



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

고속 GTAW 공정변수가 Tube butt joints에 미치는 영향에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 병 훈

고속 GTAW 공정변수가 Tube butt joints에 미치는 영향에 관한 연구

Study on the impact of weld parameters
In tube butt joints using high speed GTAW

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 병 훈

고속 GTAW 공정변수가 Tube butt joints에 미치는 영향에 관한 연구

지도교수 송 국 현

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 병 훈

김병훈의 석사학위논문을 인준함

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

2018년 11월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	IV
List of Tables	VI
Abstract	VII
1장. 서 론	1
1 . 1 연구배경, 목적과 내용	1
1.1.1 연구 배경	1
1.1.2 연구 목적과 내용	2
2장. 이론적 배경	3
2 . 1 GTAW(Gas Tungsten Acr Welding) 용접	3
2.1.1 GTAW의 원리	3
2.1.2 GTAW의 아크 특성	4
2.1.3 GTAW의 장점 과 단점	7
2 . 2 GTAW 용접기와 재료	8
2.2.1 용접기	9
2.2.2 용접기 토치	12
2.2.3 용접 재료	13
2.2.4 GTAW 고속 용접(High speed GTAW)	16
2.2.5 플랜트 발전 설비의 소구경 파이프 맞대기 용접 ..	16

3장. 연구 방법	17
3.1 실험 조건	17
3.1.1 사용 재료	17
3.1.2 용접장비와 공정변수 조건	20
3.2 용접부에 대한 특성 평가	25
3.2.1 육안 시험	25
3.2.2 비파괴 시험	26
3.2.3 인장 시험	27
3.2.4 경도 시험	28
3.2.5 미세조직 시험	29
4장. 실험 결과와 고찰	30
4.1 시험편 Top view와 외관 검사	30
4.1.1 Top View	30
4.1.2 공정조건별 용접비드 폭 변화량	31
4.2 비파괴 검사 평가	32
4.3 인장 강도 특성	35
4.4 경도 특성	37
4.5 미세조직 특성	41
4.5.1 마크로 평가	41
4.5.2 용접부 미세조직 평가	42

4.5.3 열 영향부 미세조직 평가.....	47
5장. 결 론	52
참고문헌	53

List of Figures

Fig. 1 Manual-GTAW Process Graph	1
Fig. 2 Fig.2 Heat transfer from flue gas to water/steam in the Item	2
Fig. 3 Schematic of GTAW	3
Fig. 4 Steady-state voltage-current characteristic of a discharge	4
Fig. 5 The voltage along arc axis is divided into three regions; the anode voltage drop, the cathode voltage drop, and arc column	5
Fig. 6 Voltage-current characteristic for welding arc	6
Fig. 7 Schematic diagram for GTAW equipment	8
Fig. 8 Direct current arc, electrode as cathode(-); penetration ratios	9
Fig. 9 Direct current arc, electrode as anode(+); penetration ratios	10
Fig. 10 Sectional view for Air-cooled GTAW welding torch	12
Fig. 11 Sectional view for Water-cooled GTAW welding torch	12
Fig. 12 The electrode tip shape according to welding current polarity	13
Fig. 13 The phase diagram Fe-Fe ₃ C	19
Fig. 14 The test coupon drawing for welding Joint	19
Fig. 15 High speed welding machine	20
Fig. 16 Tensile test machine	27
Fig. 17 Specimen for Tensile test(ASME Sec. XI pipe type)	27
Fig. 18 Vickers hardness test machine	28
Fig. 19 Test locations for vickers hardness	28
Fig. 20 Optical Microscope	29
Fig. 21 Top view of high speed welded coupon under various welding conditions	30
Fig. 22 Variation of weld bead width according to process conditions	31
Fig. 23 Radiography Test Film for Coupons welded at Peak Current 160A	33
Fig. 24 Radiography Test Film for Coupons welded at Peak Current 170A	34
Fig. 25 Mechanical properties for welded SA 209M Gr. T1a	35
Fig. 26 Tensile test result (visual shape)	36
Fig. 27 Hardness distribution of specimens welded at Peak Current 160A	38
Fig. 28 Hardness distribution of specimens welded at Peak Current 170A	40
Fig. 29 Macrostructures of specimens(X 5)	41

Fig. 30 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 160A (X 200)	43
Fig. 31 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 160A (X 500)	44
Fig. 32 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 170A (X 200)	45
Fig. 33 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 170A (X 200)	45
Fig. 34 Microstructure for HAZ of specimens welded at Peak Current 160A(X 200)	48
Fig. 35 Microstructure for HAZ of specimens welded at Peak Current 160A(X 500)	49
Fig. 36 Microstructure for HAZ of specimens welded at Peak Current 170A(X 200)	50
Fig. 37 Microstructure for HAZ of specimens welded at Peak Current 170A(X 500)	51

List of Tables

Table.1 Comparison of bead shape according to the polarity	11
Table.2 Classification of Tungsten according to chemical composition	14
Table.3 Characteristic of Argon gas and Helium gas	15
Table.4 Chemical Composition of SA209M Gr. T1a	18
Table.5 Mechanical Properties of SA209M Gr. T1a	18
Table.6 Specification of INVERTER ELECON 500P	21
Table.7 Specification of HC-71D	22
Table.8 Detail of welding condition for high speed GTAW	23
Table.9 Chemical Composition of KC-80D2(ER80S-D2)	24
Table.10 Mechanical Properties of KC-80D2(ER80S-D2)	24
Table.11 The tolerance of alignment .(ASME Sec. I PW-33)	25

ABSTRACT

Study on the impact of weld parameters In tube butt joint using high speed GTAW

Kim Byeong-Hun

Advisor : Prof. Song, Guk-Hyeon, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Although GTAW has many advantages to get the excellent welding quality in most materials and is in generally used in the power plant industry for making the main pressure parts of equipment, there is a main problem of comparatively low productivity for low speed welding condition. The power plant industries are manufacturing the main pressure item using the small tubes is intended to supply the high speed GTAW process conditions by testing and evaluating the welding quality of non-destructive method and mechanical properties when welding base and peak current, welding speed rate, wire feeding speed for weld parameters are changed.

In this study, effect of welding parameters on the mechanical properties and microstructure of weldment and heat effect zone compare to base material (SA209MGr.T1a) has been investigated The study on experiment of weld parameters for high speed GTAW was proceed on an external diameter 57mm, thickness 7.7mm and Argon gas 100%. The welding parameters were changed to base current 130 and 140, welding peak current 160 and 170, welding speed rate 90, 100, 110, 120, 130 and 140 cm/min, respectively. As the current and welding speed rate increased, the cooling rate is increased, that means the microstructure at weldments and heat affected zone become better from 54 μm to 13 μm . These refined grains enhanced the significantly achieved mechanical properties such as tensile strength, yield strength and hardness. Consequently tensile strength, yield strength and hardness values of coupons is increased to 23%, 93%, 90% compare to parent material.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경, 목적과 내용

1.1.1 연구 배경

국가 간 자유 무역 협약에 의한 시장 개방으로 치열한 세계 시장의 가격 경쟁력, 고품질 신뢰성 확보, 생산성 향상 등을 위해 많은 산업 분야에서 노력을 하고 있다. 산업 분야 중 발전 플랜트 분야는 특수 제품을 제외 한 설비 제작 능력이 평준화 되고 있어 가격 경쟁력, 품질 신뢰성, 효율적인 생산성이 필요하다. 특히 발전 플랜트의 주요 장치(증기 발생 장치, 전력 발생장치) 제작 시 소구경 Tube 와 Tube 를 연결하여 제품을 제작 할 경우 Tube 간 맞대기 용접 구간이 필요하다. 플랜트에 속하는 주요 장치 특성 상 다소 높은 고온, 고압의 수증기 및 유체에 노출 되어 사용되므로 용접부의 결함 문제로 인해 큰 인적 재산적 손실을 초래하므로 대부분의 산업 현장에서 수동(Manual)-가스-텅스텐 용접(Gas Tungsten Arc Welding) process가 사용 된다. 발전 플랜트의 주요 장치를 제작하는 용도의 수동(Manual)-GTAW process는 소구경 맞대기 용접 Joint에 대하여 Back bead 형성이 매우 우수하고, 기계적 성질, 아크 안전성, 용착 효율성이 우수하다는 장점이 있지만 해당 제품을 용접 할 수 있는 용접사의 기량이 제한 되어있으며, 생산성이 낮고 높은 인건비 와 제품의 용접 완료 후 용접부에 시험 하는 비파괴 시험(방사선 검사, 초음파 검사)에 대하여 통과 하지 못 할 경우 실패 비용이 매우 큰 문제점이 있다.

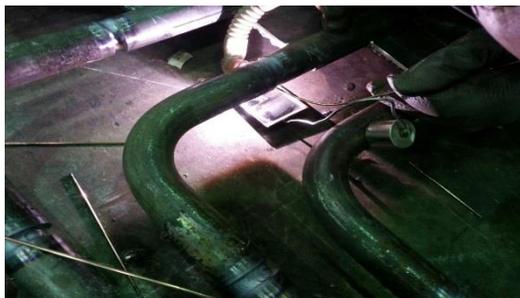


Fig. 1 Manual-GTAW Process Graph

1.1.2 연구 목적과 내용

용접은 발전산업 전반에 걸쳐 매우 중요한 역할을 하고 있으며 기존의 용접기법보다 높은 용착효율, 용착속도 와 우수한 용접품질을 요구하고 있다. 용접은 금속의 가용성을 이용하여 금속을 용융온도 이상으로 가열하여 접합하는 야금학적 접합법으로 수압은 방법이 개발되고 개선 되어 왔다. 사용재료가 점차 고품질화로 진행되고 있으므로, 이에 맞는 용접 기술 또한 용도, 특성에 맞게 개발·발전 되고 있다.[1] 발전 플랜트의 주요 장치 제작에 많은 비중을 차지하고 있는 용접 방법에는 수동(Manual)-GTAW process가 있다. 최근 가격 경쟁력, 생산성 향상, 일정한 용접품질을 확보하기 위해 수동(Manual)-GTAW 에서 High-speed GTAW로 대체 하였을 경우 용접품질, 용접 효율과 각종 기계적 성질 변화 등을 비교 검토함으로써 최적의 용접 조건을 제시하는데 그 목적 있다. 본 연구에서 목적은 발전 플랜트의 주요 장치 중 Reheater, Superheater, Economizer 와 같이 소구경 파이프(SA209M Gr T1a)로 제작 되는 Coil 제품에 대한 자동화 설비로 제작 되는 system의 매우 중요한 설비로 역할을 하는 High speed 가스-텅스텐 아크용접(GTAW) 용접법을 이용하였을 때 공정 변수가 Tube 맞대기용접부의 야금학적으로 미치는 영향을 알아 보 고자 한다.

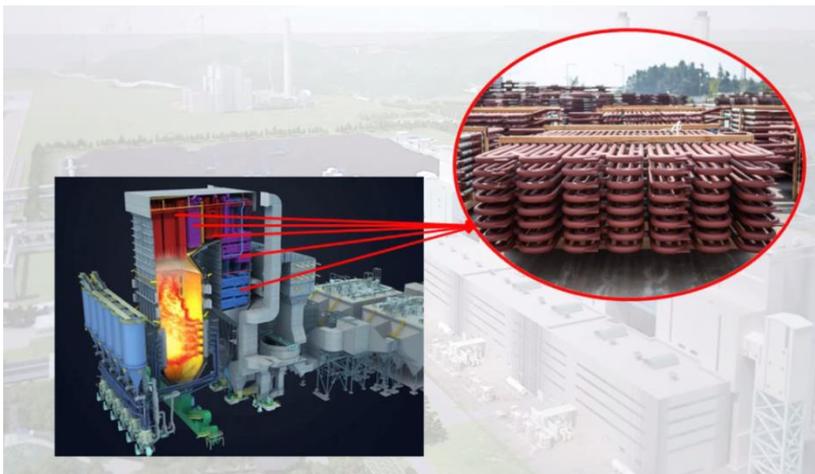


Fig. 2 Heat transfer from flue gas to water/steam in the Item

제 2 장 이론적 배경

2.1 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 용접

가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding)은 모재의 용융풀과 텅스텐 전극 붕에 대한 산화 방지를 하기 위해 Ar, He, Ar +He 등과 같은 불활성 가스를 실드 가스로 사용하면서 고온에서 녹지 않은 비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재 사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 용융시켜 접합 하는 용접법을 말한다. GTAW는 모든 용접자세에 적용이 가능하며, 아크 안전성이 높고 용접 품질이 우수하므로 산화나 질화등에 민감한 재질의 용접 및 피복 아크 용접을 적용하기 곤란한 경우에 사용 된다. 1940년대를 넘어가면서 알루미늄과 마그네슘 등의 용접에 적용되면서 그 활용도가 매우 넓어지고 있는 용접기법이다. 슬래그 형성이 없고, 외부에서 공급되는 보호 가스 분위기에서 고품질의 용접을 진행 한다. 유럽에서는 비활성기체를 사용하고 텅스텐 전극으로 용접을 진행한다고 해서 Metal Inert Gas welding 혹은 Tungsten Inert Gas Welding(TIG)라고 부른다.[2]

2.1.1 GTAW의 원리

GTAW는 높은 용점을 갖는 비소모성 텅스텐 과 모재간의 발생 되는 아크열에 용접봉을 사용하거나 또는 사용하지 않은 방법으로 Fig 3. 과 같이 용접부에 대하여 불활성 가스(Ar, He,등)를 실드 가스로 사용하면서 용접하는 원리이다.

