



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](#)

August 2016

Master's Thesis

Weldability Evaluation of Root Pass Welding Using The RMD-GMAW

Graduate School of Chosun University

Department of Welding and Joining Science
Engineering

Kwang-Rok Kim

Weldability Evaluation of Root Pass Welding Using The RMD-GMAW

RMD방식 GMAW를 이용한 초층용접의 용접성 평가

August 25, 2016

Graduate School of Chosun University

Department of Welding and Joining Science
Engineering

Kwang-Rok Kim

Weldability Evaluation of Root Pass Welding Using The RMD-GMAW

Advisor : Professor Sung-Min Joo

A Thesis submitted for the degree of
Master of Engineering

April 2016

Graduate School of Chosun University

Department of Welding and Joining Science
Engineering

Kwang-Rok Kim

Kwang-Rok Kim's
Master Thesis is certified.

Committee Chair Chosun Univ. Prof. Han-seo Bang

Member Chosun Univ. Prof. Hee-seon Bang

Member Chosun Univ. Prof. Sung-min Joo

May 2016

Graduate School of Chosun University

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	V
Abstract	VI
1장. 서론	1
1 . 1 연구배경	1
1 . 2 연구목적	4
1 . 3 초층용접의 이해	5
1 . 4 연구방법	8
2장. 이론적 고찰	10
2 . 1 GTAW(TIG)의 원리 및 특성	10
2.1.1 GTAW(TIG)의 원리	10
2.1.2 GTAW(TIG)의 특성	11
2 . 2 GMAW(MIG)의 원리 및 특성	13
2.2.1 GMAW(MIG)의 원리	13
2.2.2 GMAW(MIG)에서 용착금속의 이행방식	16
2.2.3 GMAW(MIG)의 특성	18
2 . 3 RMD-GMA 용접의 원리 및 특성	19
2.3.1 RMD-GMA 용접의 원리	19
2.3.2 RMD-GMA 용접의 특성	28

3장. GTAW 및 RMD-GMAW를 이용한 초층용접의 실험 ..	30
3 . 1 실험 세부사항	30
3.1.1 실험 재료 및 장비	30
3.1.2 실험 방법 및 용접 조건	39
3.1.3 용접 조건	42
4장. 용접부의 기계적 및 금속학적 특성 평가	44
4 . 1 용접 이음부의 성능평가 및 미세조직 특성	44
4.1.1 경도	44
4.1.2 인장 강도	46
4 . 2 결과 및 고찰	48
4.2.1 비드 특성	48
4.2.2 경도 분포 특성	51
4.2.3 미세조직	52
4.2.4 인장 강도 특성	54
5장. 결 론	56
참고문헌	62

List of Figures

Fig 1.1	The problems of GTAW welding process in the field	3
Fig 1.2	Flow chart of thesis	9
Fig 2.1	Schematic illustration of GTAW (1)	10
Fig 2.2	Schematic illustration of GTAW (2)	11
Fig 2.3	Schematic illustration of GMAW (1)	13
Fig 2.4	Schematic illustration of GMAW (2)	14
Fig 2.5	Forces involved in the droplet detachment process	16
Fig 2.6	Basic metal transfer modes in GMAW	17
Fig 2.7	Basic metal transfer modes in RMD-GMAW	19
Fig 2.8	Mechanical of Short Circuiting Transfer	20
Fig 2.9	Mechanical of Spray Transfer	20
Fig 2.10	Short Circuit Transfer Waveform	21
Fig 2.11	RMD-GMAW Ball Transfer Waveform	22
Fig 2.12	Taking Control Waveform of Short Circuit Transfer	23
Fig 2.13	RMD-GMAW Waveform	23
Fig 2.14	RMD Ball Transfer	24
Fig 2.15	Short Circuit Transfer	24
Fig 2.16	Example of obtained electrical signals	25
Fig 2.17	Related equation of R_{neck} and P_{neck} during short circuit	26
Fig 2.18	Comparison of power density in necking region between standard GMAW and RMD-GMAW process	27
Fig 3.1	Configuration of welded specimen	31
Fig 3.2	Dimensions of welded specimen and configuration of SS400 Pipe	32
Fig 3.3	Tack welding of SS400 Pipe	32
Fig 3.4	Grind to feather edge for Root Pass welding	33

Fig 3.5	Jig for Root Pass welding	33
Fig 3.6	Pipe rotating & Torch angle	34
Fig 3.7	Welding system of GTAW(TIG)	37
Fig 3.8	Welding system of RMD-GMAW(RMD-MIG)	38
Fig 3.9	Tack welding & 3.2mm Gap	39
Fig 3.10	Backing film for back bead of TIG welding	39
Fig 3.11	Dimension of test specimen	41
Fig 3.12	Configuration of test specimen	41
Fig 4.1	Vickers hardness test scheme and equipment	45
Fig 4.2	Tensile test equipment	46
Fig 4.3	Dimension of tensile test specimen(3mm)	47
Fig 4.4	Cross section of RMD-GMAW & GTAW test specimen	50
Fig 4.5	Cross section of RMD-GMAW test specimen	50
Fig 4.6	Comparative of GTAW and RMD-GMAW Hardness graph	51
Fig 4.7	Micro structures in RMD-GMAW	52
Fig 4.8	Micro structures in GTAW	53
Fig 4.9	Stress-Strain Curve of SS400(3t) TIG and RMD welds	54
Fig 4.10	Fractured specimen of GTAW after SS400 tensile test	55
Fig 4.11	Fractured specimen of RMD after SS400 tensile test	55
Fig 5.1	Configuration of SS400 Pipe	58
Fig 5.2	Configuration of RMD-GMAW process	59
Fig 5.3	Appearance of Top bead & Back bead in RMD-GMAW	59
Fig 5.4	Comparative of Root Pass welding on SMAW, GTAW, RMD-GMAW	60
Fig 5.5	Comparative of bead on Root Pass welding	60

List of Table

Table 3.1	Chemical Composition & Mechanical Property of SS400	· 31
Table 3.2	Dimensions of welded specimen	· 31
Table 3.3	Dimensions of welded specimen of SS400 Pipe	· 34
Table 3.4	Chemical Composition & Mechanical Property of ST50G	· 35
Table 3.5	Chemical Composition & Mechanical Property of SM70	· 36
Table 3.6	Welding parameters of GTAW(3mm)	· 43
Table 3.7	Welding parameters of RMD-GMAW(3mm)	· 43
Table 4.1	Hardness testing condition	· 45
Table 4.2	Configuration of tensile test specimen	· 47
Table 4.3	Bead profiles of GTAW (37.5° bevel & 3.2mm gap size)	· 49
Table 4.4	Bead profiles of RMD-GMAW (37.5° bevel & 3.2mm gap size)	· 49
Table 5.1	Welding Parameters of RMD-GMAW Process(SS400 Pipe)	· 58

ABSTRACT

Weldability Evaluation Of Root Pass Welding Using The RMD-GMAW

Kwang-Rok Kim

Advisor : Prof. Joo, Sung-Min

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

Welding is root industry and a key technology for the production. Also it is widely used in aircraft, ships, cars and various industries. But the welding work is difficult, dirty, dangerous. Because the smoke, noise, strong light and heat generated during welding make workers difficult. Nevertheless, the welding work is necessary at the manufacturing process of modern industry. Continuous research and development are required. Study on welding is being advanced in the direction for making high quality of the joint. High quality is associated with weld bead. So many engineers are doing research to improve the weld quality.

Welding is largely classified as SMAW, GTAW, GMAW, Laser welding and SAW etc. Among them, the share of GTA welding is only 20% in the current industry. However, its significance is fairly high compared to other welding processes.

Recently, many welding processes are being automated. GTAW is not easy to make automation equipment system. Because current

automation technology doesn't accurate than manual welding.

In recently the trend of increasing Off-Shore plant and Shale Gas industry, Use of the welded pipe is increased. At this industrial sector, the welding process applied to the Root Pass welding is a GTA welding. Advantages of GTAW are high quality beads and the excellent mechanical properties of welded joints. This doesn't require post weld treatment. However, the biggest disadvantage of the GTA welding is that it requires a skilled welder operation. This rises labor costs and has low productivity.

Proficient technicians are necessary in GTA welding during Root Pass. It increases labor costs. In this paper, Instead of the high cost and low productivity in GTA, RMD-GMA welding process of the Miller company was applied. The research was conducted to study the mechanical properties about tensile, hardness, defects of the weld bead. If there is no difference in the mechanical properties compared with the GTAW, the study was conducted to improve productivity by replacing the GTAW with the RMD-GMAW.

In this study, we compared GTAW with GMAW in the same working environment that is the same specimen (Carbon Steel SS400 3t). Welding conditions(Parameter) for carbon steel SS400 was received from Miller company. Each specimen was welded by applying the optimal conditions to weld the carbon steel SS400.

When applying Root Pass Welding, Miller company RMD-GMAW Process increases productivity by about three times higher than Root Pass Welding of GTA welding. Bead and the back bead of Miller company RMD-GMAW shows a graceful appearance significantly.

In addition, the tensile strength shows almost the same level. The beads formed back bead and the good shape.

Therefore if replace the GTAW with RMD-GMAW, production cost will be reduced by half and productivity will be improved by more than three times.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현대 산업의 근간인 뿌리산업에는 6가지 분야가 있다. 주조, 금형, 소성가공, 표면처리, 열처리, 용접이 바로 6대 뿌리산업으로 분류된다. 이 중 용접은 거의 모든 산업에 녹아 있다. 포괄적인 의미의 용접으로 보았을 때, 산업의 95% 이상에 용접이 적용되고 있다고 해도 과언이 아닐 것이다.

뿌리산업 중 용접은 현대 산업 공정의 핵심적인 기술로서 제품의 생산에 있어서 가장 기본적이고 필수적인 조립공정 중 하나이다. 또한, 항공기, 조선, 자동차 및 다양한 산업 분야에 폭 넓게 이용되고 있는 근대 산업에 있어서 필수적인 생산 기술이다. 하지만 용접은 강한 아크 빛과 아크 열, 용접 시 발생하는 연기, 소음 등으로 인한 열악한 작업환경 요인 때문에 작업이 기피되고 있으며, 3D업종으로 인식이 되어 있는 것이 현 실정이다. 그럼에도 불구하고 현대 산업의 제조 공정에 있어 용접은 필수불가결한 작업으로서, 용접 현장에서는 제품의 완성도 측면에서 용접 접합부의 품질이 균일하게 유지 및 생산되는 것이 요구되고 있으며, 이는 용접 비드의 형상과 밀접한 관계가 있으므로 이에 대한 개선방안을 모색하는 연구가 끊임없이 지속적으로 연구되고 있다.

특히 다층용접에 있어서의 접합부는 초층용접(Root Pass Welding)에 의한 이면 비드의 형상이 상당히 중요하다. 그리고 용접 비드의 형상변수 즉, 비드 폭(Bead Width), 용입 깊이(Penetration), 비드 높이(Bead height) 이러한 용접비드의 형상변수는 용접공정 변수 즉, 용접전류(Welding Current), 용접전압(Welding Voltage), 용접속도(Welding Speed), 보호가스(Shielding Gas) 등과 같은 용접공정 변수(Welding Process Parameter)에 의해 결정된다. 따라서 양호한 용접 품질의 용접비드 형상을 얻기 위해서는 용접 작업 공정에 따른 적절한 용접공정 변수

를 설정하는 것이 용접 작업을 실시하기 전에 절대적으로 필요하다.

용접은 크게 SMAW, GTAW, GMAW, SAW, Laser 용접 등으로 분류되며, 그중 GTA 용접이 차지하는 비중은 현재 산업에서 20% 정도에 불과하다. 그러나 제품의 품질 및 완성도 측면에서 GTA 용접의 중요성은 다른 용접 공정에 비해 상당히 높은 편이다.

특히 최근에는 원유정유정제 시설, 발전설비 현장, 공기 조화 및 수력Pipe 설비 현장, Off-Shore 산업, 해상구조물 제작, 배관(Pipe)용접 등에 GTA 용접 공정이 많이 적용되고 있다. 특히 Pipe 용접에서 초층용접은 GTAW 만을 적용하고 있는데 이는 수려한 비드 외관과 후처리 작업이 필요 없으며, 용접 이음부의 기계적 특성이 우수한 이유에서 GTA 용접만을 적용하고 있다. 제 2장에서 GTA와 GMA 용접을 간략하게 설명하겠지만, GTA 용접의 가장 큰 단점은 숙련된 용접사가 작업을 하여야 하고 이는 곧 인건비 상승의 요인이 된다. 또한 생산 제품의 품질 문제, 즉 품질의 향상을 위해 GTA 용접을 적용할 수밖에 없는 것도 문제며, 무엇보다 생산성에 있어 효율이 많이 떨어지는 것이 가장 문제가 되고 있는 것이 사실이다. Fig. 1.1에서 GTAW를 적용한 용접 공정의 문제점에 대해 간략하게 나타내었다.

생산성 및 비용 문제만을 놓고 보더라도 GTA 용접 공정이 상당히 비효율적이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 초층용접 시 GTA 용접을 대체할 수 있는 GMA 용접에 관한 연구를 하려고 한다. 모든 재료는 동일한 조건에서 진행하였으며, 공정변수는 GTA 용접과 RMD-GMA 용접 시 최적의 용접 조건을 적용(기존 실험 결과 참조)하였으며, 동일한 사양의 재료 조건에서 GTAW를 이용한 초층용접과 RMD-GMAW를 이용한 초층용접 시, RMD-GMA 용접공정이 GTA 용접공정을 대체 할 수 있는 가능성에 대해 알아보려고 한다.

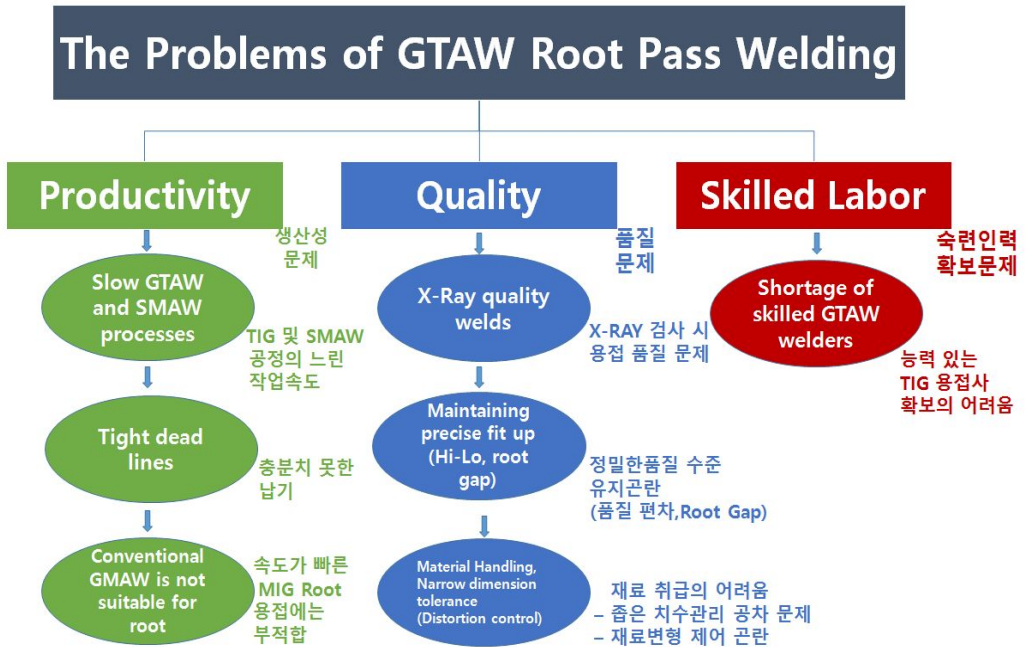


Fig. 1.1 The problems of GTAW process in the field

1.2 연구목적

해상구조물, Pipe 등 초충용접을 적용하여만 하는 용접공정에서 고비용, 저생산성의 GTA 용접을 대체하여, Miller社의 RMD-GMA 용접 process를 적용함으로써, 초충용접의 생산성 향상과 비용 절감 목적을 위한 연구이다. 기존 GTA 용접으로 초충용접 시 기량이 풍부한 용접사가 필요하였으며, 이는 곧 인건비의 증가를 가져온다. 또한 생산성에 있어 기존 GTA 용접 대비 RMD-GMA 용접 방식을 적용함으로써 가져 올 수 있는 생산성의 향상에 관해 연구하고자 한다.

기존 많은 현장에서 작업 중인 초충용접에서 GTA 용접을 대신해 RMD-GMA 용접 공정을 적용하였을 때, 용접 이음부에서의 기계적 성질인 인장, 경도와 용접비드 및 제품의 결함 등에 있어서 문제가 없다면, RMD-GMAW를 적용하였을 때 비용절감 및 생산성의 증가가 가져올 경제적 이익은 너무나도 큰 장점일 것이다.

