbox"/> Reviewed by <input type="checkbox"/> Witnessed by <input type="checkbox"/>																																						
Reviewed by Level II  Y.S. SHIN	Approved by Level II  J.D. CHOI	Owner    Class    Class																																				
HSGJ 13 210 A4 (201406) 																																						

Fig. 3.12 Report of radiographic testing

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 자동차용 부품 Lower-Arm 제작시 용접 시공 상의 기초적 문제점을 해결하기 위해 아연도금강판 SGAPH440 소재에 대한 MAG와 LASER 용접부의 특성을 비교·평가를 하였다. ISO 국제규격에 의거하여 용접부 품질평가를 실시하였고 기계적 특성과 금속학적 특성을 고찰하였다. 또한 방사선투과시험으로 내부결함을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 혼합가스 조성비별 아크 안정성 및 이행모드 관찰결과, Ar 7:CO<sub>2</sub> 3 조성비의 경우 순간단락에 의한 강한 반발력을 관찰하였고 이로 인해 다량의 스퍼터가 생성되었으며 아연증기로 인해 용접금속부에 기공이 발생하였다. 안정적인 아킹 현상과 용접 결함이 발생하지 않은 Ar 8:CO<sub>2</sub> 2 조건을 최적 혼합가스 비율로 선정하였다.
- 2) MAG 용접의 비드 특성 평가 결과, MC 솔리드 와이어를 사용했을 때 스퍼터 발생이 감소하였다. 실리콘과 망간의 함유량이 KC 솔리드 와이어보다 상대적으로 적은 것이 용접의 성장에 영향을 주어 스퍼터 발생에 기인한 것으로 판단된다. ISO 국제규격에 의거한 용접 품질 평가 결과, MC 솔리드 와이어의 160A 60cm/min, 170A 60cm/min 조건, KC 솔리드 와이어의 160A 60cm/min 조건에서 양호 수준으로 평가되는 건전한 용접부를 확보하였다.
- 3) MAG 용접의 기계적 특성 평가 결과, 최대 인장-전단강도는 18.1kN으로 MC 솔리드 와이어 170A 60cm/min 조건에서 얻을 수 있었다. 또한 파단은 모재에서 발생하여 우수한 인장-전단강도를 확인하였다. 최대 경도 값은 230.3HV로 용접금속부에 발생하였고 모재 대비 약 57HV 상승함을 확인하였다. 두 솔리드 와이어 최대 인장-전단강도와 경도 값의 차이는 각각 1kN, 2HV 이하로 거의 비슷한 수준의 값을 보여 기계적 특성에서 솔리드 와이어의 실리콘과 망간 성분에 따른 영향은 미미한 수준으로 판단된다.

- 4) LASER 용접의 비드 특성 평가 결과, MAG에 비해 스퍼터가 발생하지 않아 미려한 비드표면 관찰하였다. ISO 국제규격에 의거한 용접 품질 평가 결과, LASER 용접의 모든 조건에서 [B]등급의 건전한 용접부를 확인하였다. 또한 방사선 투과 검사결과 MAG, LASER 용접 모두 내부결함이 발생하지 않음으로 충분한 용입이 이루어 졌다고 판단된다.
  
- 5) LASER 용접의 기계적 특성 평가 결과, 최대 인장-전단강도는 Double line 조건에서 16.7kN로 측정되었고 Single line 대비 1.1kN 향상되었다. 이는 겹친 부위에 한번 더 용접한 것이 인장-전단강도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 하지만 MAG 용접과 달리 인장-전단 시험에서 열영향부 파단이 발생해 부족한 기계적 특성을 보였다. 최대 경도 값은 용접부에서 293.5HV로 MAG 용접에 비해 약 27% 높은 값이 측정되었다.
  
- 6) 아연도금강판 SGAPH440 소재를 이용한 MAG와 LASER 용접특성 평가 결과, ISO 국제규격 평가에서 양호 수준을 얻었고 기계적 및 금속학적 시험에서 전반적으로 우수한 용접성을 나타낸 MAG 용접의 MC 솔리드 와이어 5번 조건 (170A 60cm/min)을 Lower-Arm에 적용시킬 가장 적합한 조건으로 선정하였다. LASER 용접에서는 MAG 용접보다 미려한 비드표면을 얻었고 MAG 대비 88% 해당하는 인장-전단강도를 확보하였지만 열영향부 파단이 발생해 Lower-Arm 적용에 미흡한 부분을 확인했다.