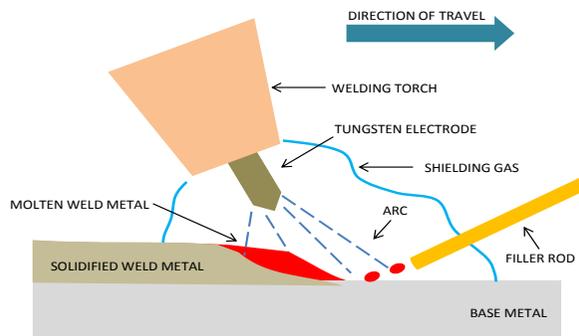


Fig. 3 Schematic of GTAW

2.1.2 GTAW의 아크 특성

(1) 아크 방전 현상

특별한 경우를 제외하고 아크와 외부전기 회로사이에는 전극이 존재하며, 전류는 전극을 매개로 하여 기체와 전기회로 사이를 흐르게 된다. 용접 아크의 경우 전극은 탄소이거나 금속이며, 고체이거나 액체인 경우도 있다. 부(-)전극을 음극이라 하며, 음극으로부터 저자를 가스 중에 방출 시킨다. 반면에 양(+전극을 양극이라고 한다.[3] 저기압 가스가 들어있는 방전관 중에서 접촉된 2개의 전기도체에 전류를 흐르게하고, 약간의 간격을 띄우게 되면, Fig. 4와 같이 도체 사이에 방전 현상이 발생 한다. 이 아크방전은 다른 방전에 비해 저전압, 대전류 아크로 큰 에너지로 금속을 용융시키는 용접열원으로 취급이 용이한 특징이 있다.[4]

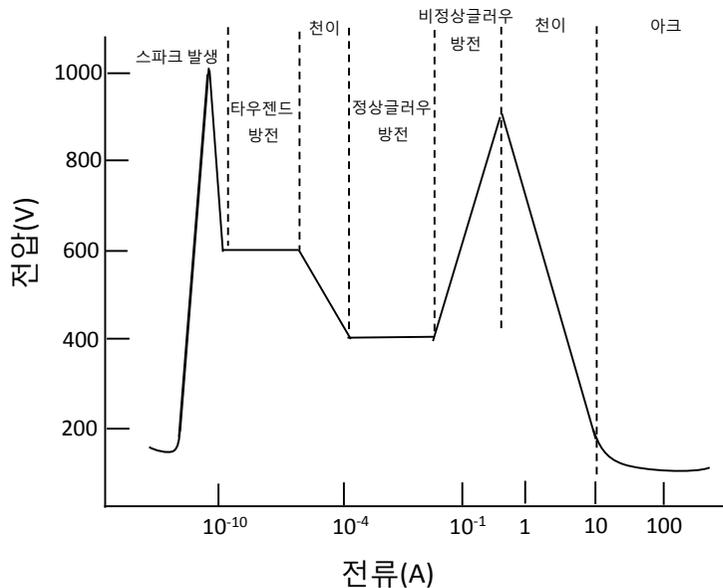


Fig. 4 Steady state voltage–current characteristic of a discharge

아크는 Fig. 5에 보인 바와 같이 전압강하에 대한 특성에 따라서 양극 전압 강화 구역(anode drop region), 음극 전압 강화 구역(cathode drop region), 아크 기둥(arc column)의 3구역으로 구분된다. 양극과 음극 강화 구역의 길이는 아크 기둥의 길이에 비하여 매우 작기 때문에 전기장은 대략 $10^9 \sim 10^{12} \text{V/m}$ 로 매우 높다. 또한, 양극과 음극 강화구역의 전압은 전극의 재질과 가스 종류에 따라 변하지만, 아크 길이가 변화여도 일정한 값을 유지 한다. 아크전압은 양극 강화 전압, 기둥강하 전압, 그리고 음극 강화 전압의 합으로 나타낼 수 있다. [5]

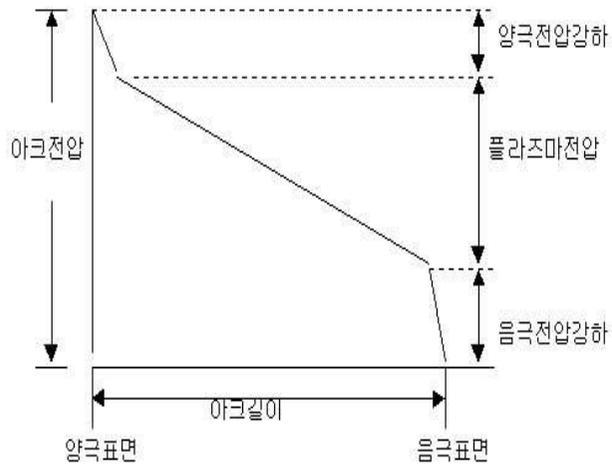


Fig. 5 The voltage along arc axis is divided into three regions; the anode voltage drop, the cathode voltage drop, and arc column

(2) 아크 전압과 전류 특성

아크 전압과 전류 특성은 Fig. 6을 살펴보면 전류가 일정한 상태에서 아크의 길이가 증가하면 전압이 증가하고, 아크길이가 일정하면 전류를 증가시키면 전압이 증가 함을 알 수 있다.

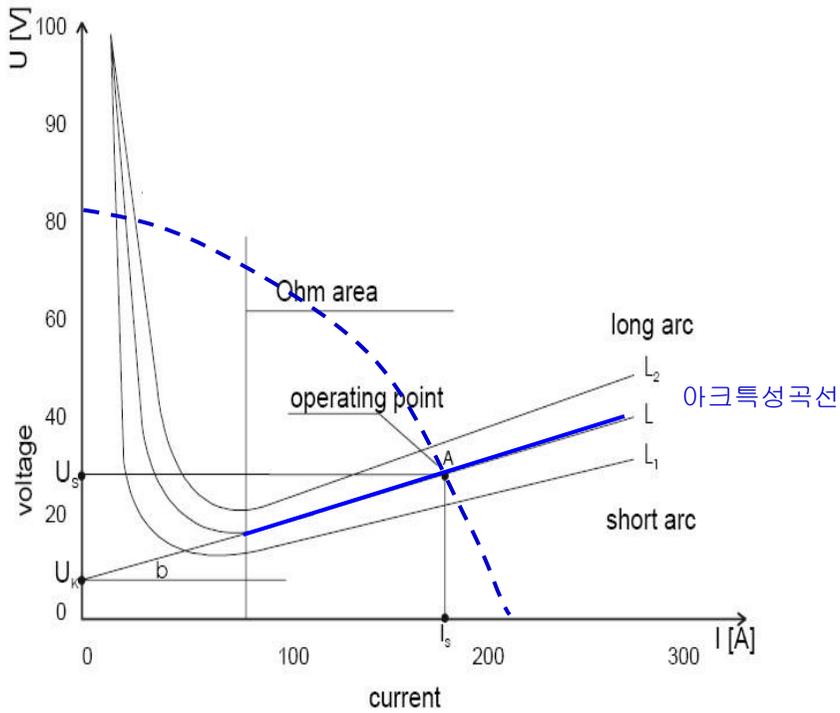


Fig. 6 Voltage-current characteristic for welding arc[6]

2.1.3 GTAW 장점과 단점

(1) GTAW 장점

GTAW는 용접 입열의 조정이 용이하기 때문에 박판 용접과 초층(Root Pass)에 용입을 정확하게 할 수 있다. 용접봉을 첨가 하지 않고 텅스텐 전극봉 과 모재 사이 발생하는 아크열을 이용하여 제살용접을 할 수 있고, 이종 재료를 포함한 거의 모든 금속 재료의 용접에 적용 가능 할 수 있다.

- ① 용접부의 기계적 성질이 우수하다
- ② 내부식성이 우수하다
- ③ 전 자세 용접이 가능하다
- ④ 용접 스페터가 거의 발생하지 않는다.
- ⑤ 용접부 변형이 적다

(2) GTAW 단점

GTAW는 일반적으로 SMAW, SAW, GMAW 등의 방법으로 쉽게 용접이 가능한 경우에 이들 용접방법과는 비용에 있어서 경쟁이 안 될 정도로 전체의 가격 상승을 가져오는 경우가 있는데 그것은 다음과 같다.

- ① 소모성 용접봉을 쓰는 용접 방법보다 용접 속도가 느리다.
- ② 용접 잘못으로 텅스텐 전극봉이 용접부에 녹아 들어가거나 오염될 경우 용접부가 취화되기 쉽다.
- ③ 부적당한 용접 기술로 용가재의 끝 부분이 공기에 노출되면 용접금속이 오염된다.
- ④ 불활성 가스와 텅스텐 전극봉은 다른 용접 방법과 비교해 볼 때 높은가격이며, 용접기의 가격이 비싸다.
- ⑤ 용접사가 숙련되고 세심한 기량이 요구 된다.

2.2 GTAW 용접기와 재료

용접기의 구성은 Fig. 7과 같이 용접 전원(Power source), 용접봉 송급 제어 장치, 용접봉 송급 장치, 토치, 비소모성 텅스텐 전극, 실드가스 공급을 조절하는 유량계로 구성 되어 있다.

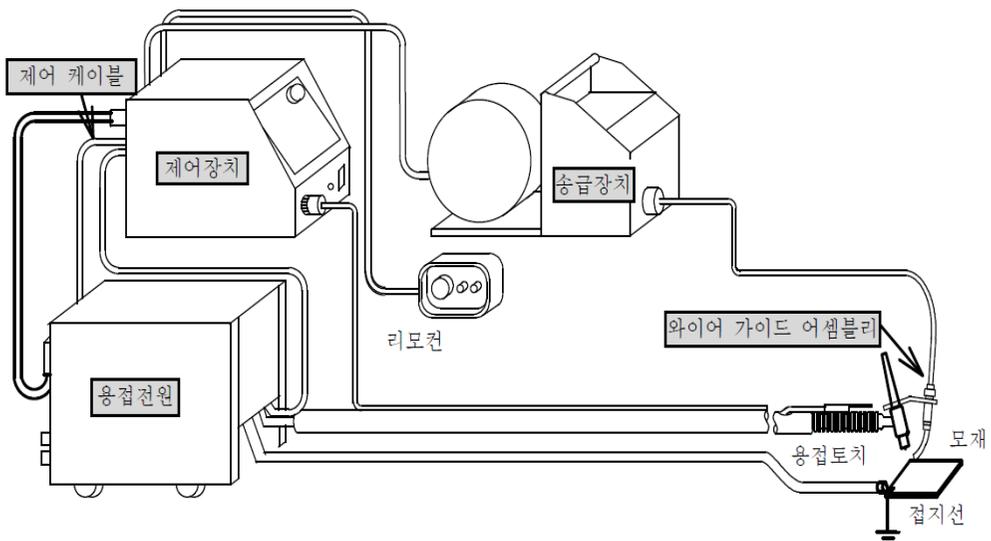


Fig. 7 Schematic diagram for GTAW equipment

2.2.1 용접기

GTAW 용접에서는 정전류 용접기를 사용하기 때문에 용접기는 아크길이가 변화하여도 일정한 전류를 제공하며, 아크의 길이를 일정하게 유지하기 위해서 전류의 변화에 따라 전압을 조정해 주어야 한다. 전류는 직류와 교류를 모두 사용하고 재료의 종류에 따라 선택해야 된다. 직류와 교류의 용접 할 때 특성은 다음과 같다.

(1) 직류 정극성(Electrode Negative, DCEN)

비소모성 텅스텐 전극은 음극으로, 모재는 양극으로 전원이 연결된 상태로 진행되는 용접이다. 텅스텐전극에서 나오는 열전자(Thermionic Emission)가 모재를 가열시키고 용융되는 용접봉의 이송을 원활하게 하여 좁게 용입이 깊은 Bead를 얻을 수 있으며, 용접 속도가 빠른 것이 특징이며, 용접과정에서 발생하는 열의 30% 정도가 텅스텐 전극쪽에서 발생하고 70%의 열만이 모재 쪽으로 발생한다. 역극성에 비해 보다 높은 전류에 상대적으로 적은 직경의 전극을 사용해도 되는 장점이 있으며, 전극이 과열되지 않아 전극의 선단 변형이 적어서 아크의 지향성이 좋다.[2]

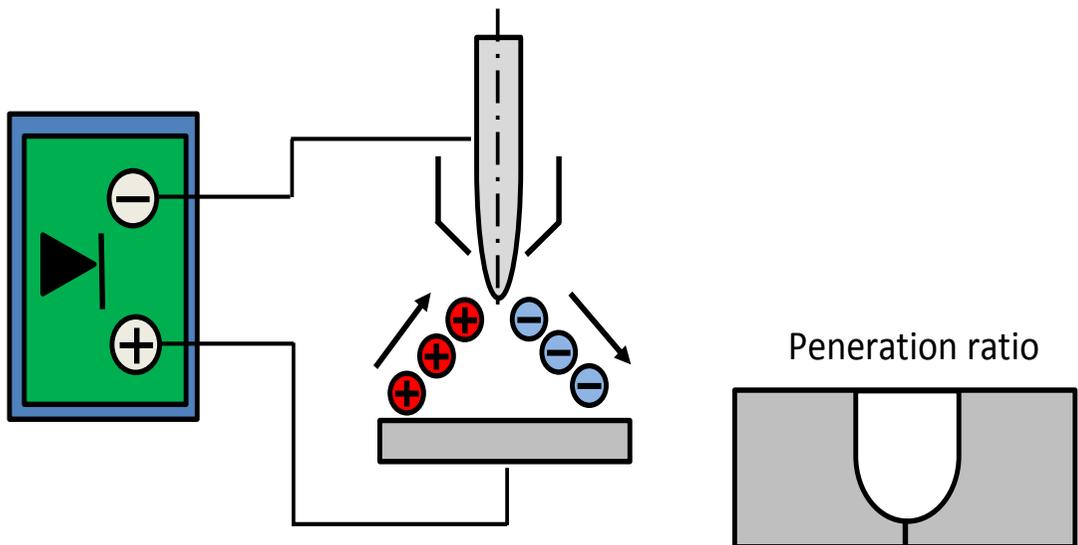


Fig. 8 Direct current arc, electrode as cathode(-); penetration ratios

(2) 직류 역극성(Electrode Postive, DCEP)

텅스텐 전극은 양극으로, 모재는 음극으로 하여 용접을 진행한다. 전자가 튀어나오는 모재의 범위가 넓어 열의 집중이 정극성에 비해서 불량하므로 폭이 넓은 Bead에 얇은 용입이 얻어진다. 텅스텐 전극이 과열되기 쉽고 과열된 텅스텐전극이 용탕의 텅스텐 혼입(Tungsten Inclusion)을 일으킬 수 있다. 따라서 텅스텐의 크기가 커지게 되며 전극 효율이 떨어진다. [2] 역극성 용접이 같은 특징적인 효과는 청정작용이다. 이는 가속된 가스이온이 모재에 충돌하여 모재의 산화물 피막이 파괴, 제거되는 과정으로 알려져 있다. GTAW의 역극성을 사용하면 용접봉 없이도 용접이 쉽고 아르곤 이온이 산화막을 제거하므로 용접 후 용접비드 주변이 희색을 띄게 된다. [2]

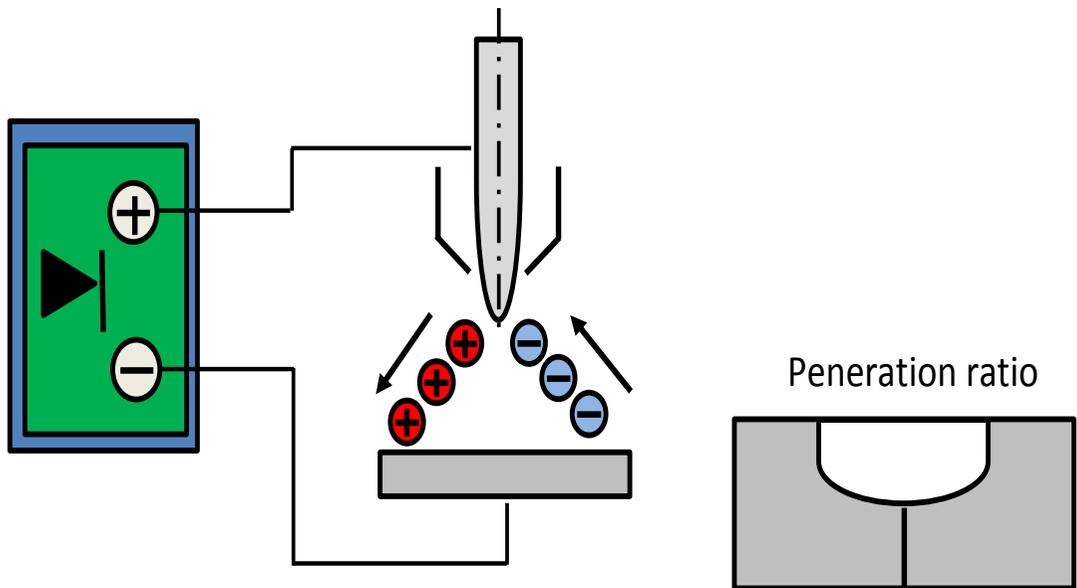
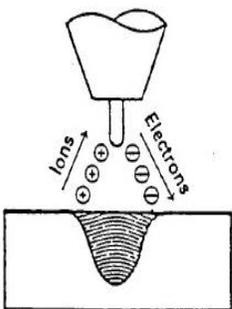
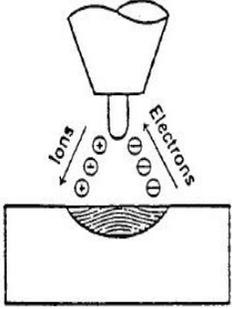
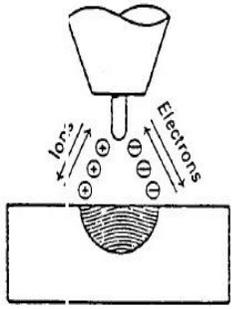


Fig. 9 Direct current arc, electrode as anode(+); penetration ratios

(3) 교류

교류는 직류 역극성의 특징과 정극성의 특징을 함께 얻을 수 있는 장점이 있다. 즉 깊은 용입과 청정작용을 동시에 얻을 수 있으며, 전극의 지름이 작아도 되고 아르곤 가스를 사용하면 표면 산화막의 청정 작용이 있다.[2] 그러나 교류 특성상 매 주기마다 2번씩 아크가 소멸되고 재생성되어 아크가 근본적으로 불안하기 때문에 아크 발생기를 항상 작동 시켜야 한다. 열전도도가 높은 재질을 교류로 용접하는 경우, 아크 소멸 시 용융부의 열이 모재에 전도 되어 직류에 비하여 열손실이 증가하므로 용융이 감소 한다.[5]

Table. 1 Comparison of bead shape according to the polarity

CURRENT TYPE	DCEN	DCEP	AC(BALNCED)
ELECTRODE POLARIT	NEGATIVE	POSITIVE	
ELECTRON AND ION FLOW			
PENETRATION CHARACTERISITICS			
OXIDE CLEANING ACTION	NO	YES	YES-ONCE EVERY HALF CYCLE
HEAT BALAJCE IN THE ARC(APPROX)	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	30% AT WORK END 70% AT ELECTRODE END	50% AT WORK END 50% AT ELECTRODE END
PENETRATION	DEEP, NARROW	SHALLOW, WIDE	MEDIUM
ELECTRODE CAPACITY	EXCELENT	POOR	GOOD

2.2.2 용접기 토치

용접 토치의 종류는 용접 중 또는 용접 후 냉각 시키는 방법에 따라 Air-cooled 와 Water-cooled GTAW 토치의 두가지 방식이 있다. 공냉식 과 수냉식 토치를 Fig. 10 과 Fig. 11 에서 보여주고 있다.