1.3 초층용접의 이해

최근까지 전 세계 주요 에너지원으로 활용되고 있는 LNG(Liquefied Natural Gas) 시추를 위한 해상 구조물(Off Shore 산업)과 그 해상 구조물의 골격을 이루고 있는 대형 Pipe 등의 용접 구조물의 수요가 급격히 증가하고 있다. 또한 이러한 LNG의 전 세계 매장량에 한계가 있으며 향후 대체 에너지로 전 세계가 주목하고 있는 것이 바로 셰일 가스(Shale gas)이다. 셰일 가스는 바다 속 진흙이 수평으로 퇴적하여 굳어진 암석층(혈암, shale)에 함유된 천연가스를 말한다. 현재 셰일 가스의 매장량은 전 세계에 고루 분포가 되어 있으며, 매장량 역시 향후 30년은 세계가 사용할 수 있을 만큼의 충분한 매장량을 보유하고 있다는 지질학계의 보고가 있다.

LNG 및 Shale Gas의 개발을 위해서는 시추를 위한 장비 및 구조물이 필요하며, 이와 같은 구조물 제작에 필연적으로 들어가는 작업이 바로 용접이다. 초층용접은 용접 공정 중에서 가장 먼저 선행되어야만 하는 용접 공정이다. 또한 이러한 구조물을 제작하기 위해서는 정밀성과 생산성이 동반되어야하는 초층용접이 상당히 중요한 역할을 한다.

초층용접(Root Pass)이란 한 번 또는 그 이상의 층(Pass)으로 형성된 용착금속의 최초 층(Pass)의 용접을 지칭한다.

GMA 용접은 용입이 깊으며 용접 속도가 매우 빠르고, 아크의 집중성 및 용착 효율이 우수하고, 슬래그의 발생량이 적어 슬래그를 제거하는 시간이 다소 적게 소요되며, 용접 비용이 싸고 안정적이며, 기계적 성질이 뛰어나기 때문에 GTA 용접과 더불어 초층용접에서 조금씩 사용되어지고 있다. 그러나 GTA 용접과 비교시 기존 GMA 용접은 스파터가 많이 발생하고, 비드 형상이 고르지 못한 점 등, GTA 용접을 대체하여 작업 공정에 적용하기에는 많이 부족하였다.

이에 반해, GTA 용접은 고품질의 Back Bead(이면비드)가 얻어지며 용접인자의

제어가 쉽다는 장점이 있어 초충용접에서 많이 사용되지만, Wire(소모성 전극)를 사용하는 GMA 용접에 비해 용접 속도가 상당히 느려 생산성이 떨어진다는 단점이 있다. 또한 숙련된 용접사의 기량이 필요하기에 인건비가 고가라는 것이 가장 큰 흠이다. 이는 곧 비용과 직결되는 문제이다. 따라서 안정적이고 고품질의 Back Bead를 가지면서 생산성이 높은 GMAW 방식의 초충용접 방법의 개발이 요구되어지고 있는 것이 현실이다.

한편, GMA 용접은 고도의 숙련된 용접 기술을 요구하지도 않으면서 용접 속도를 높이고, 양호한 비드 형상을 얻기 위해 이면재(Backing Plate)를 이음부 하부에 두고 용접하는 경우도 있지만, 이렇게 용접한 경우 모재와 용접부에서의 두께 차이를 크게 만듦으로써 응력의 집중을 불러오며, 루트 균열, 슬래그 혼입, 용입 부족 등이 생기기 쉬운 결점이 있다. 이런 결점을 줄이기 위해 용접 접합부는 주로 표준 V형 맞대기 이음(V-Groove) 형상으로 하고, 용접조건은 균일한 이면비드가 형성되도록 선정하여 적용하여 용접을 하고 있다.

초충용접은 결함발생의 가능성 등으로 인해 고도로 숙련된 작업자의 경험에 크게 의존하고 있어, 사실 초충용접에 대한 자료가 많이 부족한 실정이다. 그리고 용접의 품질 및 생산성 향상과 작업여건 개선 등을 위해서는 용접공정의 자동화가 요구되고 있다. 이런 GMAW의 초충용접은 해저 수공관, 대구경 파이프라인, 일반 구조용강 등의 후판 이음부에서 주로 적용되며, 생산속도를 높이면서도 이면비드(Back Bead)의 형성이 균일하게 이루어져야 하는 이유로 최적의 용접조건을 선정하여 적용할 필요가 있다.

용접부의 품질은 용접 비드의 형상에 의해 결정된다. 이것은 용접 비드의 형상이 용접부 즉 용접 이음부의 기계적 강도를 결정짓는 중요한 요소이기 때문이다. 또한 원하는 용접 비드 형상과 품질을 얻기 위해서는 용접공정변수를 결정 하는 것이 중요한 역할을 한다. 용접공정변수를 결정하는데 널리 이용되는 방법 중 하나는 실험 결과 값을 이용하는 것이다. 일부 연구자료 중 먼저 회귀분석을 이용하여

용접비드 형상변수와 용접공정변수 사이의 선형 모델을 유도한 연구가 있었으며, 최근에는 선형회귀 모델, 통계적 실험계획, 인공지능기법을 통해서 용접비드 형상에 영향을 미치는 용접공정변수들의 영향에 관한 연구가 이루어져 왔다. 아울러 용접 이음부의 비드 형상에 관한 연구로는 MIG(GMAW)용접에서 용접비드 형상을 수학적 모델에 의한 예측 및 용접공정변수와 용접비드 폭의 상관관계에 관한 연구, 용접공정변수와 비드 형상의 관계를 규명한 연구 등이 있으며, 이와 같이 선행된 연구 자료와 논문들을 통해 용접부 즉 용접 이음부의 기계적 성질을 결정하는 용접비드 형상이 용접공정 변수에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그렇다면 초충용접 시 주요 변수들을 살펴보면, 공정변수로는 Welding Current(전류), Welding Voltage(전압), Welding Speed(속도) 등이 있고, 용접 조인트의 형상 변수로는 루트 면(Root Face)과 루트 간격(Root Gap)이 있다. 그리고 고품질의 Back Bead(이면 비드) 형상을 얻기 위해서는 용접변수 조절을 통해 많은 실험을 하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 본 연구에서는 선행연구된 GTA 용접공정에 의한 이면비드 최적화의 이론적 배경을 바탕으로, 와이어 형태의 전극이 일정한 속도로 송급 되기 때문에 조건선택이 보다 어려운 GMA 용접공정을 초충용접에 적용할 때의 최적화를 우선적으로 실행하였다. 따라서 선행연구의 방법론을 응용하여 맞대기 용접부에 대한 GMA 초충용접을 대상으로 2차 회귀 모델 및 호감도 함수를 적용한 반응표면 분석법을 통해 최적용접조건을 선정하였다.

1.4 연구방법

1장에서는 연구 배경 및 연구 목적 그리고 본 논문의 구성에 대해서 나타내었다.

2장에서는 GTA 용접과 GMA 용접의 이론적 고찰을 통해 TIG와 MIG 용접의 기초 원리와 특성에 대해 알아보고, RMD-GMAW의 원리와 특성에 대해서 자세히 알아보도록 하겠다. 일반적인 GMAW와 RMD-GMAW의 이행방식의 차이점도 알아볼 것이며, 기본적인 원리의 차이를 비교, 분석 해보도록 하겠다.

3장에서는 GTA 용접을 이용한 초충용접 시 용접부의 기계적 특성 및 금속학적 특성을 평가하였다. 그리고 RMD-GMAW Process를 이용하여 초충용접 시 용접부의 기계적 특성 및 금속학적 특성을 평가하여, GTAW와 RMD-GMAW의 용접성을 비교분석하였다. 또한 광학현미경을 이용하여 RMD-GMAW Process를 활용하여 초충용접을 진행한 시편의 미세조직 특성을 관찰하였다.

시편 재질은 Carbon Steel SS400을 사용하였으며, 3tX100X150 사이즈로 용접을 진행하였다. 용접 조건은 Miller社에서 제공된 최적의 조건으로 용접하였다.

본 연구에서 사용 된 장비는 Miller社에서 개발한 RMD-GMAW(Regulated Metal Deposition-Gas Metal Arc Welding)process를 이용하여 초충용접 후 인장강도, 경도, 조직 등을 측정하여 RMD-GMAW를 초충용접에 적용함으로써, 비용절감, 생산성 향상이라는 두 가지 목표를 두고 연구를 진행할 예정이다.

4장에서는 GTA 용접을 이용한 초충용접을 RMD-GMA 용접 process로 대체 가능 여부와, 대체 가능할 시 얻을 수 있는 생산성 향상과 비용 절감 효과에 대한 요약 및 결론을 도출하였다.

다음 Fig. 1.2에 5개의 장으로 구성된 본 논문구성의 Flowchart를 나타내었다.

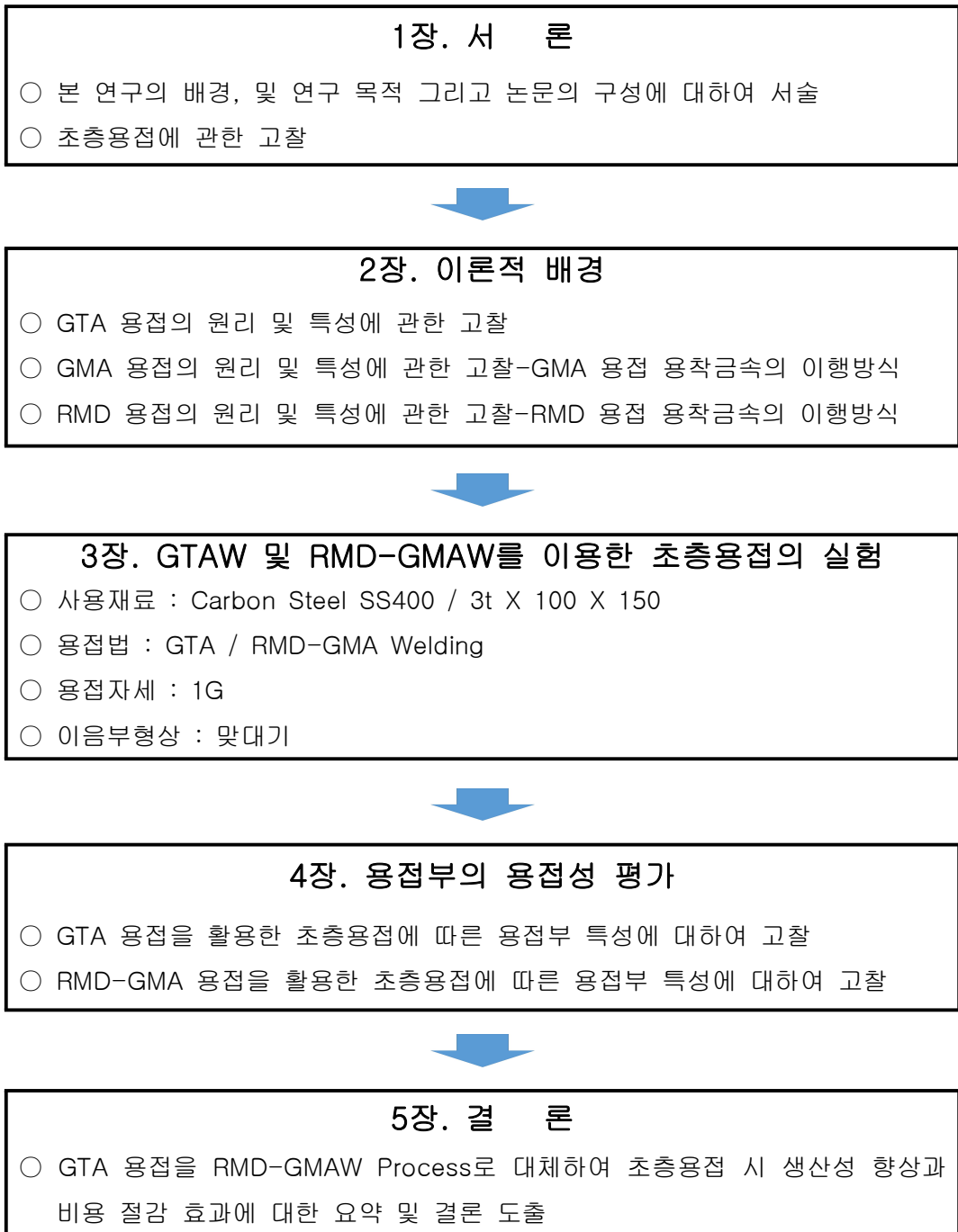


Fig. 1.2 Flow chart of thesis

제 2 장 이론적 고찰

2.1 GTAW(TIG)의 원리 및 특성

2.1.1 GTAW(TIG)의 원리

GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), 일명 TIG(Tungsten Inert Gas)용접이라고 불린다. GTA 용접은 비소모식 용접으로 비철금속의 용접에 일반적으로 사용되며, 대부분의 금속을 접합할 수 있어 여러 산업 분야에서 광범위하게 사용되어지고 있는 용접법이다. 비소모성 텅스텐 전극봉(Tungsten Electrode)을 사용하며 용접부에는 아르곤이나 헬륨 같은 불활성 가스(Inert Gas)로 보호되며 보통 용가재(Filler Metal)가 사용된다. 아르곤 가스를 사용하는 경우에는 보통 알곤 용접이라고도 한다. 대표적인 GTA 용접의 모식도를 Fig.2.1과 Fig.2.2에 나타내었다.

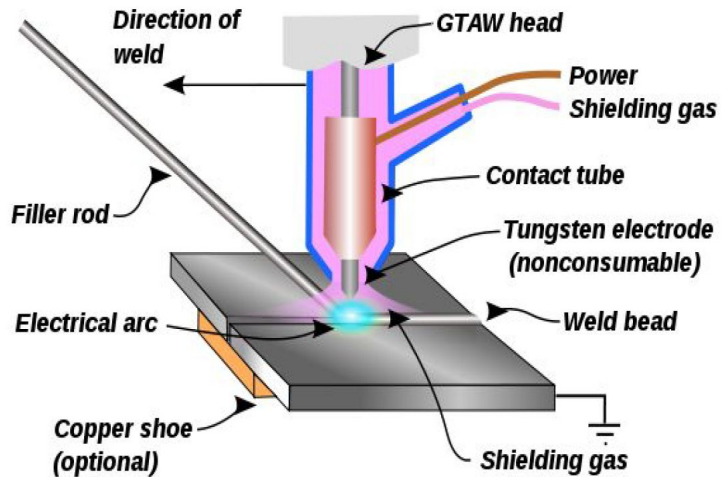


Fig. 2.1 Schematic illustration of GTAW(1)

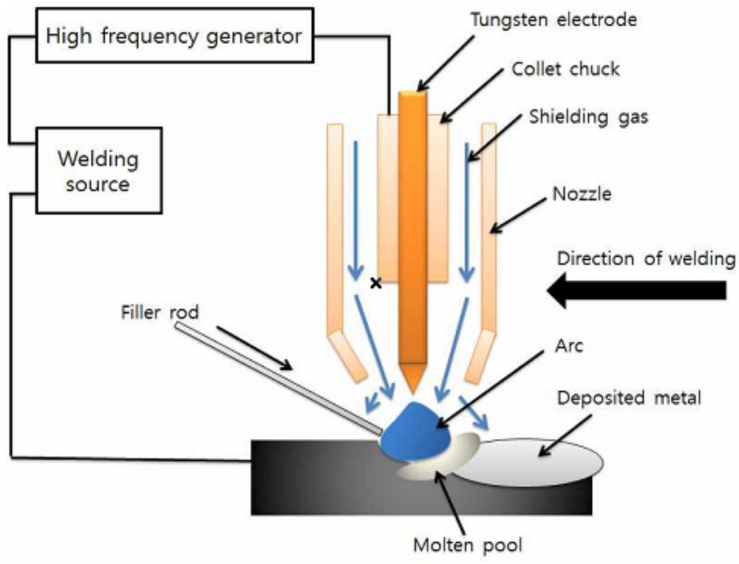


Fig. 2.2 Schematic illustration of GTAW(2)

2.1.2 GTAW(TIG)의 특성

GTAW(TIG)의 장점과 단점은 다음과 같다.

(1) 장점

- 용접 이음부의 기계적 성질이 우수하다.
- 대부분의 금속과 비금속의 고품질 용접이 가능하다.
- 용접 이음부의 변형이 적다
- 용접 후 슬래그 제거 등의 Cleaning(청결작업) 작업이 필요 없다.
- 내부식성이 우수하다.
- 보호가스가 투명하여 작업 중 작업자가 아크 용융풀 등 용접 상황을 파악 할 수 있어 작업성이 양호하다.
- 스패터가 거의 없다.

- 전 자세 용접이 가능하다.
- 용접 입열 조정이 용이하여 박판 용접에 상당히 좋다.

(2) 단점

- Wire 즉 소모성 용접봉을 쓰는 용접보다 용접 속도가 느리다.
- 용접 속도가 느림으로 용접 비용면에서 가격 상승 요인이 된다.
- SMAW와 같은 다른 용접 방법에 비해 용접기의 가격이 비싸고 Shield Gas가 비싸기 때문에 유지 및 운영비가 비싸다.
- 불활성 기스와 텅스텐 전극봉은 다른 용접 방법에 비교해 볼 때 고가이다.
- 부적당한 용접 기술로 용가재의 끝부분이 공기에 노출이 되면 용접 금속이 오염된다.
- 용접 부주의로 인해 텅스텐 전극봉이 용접부에 녹아 들어가거나 오염될 경우 용접부가 취성을 갖는 경우가 있다.