## Reference

- [1] V. Jagannathan: GALVATECH' 92 Stahl and Eisen, 1992, pp127-131
- [2] T.Nakmori : Effect of Microstructure of Base Steel on Fe-Zn Alloy Growth during Galvanizing of an Interstitial Free Steel, ISIJ International, 1996 Vol 36, No.2, pp179-186
- [3] S. Ochiai et al, Crack Spacing Distribution in Coating Layer of Galvannealed Steel under Applied Tensile Strain, ISIJ International, 2007, Vol 47, No.3, pp458-465
- [4] Marder, A. R : The Metallurgy of Zinc-coated Steel, Progress in Materials Science, 2000, Vol 45, pp191~271
- [5] D. S Choi et al : A Study on Characteristic of Fracture in Lap Joint Welded STS429L, Journal of KWJS, 2009, Vol 27, No.5, pp49-54
- [6] K. Yasuda et al : Avoidance of Blowhole in Arc Welding of Galvanized Steel Sheets, The 5th International Symposium of the Japan Welding Society, 1990, pp785-790
- [7] (社)日本{溶接協會 編 : 炭酸ガス半自動アーWク溶接, 産報出版, 1996(in Japanese)
- [8] H.Ushio et al : Effect of Shielding Gas Composition on Metal Transfer Phenomena in High Current GMA Welding, Trans. JWRI, 22, 1993
- [9] Takeshi SHINODA : Recent Trend of Research Activities of MAG Welding in Japan, The Korean Welding Society, 1994
- [10] T. H. Kim et al : Astudy on Effect of Shielding Gas in Fiber Laser Welding of Zinc Coated steel for Automobile, Korean Society Of Precision Engineering, 2009, pp397-398
- [11] H. S. Bang et al : A Study on the Prediction of the Optimal Welding Condition for Automotive Steel Sheets in MAG Welding Process, Journal

- of KWJS, 2009.6, Vol 27, No.3, pp38-43
- [12] Carmignani, C et al : Transient Finite Element Analysis of Deep Penetration Laser Welding Process in a Singlepass Butt-Welded Thick Steel Plate, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 179, No.3, pp197-214
- [13] J. H. Kim et al : Current Waveform Control of Pulse MAG Welding Power Source for High Speed Welding of Thin Plates, The Korean Institute of Electrical Engineers, (1999) 571-578
- [14] I. S. Pinchuk et al : Stabilization of transfer and methods of reducing the spattering of metal in CO<sub>2</sub> welding with a short arc, Welding Production, 1980, 27-6
- [15] E. K. Stava : The surface tension transfer power source, new, low-spatter arc welding machine, Welding Journal, 1993, 72-1
- [16] Bruce D. DeRuntz : Assessing the benefits of surface tension transfer welding to industry, Journal of Industrial Technology, 2003, 19-4
- [17] CO<sub>2</sub> MAG Power supply SENSARC LS350, KOBE Technical Guide, 1997, 37-330(in Japanese)
- [18] Y. S. Kim et al : A Review of Welding Current Waveform Control and Mechanical Control Technique for Reduction of Spatter in Short Circuit Transfer, Journal of KWJS, 2007.10, Vol. 25, No. 5, pp460-470
- [19] Y. H. An et al : Effect of Si on Arc Stability of MAG Welding, Journal of KWJS, Vol 16(6), 1998.12, pp52-58
- [20] K. S. Bang et al : The Effect of Deoxidizers in a Wire on Spatter Generation in Gas Metal Arc Welding, Journal of KWJS, Vol 14(5), 1996.10, pp145-150
- [21] Y. H. An : Study on the Effects of Chemical Composition of Wire on Spatter Generation and Arc Phenomena in GMA Welding, 부산대학교, 박사, 1998

- [22] International Organization for Standardization: Welding-Fusion welded Joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)-Quality Levels for Imperfections (ISO 5817), ISO, 2007
- [23] International Organization for Standardization: Welding-Electron and Laser beam welded joints-Guidance on Quality Levels for Imperfections; Part 1 (ISO 13919-1), ISO, 1996
- [24] Yong Lee : Method of Radiographic Testing and Industrial Application, Journal of KWS, 1994.12, Vol 12, No.4, pp35-40
- [25] J. S. Seo et al : Effects of Porosity Formation on Shielding Gas and Welding Conditions for HSLA Steel Welding, Journal of KWJS, 2012, Vol 30(4), pp300-303
- [26] American Welding Society: Welding Handbook 7<sup>th</sup> edition, AWS, 1978
- [27] E.J. Pavlina and C.J. Van Tyne : Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels, Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, Vol 17(6), pp888-893
- [28] Hongping Gu : A new method of lap welding of zinc-coated steel sheet, Section C-ICALEO, 2000, pp1-6
- [29] M.M.S. Gualini et al : Experimental result of laser welding of zinc coated steel sheets with a new method, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics, 2003
- [30] H. S. Bang et al : Investigation on Weldability of Aluminum Alloy by Arc, Laser, Hybrid (Laser+MIG) Welding, Journal of KWJS, 2011, Vol 29, No.4, pp389-391
- [31] H. S. Bang et al : A Study on the Characteristic Change of 2.25Cr-1Mo Steel Welds for Various Welding Processes, Journal of Ocean Engineering and Technology, 2005.2, Vol 19, No.1, pp49-56
- [32] H. S. Bang : Welding Residual Stresses Distribution Characteristics of High Tensile Steel for Ship Structures in Laser Welding, Journal of KWJS, 2003, Vol 21, No.4, pp35-39