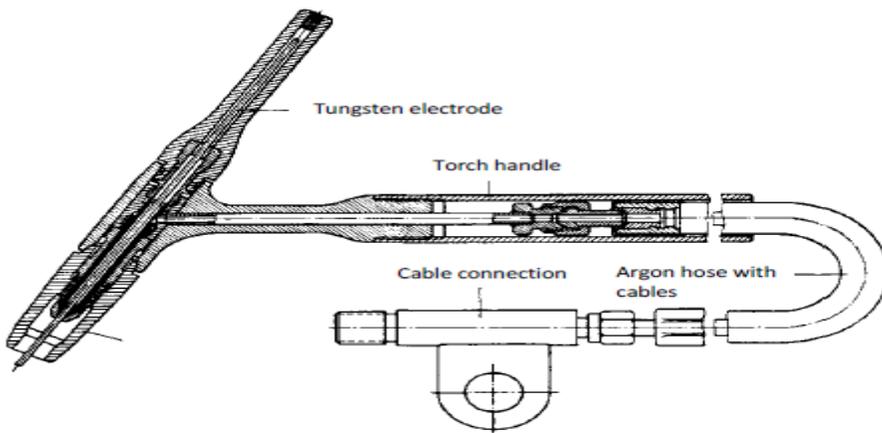


Fig. 10 Sectional view for Air-cooled GTAW welding torch

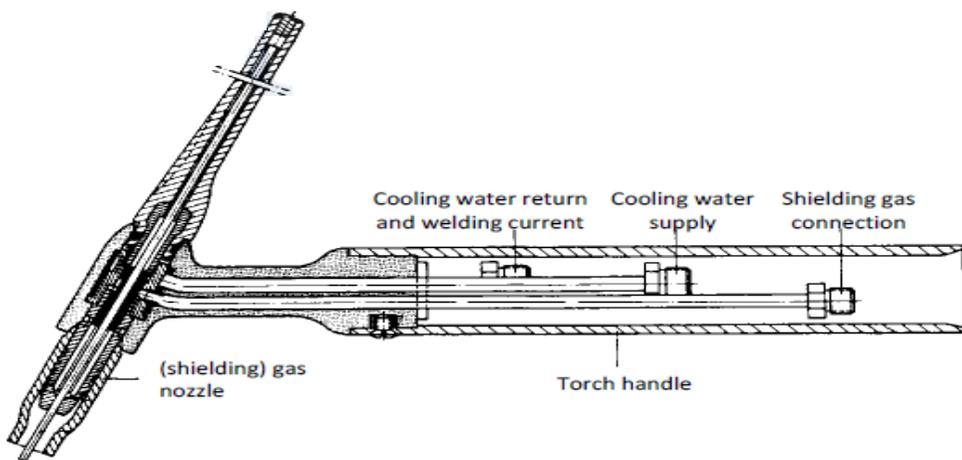


Fig. 11 Sectional view for Water-cooled GTAW welding torch

2.2.3 용접 재료

(1) 텅스텐 전극

GTAW에 사용되는 전극은 텅스텐으로 제작된 비소모성 전극을 사용한다. 교류를 사용하면 전극성과 역극성의 과정을 모두 거치게 되기 때문에 상대적으로 뭉툭하고 큰 직경의 전극을 사용한다. 전극이 날카롭게 예각으로 가공될수록 종모양의 아크가 형성되며, 아래 방향으로 향하는 전자기력(Lorentz Force)가 커진다. 이에 비해 둔각으로 가공될수록 용탕을 아래 방향으로 밀어주는 힘이 작아지게 된다.[2]

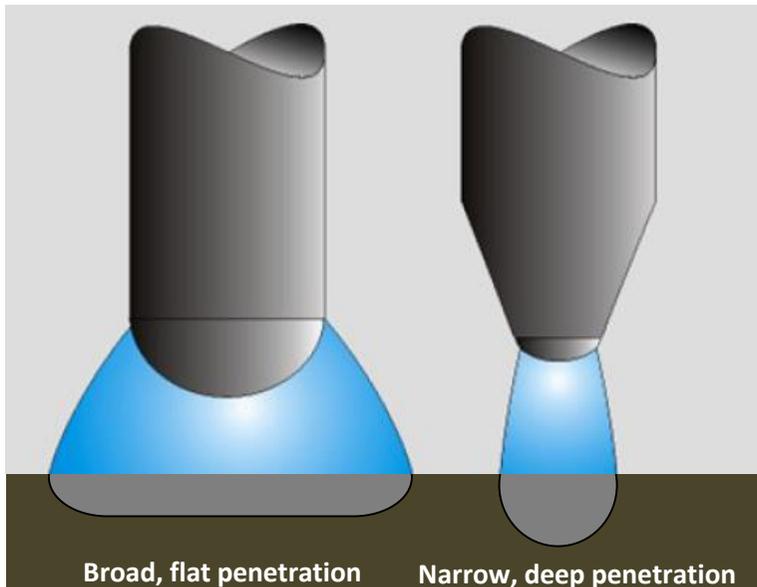


Fig. 12 The electrode tip shape according to welding current polarity

전극봉의 재질은 순수 텅스텐을 사용하거나, 정극성을 사용하는 경우에 전극봉에서 전자의 방출이 쉽도록 일함수가 낮은 산화토륨(ThO_2)을 1 ~ 2% 첨가한 텅스텐 전극봉을 사용한다. 역극성인 경우에는 전극봉에서 발생하는 열이 많기 때문에 전극봉이 과열되기 쉽다. 그러므로 동일한 용접 빛스류인 경우에는 역극성에서 사용하는 전극봉 직경이 정극성의 전극봉 직경보다 크다.[5]

GTAW에 사용 되는 전극봉은 텅스텐에 첨가 되는 합금 성분에 따라 전극의 끝단의 색으로 Table. 2와 같이 구분 할 수 있다.

Table. 2 Classification of Tungsten according to chemical composition

Electrode base material	Short Symbol	Requirement of the chemical composition				Identification colour	
		Oxide Additive		Pollution content in %	Tungsten content in %		
		Main Oxides	Contents in %				
Pure Tungsten	WP	non	n.a	0.5	99.5	Green	
Tungsten with thorium oxide	WT 10	ThO ₂	0.8 - 1.2	0.5	Rest	Yellow	
	WT 20		1.7 - 2.2			Red	
	WT 30		2.8 - 3.2			Violet	
Tungsten with zirconium oxide	WZr 3	ZrO ₂	0.15 - 0.5	0.5	Rest	Brown	
	WZr 8		0.7 - 0.9			White	
Tungsten with lanthanum oxide	WLa 10	La ₂ O ₃	0.8 - 1.2	0.5	Rest	Black	
	WLa 15		1.3 - 1.7			Gold	
	WLa 20		1.8 - 2.2			Blue	
Tungsten with cerium oxide	Wce 20	CeO ₂	1.8 - 2.2	0.5	Rest	Grey	

(2) 보호 가스

보호 가스로 불활성 가스인 Ar(아르곤)이나 He(헬륨)을 사용하여 전극봉과 용융풀의 산화를 방지한다. 각각의 특징은 Table, 3과 같다.

Table. 3 Characteristic of Argon gas and Helium gas

특징	아르곤(Argon)	헬륨(Helium)
열적 핀치력	낮다.(열전도성이 낮다)	높다. (열전도성이 높다)
아크 전압	낮다(이원화 전위가 낮다)	높다(이원화 전위가 높다)
아크 발생	헬륨보다 쉽다.	아르곤 보다 좁다.
열영향부 (HAZ)	헬륨보다 넓다.	아르곤 보다 좁다.
가스 소모량	적다(분자량 40)	많다.(분자량 4)
아크 안정성	좋다.	아르곤 보다 나쁘다.
모재 두께	박판에 좋다.(열의 발생이 적다)	후박에 좋다(열의 발생이 많다)
청정 작용	있다.(DCEP, ACHF)	없다.
용입	얕다.	깊다.

2.2.4 GTAW 고속 용접(High speed GTAW)

GTAW 에서 생산성을 높이는 방법으로는 대전류를 이용한 고속 용접을 적용해야 한다. 그러나 일반적인 수동 GTAW 용접공정은 수동으로 용접할 경우 8~15 cm/min 의 용접 속도 밖에 없을 수 없기 때문에 반자동 GMAW 공정에 비해 생산성에 많은 한계를 갖고 있다. 하지만 GTAW 공정은 GMAW 공정에 비해 고품질의 용접부를 얻을 수 있으며 용접효율이 높은 많은 이점을 가지고 있다. 고속 용접은 주로 박판 lap-joint, Fillet joint, butt joint 에 주로 사용되며 작은 용착 단면적 필요한 용접부를 빠른 용접속도로 용접하는데 사용된다. 용착속도를 증가시키기 위해서는 전류를 높이고 송급속도를 증가 시켜야 된다. 하지만 일반 GTAW 용접에서는 대전류를 적용하면 강한 아크력에 의해 언더컷과 험핑비드와 같은 결함이 발생하여 용착속도에 한계가 있다. 그래서 GTAW 는 저속 용접에서는 큰 용착 단면적을 가질 수 있으나 고속용접에서는 큰 용착 단면적을 유지 할 수 없다. 그래서 현재는 위 와 같이 작은 용착 단면적을 요구하는 분야에서 주로 사용되고 있다.[7]

2.2.5 플랜트 발전 설비의 소 구경 파이프 맞대기 용접

플랜트 발전 산업의 성장으로 인하여 플랜트 산업에 사용되는 파이프의 오버레이 용접기술과 함께 플랜트 발전 설비의 소 구경 파이프 맞대기 용접에 대한 생산성 향상, 고 품질 확보, 와 용접 시공시의 문제점에 대한 개선이 대두 되고 있으며, 소 구경 파이프 맞대기 용접 시공에서의 문제점으로는 이면비드 형성 불량, 단차와 루트 갭의 불균일에 따른 용락 과 용입량의 문제 발생, 용접 시공에 따라 생기는 각 변형으로 인하여 제품 직직도 불량,과 수축 변형의 불균일 문제 등이 있다. 대부분의 소 구경 파이프 맞대기 고속 용접 시공 시 일반 GTAW와 같은 전류, 전압을 설정 한 후 시공 하기 때문에 고 품질의 용접부 확보가 불가능한 상황이다. 본 연구에서는 베이스 전류, 피크 전류, 베이스 전류 지속 시간, 피크 전류 지속 시간을 조정하여 소 구경 파이프 맞대기 고속 용접에서의 이면 비드 형성, 용입 불량 의 현상을 개선 할 수 있을 것으로 기대 된다.[8]

제 3 장 연구 방법

3.1 고속 GTAW 공정

3.1.1 사용재료

본 연구에 사용된 소재는 압력용기, 발전 플랜트, 열 교환기 등의 고온·고압에 영향을 노출 되는 부품에 사용되는 SA209M Gr. T1a 합금으로서, 미국 기계학회(American Society of Mechanical Engineers), ASME Section II Part-A 에 등재 된 Creep resistance 용 C-Mo 강재 이었으며, 본 소재의 Chemical composition 과 Mechanical properties 에 대하여 Table 4 와 Table 5 에 나타내었다. SA209M Gr. T1a Creep resistance 용 C-Mo 강재는 0.15 - 0.25 wt. %의 Carbon 와 0.44 - 0.65 wt. % 의 Molybdenum 의 요구 조건에서 0.17 wt. % 의 Carbon, 0.49 wt. % 의 Molybdenum 을 함유 했으며, Tensile strength, Yield strength 와 Elongation 이 각각 282 Mpa, 480 Mpa 과 37.2%의 기계적 성질을 갖고 있었다. 일반적으로 탄소강의 경우 탄소의 함유량 , 온도 등의 다양한 변수로 인하여 다양한 상 변태(동소 변태)를 하며, 그 중 Austenite(γ -Fe)에서 Ferrite(α -Fe)로의 상 변태 중 연속 냉각 속도($T_{8/5}$)에 따라 Pearlite, Bainite 와 Martensite 의 변태가 용접 후 냉각 시 용접부 와 열영향부에 주로 유발 된다. 고속 GTAW 의 공정변수에 따라 용접부 와 열영향부의 상변태는 기계적 성질 과 금속 조직의 변화 제어의 공정 조건이 요구 되며, Fe-Fe₃C 이원계 상태도를 도입 함으로써, 상변태 제어방안을 통하여 미세립 결정 크기 변화에 대하여 연구 하였다. 본 연구에서 사용 된 소재의 제원과 명칭을 Fig.14 에 나타내었으며, Tube 의 외경 은 57 mm, 두께는 7.7 mm 의 튜브를 사용 하였다. 고속 GTAW 의 용접부 형상은 일반적으로 사용되는 V-Groove 의 형태가 아닌 J- Groove 를 사용하여 고속 용접에 용이 한 형태의 Joint 형상으로 개선 가공 하여 실험을 실시 하였다.