2.2 GMAW(MIG)의 원리 및 특성

2.2.1 GMAW(MIG)의 원리

GMAW(Gas Metal Arc Welding), 일명 MIG(Metal Inert Gas)용접이라고 불린다. 소모성 와이어 전극과 대상물 사이에 전기적 아크를 생성하여 대상물을 녹여서 용접하는 방식이다. 즉 용접 중 연속적으로 공급되는 소모성 와이어와 모재(Base Metal)간의 접촉에 의해 발생하는 Arc열에 의해 용접되며, Torch(용접 홀더)를 통해 Shielding Gas(보호가스)가 방출되어 외부로부터 공기 및 대기 중의 이물질의 침투를 방지해주는 동시에 용착 금속을 보호하며 용접되는 방식이다. GMA 용접에서는 사용되는 보호가스의 종류에 따라 용입의 깊이에 어느 정도 영향을 준다. 헬륨의 경우에는 용입 깊이를 최대로 얻을 수 있으며 이산화탄소는 최소, 아르곤은 중간 깊이의 용입을 얻을 수 있다. 대표적인 GMA 용접의 모식도를 Fig. 2.3과 Fig. 2.4에 나타내었다.

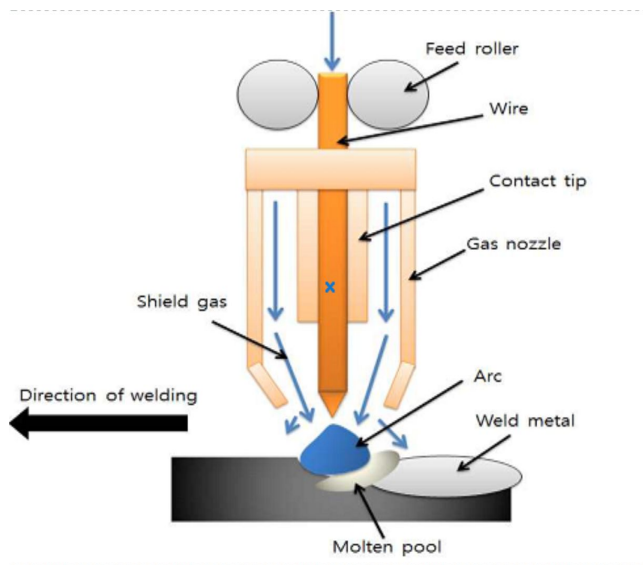


Fig. 2.3 Schematic illustration of GMAW(1)

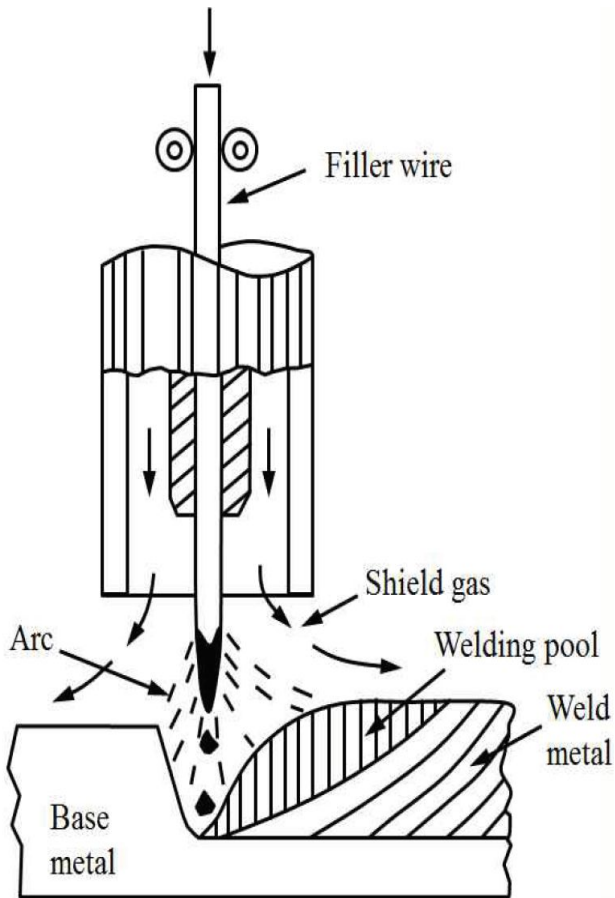


Fig. 2.4 Schematic illustration of GMAW(2)

또한 MIG 용접에서 높은 전류밀도와 적절한 보호가스 사용은 후판용접을 가능하게 한다. MIG 용접에 사용되는 용접봉은 치수공차가 정밀하여야 하고 사용하는 목적에 적합한 화학성분이 일정하여야 한다. 반자동 혹은 자동화가 가능한 공정으로 일정한 DC전압이 주로 사용되나 일정한 교류(AC)를 사용하기도 한다. GMA 용접은 직류역극성(Direct Current Reverse Polarity(DCRP))을 이용하여 용접 시 Wire가 미세한 입자로 용융되어 모재에 이행이 되며, 수려한 Bead외관을 얻을 수도 있다.

GMA 용접은 정전압특성(Constant Voltage Characteristics)을 이용하는데, 정전압특성이란 어떤 조건의 변화로 아크의 길이가 짧아지면 아크 전류가 증가하여 전극 용해율이 높아져 아크 길이는 정상 길이로 되어 용접이 정상적으로 이루어진다.

따라서 정전압 특성의 용접기를 이용하면 Burn Back(번백) 작용에 의해 전류의 변화 범위가 커져서 Wire가 모재에 단락되기 전에 Wire가 급속히 용융되어 단락을 방지 할 수 있다. GMAW는 일반적으로 직류역극성(Direct Current Reverse Polarity)을 많이 사용하는데, 모재에 대한 용접 입열이 크므로 용입이 깊고 청정작용(Cleaning / 아크가 모재 표면의 산화막을 제거하는 작용)으로 인해 모재의 품질이 좋아짐으로 알루미늄, 마그네슘 등의 경합금 용접에 많이 이용되고 있다.

GMA 용접은 1940년에 알루미늄과 비철 금속 용접을 위해 개발되었으나 다른 용접 방법들에 비해 속도가 빨라 철 금속에도 적용되었으며 다양한 방법도 개발되었다. 불활성기체의 높은 가격으로 인해 CO₂가 많이 사용되어졌으며 결과적으로 현대 산업분야에서 가장 많이 사용되어 지고 있다.

2.2.2 GMAW(MIG)에서 용착금속의 이행방식

GMA 용접에서는 소모성 전극을 사용하기 때문에 다른 용접 방법과 달리 용융된 와이어가 용융 풀로 이행하는 용적이행 현상이 나타난다. 이는 용접 변수들이 변화함에 따라 와이어 선단의 용적에 작용하는 힘들의 크기가 달라지기 때문이다.

Fig. 2.5에 나타낸 바와 같이 용적에는 여러 가지 종류의 힘이 동시에 작용한다.

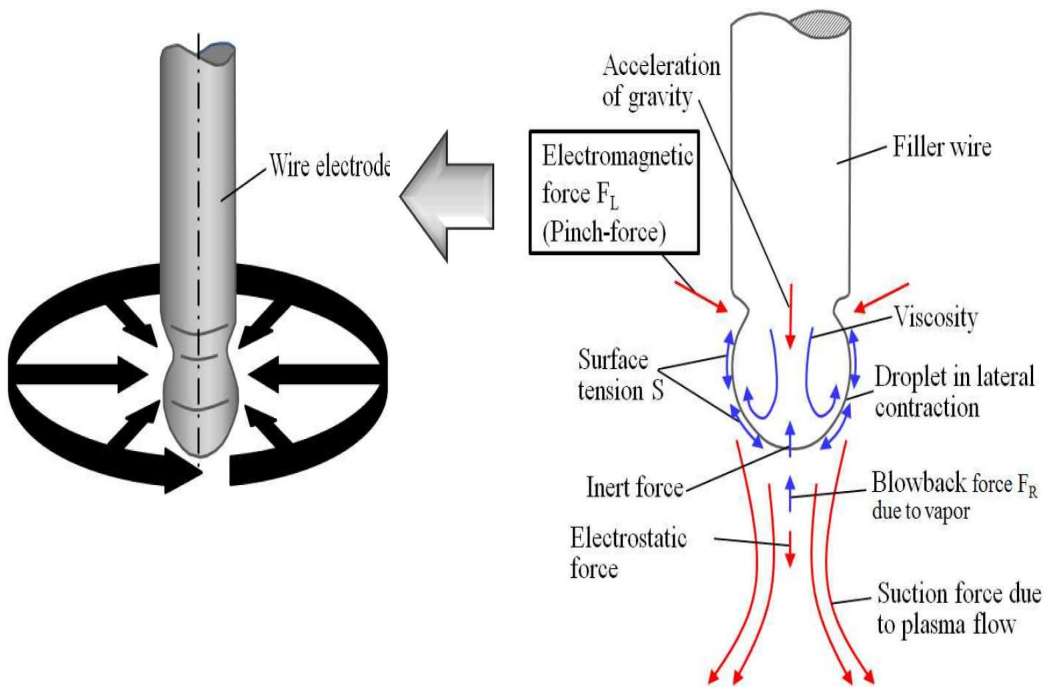


Fig. 2.5 Forces involved in the droplet detachment process

GMA 용접에 있어서 용착금속의 이행방식(Metal Transfer)에는 Short-Circuit(단락이행), Globular(구상이행), Spray(분사이행)의 크게 세 가지 특징적인 용적이행 방식으로 나누어진다. GMA 용접에 있어서의 세 가지 이행방식 모식도를 Fig. 2.6에 나타내었다.

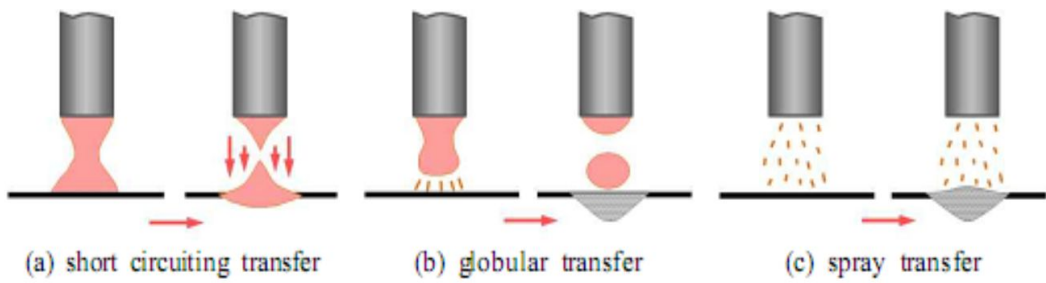


Fig. 2.6 Basic metal transfer modes in GMAW

2.2.3 GMAW(MIG)의 특성

GMAW(MIG)의 장점과 단점은 다음과 같다.

(1)장점

- 용접 조작이 비교적 간단하다.
- 용착 효율 약 95%로 상당히 좋다.(SMAW 약 60%)
- 와이어의 연속적인 공급으로 용접봉의 교체 작업이 필요 없다.
- 용접 속도가 빠르고 생산 효율이 좋다.
- 슬래그가 없으므로 슬래그 제거 시간이 필요 없다.
- Cleaning(청정작용)작용이 있다.
- 전류 밀도가 크기 때문에 용입이 깊고, 전자세 용접이 가능하다.

(2)단점

- SMAW와 같은 용접기와 비교하여 장비 가격이 비싼 편이고, 보호가스가 다소 비싸 유지비가 많이 든다.
- Torch가 용접부에 접근하기 곤란한 경우는 용접이 불가능하다.
- 용접 장비가 무겁고 구조가 복잡하여 이동이 불편하다.
- 바람이 부는 옥외에서는 보호가스가 역할을 충분히 하지 못함으로 방풍대책이 필요하다.
- 다량의 스패터로 인해 작업 주변 환경이 청결하기 어렵다.
- 다량의 스패터로 인해 스패터 제거 작업이 요구된다.

2.3 RMD-GMA 용접의 원리 및 특성

2.3.1 RMD-GMA 용접의 원리

RMD(Regulated Metal Deposition)-GMAW Process ;
 최근 Miller社에서 7년간의 개발 과정을 통해 출시한 GMA 용접의 한 Process로, 기존 GTA 용접으로 작업해 오던 초층용접을 Purge Gas(이면부 용접 비드 형성을 위한 보호가스)와 이면재(이면부 용접 비드 즉 백비드(Back Bead) 형성을 위한 용접 재료)를 사용하지 않고, 이면비를 생성하며 초층용접을 가능하게 개발한 Process이다.

RMD(Regulated Metal Deposition) Process에서의 금속 용융 이행방식의 모식도를 Fig. 2.7에 나타내었다. 이해를 돕기 위해 단락이행의 모식도를 Fig. 2.8에 함께 나타내었다.

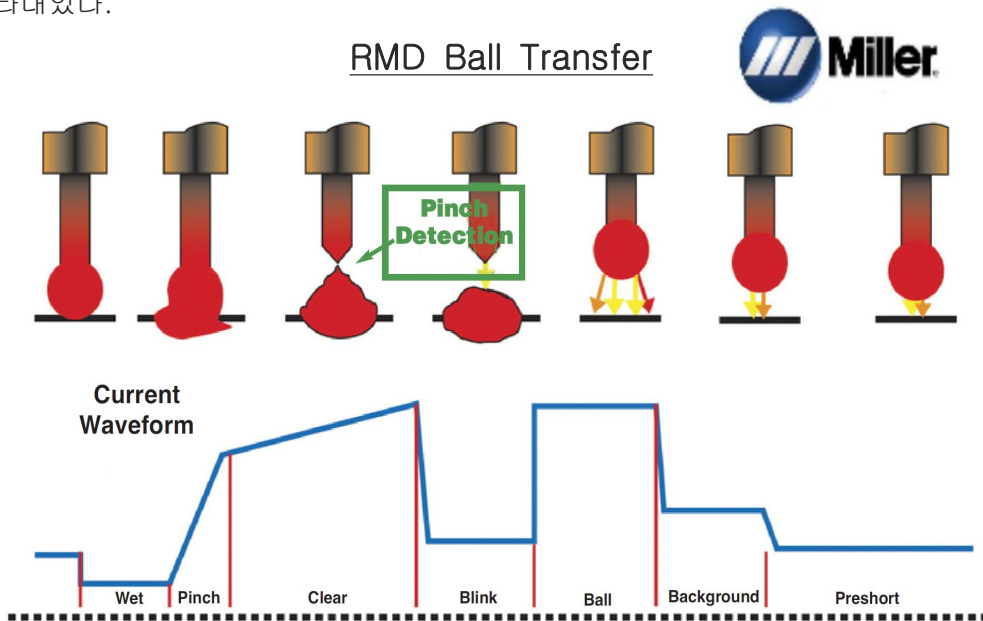


Fig. 2.7 Basic metal transfer modes in RMD-GMAW

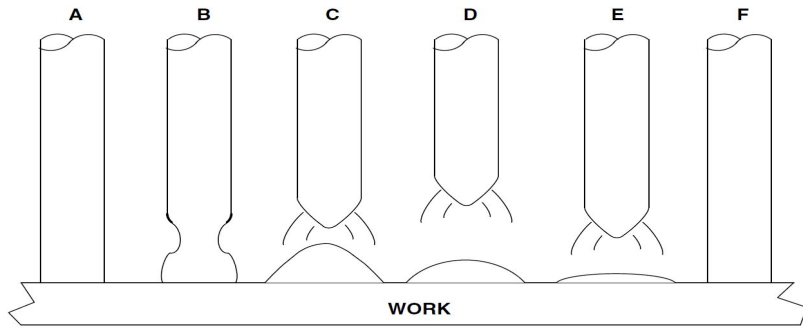


Fig. 2.8 Mechanics of Short Circuiting Transfer

Fig. 2.7과 Fig. 2.8에서 보듯이 RMD-GMAW의 이행방식은 금속 용융 이행방식 중 단락이행(Short Circuit)방식과 흡사한 형태를 가지고 있다. 이는 RMD-GMAW의 이행 방식이 일반적인 단락이행 방식에서 약간의 변화를 주어, 즉 단락이행에서의 파형을 제어하여 임의의 이행방식을 만든 것이라고 볼 수 있다.

Short Circuit Transfer방식에서는 작은 직경의 와이어를 사용하며, 낮은 아크 전압을 사용한다. 따라서 단락이행방식은 정전압 방식의 용접기를 사용한다.

그렇다면 여기서 Spray 이행방식을 살펴보도록 하겠다. Fig. 2.9에서 Spray 이행방식의 모식도를 나타내었다.

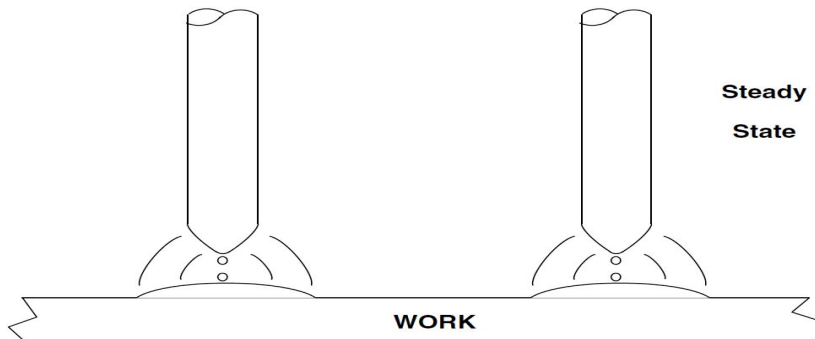


Fig. 2.9 Mechanics of Spray Transfer

Spray Transfer방식에서는 큰 직경의 와이어를 사용하며, 높은 아크 전압을 사용한다. 따라서 Spary 이행방식은 정전압 방식 또는 정전류 방식의 용접기 모두를 사용할 수 있다.

위에서 살펴보았듯이, RMD-GMAW의 용적 이행방식 즉 Ball Transfer 방식은 Short Circuit 이행방식과 흡사한 것을 알 수 있다. 그렇다면, Short Circuit Transfer방식과 Ball Transfer방식의 파형을 측정해 보도록 하겠다.

Fig. 2.10은 일반적인 GMA 용접에서의 Short Circuit Transfer 방식의 파형을 나타냈으며, Fig. 2.11은 RMD-GMAW의 Ball Transfer 방식의 파형을 측정하여 나타내었다.

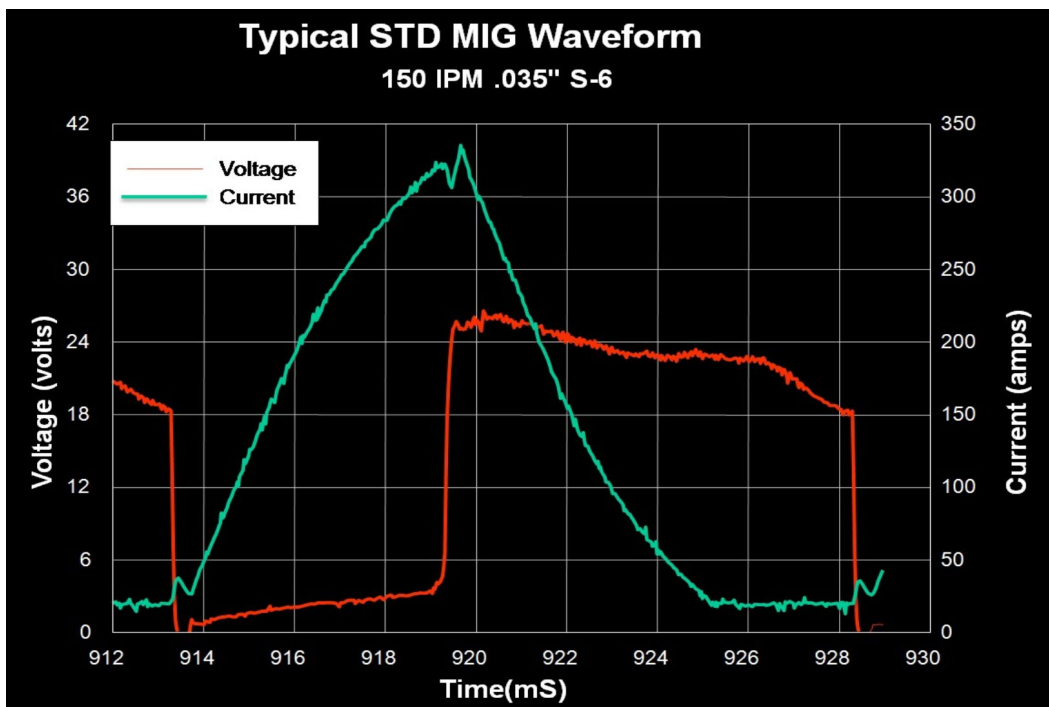


Fig. 2.10 Short Circuit Transfer Waveform

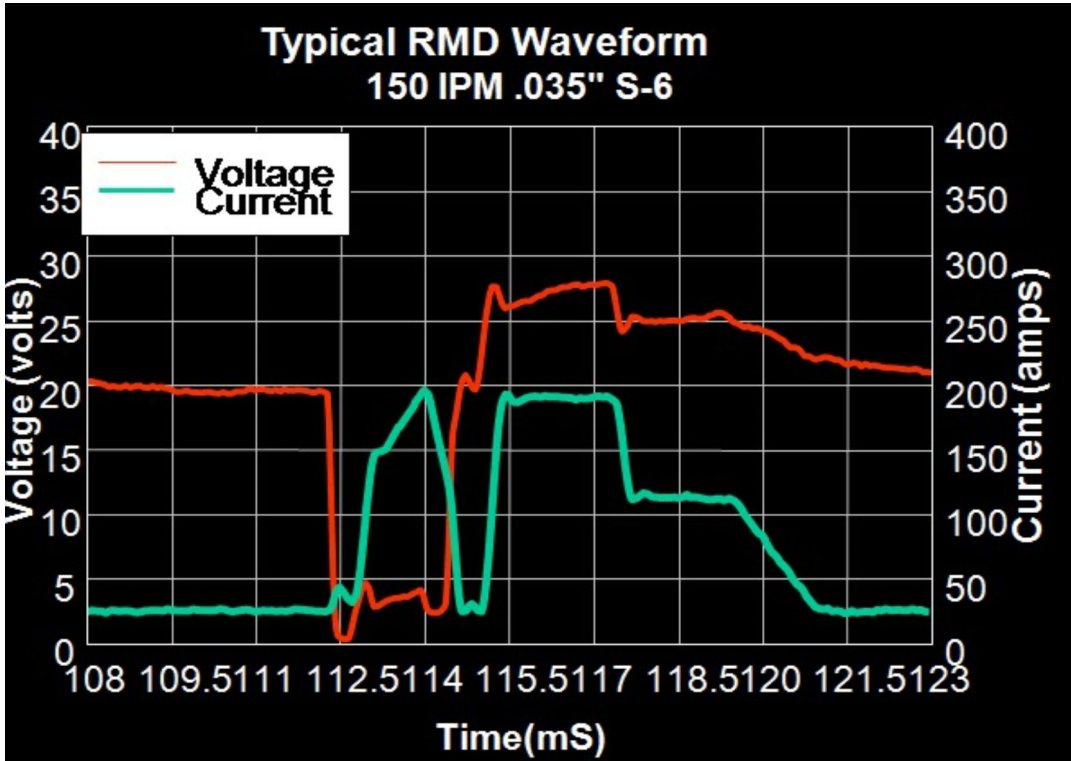


Fig. 2.11 RMD-GMAW Ball Transfer Waveform

일반적인 GMA 용접에서의 Short Circuit Transfer와 RMD-GMA 용접에서의 Ball Transfer의 파형을 살펴보면, 전류는 RMD 방식이 일반 MIG보다 다소 낮게 흐르며, 전압은 거의 차이가 없다.

즉 앞서 기술한 바와 같이 일반적 단락이행의 파형에서 전류 및 전압을 제어하여 단락이행보다 부드럽게, 거의 Spray 이행방식에 가까울 정도로 파형을 제어하는 것이 기술이다. Spray 이행방식으로 보기에 는 무리가 있으며, 단락이행에서 파형을 조절 및 변형을 준 이행방식이라고 볼 수 있다. 좀 더 정확히 한눈에 비교해보면 아래 Fig. 2.12와 같다.

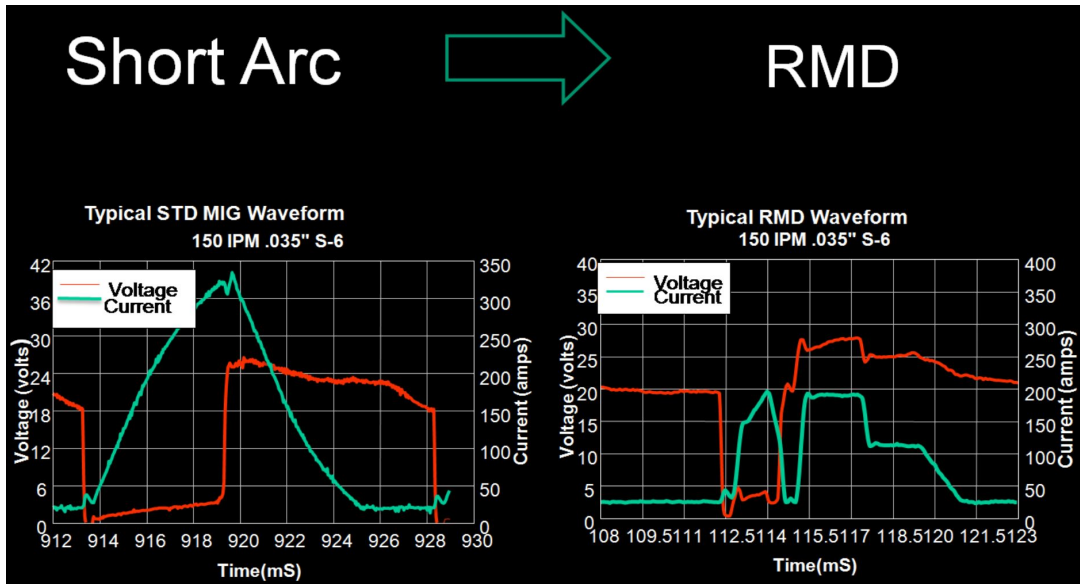


Fig. 2.12 Taking control waveform of Short Circuit Transfer

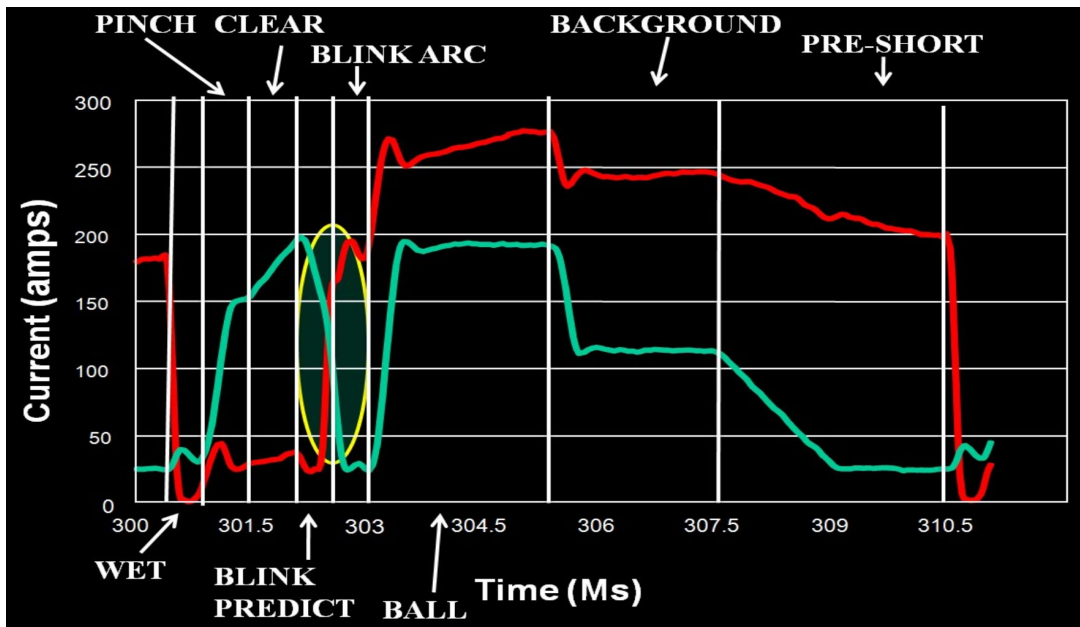


Fig. 2.13 RMD-GMAW Waveform

Fig. 2.12와 Fig. 2.13에서 보듯이 RMD-GMAW Process는 일반적인 MIG 용접에 사용되는 단락이행방식을 정밀하고 정확하게 제어한다. Fig. 2.13에서 살펴보면 일반적인 단락이행방식에서 단락이 끝나기 직전에, 전류 레벨 변경 데이터에 대하여 빠르게 반응함으로써, 즉 전류가 상승하기 전에 전류 상승을 억제시키는 원리로 볼 수 있다.

아래 Fig. 2.14에서 RMD-GMA 용접 시 고속촬영을 한 장면을 나타냈으며, Fig. 2.15에서는 일반적인 GMA 용접 시 고속촬영을 한 장면을 나타내었다. RMD-GMAW에서 전류를 제어함으로써 일반 GMA 용접에서 보다 용융풀이 상당히 뚜렷하고 정확히 단락이 되는 것을 확인할 수가 있다.

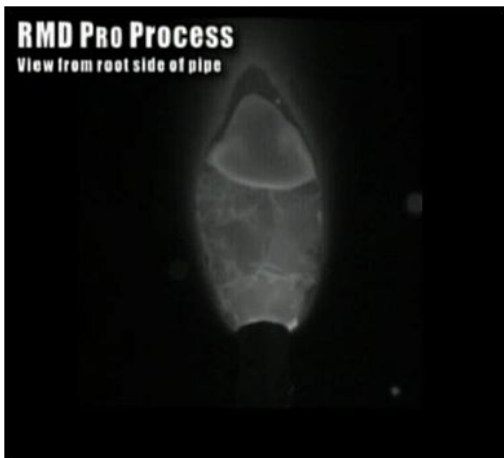


Fig. 2.14 RMD Ball Transfer



Fig. 2.15 Short Circuit Transfer

다음은 일반 GMAW의 Electrical Signal과 RMD-GMAW의 Electrical Signal을 Fig. 2.16에 나타내었다.

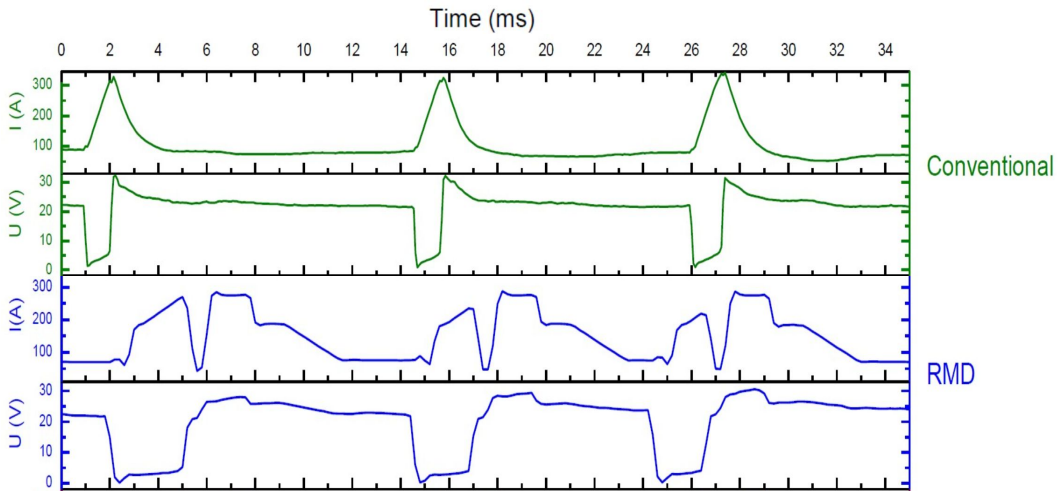


Fig. 2.16 Example of obtained electrical signals

단락기간 중 전류가 최대치에 도달하였을 때 아크가 재생되며 이 때 재생된 아크는 강한 아크 반발력으로 용융지를 쳐내면서 소립의 스파터를 발생시킨다. 따라서 아크 재생 시 발생하는 스파터를 억제하기 위해서는 가능한 낮은 전류를 유지한 상태에서 아크가 재생하도록 하여야 한다.[25]

위 그래프에서 RMD-GMAW의 그래프는 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 설정된 전류 이상에서는 전류 상승속도를 감소시켜 궁극적으로 아크재생 시의 전류를 낮게 유지하는 방법을 적용함으로써 일반적인 GMAW에서의 그래프 보다 안정적인 전기적 특성을 확인할 수 있다.[27]

다음 Fig. 2.17에 RMD-GMAW Process 용접부의 힘의 밀도를 나타내었다.

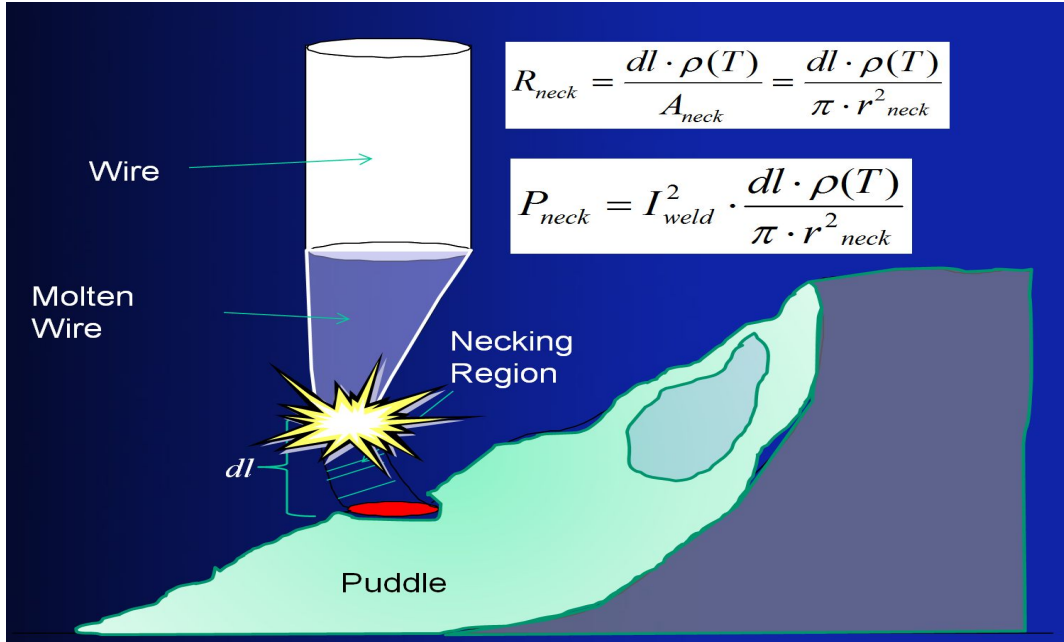


Fig. 2.17 related equation of R_{neck} and P_{neck} during short circuit

Fig. 2.17에서 P_{neck} 는 전류의 제곱과 저항(R_{neck})을 곱한 값으로, 단락이행시 용융금속은 단락이 유지되는 동안에 중력과 표면장력에 의해 용융지로 이동되는데, 단락 말기에는 단면적이 작아지면서 전류 밀도가 증가하여 저항열에 의한 단락부의 온도 상승과 전자기력에 의한 핀치효과로 용융금속의 이행은 촉진됨으로, 결국 와이어와 용융지가 분리됨을 수식적으로 나타내고 있다.