Table. 4 Chemical Composition of SA209M Gr. T1a

Material	Chemical Composition							
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Al	N
SA 209M Gr. T1a	0.18	0.21	0.38	0.017	0.002	0.49	0.013	0.004

Table.5 Mechanical Properties of SA209M Gr. T1a

Material	Mechanical Properties		
	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation
SA 209M Gr. T1a	480 Mpa	282 Mpa	37.20%

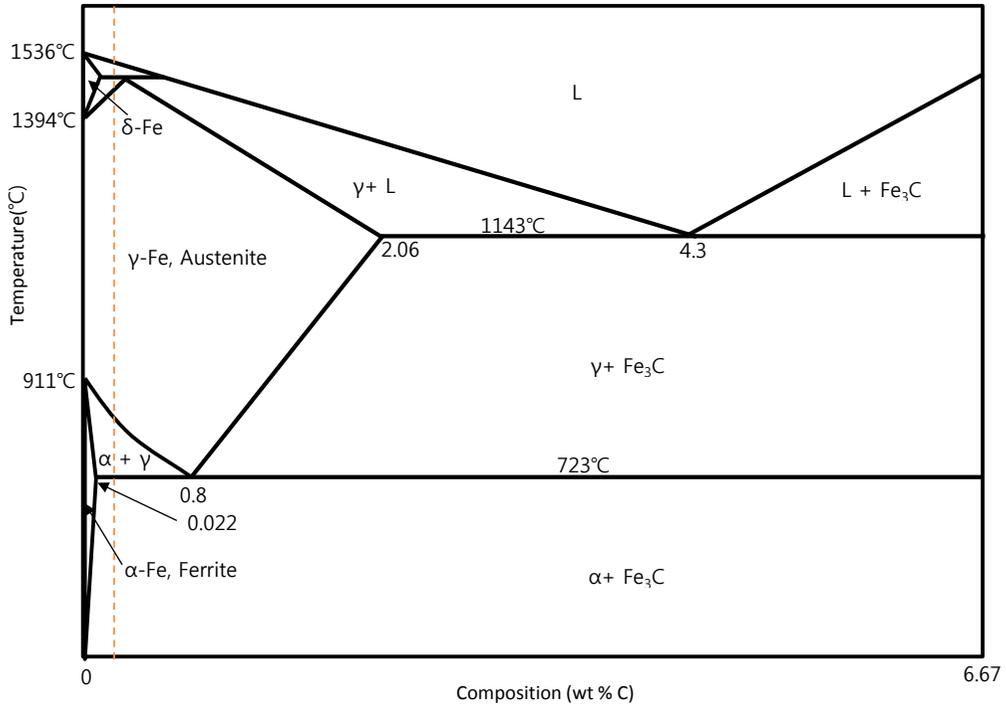


Fig.13 The phase diagram Fe-Fe₃C

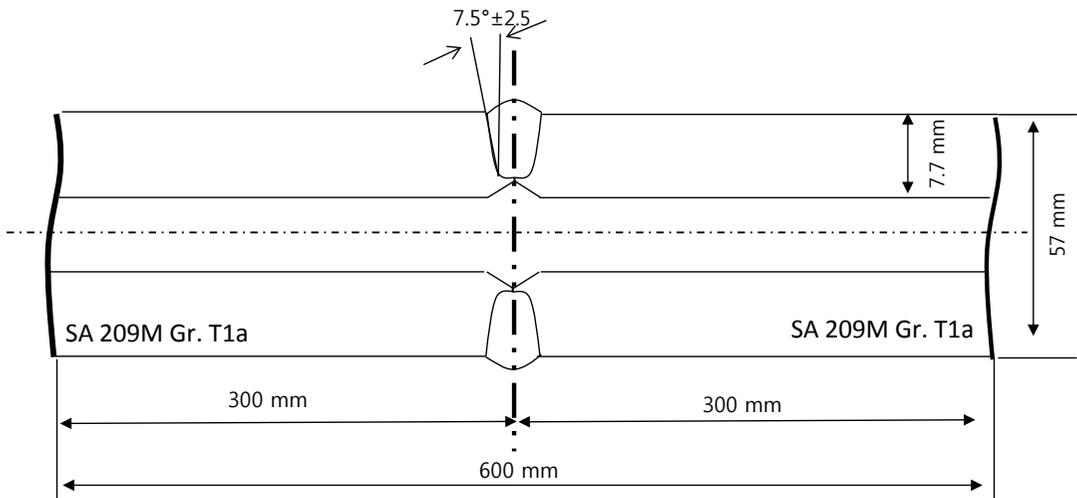


Fig. 14 The test coupon drawing for welding Joint

3.1.2 용접 장비와 공정 변수 조건

본 연구에서 사용된 시험편에 적용되는 고속 GTAW 용접 장비는 Fig 15.와 같이 용접 전원 장치인 DAIHEN 사의 INVERTER ELECON 500P 와 와이어 송급 제어 장치 인 TIG 필러 HC-71D 모델을 사용 하였다. 이 용접기는 고속 GTAW 를 구현 할 수 있도록 구성 되었으며, 해당 용접기 사양은 Table. 6, 7 에 상세하게 표기 하였다.



Fig. 15 High speed welding machine. (A)Power controller
 (B) Wire feeding controller (C) Wire feeding machine

Table. 6 Specification of INVERTER ELECON 500P

Division	Specifications
Rated input voltage(V)	220
Rated output voltage(A)	500
Rated input(Kva)	22
Rated utilization(%)	60
Output current range(A)	5 - 500
Output voltage(V)	26
Crater current(A)	5 - 500
Pulse current(A)	5 - 500
Pulse frequency(Hz)	10 - 500
Body(W X D X H) (mm)	467 X 611 X877
Body weight(kg)	96

Table. 7 Specification of HC-71D

Division	Specifications
Rated input voltage(V)	220
Rated output voltage(A)	500
Wire feeding mode(Kva)	3종류(단속, 연속, 펄스)
단속 시간 범위(초)	0.1 - 5
송급개시지연시간(초)	0 - 5
크레이터 송급시간(초)	0 - 5
적용 와이어 사이즈(mm)	0.8 - 1.6
와이어 송급 속도(m/Min.)	5
Body(W X D X H) (mm)	206 X 251 X 395
Body weight(kg)	7.5

고속 GTAW 의 공정 변수 조건에 따른 비파괴 검사 시 합격 여부, 기계적 특성과 미세조직의 변화를 확인하기 위하여, 용접 Peak 전류, 용접 Base 전류, 용접 전압, 와이어 송급 속도를 공정 변수로 선정 하였고, Tube 의 root 용접부에 대하여 이면 비드 형성을 위해 초층 용접에 대한 전류, 전압, 와이어 송급 속도는 일정하게 유지한 상태에서 고속 GTAW 공정을 진행 하였다. 이에 대한 구체적인 실험 조건은 Table. 8 에 나타내었다.

Table. 8 Detail of welding condition for high speed GTAW

Fixed	Filler metal	ER80S-D2					
	Base metal	SA 209 Gr. T1a					
	Shielding Gas	Ar 99.998% 25L / min					
	Base current(A)	50					
	Peak current(A)	50					
	Feeding Rate(cm/ min)	90					
	Welding speed Rate(cm/ min)	70					
Varied	Coupon No.	1	2	3	4	5	6
	Base current(A)	130	130	130	140	140	140
	Peak current(A)	160	160	160	170	170	170
	Feeding Rate(cm/ min)	600	850	1000	700	950	1100
	Welding speed Rate(cm/ min)	90	110	130	100	120	140

본 실험에 사용된 보호 가스는 헬륨(He) 보다 열전도율과 이온화 에너지 낮아 아크 에너지가 플라즈마 중앙부에 집중되고 보다 낮은 전압에서 용접을 진행 할 수 있고 아크 안정성이 좋은 아르곤(Ar) 가스를 사용 하였으며, 용가재는 Table. 9, 10 과 같이 AWS(American Welding Society) 규격에 따라 AWS A5.28 -2005 ER80S D2 중 KISWEL 社 의 KC-80D2 로 용접을 진행 하였다.

Table. 9 Chemical Composition of KC-80D2(ER80S-D2)

Welding Rod	Chemical Composition							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo
KC-80D2	0.009	0.62	1.69	0.014	0.007	0.18	0.01	0.45

Table. 10 Mechanical Properties of KC-80D2(ER80S-D2)

Welding Rod	Mechanical Properties		
	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation
KC-80D2	668 Mpa	555 Mpa	27.40%

3.2 용접부에 대한 특성 평가

3.2.1 육안 시험

본 연구에서 용접 된 시험편의 육안검사는 ASME Section Part. I 2017 edition 중 PW-33 Visual inspection 에 따라 검사를 수행하고 검사 기준은 아래 조건 과 Table. 11 과 같이 실시 하였다.

All weld bevels and weld surfaces shall be free from cracks, porosity, slag inclusions and the weld grooves and base metal shall be clean and free from paint, oil, dirt, scale, oxides and other foreign material detrimental to the integrity of the weld. [9]

Table. 11 The tolerance of alignment .(ASME Sec. I PW-33)[9]

ALIGNMENT TOLERANCE OF SECTION TO BE BUTT WELDED [SHELLS AND VESSELS (INCLUDING PIPE OR TUBE USED AS A SHELL)]		
Section	Direction of Joint in Cylindrical Shells	
Nominal Thickness(mm)	Longitudinal (mm)	Circumferential (mm)
Up to 13 incl.	1/4 t	1/4 t
Over 13 to 19 incl.	3	1/4 t
Over 19 to 38 incl.	3	3/16 (5)
Over 38 to 50 incl.	3	1/8t

3.2.2 비파괴 시험

본 연구에서 용접 된 시험편의 파괴 시험 전 결함 유무를 확인 하기 위하여 비파괴 시험을 실시 하였다. 비파괴 시험 중 Radiography test 를 선택하여 진행 하였고 방사성 동위 원소는 Ir-192 을 사용하고, Film 은 Kodak Mx125 를 사용 하였으며. 촬영 기법은 단벽 촬영 기법(Single-Wall technique)으로 실시 하였다. 방사선 투과 검사 경우 ASME Section Part V 에 의거하여 방사선 투과 검사를 실시하고 ASME Section Part I PW-51 에 따라 승인 된 판독자가 방사선 투과 검사 Film 을 아래와 사항에 따라 결함 유무를 판단한다.

용접부에 대한 방사선투과검사 결과 투과 사진상 다음과 같은 유형의 지시가 있는 경우 불합격으로 판정한다. [9]

- (1) Any indication characterized as a crack or zone of incomplete fusion or penetration; (모든 종류의 균열, 융합불량 또는 용입 불량을 나타내는 지시)
- (2) Any other elongated indication on the radiograph which has a length greater than:
 - ① $\frac{1}{4}$ in.(6mm) for t up to $\frac{3}{4}$ in.(19mm), inclusive;
 - ② $\frac{1}{3}t$ for t from $\frac{3}{4}$ in.(19mm) to $2\frac{1}{4}$ in.(57mm), inclusive;
 - ③ $\frac{3}{4}$ in.(19mm) for t over $2\frac{1}{4}$ in.(57mm)

Where t is the thickness of the weld excluding any allowable reinforcement. For a butt weld joining two members having different thicknesses at the weld, t is the thinner of these two thicknesses. If a full penetration weld includes a fillet weld, the thickness of the thro'at of the fillet shall be included in t.

(다음 길이를 초과하는 가늘고 긴 지시(elongated indication))

- ① 두께(t)가 $\frac{3}{4}$ in.(19mm) 이하 : $\frac{1}{4}$ in.(6mm)
- ② 두께(t)가 $\frac{3}{4}$ in.(19mm) - $2\frac{1}{4}$ in.(57mm) : 두께의 $\frac{1}{3}$ 길이
- ③ 두께(t)가 $2\frac{1}{4}$ in.(57mm) 초과 : $\frac{3}{4}$ in.(19mm)

3.2.3 인장 시험



Fig. 16 Tensile test machine

본 연구에서 용접 된 시험편의 용접부에 대한 기계적 강도를 평가하기 위해 기계적 절단 방법으로 시험편을 가공 하였고, 인장 시험은 500K 용량의 유압식 인장시험기 KSTM 社 KSU-50HSO 를 사용 하였다. 인장 시험편은 ASME SECTION IX QW-462.1(b) 규격에 따라 가공하여 Load speed 2mm/Min 으로 실험을 실시 하였으며, 결과는 응력-변형을 선도로 나타내었다.

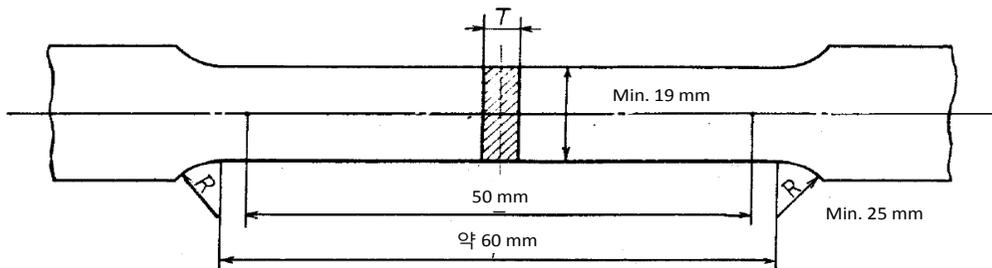


Fig. 17 Specimen for Tensile test(ASME Sec. XI pipe type)

3.2.4 경도 시험

본 연구에서 진행 된 시험편 마다 다른 공정 조건에서 용접 된 시편의 Weld metal, Haz, Basm metal 의 부위에 대한 Hardness 를 평가 하기 위하여 경도 시험을 도입 하였다. 각 시편에 적용 하는 비커스 경도의 경우, Fig. 18 에 나타낸바와 같이 Struers 사의 비커스 경도계를 이용하여 실험 하였고, 시편 상단에서 1.5mm 아래 용접부를 중심으로 좌우 0.5 mm 간격으로 (Fig. 19) HV 0.5(4.903 N) 하중으로 시편 표면에 10 초간 유지하여 측정 하였다.



Fig. 18 Vickers hardness test machine

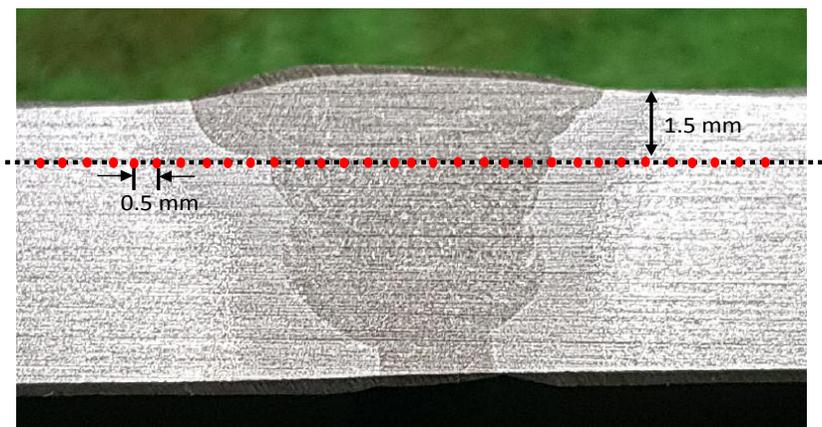


Fig. 19 Test locations for vickers hardness

3.2.5 미세조직 시험

서로 다른 조건에서 용접 된 시험편의 용접 접합부의 미세조직 특성을 분석하기 위해 시험편을 절단 후 #200 ~ #2000 의 Emery paper 로 연마 후 시편 표면의 화학적 부식 작용을 위해, Nital 5% 용액을 제조 후, 이를 이용하여 접합부의 횡단면을 광학 현미경(Opitcal Mircoscope)을 이용해 마크로 실험과 미세 조직을 확인 하였다.



Fig. 20 Optical Microscope

제 4 장 실험 결과 와 고찰

4.1 시험편 Top view 와 외관 검사

4.1.1 Top view

고속 GTAW 공정조건에 따라 시험편의 Top view 를 검사 하였고, 그 결과를 Fig .19 에 나타내었다. 실험 결과, 다양한 용접조건에서 실시된 각 시험편의 외관 검사 결과 모두 균열, 스패터, 기공, 용접 후 직진도 변형과 같은 결함이 없이 미려하게 접합된 것으로 관찰 되었다. 그러나, 용접 속도의 증가는 Fig. 21 에 나타난 바와 같이, 용접비드 폭 감소를 촉진 시켰는데, 이로 인하여 비드 폭의 길이가 1.3 mm 에서 0.8 까지 감소 되는 결과를 나타내었다.