아래 Fig. 2.18에서 일반 GMAW의 Short Circuit에서의 Necking Region과 RMD-GMAW의 Ball Transfer에서의 Necking Region을 그래프로 나타내었다.

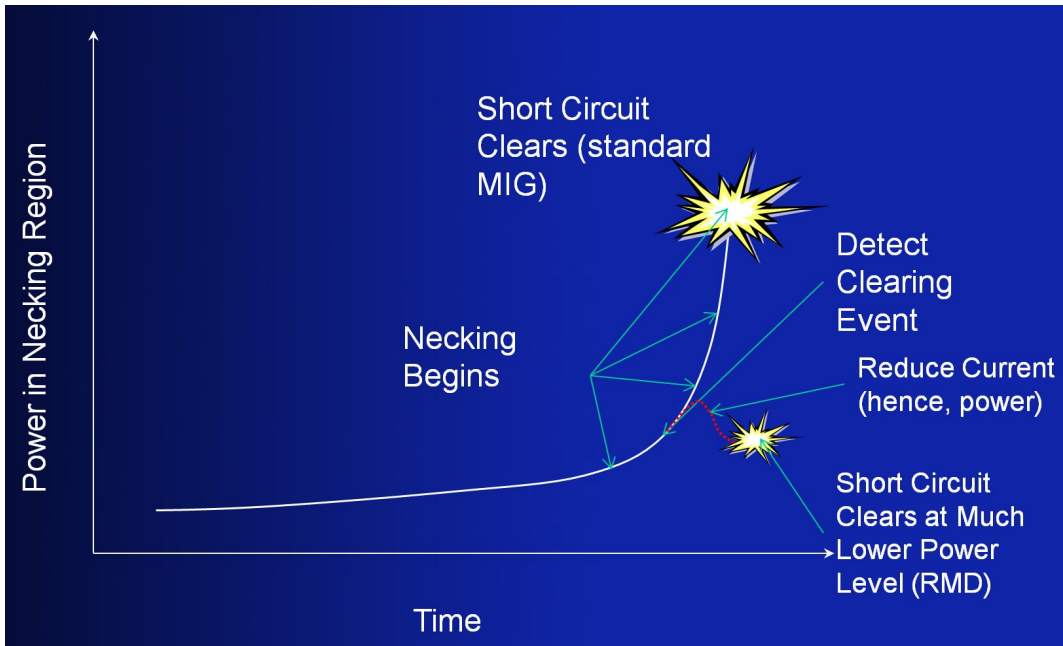


Fig. 2.18 Comparison of power density in necking region between standard GMAW and RMD-GMAW process

Fig. 2.18은 일반적인 MIG 및 RMD process의 Power density를 비교한 것으로, 단락이행 시 RMD process는 일반적인 MIG에 비해 상대적으로 낮은 Power에서 단락이행이 발생함을 보여주고 있다. 따라서, RMD process는 저전류 파형제어를 통한 안정적인 아크를 유지함은 물론 스파터 저감 및 입열을 최소화할 수 있는 혁신적인 process이다.

2.3.2 RMD-GMA 용접의 특성

RMD-GMAW process는 일반적인 MIG 용접에 사용되는 단락이행방식을 정밀하고 정확하게 제어한다. 단락이행방식에서 단락이 끝나기 직전에 전류 레벨 변경 데이터에 빠르게 반응하는 원리로, 즉 다시 말해 전류가 상승하기 전에 전류 상승을 억제시키는 원리로 볼 수 있다.

이러한 RMD-GMAW Process 이행방식의 특징은 주도적으로 용융풀을 제어한다. 다시 말하자면 작업자의 운봉(Weaving) 능력이 탁월하지 않아도 장비의 RMD-GMAW Process가 용융풀을 주도적으로 이끌어줌으로 작업이 한결 수월하다. 이는 곧 숙련된 작업자가 아니어도 작업이 가능하게 됨으로, 인건비를 절감할 수 있는 요인이 된다.

(1) 장점

- 단락이행의 정밀한 제어로 초충용접 시 안정적인 아크와 용융풀을 만든다.
- 즉 발전된 소프트웨어의 기능으로 작업자의 기량이 크게 요구 되지 않는다.
- 저온균열(Cold Crack) 또는 융합부족을 최소화하고, 스파터가 적으며, 초충용접에 있어서 더 높은 품질의 초충용접 작업을 할 수 있게 해준다.
- 용접 공정에 있어 안정적인 용접 process는 작업자가 용융풀을 손쉽게 제어할 수 있게 한다.
- 용접조건이 변경(손떨림 등)되어도 안정적인 용접성을 보여준다.
- 종래의 초충용접(GTAW를 이용한 초충용접)보다 용접 비드가 두꺼워 Hot Pass 작업이 필요 없다.
- 이면비드 생성을 위한 퍼지 가스, 백킹재(이면재)가 필요 없다.
- 스파터가 거의 없다.
- 용접 작업자의 교육 시간이 상당히 적다.(하루 정도 소요)

(2) 단점

- 장비가 고가여서 초기 비용이 많이 들어간다.

*Miller社에서 RMD-GMAW Process를 개발하여 탑재한 장비로는 다음과 같은 모델들이 있다.

- PipeWorx System(Shop Fabrication 用)
- PipeWorx Field Pro Sysem(Field 用)
- Auto-Axcess System
- Continuum System

Continuum 모델의 경우, Miller社의 가장 최신 장비이며 Miller社에서 KUKA Robot을 비롯한 여러 Robot 업체들과 기술적 제휴를 통해 용접 자동화 Robot System으로 야심차게 준비하고 있는 차세대 자동화 용접 모델이다.

본 연구에 적용 된 장비는 Miller社 “PipeWorx Field Pro 350” 모델을 사용하여 실험을 진행하였다.

제 3장. GTAW 및 RMD-GMAW를 이용한 초층용접의 실험

3.1 실험 세부사항

3.1.1 실험 재료 및 장비

(1) 실험 재료

본 연구에서 사용한 재료는 GTA와 RMD-GMA 용접의 용접성을 평가하기 위해 모든 실험 공정에 일반구조용 강재인 Carbon Steel SS400(두께 3mm)을 사용하였다. 그리고 용가재의 경우, GTA 용접공정에서는 용가재는 (주)현대종합금속에서 판매되고 있는 ST50G 및 2% Thoriated 가 함유된 Tungsten 1.6 ϕ 를 사용하였으며, RMD-GMA 용접공정에서는 (주)현대종합금속에서 판매되고 있는 SM70 Solid Wire 1.0 ϕ 를 사용하였다.

시험편의 개섩각은 한 면에 37.5 $^{\circ}$ 씩 총 75 $^{\circ}$ 를 두었으며, 시험편의 치수는 3tX100(L)X150(B)이다. GTA 용접 공정에서의 보호가스는 Argon 100%를 사용, RMD-GMA 용접공정에서는 혼합가스를 사용하였으며, 혼합가스의 비율은 Miller社 추천 혼합 비율인 Ar. 80% / CO₂ 20%를 사용하였다. 용접 자세는 1G(아래보기)로 실험을 하였다.

Table. 3.1에 시험편 SS400의 물성치를 나타내었고, Fig. 3.1에는 시험편의 모식도를 나타내었으며, Table. 3.2에는 시험편의 규격을 나타내었다.

Table. 3.1 Chemical composition & Mechanical property of SS400

Material	Chemical Composition (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	기타
SS400	0.16	0.32	0.008	0.013	0.03	0.04	-	-	
	Mechanical Properties								
	Yield Stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile Stress (MPa)	Heat Condition coeff.(mm/m°)		Density (g/cc)	Melting Point		
312	37	450	0.012		7.85	1,473			

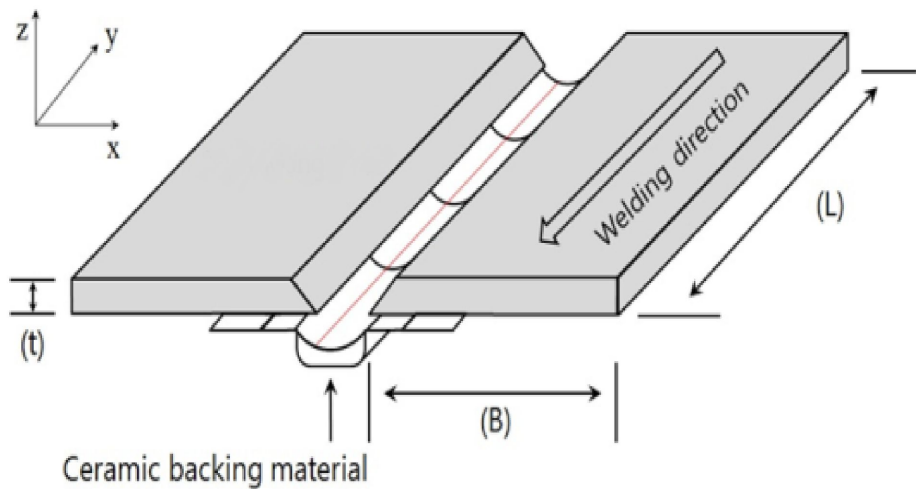


Fig. 3.1 Configuration of welded specimen

Table. 3.2 Dimensions of welded specimen

Material	Length	Breadth	Thickness	Root Gap	Bevel
SS400	100mm	150mm	3mm	3.2mm	37.5°

아울러 실제 산업 현장에 적용 할 Pipe 용접 테스트도 함께 진행하였으며, 이에 필요한 시편도 함께 제작하여 실험을 진행해보았다. Fig. 3.2와 Fig 3.3에 Pipe 시편 제작 과정을 나타내었다.

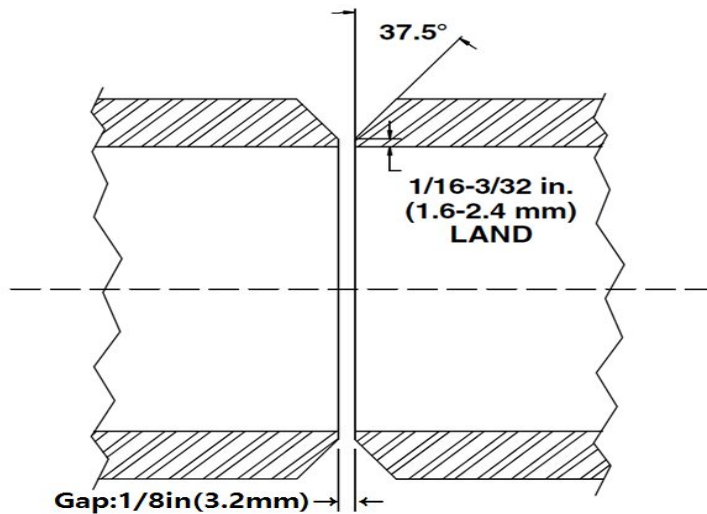


Fig. 3.2 Dimensions of welded specimen and configuration of SS400 Pipe

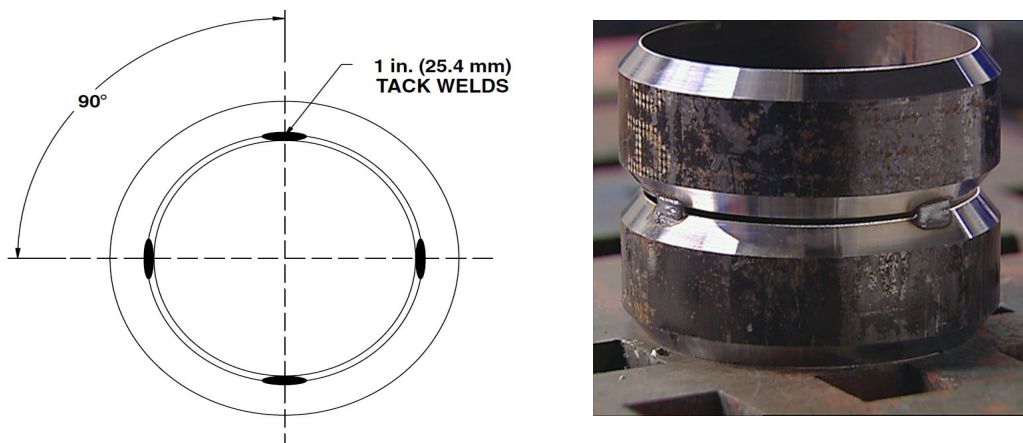


Fig. 3.3 Tack welding of SS400 Pipe

SS400강재 Pipe 시편을 용접하기 위해 3.2mm 용접와이어를 활용하여 Gap을 3.2mm로 설정한 후 Fig. 3.3에서처럼 3시, 6시, 9시, 12시 방향에 Tack welding 을 실시하였다. 다음으로 초층용접 시작 부분에 Arc의 안정적인 Start를 위해 그라인드 처리를 하는 과정을 Fig. 3.4에 나타내었다.

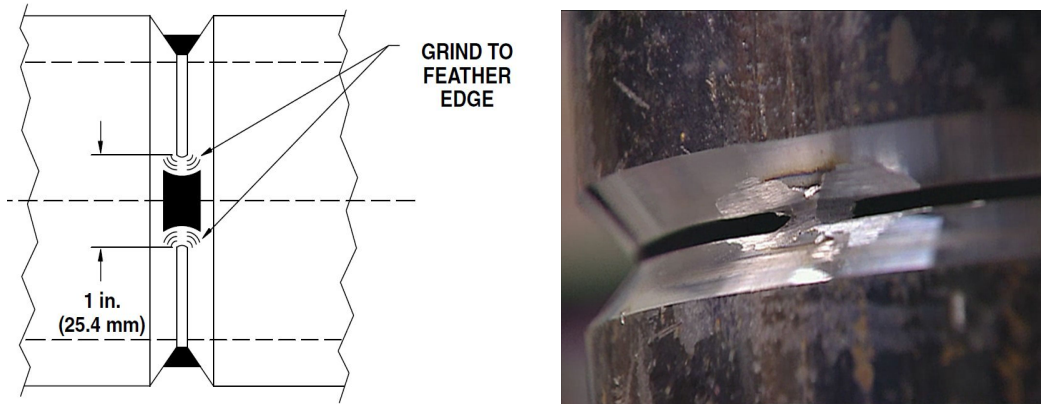


Fig. 3.4 Grind to feather edge for Root Pass welding

위와 같은 시편 제작 작업공정 후 Fig.3.5와 같이 Jig장치를 이용하여 Pipe 용접 을 실시하였으며, 1G자세로 용접을 하기 위해 Rotating Motor를 Fig. 3.5의 좌측 그림에서 P5번 위치에 모터를 장착 및 구동하여 초층용접을 실시하였다.