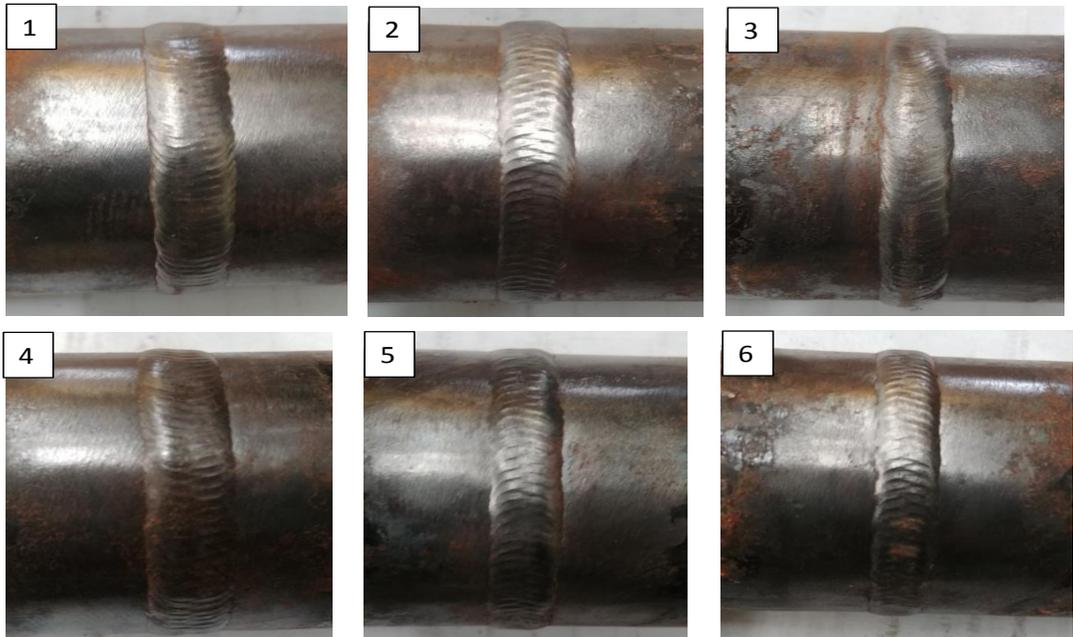


Fig. 21 Top view of high speed welded coupon under various welding conditions

4.1.2 공정조건별 용접비드 폭 변화량

고속용접 된 시험편의 비드 폭 변화를 측정하였고, 공정조건에 따라 변화 되는 비드폭에 대하여 Fig 22 에 나타내었다. 용접 전류와 용접속도가 가장 낮은 1 번 조건에서 약 1.2 mm 로 가장 크게 나타났으며, 용접 전류와 용접속도가 가장 높은 6 번 조건에서 약 0.7 mm 로 가장 작게 나타났다. 전체적으로 용접 전류와 용접 속도가 증가함에 따라 용접 비드 폭이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

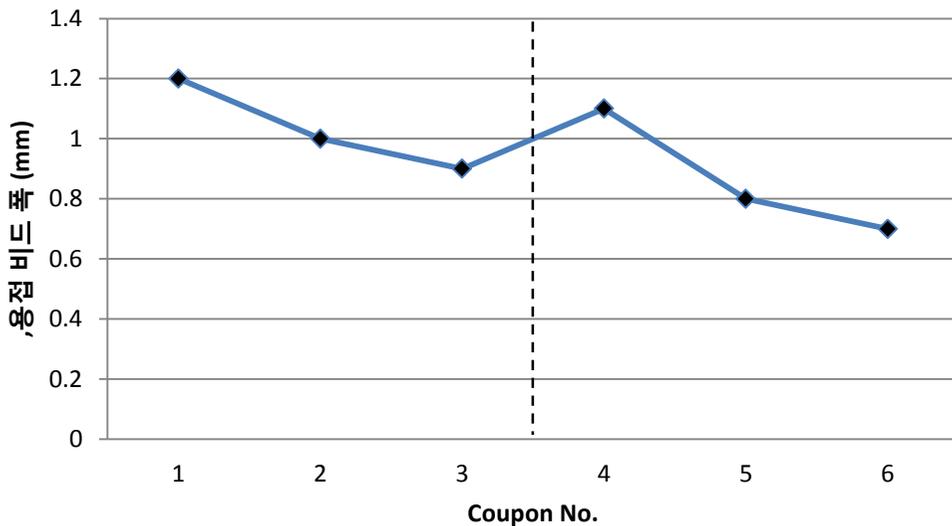


Fig. 22 Variation of weld bead width according to process conditions

4.2 비파괴 검사 평가

고속 GTAW 공정조건에 따라 용접 된 시험편에 대하여 육안 검사 후 비파괴 검사(방사선 투과 시험, RT)를 ASME Section V 에 의거하여 실시하였고, ASME Section I PW-51 에 따라 방사선 투과시험 필름을 판독하였으며, 방사선 투과시험 사진 농도는 최소 2.0 으로 Fig 23, 24 과 같이 나타내었다. 방사선 투과시험 필름 판독 결과 Back bead weld condition 은 양호 한 결과를 가졌으며, 시험편 용접부 내부에 기공, 슬래그 혼입, 텅스텐 혼입, 용입 부족, Crack 등 과 같은 불합격 지시는 나타나지 않아 용접 전류 와 용접 속도가 증가함에 따라 용접부 품질 신뢰성은 확보 할수 있음을 나타내고 있으나, 용접 속도가 가장 빠른 조건으로 용접 된 Peak current 160 (A)에 Welding Rate 130(cm / min)인 3 번 조건 과 Peak current 170 (A)에 Welding Rate 140(cm / min)인 6 번 조건에서 Lack of Fusion(융합 불량)의 결함이 검출 되어 방사선 투과시험 필름상에 결함이 없는 용접금속과의 농도차이로 인하여 검정색 지시로 표시 되어 있다. 이와 같은 현상은 매우 빠른 용접 속도에 비해 이미 용접 된 비드 위에 용접봉을 용융시켜 비드와 비드간의 융착을 시키는 역할을 하는 용접 전류가 매우 빠른 속도로 인해 일부 구간에 대하여 충분히 녹이지 못한 상태에서 접합이 완료 되었기 때문이라고 판단 된다.

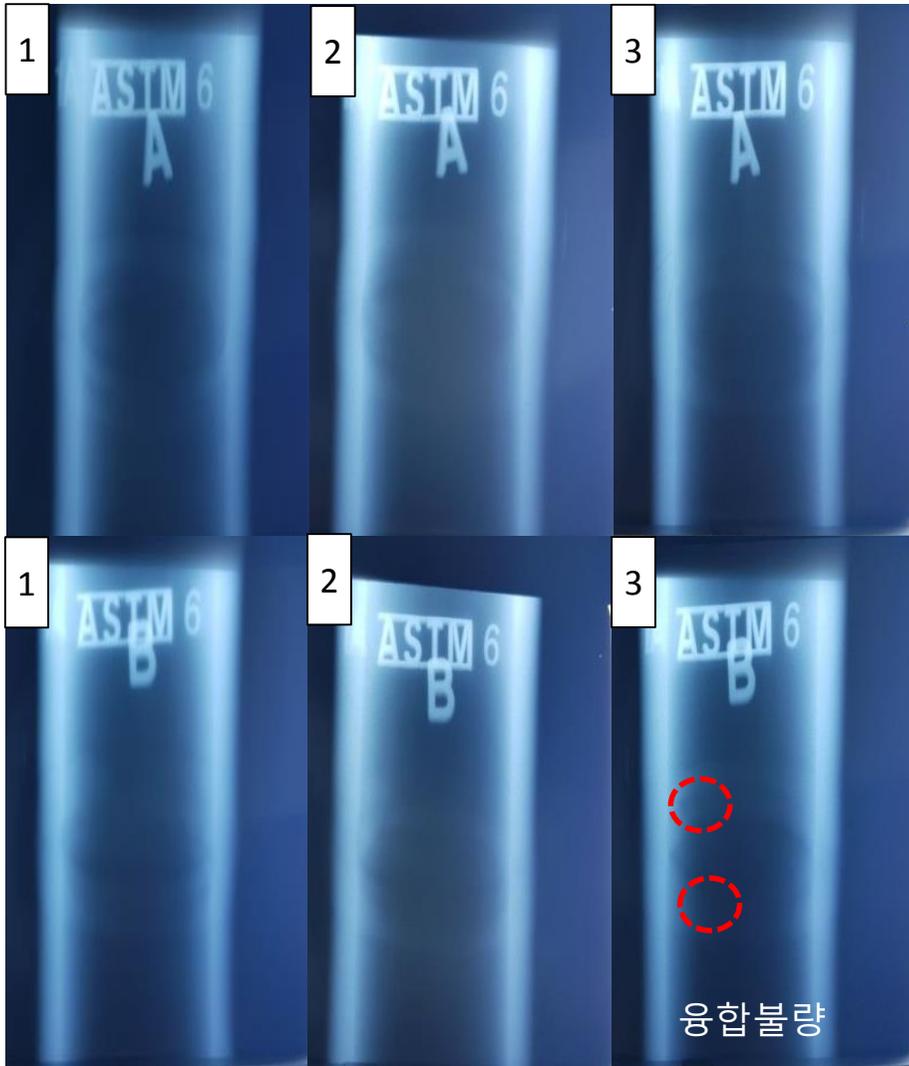


Fig. 23 Radiography Test Film for Coupons welded at Peak Current 160A
 (1) Welding Speed 90 cm/min, (2) Welding Speed 110 cm/min,
 (3) Welding Speed 110 cm/min

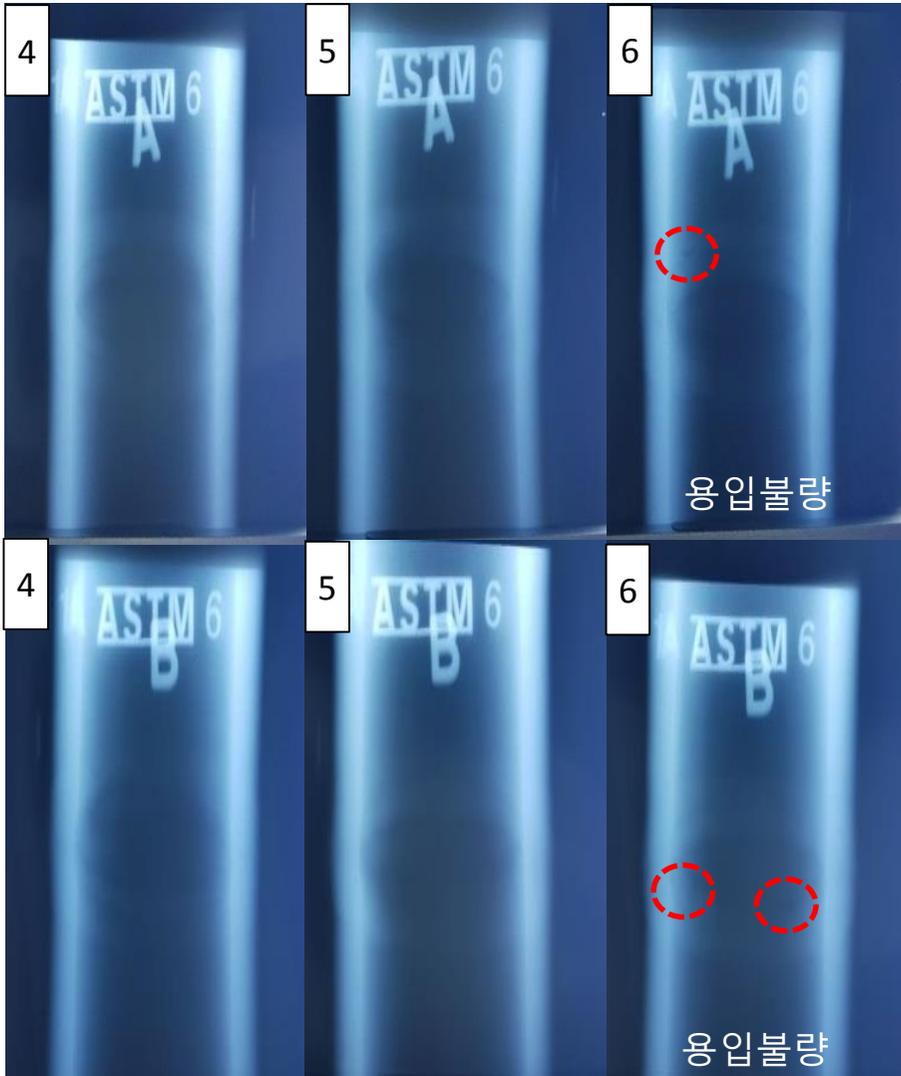


Fig. 24 Radiography Test Film for Coupons welded at Peak Current 170A
 (4) Welding Speed 100 cm/min, (5) Welding Speed 120 cm/min,
 (6) Welding Speed 140 cm/min

4.3 인장 강도 특성

고속 GTAW 공정조건에 따라 용접 된 시험편에 대하여 인장 시험으로 가공 후 인장 시험을 실시한 결과 값에 대하여 Fig. 25 에 나타내었다. 모재의 경우 용접을 실시 하지 않아 열화 되지 않았으므로 전체적으로 변형이 일어나면서 용접 된 시험편에 비해 다소 낮은 인장강도와 항복강도를 가졌으나, 우수한 연신율을 나타내고 있다. SA 209M Gr. T1a 에 대한 인장 강도, 항복강도, 연신율은 각각 480 MPa, 282 MPa, 과 37%의 기계적 성질을 나타내었다. 고속 GTAW 경우, 5 번 조건(Peak current 170A, Welding Speed Rate 120 cm/min)에서 594 MPa 로 가장 높은 인장강도 값을 나타내었고, 1 번 조건(Peak current 160A, Welding Speed Rate 90 cm/min)에서 553 MPa 로 가장 낮은 인장강도 값을 나타내었다. 하지만, 3 번 조건에서 인장강도 591 MPa 로 최대 인장강도(5 번 조건)와 유사한 강성을 지녔다. 인장시험결과에 따른 인장시험편의 파단면을 Fig. 26 에 나타내었다. 고속 GTAW 의 인장 시험 파단면을 볼 때, 파단 부분에서 necking 이 발생을 확인할 수 있으며, 파단면 입계파단 형태임을 확인 할 수 있었다. 이로써 연성파괴(Ductile fracture) 양상으로 보였다.

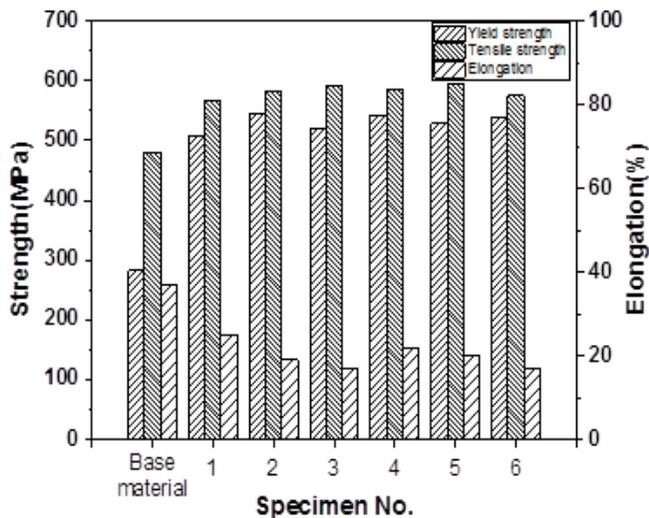


Fig. 25 Mechanical properties for welded SA 209M Gr. T1a

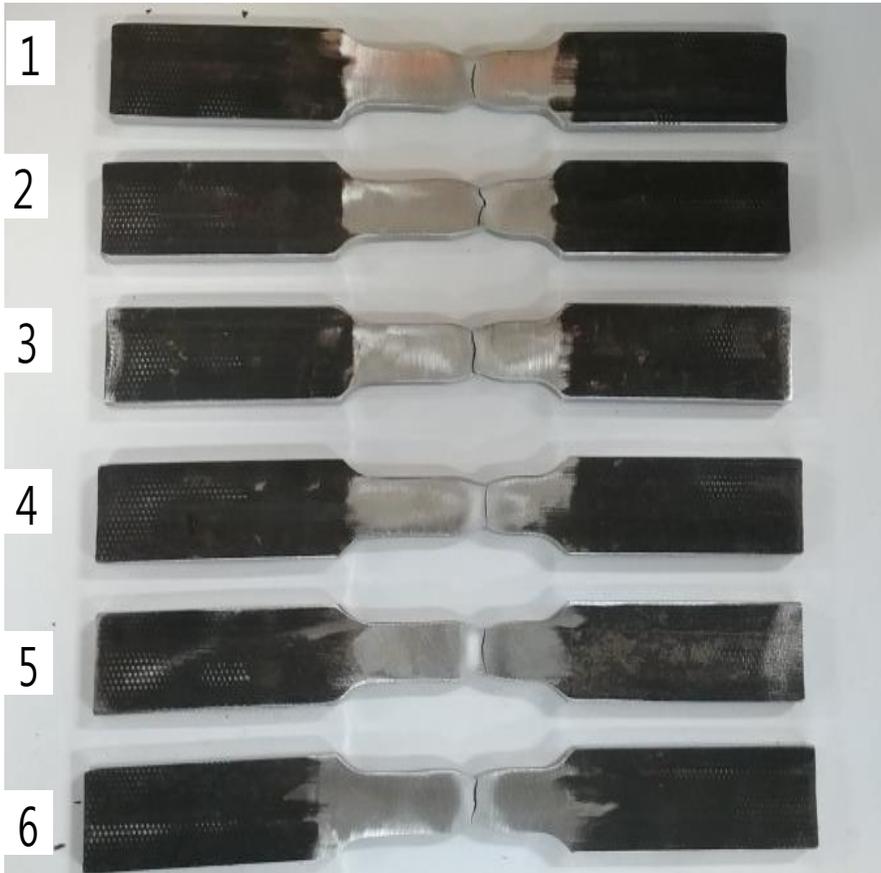


Fig. 26 Tensile test result (visual shape)

4.4 경도 특성

고속 GTAW 공정조건에 따른 용접부의 경도값을 분석하였다. 초기 모재에 대한 경도가 137 ~ 158 Hv 정도 값의 분포를 확인하였다. 시험편에 대한 경도 측정은 경도 시편의 상표면으로부터 1.5 mm 지점에서 용접부로부터 0.5 mm 씩 등간격으로 경도를 측정하였다. Peak current 160 (A) 조건에서 Welding speed 를 90, 110, 130 cm/min 으로 용접 하였을 때, 경도분포는 Fig. 27 에 나타내었다. Welding speed 조건이 90 cm/min 인 1 번 조건의 용접부 경도 값은 Fig. 27(1)에 보여진 바와 같이 143 ~ 273 Hv 정도를 나타냈으며, 용접부(Weld metal) 와 열영향부(Heat Affected Zone) 경도 값이 모재 대비 약 70% 증가하는 결과를 보였다. Welding speed 조건이 110 cm/min 인 2 번 조건의 용접부 경도 값은 Fig. 27(2)에 보여낸 바와 같이 143 ~ 281 Hv 로 1 번 조건에 비하여 측정 값이 증가한 결과를 나타내었다. Welding speed 조건이 130 cm/min 인 3 번 조건의 용접부 경도 값은 Fig. 27(3)에 보여진 바와 같이 144 ~ 303 Hv 로 초기 모재 경도에 비해 약 90% 증가와 1 번 조건에 비해 약 10%증가 한 경도 크기를 나타내었다. 위 결과들을 통해 Welding speed 가 증가 할수록 용접부 폭은 1.2 mm 에서 0.9 mm 로 좁아졌으며, 용접속도 증가에 따라 경도 값이 상승함을 확인 하였다.

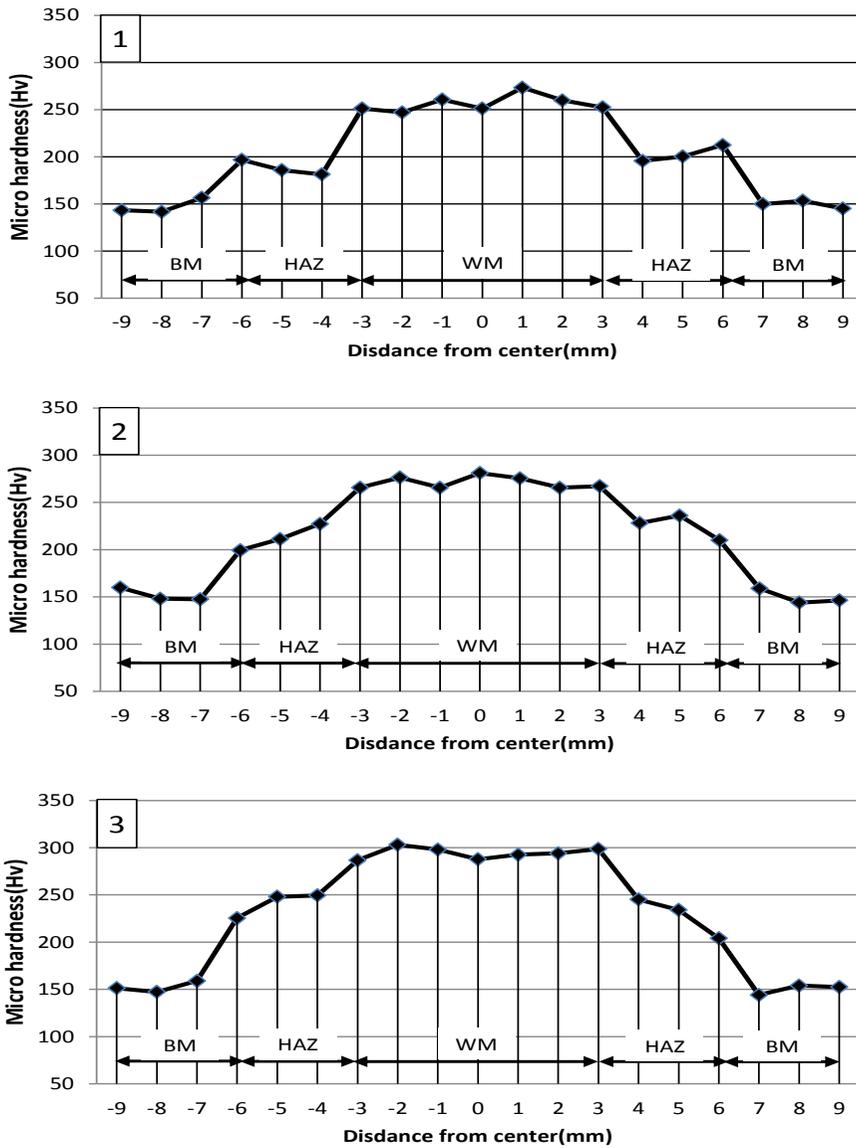


Fig. 27 Hardness distribution of specimens welded at Peak Current 160A
 (1) Welding Speed 90 cm/min, (2) Welding Speed 110 cm/min,
 (3) Welding Speed 110 cm/min

Peak current 를 170 (A) 조건에서 Welding speed 를 100, 120, 140 cm/min 으로 용접 하였을 때, 경도분포는 Fig. 28 에 나타내었다. Welding speed 조건이 100 cm/min 인 4 번 조건의 용접부 경도 값은 Fig. 28(1)에 보여진 바와 같이 148 ~ 296 Hv 정도를 나타냈으며, 용접부(Weld metal) 와 열 영향부(Heat Affected Zone) 경도 값이 모재 대비 약 87% 증가하는 결과를 보였다. Welding speed 조건이 120 cm/min 인 5 번 조건의 용접부 경도 값은 Fig. 28(2)에 보여낸 바와 같이 144 ~ 311 Hv 로 4 번 조건에 비하여 측정 값이 증가한 결과를 나타내었다. Welding speed 조건이 140 cm/min 인 6 번 조건의 용접부 경도 값은 Fig. 28(3)에 보여진 바와 같이 143 ~ 286 Hv 을 나타내었다. 5 번 조건의 경우 초기 모재 경도에 비해 약 96% 와 4 번 조건에 비해 약 5% 증가 한 경도 크기를 나타내었다. 위 결과들을 통해 Welding speed 가 증가 할수록 용접부 폭은 1.1 mm 에서 0.7 mm 로 좁아졌으며, 용접부(Weld metal) 와 열 영향부(Heat Affected Zone)가 열화되어 경도값이 높게 측정 된 것으로 판단된다.

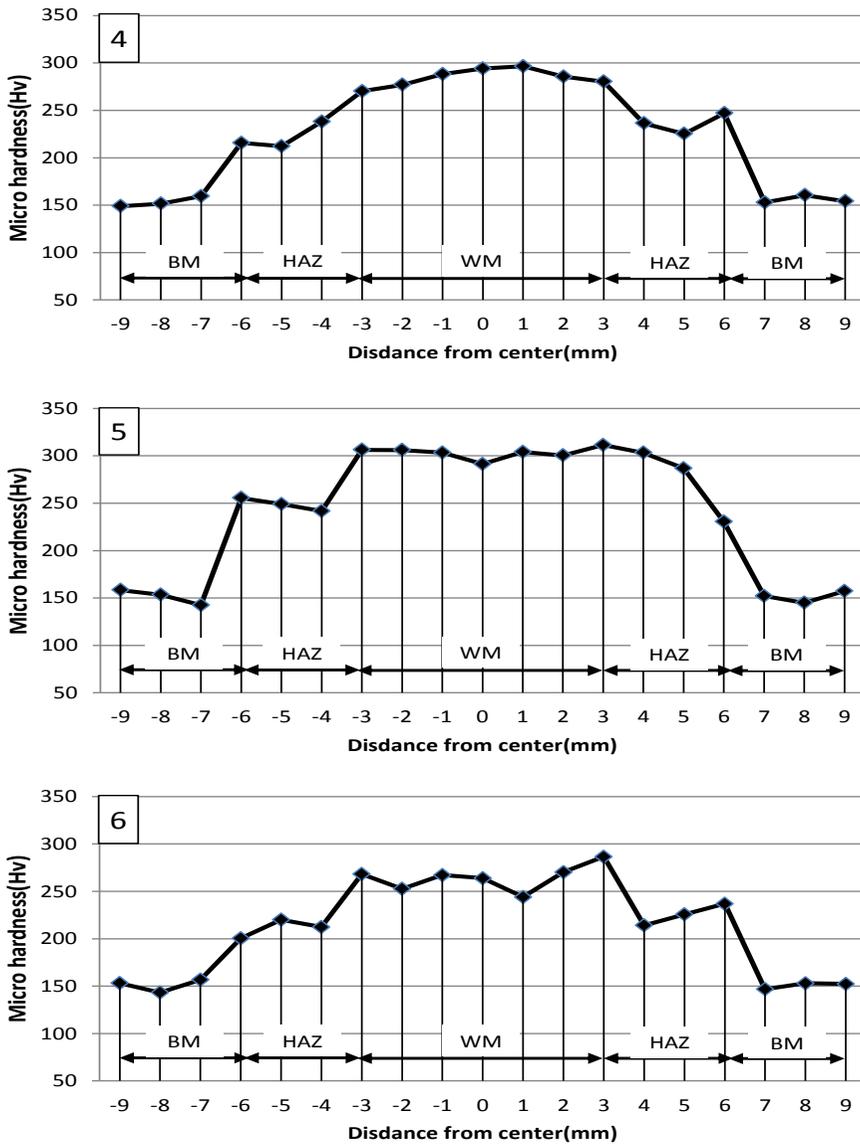


Fig. 28 Hardness distribution of specimens welded at Peak Current 170A
 (4) Welding Speed 100 cm/min, (5) Welding Speed 120 cm/min,
 (6) Welding Speed 140 cm/min

4.5 미세조직 특성

4.5.1 마크로 평가

고속 GTAW 공정조건에 따른 용접부의 시험편에 대한 마크로 단면을 관찰하였다. Fig. 29 은 모든 시험편에서 Crack, 기공, 슬래그 혼입, 용입 불량 과 용융 불량 같은 결함은 발견 되지 않았으며. 시험편 전체적으로 미려한 Back bead 형성과 Cap bead 를 관찰 할 수 있었다. (비파괴 검사를 실시하여 결함이 검출되었던 3 번 과 6 번 시험재에 대하여 결함이 없는 구간으로 가공하여 실험 하였다.) 또한 열 영향부(Heat Affected Zone)의 폭은 소폭으로 감소 하고 있으며, 같은 Peak current 가 주어졌을 때 용접 속도가 증가함에 냉각 속도가 증가하여 열 영향부의 폭이 소폭으로 감소 된 것으로 판단 된다.,

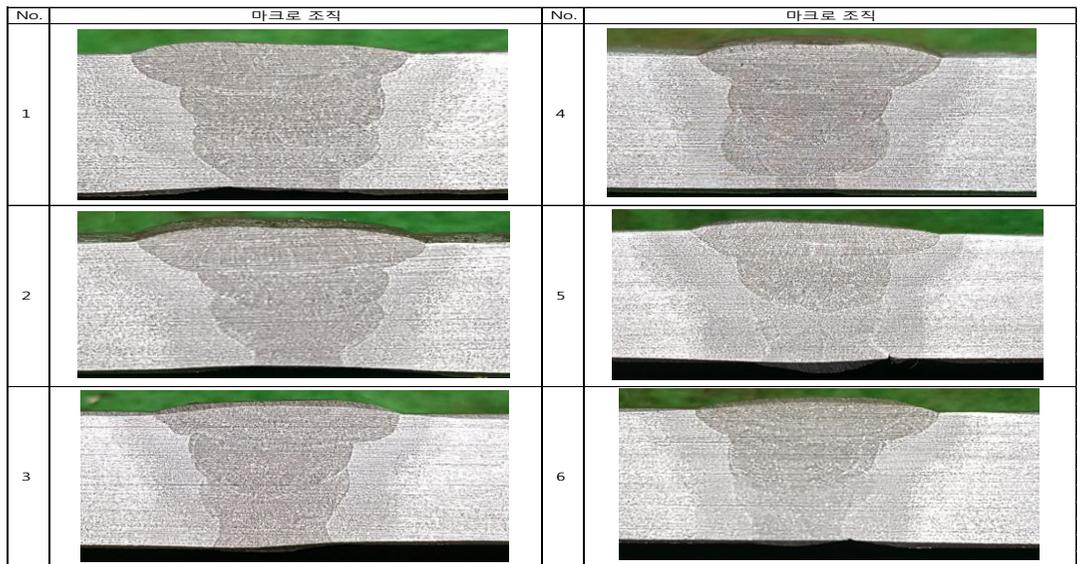


Fig. 29 Macrostructures of specimens(X 5)

4.5.2 용접부 미세조직 평가

고속 GTAW 공정조건에 따른 시험편에 대하여 Peak current 와 Welding speed rate 변화에 따른 미세 조직을 관찰하였고 용접부 미세조직 결정립 분포양상을 Fig. 30, 31, 32, 33 에 나타내었다. 초기모재(Fig. 30(1))는 일반적인 탄소강의 아공석강에서 나타나는 페라이트 결정립들과 펄라이트 결정립들이 등축정 형태로 각각 3 ~ 54 μm 와 2 ~ 45 μm 정도로 분포를 나타내었다. Peak current 160A 와 Welding speed rate 90 cm/min 인 1 번 조건은 Fig. 30(2)에 나타난 바와 같이, 용접열에 의해 용융 된 금속은 응고 과정 중 조성적 과냉으로 인해 미세화 된 페라이트 결정과 펄라이트 결정들로 구성되어 있었다. 용접부 미세조직 중 베이나이트나 마르텐 사이트 조직이 관찰되지 않아, 냉각속도 증가로 인하여 상변태가 발생 되지 않은 것으로 확인되며 이는 실험에 사용 된 모재 와 용접봉의 탄소 함량이 0.22 wt% 미만의 화학적 조성을 가지므로 오스테나이트 조직이 급냉이 되는 과정에서 마르텐사이트 조직으로 변태가 되지 않았으며, 과냉각이 되는 경우 핵 생성 속도가 성장속도보다 빠르므로 초기 모재의 미세 조직보다 Grain size 가 미세화 되었다고 판단된다. 입도 분포는 약 4~36 μm 정도로 분포하고 있으며, 모재와 비교 했을 때 Grain size 가 미세화 되어 있음을 알 수 있다. Welding speed rate 110 cm/min 인 2 번 조건은 Fig. 30(3)에 나타난 바와 같이 1 번 조건과 유사한 상분포를 보였고, 초기 모재와 1 번 조건의 조직 보다 미세화 되었음을 알 수 있으며, 입도 분포는 약 4~25 μm 정도로 분포하고 있다.