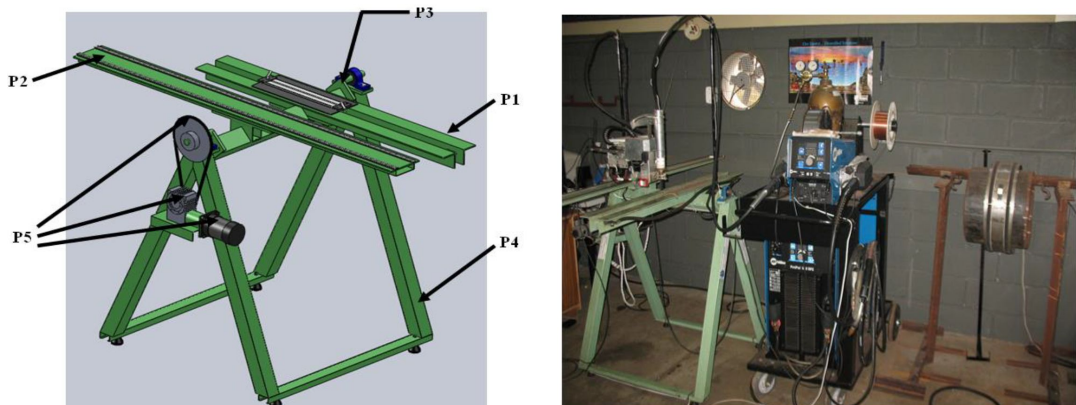


Fig. 3.5 Jig for Root Pass welding

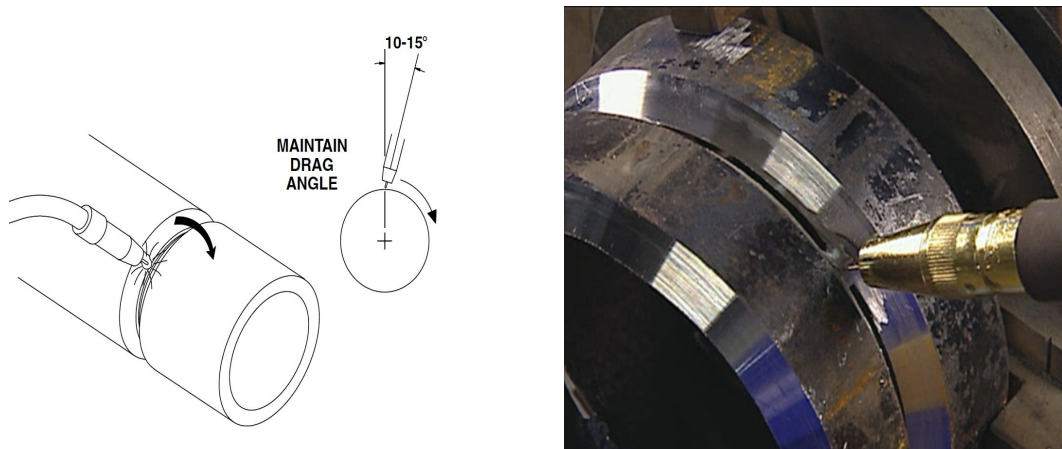


Fig. 3.6 Pipe rotating & torch angle

Fig. 3.6에서 초충용접을 실시하기 위한 Torch의 각도를 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 로 고정한 것을 나타내었다. 위에서 시편으로 제작한 SS400강재 Pipe의 규격을 정리하여 아래 Table. 3.3에 나타내었다.

Table. 3.3 Dimensions of welded specimen of SS400 Pipe

Material	Thickness	Diameter	Land	Root Gap	Bevel
SS400	6mm	200mm	2.4mm	3.2mm	37.5°

준비한 Pipe 시편의 실험결과는 제5장 결론에서 맞대기 용접에서의 Root Pass 용접 결과와 함께 살펴보도록 하겠다.

GTAW를 이용하여 초층용접 시 이면 비드(Back Bead)를 내기 위해 세라믹 백킹재(이면재)를 이용하였고, 용가재는 ST50G를 사용, Tungsten 1.6 ϕ 를 사용하였으며, 보호가스는 Ar. 100%를 사용하였다. Table. 3.4에 용가재 ST50G의 물성치를 나타내었다.

Table. 3.4 Chemical composition & Mechanical property of ST50G

	Chemical Composition (wt%)					
Consumable	C	Si	Mn	P	S	Cu
ST-50G	0.08	0.63	1.14	0.011	0.011	0.13
ASME A NO.1	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 1.60	-	-	-
AWS A5.18 ER70S-G	Not Specified					
	Mechanical Properties					
Consumable	Tensile Test			CVN Impact Test(Joule)		
ST-50G	Yield Stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile Stress (MPa)	-20 $^{\circ}$ C	-46 $^{\circ}$ C	
	470	561	28.7	180	80	
AWS A5.18 ER70S-G	≥ 400	≥ 480	≥ 22	As agreed between supplier and purchaser		

RMD-GMAW를 이용하여 초층용접 시 백킹재 없이 백비드가 형성이 됨으로 백킹재는 사용하지 않았으며, Solid Wire는 1.0 \emptyset SM70을 사용하였다. 보호가스는 8:2 비율의 Ar과 CO₂ 혼합가스를 이용하였다. Table. 3.5에 Solid Wire SM70의 물성치를 나타내었다.

Table. 3.5 Chemical composition & Mechanical property of SM70

Chemical Composition (wt%)					
Consumable	C	Si	Mn	P	S
SM-70	0.07	0.45	0.96	0.015	0.008
AWS A5.18 ER70S-6	≤0.12	≤0.9	≤1.75	≤0.03	≤0.03
Mechanical Properties					
Consumable	Tensile Test			CVN Impact Test(Joule)	
SM-70	Yield Stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile Stress (MPa)	0℃	-30℃
	452	540	28.5	140	110
AWS A5.18 ER70S-6	≥400	≥480	≥22	≥27J at -30℃	

(2) 실험 장비

본 연구의 초충용접을 수행하기 위해 실험에 적용 된 장비는 다음과 같다. 두 공정의 전류와 전압은 Miller社 그리고 현대중합금속社에서 제공한, SS400시편 초충용접을 위한 최적의 조건으로 추천 받아 다음과 같이 적용하였다. 그리고 보호 가스는 GTAW에서는 Ar.100%를 사용하였고, RMD-GMAW에서는 Ar. 80% / CO₂ 20% 혼합가스를 사용하였다.

1) GTA 용접

- GTAW : Miller社 AC/DC Inverter TIG 용접기
- 모델명 : Dynasty350
- 용접 전류 / 전압 : 75Amp / 10V
- 보호가스(유량) : Ar. 100%(25ℓ/min)
- 세라믹 백킹재(이면재) 사용

GTA 용접의 실험 장비를 Fig. 3.7에 나타내었다.



Fig. 3.7 Welding system of GTAW(TIG)

2)RMD-GMA 용접

- RMD-GMAW : Miller社 MIG 용접기
- 모델명 : PipeWorx350 FieldPro
- 용접 전류 / 전압 : 80Amp / 16V
- 보호가스(유량) : Ar. 80% / CO₂ 20%(25ℓ/min)
- 세라믹 백킹재(이면재) 없음

RMD-GMA 용접의 실험 장비와 Installation Diagram을 Fig. 3.8에 나타내었다.



n

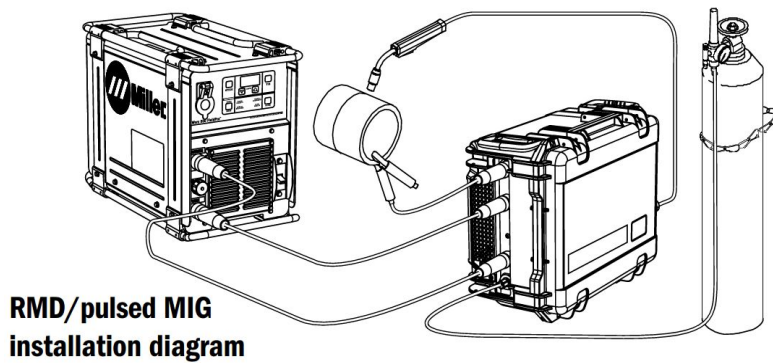


Fig. 3.8 Welding system of RMD-GMAW(RMD-MIG)

3.1.2 실험 방법 및 용접 조건

- 1) SS400강재 시험편 용접을 수행하기 위해서, 첫 번째로 가접을 실시하였다. 가접은 총 2군데 실시하였으며, 백킹재는 세라믹 백킹재를 사용하였으며, 1G 자세로 용접을 하였다. Gap은 3.2mm Tungsten 봉을 이용하여 Gap을 일정하게 설정하였다. 가접과 Gap을 설정하는 모습을 Fig. 3.9에 나타내었으며, 이면재를 부착한 모습을 Fig 3.10에 나타내었다.

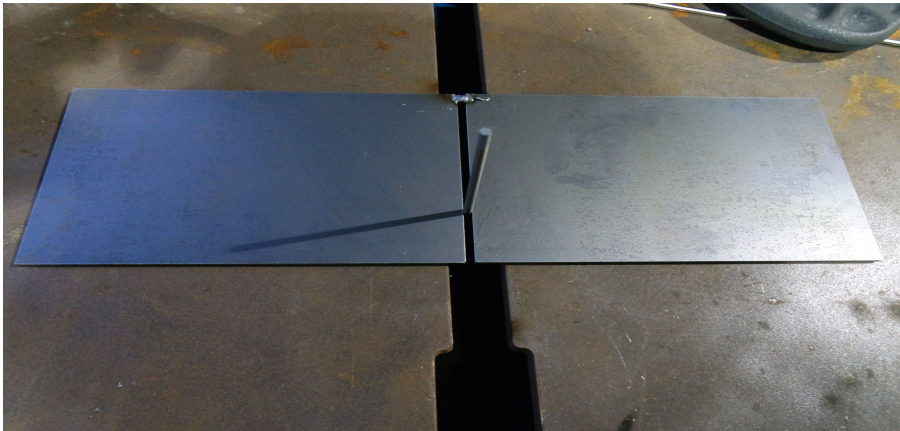


Fig. 3.9 Tack welding & 3.2mm Gap



Fig. 3.10 Backing film for back bead of TIG welding

- 2) 두 번째로, GTA 용접에서의 용접 조건은 Miller社에서 추천 받은 조건인 다음과 같이 설정하였다. 시편이 3t인 경우, 전류는 75Amp, 전압은 10V로 초충용접을 하기 위한 최적의 용접 조건을 설정하였으며, 정확도를 위하여 Digital clamp meter기와 Data logger를 이용하여 전압과 전류를 측정하였다. Gap은 3.2mm, 개선각은 37.5°, 보호 가스는 Ar. 100%를 사용하였으며, ST50G 용가재를 사용하였다.

- 3) 세 번째로, RMD-GMA 용접에서의 용접 조건 역시 Miller社에서 추천 받은 바와 같이 시편이 3t인 경우 전류는 80Amp 전압은 16V로 설정하였다. CTWD는 10mm로 정하였다. 용접 진행 방향은 후진법으로 수행하였고, 보호 가스는 8:2 비율의 Ar과 CO₂ 혼합가스를 사용하였고 용가재는 ER70계열의 1.0∅ Solid Wire를 사용하였다. 또한 GTAW의 시편과 동일한 조건인 3.2mm Gap, 37.5°의 개선각을 적용하였다.

- 4) 네 번째로, 용접 작업을 마친 후에, 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장강도를 측정하였다. 인장 시험의 Cross-head 속도는 KS규정, KS B 0801에 의거하여 3mm/min로 설정하였다. 또한 비커스 경도 시험기를 통해 경도를 측정하였다. 용접 이음부의 기계적 특성을 평가하기 위하여 용접절차 인정시험의 시험편(KS규정, KS B 0801 13A)을 제작하여 기계적 특성을 평가하였다. Fig. 3.11에 시험편 치수를 나타내었고, Fig. 3.12에 시험편 형상을 나타내었다.

- 5) 다섯 번째로, 용접 작업을 마친 후에, 결함을 확인하기 위해 용접부의 외관 검사를 실시하였고, 금속학적 시험을 위해 용접부 미세연마 및 에칭을 실시하여 미세조직을 고찰하였다.

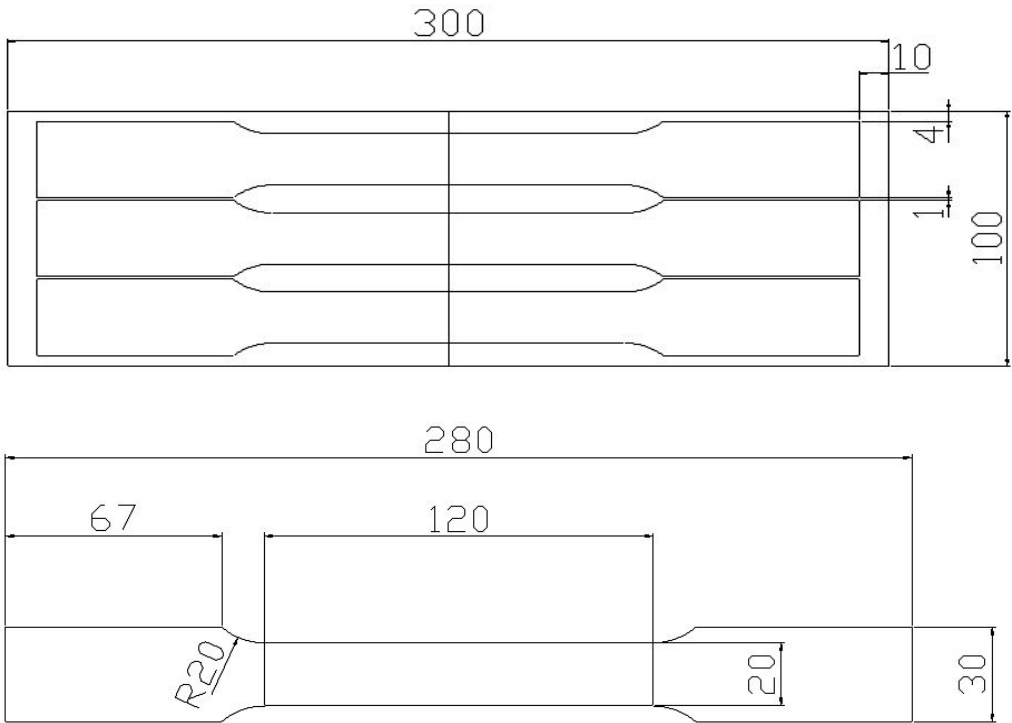


Fig. 3.11 Dimension of test specimen



Fig. 3.12 Configuration of test specimen

3.1.3 용접 조건

백킹재는 용융 금속을 받쳐주며 용융 금속을 보호하고, 용락을 방지해준다. 그리고 적절한 그루브(groove)의 높이와 너비를 형성시켜주는 역할을 한다. 특히 세라믹은 고온에서 내열성이 우수하고 급냉 및 급열에 있어서 열 충격 저항성 역시 뛰어나 용접 시 발생하는 고열에 대해 매우 안정된 상태를 유지시켜 준다.

개선각은 30° 정도로 작으면 용접 시간과 용착 금속량이 줄어, 시간과 비용은 줄일 수 있지만 개선각이 너무 작아 충분한 용입이 어려우며, 슬래그 및 기공이 미처 빠져나오지 못해 결함이 발생할 수 있다. 50° 이상일 경우에 개선각이 클수록 용착 금속량이 많아져 용접 조건을 잡기 까다로우며, 시간과 비용이 높아 질 수 있다. 문헌에 따르면, 개선각이 커짐에 따라 HAZ 및 인근모재에서 심한 온도구배가 발생하고, HAZ의 발생역 또한 증가함을 알 수 있었다.[15] 또한 충격치는 개선각이 클수록 입열량의 차이로 인해 저하할 수 있음을 알 수 있었다.[16] 따라서 개선각은 35°~40°의 평균치인 37.5°로 선정하였다.

후진법은 전진법에 비해 아크가 안정적이며 스파터의 발생이 적을 뿐만 아니라 깊은 용입을 얻을 수 있다. 용접 중 발생한 스파터가 용접이 안 된 백킹재 위에 부착되어 용접 시 완전한 재용해가 되지 않는 경우 백킹재에 갇혀 이면비드 스파터로 나타나게 된다. 따라서 이면비드의 스파터 발생을 방지하기 위해서 전진법보다 후진법을 적용하여 백킹재 위에 붙는 스파터 발생량을 줄이고자 하였다.

CO₂ 100%의 보호가스를 사용하는 용접은 보호가스의 특성으로 인해 반발이행과 단락이행의 금속이행모드를 가지며, 이때 나타나는 불안정한 아크로 인해 스파터량이 많고, 용착 및 용락 등의 문제가 발생한다. 문헌에 따르면, Ar. 2%에서 가장 많은 기공이 발생하였으며, Ar의 비율이 증가함에 따라 기공 발생 정도는 저하되어 Ar.80% / CO₂ 20%에서는 기공이 전혀 발생하지 않았음을 알 수 있다.[21] Miller社에서 추천한 보호가스 비율 역시 8:2인 것으로 확인 할 수 있었다.

따라서 보호가스는 Ar : CO₂ = 8 : 2로 선정을 하였다.

Table. 3.6 Welding parameters of GTAW(3mm)

Welding parameter		Values
GTAW	Position	1G
	Voltage(V)	10
	Current(A)	75
	Shielding Gas(ℓ/min)	Ar. 100%(25ℓ/min)
	Torch Angle(deg)	-
	Gap size(mm)	3.2
	Bevel Angle(deg)	37.5
	Backing material	ceramic material

Table. 3.7 Welding parameters of RMD-GMAW(3mm)

Welding parameter		Values
RMD GMAW	Position	1G
	Voltage(V)	16
	Current(A)	80
	Shielding Gas(ℓ/min)	Ar. 80% / CO ₂ 20%(25ℓ/min)
	Torch Angle(deg)	10°~15°
	Gap size(mm)	3.2
	Bevel Angle(deg)	37.5
	Backing material	-

제 4 장 용접부의 기계적 및 금속학적 특성 평가

4.1 용접 이음부의 성능평가 및 미세조직 특성

4.1.1 경 도

3t Carbon Steel SS400 강재의 용접부에 대하여, 경도 측정은 Fig. 4.1에 나타난 Akashi社의 HM-112 비커스 경도 시험기를 사용하였다. 현미경 배율은 50 μ m 이며, 136° 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하였다. 경도 측정을 위하여 용접부 횡단면을 절단하여 미세연마 후 나이탈(질산 4%, 에탄올 96%)을 이용하여 애칭(Etching)을 실시하였다.

경도 측정은 용접 이음부의 표면으로부터 횡방향으로 0.5mm 간격으로 하중 0.2kgf, 하중유지시간 10sec로 경도를 측정하였다.