Peak current 170A 와 Welding speed rate 100 cm/min 인 4 번 조건은 Fig. 32(5)에 나타난 바와 같이, 용접열에 의해 용융 된 금속은 응고 과정 중 조성적 과냉으로 인해 미세화 된 페라이트 결정과 펄라이트 결정들로 구성되어 있었다. 용접부 미세조직 중 베이나이트나 마르텐 사이트 조직이 관찰되지 않아, 냉각 속도 증가로 인하여 상변태가 발생 되지 않은 것으로 확인 되며, 용접 속도 증가로 인한 냉각속도 증가의 영향으로 핵 생성 속도가 성장속도보다 빠르므로 초기 모재의 미세 조직보다 Grain size 가 미세화 되었다고 판단된다. 입도 분포는 약 3~30 μm 정도로 분포하고 있으며, 모재와 비교 했을 때 Grain size 가 미세화 되어 있음을 알 수 있다. Welding speed rate 110 cm/min 인 2 번 조건은 Fig. 32(6)에 나타난 바와 같이 4 번 조건과 유사한 상분포를 보였고, 초기 모재와 4 번 조건의 조직 보다 미세화 되었음을 알 수 있으며, 입도 분포는 약 4~18 μm 정도로 분포하고 있으며 초기 모재에 비해 약 30%로 정도 입자 미세화가 진행 되었다.

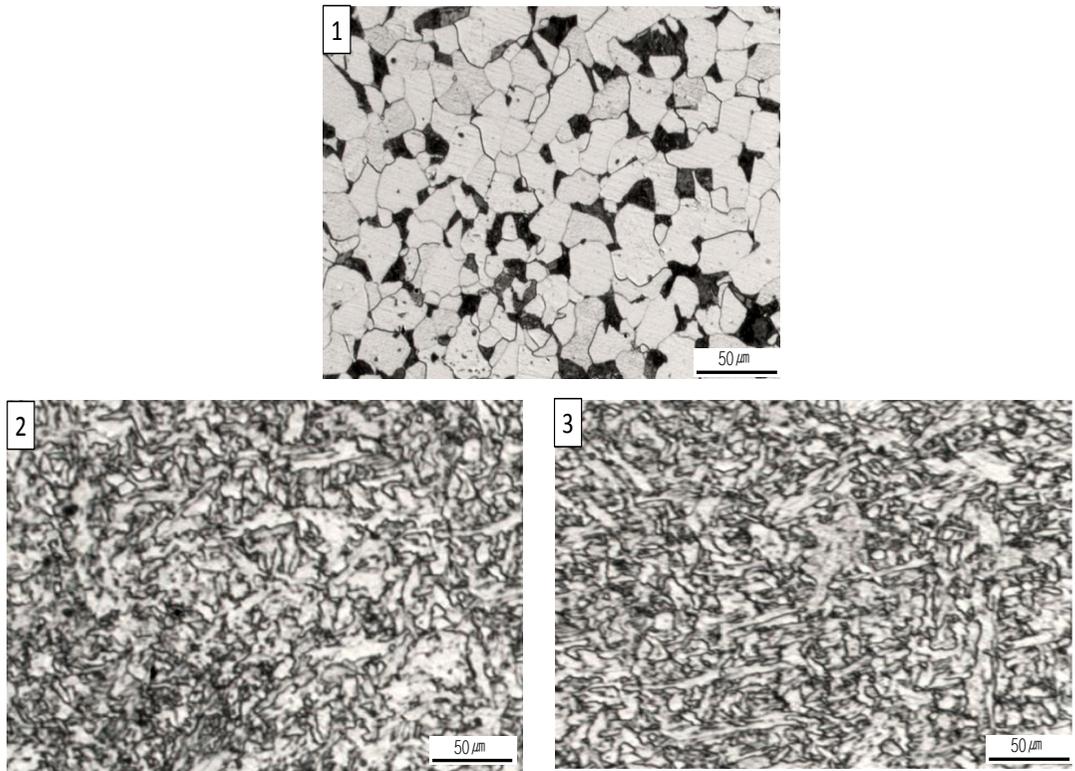


Fig. 30 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 160A (X 200)
(1) Base Material, (2) Welding Speed 90 cm/min, (3) Welding Speed 110 cm/min

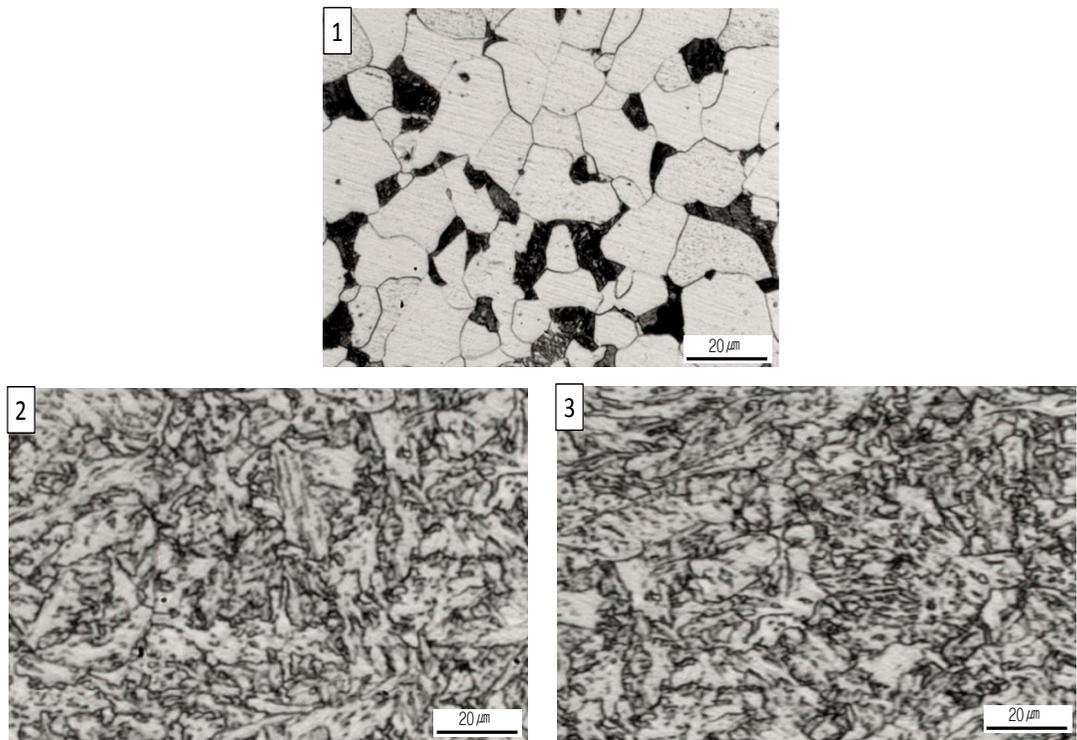


Fig. 31 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 160A (X 500)
(1) Base Material, (2) Welding Speed 90 cm/min, (3) Welding Speed 110 cm/min

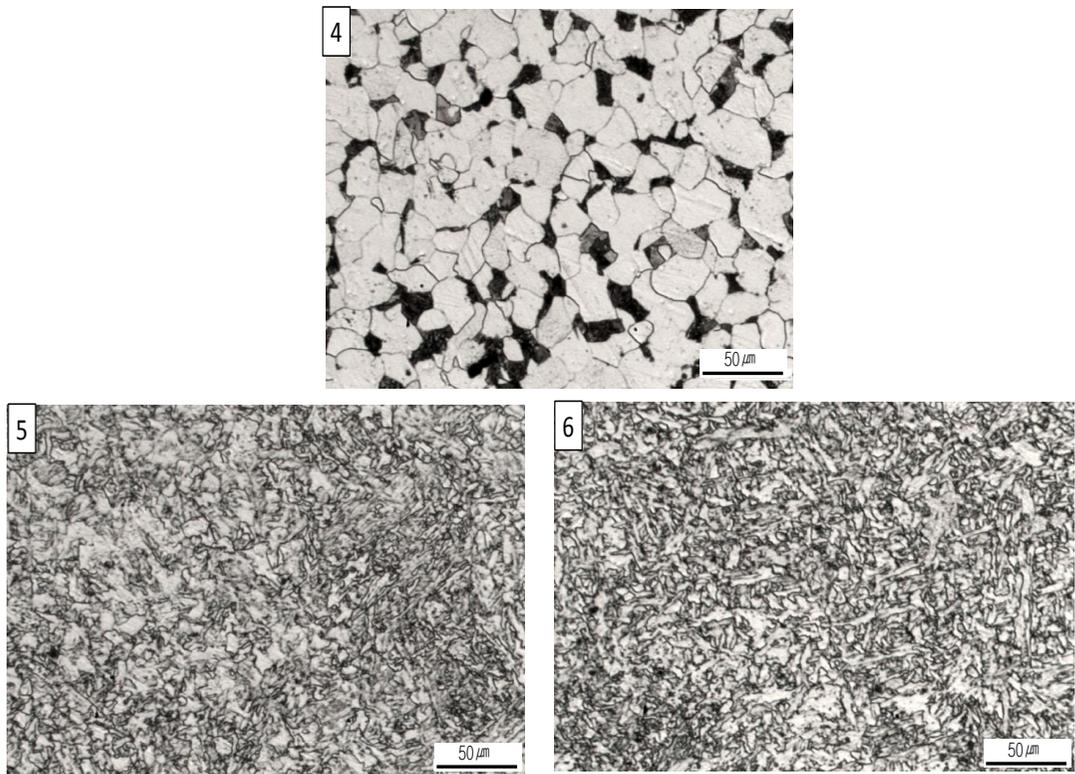


Fig. 32 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 170A (X 200)
(4) Base Material, (5) Welding Speed 100 cm/min, (6) Welding Speed 120 cm/min

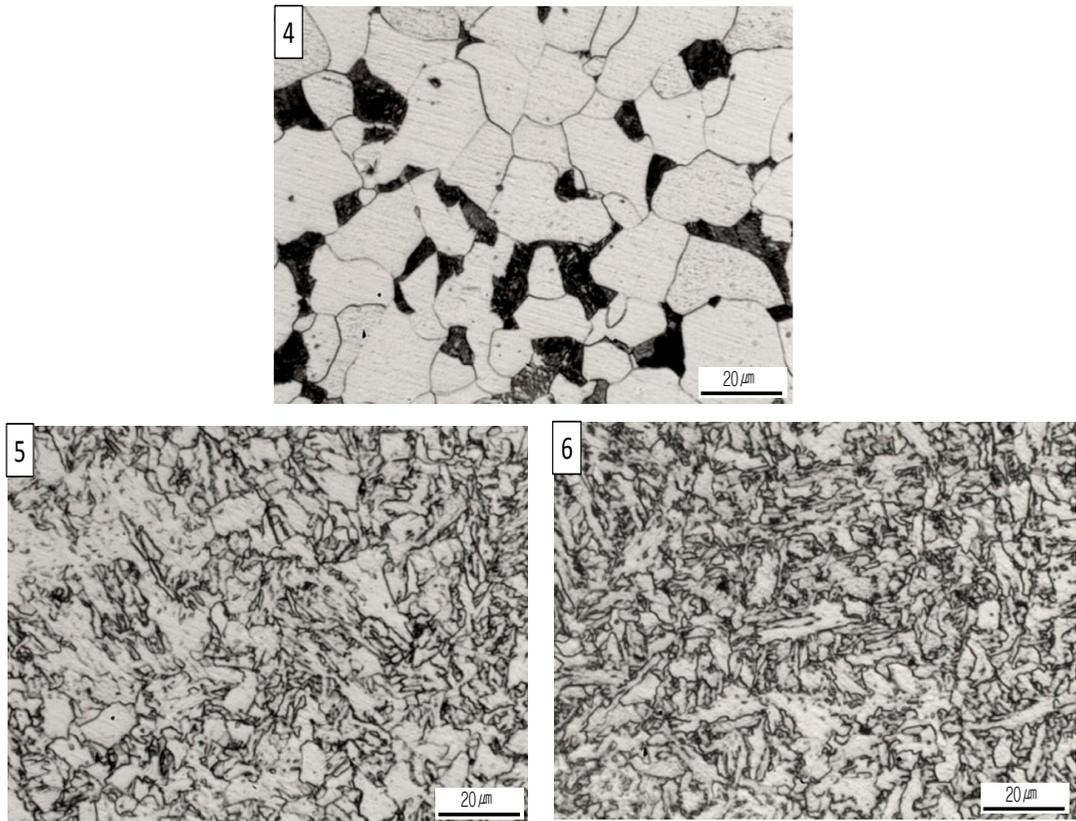


Fig. 33 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 170A (X 500)
(4) Base Material, (5) Welding Speed 100 cm/min, (6) Welding Speed 120 cm/min

4.5.3 열 영향부 미세조직 평가

고속 GTAW 공정조건에 따른 시험편에 대하여 Peak current 와 Welding speed rate 변화에 따른 미세 조직을 관찰하였고, 열 영향부 미세조직 결정립 분포양상을 Fig. 34, 35, 36, 37 에 나타내었다. Peak current 160A 와 Welding speed rate 90 cm/min 인 1 번 조건은 Fig. 34(2)에 나타난 바와 같이, 열 영향부는 용접 공정으로 인한 간접적인 열로 인하여 A_{c3} 변태점 이상까지 상승 후 냉각 시 과냉으로 인한 미세 조직이 초기 모재 보다 세립화 되었다. 과 냉각이 되는 경우 핵 생성 속도가 성장속도보다 빠르므로 초기 모재의 미세 조직보다 Grain size 가 미세화 되었다고 판단된다. 입도 분포는 약 3 ~20 μm 정도로 분포하고 있으며, 모재와 비교 했을 때 Grain size 가 미세화 되어 있음을 알 수 있다. Welding speed rate 110 cm/min 인 2 번 조건은 Fig. 34(3)에 나타난 바와 같이 1 번 조건과 유사한 상분포를 보였고, 초기 모재와 1 번 조건의 조직 보다 미세화 되었음을 알 수 있으며, 입도 분포는 약 4~18 μm 정도로 분포하고 있다.