Fig. 4.1은 경도 시험기를 나타내었고, Table. 4.1은 경도 시험기의 성능과 적용치를 작성하여 나타내었다.

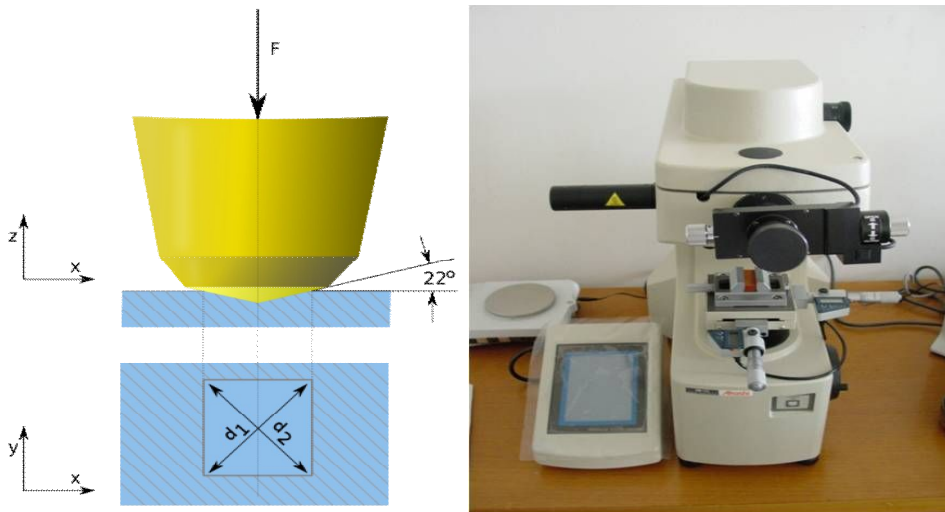


Fig. 4.1 Vickers hardness test scheme and equipment

Table. 4.1 Hardness testing condition

Parameters	Values
Type	Micro vickers hardness tester
Load	0.2kgf
Loading time	10sec
Test position	0.5mm gap from center point

4.1.2 인장 강도

SS-400 3t 초층용접(Root Pass Welding)시편의 용접 이음부 인장강도를 평가하기 위해 사용된 (주)MTDI社의 만능재료시험기 UT-100F모형을 Fig. 4.2에 나타내었다.

인장 시험편은 ASTM E8M-04 규격에 의거하여 Transverse 방향으로 제작하였다. 인장 시험 속도는 KS규정(KS B 0801 13-A)에 의거하여 3mm/min로 설정하였다. Fig. 4.3에 SS400의 수평용접을 위한 시험편 형상을 나타내었으며, Table. 4.2에 시험편의 규격을 나타내었다.



- (주)MTDI社 UT-100F
- Load capacity : $\pm 10\text{tonf}$
- test speed : 0.0005 ~ 1000mm/min

Fig. 4.2 Tensile test equipment

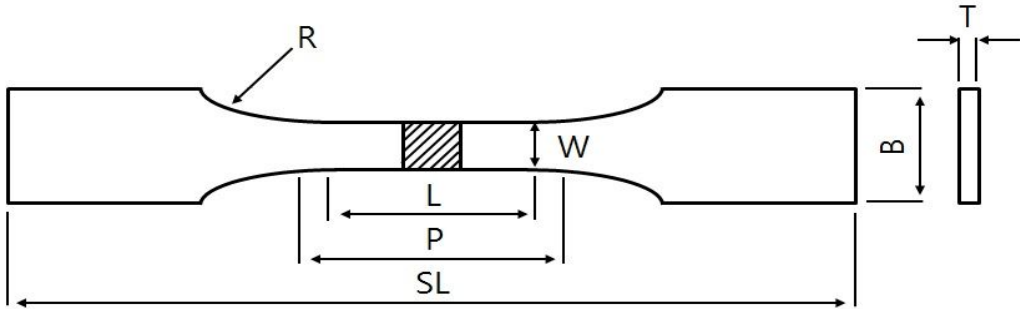


Fig. 4.3 Dimension of tensile test specimen (3mm)

Table. 4.2 Configuration of tensile test specimen

Item	W	L	P	R	T	B	SL
3t	20mm	80mm	120mm	20mm	3mm	30mm	280mm
Values	○ W : Width		○ L : Gauge length		○ R : Radius of fillet		○ T : Thickness
	○ P : Length of reduced section		○ B : Width of grip section		○ SL : Over-all length		

4.2 결과 및 고찰

4.2.1 비드 특성

3t Carbon Steel SS400강재의 GTAW 및 RMD-GMAW 초층용접을 위한 최적 조건을 선정한 후 맞대기 용접을 실시하여, 용접부의 비드형상과 이면용접부의 비드형상 특성을 고찰하였다. Table. 4.3과 Table. 4.4에 두 공정의 용접 후 비드 형상과 단면적을 나타내었다.

개선각 37.5°, 갭이 3.2mm일 때, 두 가지 용접 공정 시 탑비드와 이면비드 모두 양호한 형상을 보였다. GTA 용접에서는 이면재(백킹재)를 사용하였음에도 불구하고 이면비드(Back bead)가 거의 미미하게 나타났으며, RMD-GMA 용접에서는 약 1.6mm정도로 안정적인 이면비드가 형성된 것을 육안으로도 확인할 수 있었다. 또한 비드 쪽에서도 GTAW보다 RMD-GMAW의 비드가 더 두텁게 쌓이는 것으로 확인할 수 있었다. 아울러 앞서 제2장 RMD-GMAW의 원리 중 전기적 특성에서 고찰한 바와 같이 RMD-GMAW Process가 GMAW의 한 방식임에도 불구하고 스파터가 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 후처리(cleaning)공정이 없어도 될 만큼 안정적인 비드 형상을 관찰 하였고 TIG와 비교해도 손색이 없음을 확인할 수 있었다.

Table. 4.3 Bead profiles of GTAW (37.5° bavel & 3.2mm gap size)


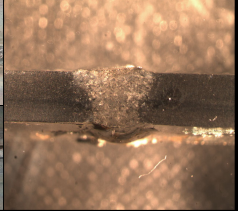

Welding conditions GTAW		GTAW Bead appearance		Cross section
Groove angle	Gap			
37.5°	3.2mm	Top Bead		
		Back bead		

Table. 4.4 Bead profiles of RMD-GMAW (37.5° bavel & 3.2mm gap size)

Welding conditions RMD-GMAW		RMD-GMAW Bead appearance		Cross section
Groove angle	Gap			
37.5°	3.2mm	Top Bead		
		Back bead		

Fig. 4.4에서 보듯이 RMD-GMA 용접 시 Bead 두께가 일반적인 GTA 용접 보다 두터운 것을 육안으로 확인 할 수 있었으며, Back Bead(이면비드) 역시 Fig. 4.5 에서 보듯이 약 1.6mm 두께의 이면비드가 형성됨을 확인 할 수 있었다.

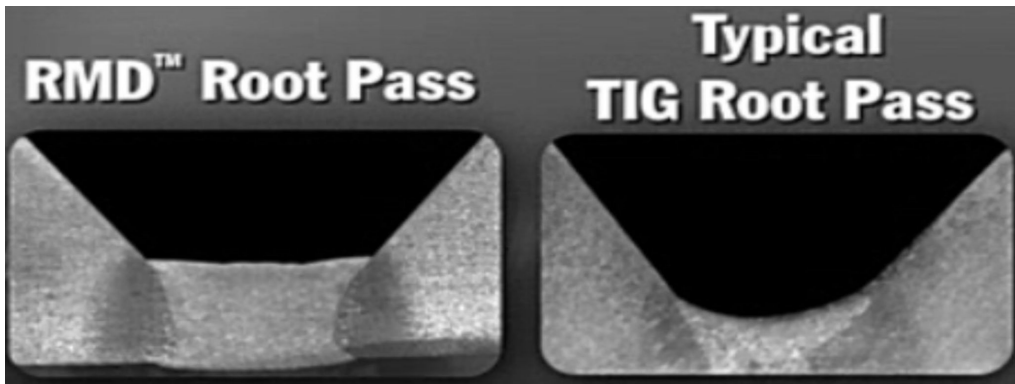


Fig. 4.4 Cross section of RMD-GMAW & GTAW test specimen

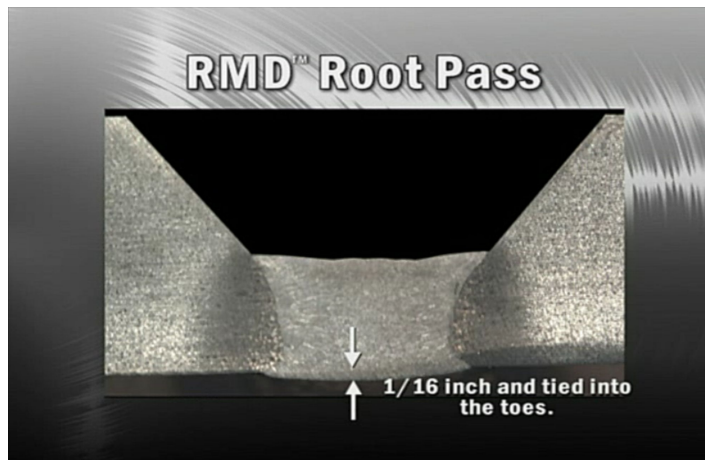


Fig. 4.5 Cross section of RMD-GMAW test specimen

4.2.2 경도 분포 특성

Fig. 4.6은 개선각 37.5°, 갭 3.2mm 일 때, GTAW 및 RMD-GMA 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 용접부의 경도분포는 시편의 용접 이음부 단면의 횡방향으로 0.5mm 간격으로 측정하였다.

GTAW 및 RMD-GMAW의 용접부의 경도분포를 비교하여보면, 전반적인 경도 분포가 비슷하나 RMD-GMA 용접부의 최고 경도 값이 약 185HV로 나타났으며, GTA 용접부의 최고 경도값은 약 169HV로 나타났다. 따라서 RMD-GMA 용접의 용접부가 GTA 용접의 용접 이음부 대비 약 15HV가 높은 것으로 보아 RMD-GMA 용접이 GTA 용접을 충분히 대체 할 수 있다고 사료된다.

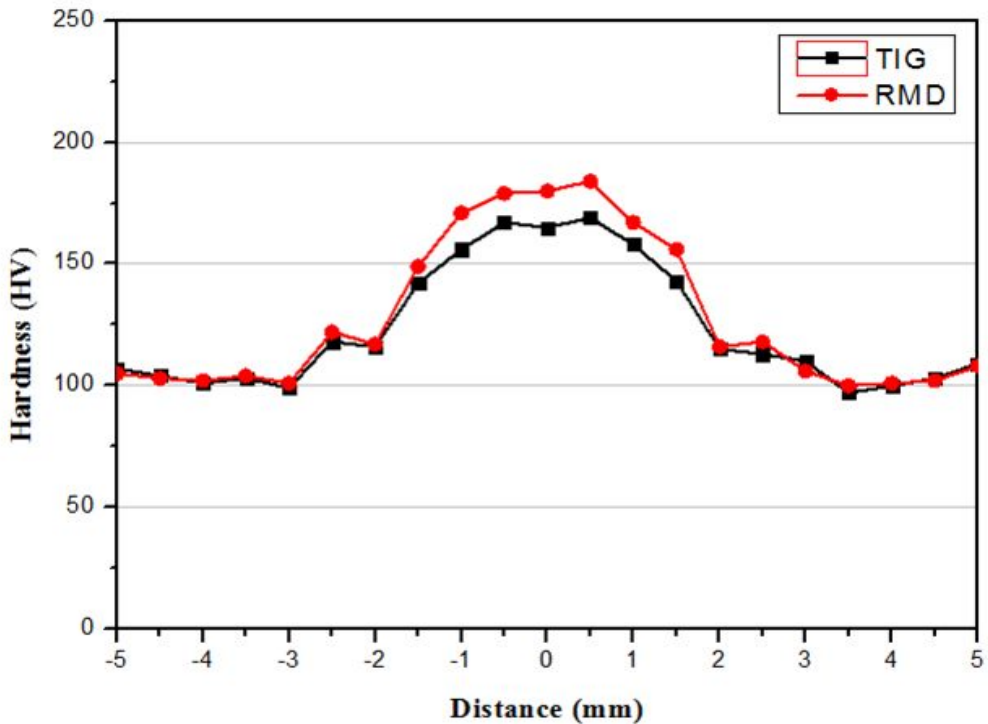


Fig. 4.6 Comparative of GTAW and RMD-GMAW Hardness graph

4.2.3 미세조직

Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 GTA 용접과 RMD-GMA 용접의 용접부를 광학현미경을 이용하여 각 영역별 용접금속부(WM), 열영향부(HAZ) 그리고 모재부(BM)의 미세조직을 관찰한 사진이다.

미세조직 평가 결과, 두 용접의 용접부 모두 비슷한 양상의 Ferrite 조직이 관찰되었음을 볼 수 있다. RMD-GMA 용접의 용접금속부에서 Acicula Ferrite와 Ferrite side plate 조직이 GTA 용접에 비해 더 조밀하게 형성되어 있어 이러한 미세조직 특성으로 인해 더 높은 경도 값을 얻은 것으로 판단된다. 열영향부에는 두 용접 모두 결정립 조대화가 일어났으며, RMD-GMA 용접의 열영향부에서는 Acicula Ferrite 조직이 다소 발달한 것을 관찰하였다.

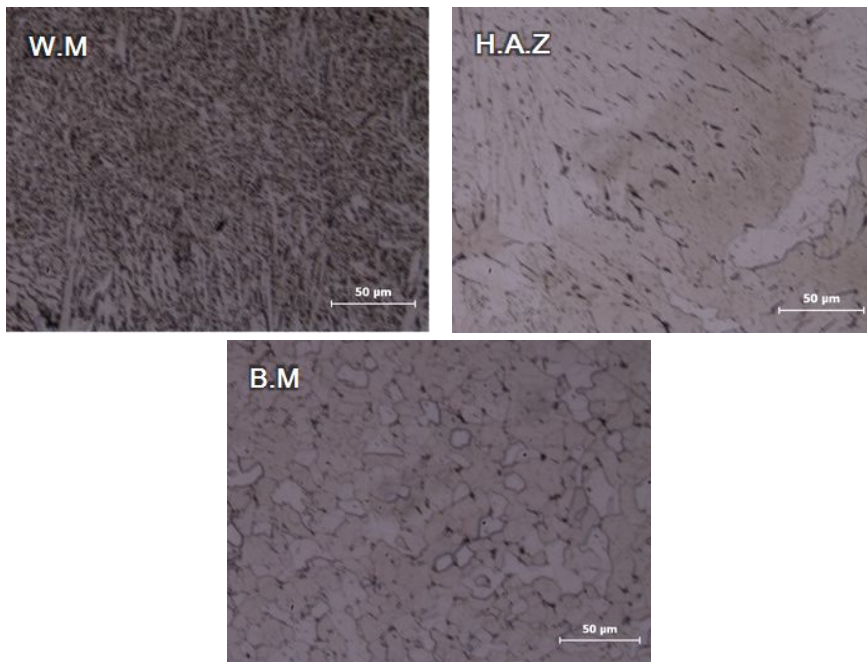


Fig. 4.7 Micro structures in RMD-GMAW

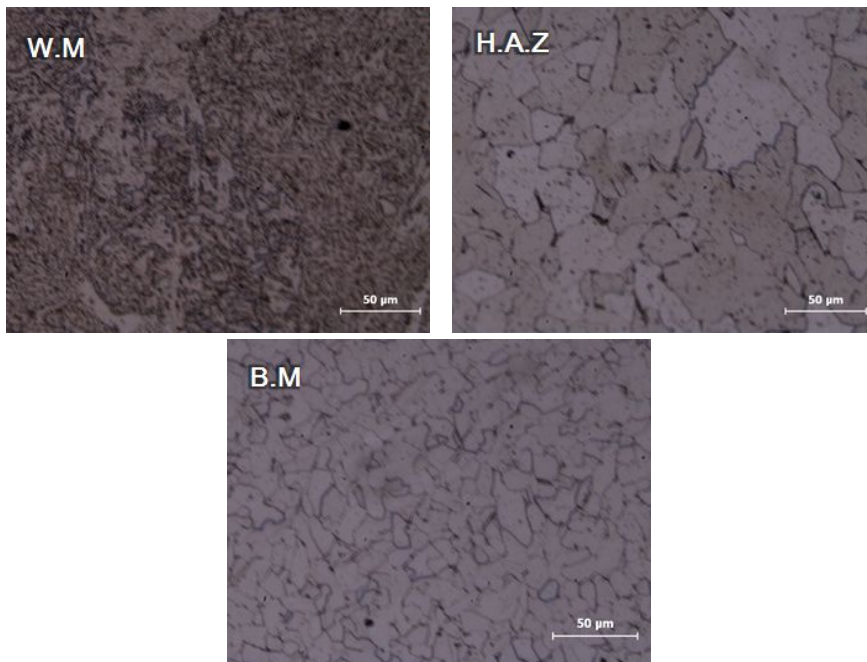


Fig. 4.8 Micro structures in GTAW

4.2.4 인장 강도 특성

용접부의 건전성을 확인하기 위하여 ASTM E8M-04 인장시험 규격에 의거하여 인장강도 특성을 나타내었다. Fig. 4.9는 도출된 최적 조건으로 실험을 수행한 3t SS400에 GTA 용접 및 RMD-GMA 용접의 용접부의 Stress-Strain Curve를 나타내었다.

갭 3.2mm, 개섩각 37.5°의 조건에서 3t SS400 강재를 GTA 및 RMD-GMA 용접을 실시한 후, 용접부를 총 6회에 걸쳐 실험 결과, GTAW로 용접 된 시편의 최대 인장강도의 평균 값은 351.102MPa, RMD-GMAW로 용접 된 시편의 최대 인장강도의 평균 값은 349.993MPa이다. GTAW 및 RMD-GMA 용접 시험편 모두 모재 파단이 발생하였기 때문에 용접 이음부가 건전한 것으로 판단할 수 있었으며, RMD-GMA 용접의 연신율이 GTA 용접 대비 약 7~8%낮은 것을 확인하였다.

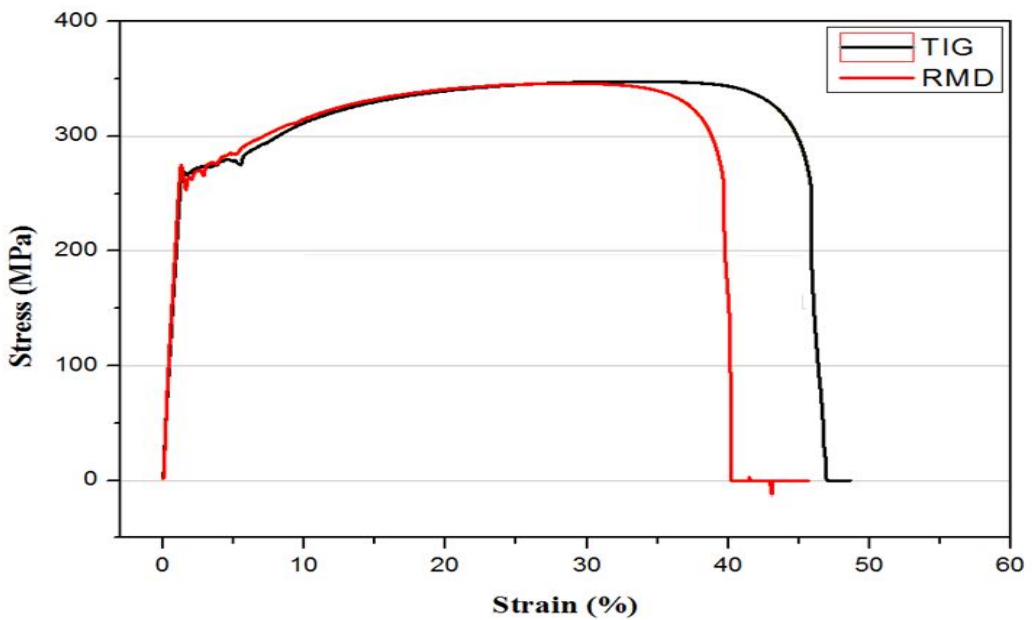


Fig. 4.9 Stress-Strain Curve of SS400 TIG and RMD welds (3mm)

Fig. 4.10에 GTAW 시험편의 인장테스트 후 파단 된 모습을 나타내었고, Fig. 4.11에 RMD-GMAW 시험편의 파단 된 모습을 나타내었다.



Fig. 4.10 Fractured specimen of GTAW after SS400 tensile test



Fig. 4.11 Fractured specimen of RMD-GMAW after SS400 tensile test

제 5 장 결 론

본 연구에서는 해상구조물 제작 및 배관(Pipe)용접 등에 고비용, 비생산적인 GTA 용접 공정이 많이 적용되고 있는 부분을 Miller社에서 개발한 RMD-GMAW process를 적용하여 초충용접에 있어서 기존의 GTA 용접을 대체할 수 있는지에 대한 연구를 진행하였다. Carbon Steel SS400강재(3mm)에 대하여 맞대기 용접을 실시하여 기계적 특성 평가와 금속학적 특성을 평가하였다. 인장, 경도, 미세조직을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각 공정별(GTAW 및 RMD-GMAW) 맞대기 용접의 용접부 비드 특성 평가 결과, 두 가지 용접 공정 시 탐비드와 이면비드 모두 양호한 형상을 보였다. 특히 RMD-GMA 용접에서는 이면재 및 Purge Gas를 활용하지 않았음에도 불구하고 약 1.6mm정도의 안정적인 이면비드가 형성된 것을 확인 할 수 있었다. 또한 스파터 및 용접결함이 발생하지 않아 후처리 공정이 필요 없을 만큼 우수한 비드 특성을 확인하였다. 그리고 방사선 투과검사 결과, 기공이나 슬래그 혼입 등 내부결함이 발생하지 않았음을 확인함으로써 충분한 용입이 이루어졌다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 인장강도 평가 결과, GTAW로 용접된 시편의 최대 인장강도의 평균 값은 약 351MPa, RMD 용접의 최대 인장강도의 평균 값은 약 350MPa으로 비슷한 수준의 인장강도를 확인 하였으며 GTAW 및 RMD-GMA 용접 시험편 모두 모재에서 파단이 발생해 건전한 용접부를 확보하였다.
- 3) 경도시험 결과, 개선각 37.5°, 갭 3.2mm의 조건에서 RMD-GMA 용접 이음부의 최고 경도 값이 약 185HV로 나타났으며, GTA 용접 이음부의 최고 경도 값은 약 169HV로 나타났다. RMD-GMA 용접의 경도 값이 GTA 용접 대비 약 15HV가 높은 것으로 보아 RMD-GMA 용접이 GTA 용접을 충분히 대체 할 수 있는 것을 알 수 있었다.

- 4) 미세조직 평가 결과, 두 용접의 용접부 모두 비슷한 양상의 Ferrite 조직이 관찰되었음을 볼 수 있었다. RMD-GMA 용접의 용접금속부에서 Acicula Ferrite와 Ferrite side plate 조직이 GTA 용접에 비해 더 조밀하게 형성되어 있어 이러한 미세조직 특성으로 인해 RMD-GMA 용접 방식이 더 높은 경도 값을 얻은 것으로 판단된다.

※ 앞서 제3장에서 맞대기 시험편 제작시 함께 제작 된 실제 현장에서 초층용접을 하고 있는 SS400 Pipe 시험편에 GTA 용접과 RMD-GMA 용접을 실시 하였으며, RMD-GMAW Process의 생산성이 확실히 뛰어나다는 결과를 확인 할 수 있었다. Table. 5.1에 Pipe 초층용접을 위한 용접 조건을 나타내었다.

Table. 5.1 Welding Parameters of RMD-GMAW Process (SS400 Pipe)

Welding parameter		Values
RMD GMAW	Position	1G
	Voltage(V)	16
	Current(A)	80
	Shielding Gas(ℓ/min)	Ar. 80% / CO2 20%(25ℓ/min)
	Torch Angle(deg)	10°~15°
	Gap size(mm)	3.2
	Bevel Angle(deg)	37.5
	Backing material	-

다음으로 Fig. 5.1은 Pipe 용접 시험편과 3.2mm Tungsten 봉을 이용하여 Root Gap을 설정한 모습을 나타내었다.

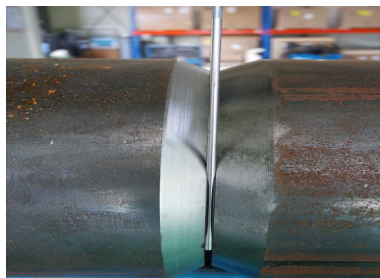


Fig. 5.1 Configuration of SS400 Pipe

RMD-GMAW Process를 이용하여 Pipe 용접 시, 용접방향은 하진 용접으로 진행하였으며, Fig. 5.2는 RMD-GMA 용접 공정의 Arc형상을 나타내었다.



Fig. 5.2 Congiguration of RMD-GMAW Process

RMD-GMAW Process로 Pipe 초층용접 후 Top bead 형상 및 Back bead 형상을 Fig. 5.3에 나타내었다.



Top Bead

Back Bead

Fig. 5.3 Appearance of Top bead & Back bead in RMD-GMAW

GTA 용접과 RMD-GMA 용접의 생산성 비교를 위한 실험으로 분당 작업 속초를 측정하여 그 결과를 아래 Fig.5.4와 Fig. 5.5에 나타내었다.



Fig. 5.4 Comparative of Root Pass welding on SMAW, GTAW, RMD-GMAW

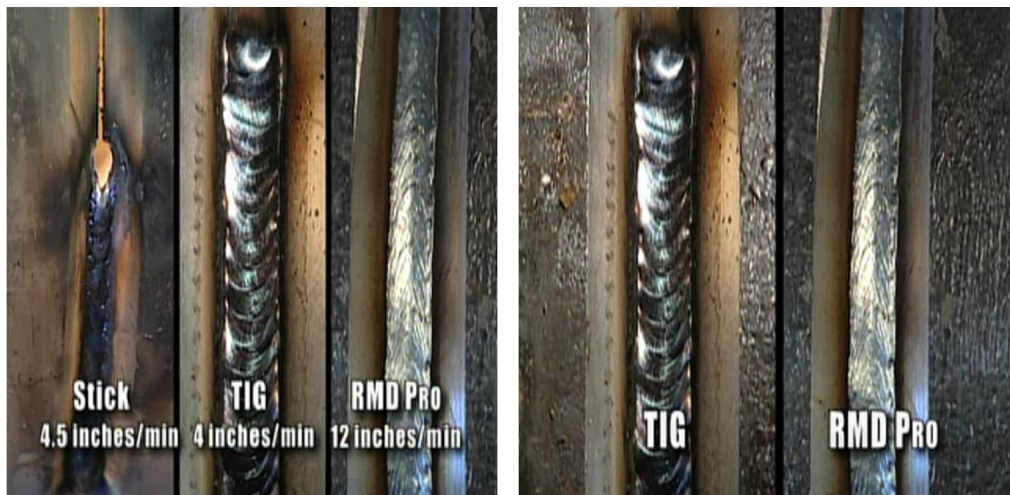


Fig. 5.5 Comparative of bead on Root Pass welding

현재 용접 현장에서 GTA 용접사의 일당은 평균 약 20만원 선이며, CO2용접사의 평균 일당은 약 15만원 선이다. 간단하게 인건비만을 놓고 비교를 해보아도, 30일 작업 시 인건비에서만 약 150만원을 절약 할 수 있는 셈이다. 또한 본 연구 실험에서 확인하였지만, 초층용접 시 RMD-GMAW Process 방식을 적용 시, 이면재와 Purgr Gas 없이 이면비드 형성이 가능함으로 재료비용 면에서도 GTA 용접 공정보다 비용이 저렴함을 확인 할 수 있었다. 또한 같은 제품을 두고 작업을 진행한다고 가정 시, RMD-GMAW Process를 적용한다면 작업 시간은 최소 3배 이상 차이가 날 것으로 인건비는 더욱 더 절감 할 수가 있을 것으로 사료된다.

초층용접이 용접사의 높은 기량이 제품 생산 품질과 공기(납기)에 큰 영향을 미치는 점을 감안 할 때, RMD-GMAW Process를 적용 시, 기량이 풍부하지 않은 일반 용접사들 혹은 용접 기술이 없는 현장 작업자들을 하루 정도 장비 교육을 실시하여 초층용접을 실시한다면, 상당한 비용 절감과 생산성 향상을 가져 올 것이라는 것을 본 연구 실험을 통해 확인 할 수 있었다.

따라서 본 논문 연구에서 중점적으로 확인하기로 하였던 비용 절감과 생산성의 증가를 진행 된 실험을 통해 확연히 비교 분석 및 입증 하였다고 할 수 있겠다. 초층용접(Root Pass Welding)에 있어서 기계적 성질 및 수려한 외관 등의 이유로 기존 현장에서 적용되고 있는 고비용, 저생산성의 GTAW 공정을 저비용, 고생산성의 RMD-GMAW Process로 대체함으로써 최소 3배 이상의 생산성과, 절반이상의 비용 절감을 가져 올 수 있음을 확인하였다.

Reference(참고 문헌)

- [1] H.S.Bang : The Optimization of Welding Design on Butt Welded Joint, Journal of KWJS, 1994, Vol.2, pp82-84
- [2] H.S.Bang, S.W.Kang, K.S.Kim, J.M.Kim : The Optimization of Welding Design on Butt Welded Joint = Butt 용접이음부의 형상 최적화, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, Vol.1994 No.1, [1994]
- [3] S.H.bang, S.H.Kim, Y.P,Kim, C.W.Lee : A Study on the Effect of Gap at the Root of Fillet Welded Joint = 필릿용접 루트부 Gap의 영향에 관한 연구, 大韓造船學會 論文集(Journal of the Society of Naval Architects of Korea) Vol.39 No.3 [2002]
- [4] J.M.Kim, C.S.Park, H.S.Bang : A Fundamental Study on the Welding Deformation Mechanism = 평판 맞대기 용접시 변형 발생기구 규명에 관한 기초적 연구, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, Vol.2001 No.1, [2001]
- [5] S.M.Joo, B.H.Yoon, W.S.Chang, H.S.Bang, H.S.Bang, C.S.Ro : Redistributions of Welding Residual Stress for CTOD Specimen by Local Compression = Local compression에 의한 CTOD 시편내의 용접잔류응력 재분포, 대한용접·접합학회지, Vol.27 No.6, [2009])[KCI등재]
- [6] H.S.Bang : A Study on The Characteristics of Heat Distribution of Welded Joint on The Steel Structure with Thick Plate, Journal of KWS, 1995, Vol.13, No1, pp570-576
- [7] K.M.Lee : Cryogenic Experiments and Structural Analysis of High manganese Steel for the Application of Onshore LNG Storage Tank, 인하대학교, 석사 2014
- [9] Y.G.Yoon : Selection of Optimal Welding Condition in GMAW Welding of V-Groove Butt Joint = 맞대기 V-그루브 GMA 용접에서 최적용접 조건의 선정에 관한 연구. 영남대학교, 석사 2010

- [10] Y.G.Yoon : GMAW 초층용접에서 이면비드 생성을 위한 최적 용접 조건의 선정. 영남대학교, 2010
- [11] B.H.Kim : Effects of the projected length of wire, electric current and voltage about the material in the GMAW = GMA 용접에서 와이어의 돌출길기와 전류 및 전압이 재료에 미치는 영향. 경남대학교, 2010
- [12] J.H.Lim : GMAW를 이용한 V형 맞대기용접에서 용접부 개선각 변화에 따른 용접 특성 연구.
- [13] S.H.Kim : A Study on the Effect of Welding Current for Static Behavior of SS400 = 용접전류가 SS400의 정적거동에 미치는 영향에 관한 연구. 서울산업대학교, 석사 2010
- [14] J.S.Kim : GMA 용접 시 보호가스 변화에 따른 TRIP 60 강재의 기계적 물성 특성. 2012
- [15] S.C.Yoon : 맞대기 V-그루브 이음 초층 용접에서 최적의 용접조건의 선정. 영남대학교, 2009
- [16] J.S.Seo : Effects of Porosity Formation on Shielding Gas and Welding Conditions for HSLA Steel Welding, Journal of KWJS, 2012, Vol.30, No4, pp300-303
- [17] S.E.Seo, M.I.L, M.S.Song, Y.J.Bae : 신월성 1,2호기 TGB 대구경 배관 FCAW 적용을 통한 생산성 향상 사례. KEPIC WEEK 2010 발표.
- [18] Evaluation of conventional and controlled Short-Circuit GMAW Processes for Foot Pass in Pip Welding. Rio Pipeline conference & Exposition 2013.
- [19] ANSI/AWS D10.12M/D 10.12-2000. Guide for Welding Mild Steel Pipe. 49p., 2000.
- [20] API 1104:2010. Welding of Pipelines and Related Facilities. 84p., 2010.
- [21] HASHMOTO, T., MORIMOTO, T. : Reduction of Spatter produced by basic welding electrodes. Welding Journal, v. 75, p.312-316, 1996.
- [22] SILVA, R. H. G : MIG/MAG welding with controlled short-circuit metal

- transfer applied to root pass. Master Dissertation, UFSC, Brazil, 128p., 2005.
- [23] Jim.C : AWS New Welding Technologies the Key to Higher Productivity / Controlled Short Circuit GMAW-Root Pass Pipe Welding. Miller Electric MFG. Co. 2012.
- [24] Jeff.F : Controlled Waveform, Low Heat Input GMAW for Reduced Distortion in Shipbuilding Applications. NSRP Welding Technology Panel Meeting Miami, FL. 2014.
- [25] Y.S.Kim, H.S Ryoo, H.J.Kim, S.C.Oh : A Review of Welding Current Waveform Control and Mechanical Control Technique for Reductuin of Spatter in Short Circuit Transfer, Journal of KWJS, Vol.25, 2007
- [26] J.Y.Lim : 구조용 압연강재(SS400)와 스테인리스강재(STS304)의 CO₂ / MIG 용접에 의한 기계적 특성. 경일대학교, 석사 2013.
- [27] H.J.Kim, Y.S.Kim : Concept of waveform control for the reduction of CO₂ welding spatter, Welding J. KWS, 16-3(1998), 18-28 (in Korean)
- [28] Korea Evaluation Institute of Industrial Technology : 에너지산업 전망에 따른 금속소재 개발 전략, 2012