Peak current 170A 와 Welding speed rate 100 cm/min 인 4 번 조건은 Fig. 36(2)에 나타난 바와 같이, 열 영향부는 용접 열로 인한 간접적인 영향으로 A_{c3} 변태점 이상까지 상승 후 냉각 시 과냉으로 인한 미세 조직이 초기 모재 보다 세립화 되었다. 과 냉각이 되는 경우 핵 생성 속도가 성장속도보다 빠르므로 초기 모재의 미세 조직보다 Grain size 가 미세화 되었다고 판단된다. 입도 분포는 약 3 ~17 μm 정도로 분포하고 있으며, 모재와 비교 했을 때 미세 조직이 미세화 되었음을 알 수 있다. Welding speed rate 120 cm/min 인 5 번 조건은 Fig. 36(3)에 나타난 바와 같이 4 번 조건과 유사한 상분포를 보였고, 초기 모재와 1 번 조건의 조직에 비교 하여 가장 많은 세립 된 조직을 갖춤을 알 수 있으며, 입도 분포는 약 2~13 μm 정도로 분포하고 있다

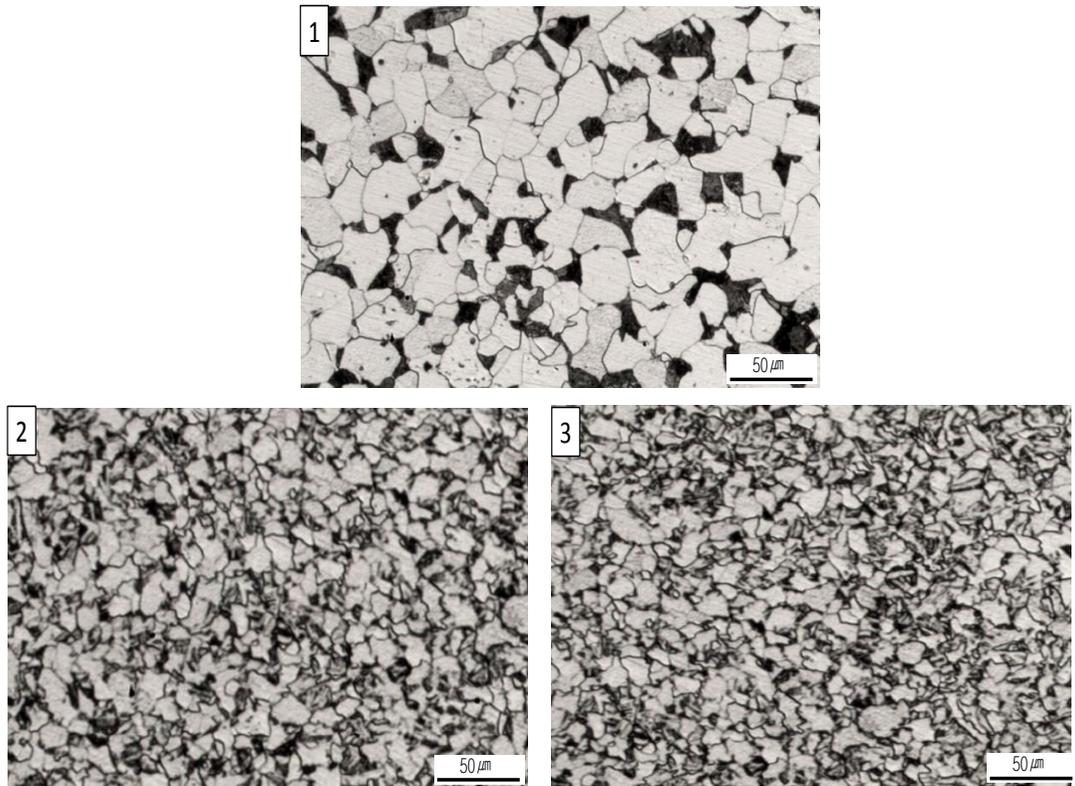


Fig. 34 Microstructure for HAZ of specimens welded at Peak Current 160A (X 200)
(1) Base Material, (2) Welding Speed 90 cm/min, (3) Welding Speed 110 cm/min

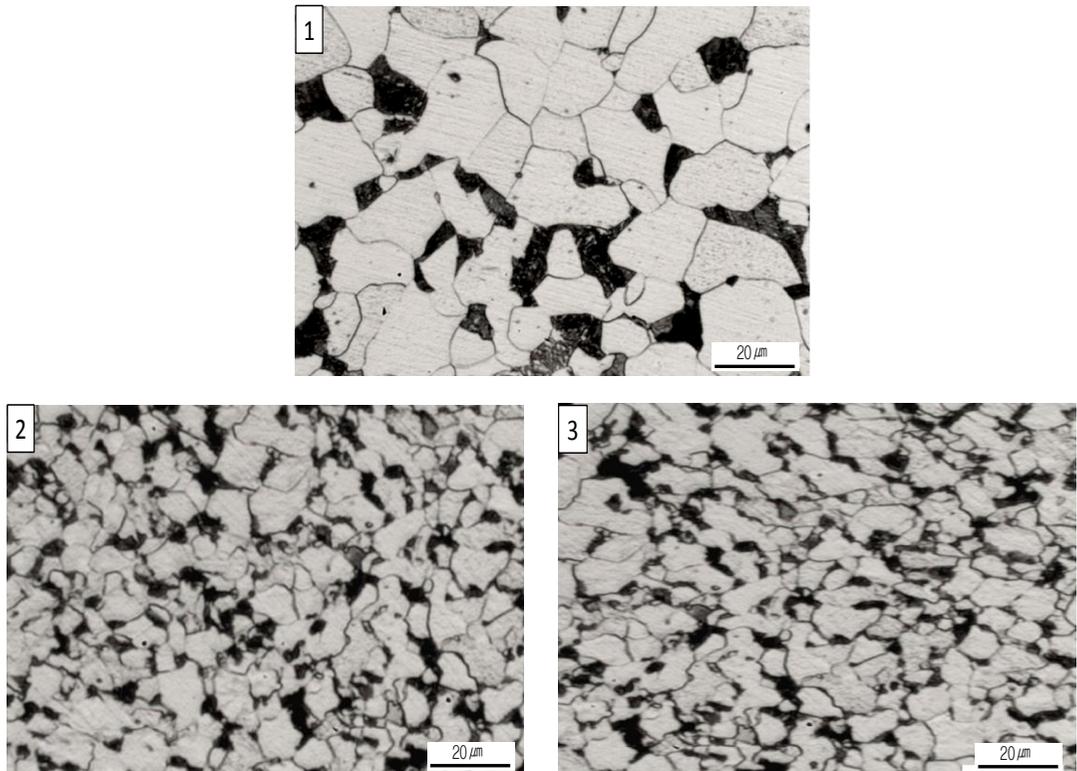


Fig. 35 Microstructure for HAZ of specimens welded at Peak Current 160A (X 500)
(1) Base Material, (2) Welding Speed 90 cm/min, (3) Welding Speed 110 cm/min

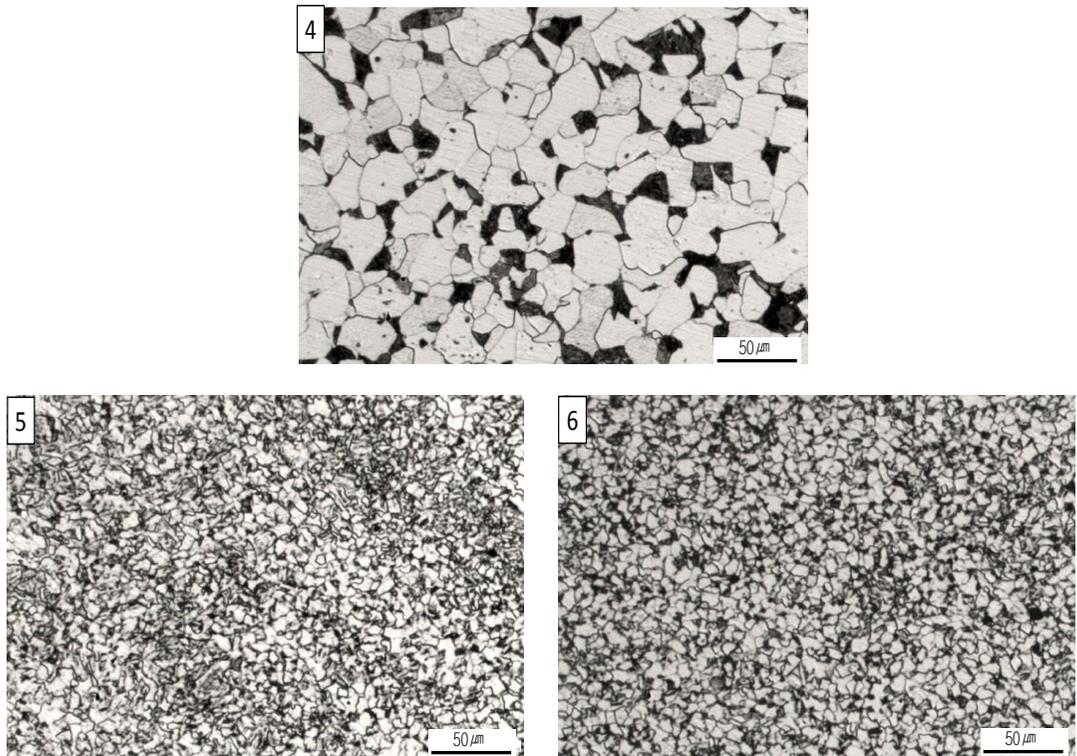


Fig. 36 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 170A (X 200)
(4) Base Material, (5) Welding Speed 100 cm/min, (6) Welding Speed 120 cm/min

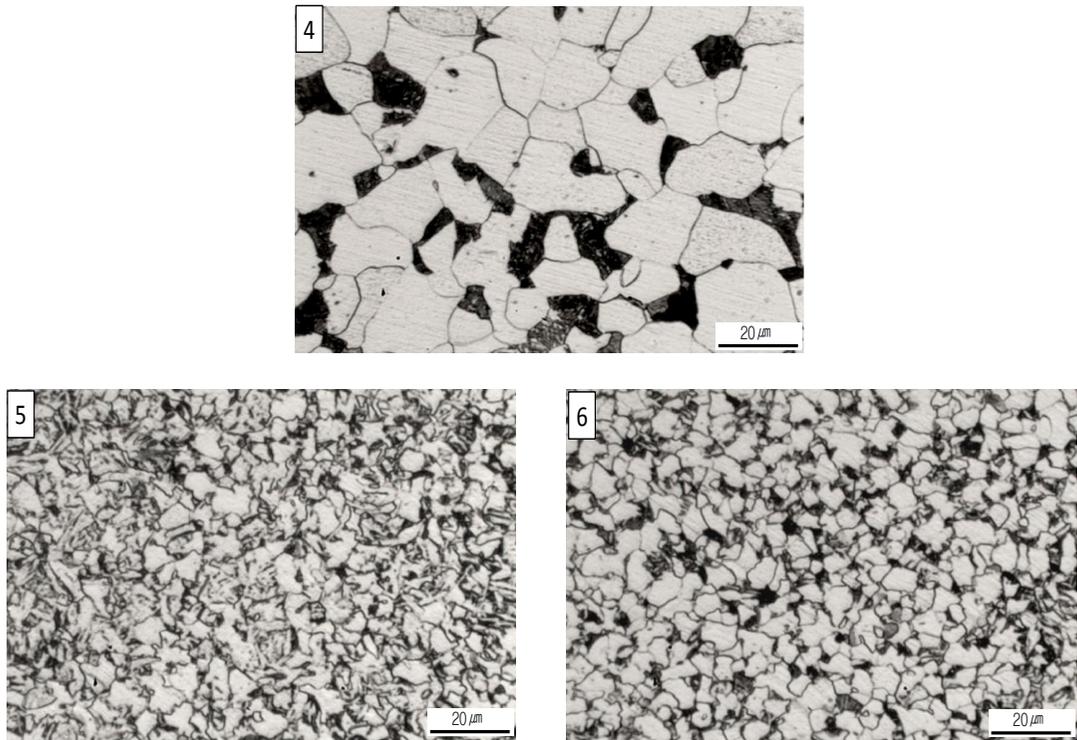


Fig. 37 Microstructure for weldment of specimens welded at Peak Current 170A (X 200)
(4) Base Material, (5) Welding Speed 100 cm/min, (6) Welding Speed 120 cm/min

제 5 장 결론

고속 GTAW 공정 변수에 따른 Tube butt joints(SA209M Gr. T1a 합금)에 대하여 외관, 비파괴 검사, 기계적 성질 과 미세조직에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Tube butt joint 에 고속 GTAW 공정을 도입 함으로써 Manual GTAW 공정 시 현저히 발생하는 용접 열에 의한 열 변형 없이 수행 되었고 용접 진행 시간이 Manual GTAW 대비 약 8 배 빠르게 완료 되므로 제작 공정 단축에 따른 생산 원가 절감을 할 수 있으나, 용접속도 증가 시 용착 불량 결함지시가 검출 되므로, 공정 변수(전류)를 조절 함으로써 비파괴 검사(방사선 투과 검사, RT)에서 결함이 없이 용접이 진행 할 수 있음을 확인 하였다.
2. 동일한 전류의 용접 조건에서 용접속도에 따라 용접 열에 용융 된 금속이 응고하는 냉각속도에 영향을 주어 핵 생성 속도 와 성장 속도에 영향을 줄 수 있으며, 이는 결정립 미세화를 초래 할 수 있었으며, 용접속도가 증가 함으로써 핵 생성 속도가 성장 속도 보다 증가하여 미세한 금속조직 형성 촉진을 초래할 수 있음을 알 수 있었다.
3. 결정립 미세화는 Hall-Petch 이론에 의한 기계적 물성 향상 직접적인 영향을 주어 인장강도와 경도는 모재 대비 약 30% 와 80% 증가하였다. 따라서 고속 GTAW 의 도입은 용접부 와 열 영향부에 결정립 미세화를 촉진시켜 기계적 물성의 향상에 큰 기여를 하였다.
4. 용접부와 열 영향부에 대한 결정립 미세화는 용접 전류와 용접 속도가 증가함에 따라 촉진 되었는데, 초기 모재의 입도 분포가 3~ 54 μm 에서 2~13 μm 까지 미세화까지 미세화 되었다.

참고문헌

- [1] 김철희 : The study on welding characteristics of Solid wire and FCAW with CO₂ Welding, 조선대학교 대학원 기술·가정 교육학과, 2011
- [2] 이진희 : 재료와 용접, 2014
- [3] R. T. C Choo, J. Szekely and R. C. Wedthoff: “Modeling of High-current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, Welding”, Welding Journal, AWS, 1990
- [4] J. F. Lancaster: “The Physics of Welding”, England, 1984
- [5] 용접·접합 편람 III 공정 및 열가공
- [6] Gene Mathers: Power source characteristics, Job Knowledge 121, TWI
- [7] 박정현 : A study on Process Development of high speed & high current Super_TIG welding, 부경대학교 대학원 신소재 시스템 공학과, 2015
- [8] 김영섭 : The effect of C type strip feeding direction on the deposition rate & penetration in Super_TIG welding, 부경대학교 대학원 신소재 시스템 공학과, 2015
- [9] ASME Section I – RULES FOR CONSTRUCTION OF POWER BOILERS, 2017