



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](#)

February 2016

Master's Thesis

Weldability and Mechanical  
Behavior of the Thin Plate  
Cryogenic High Manganese Steel

Graduate School of Chosun University

Department of Welding and Joining Science  
Engineering

Seung-yeop Baek

# Weldability and Mechanical Behavior of the Thin Plate Cryogenic High Manganese Steel

극저온용 박판 고망간강의 용접성 및 역학적 거동

February 25, 2016

Graduate School of Chosun University

Department of Welding and Joining Science  
Engineering

Seung-yeop Baek

# Weldability and Mechanical Behavior of the Thin Plate Cryogenic High Manganese Steel

Advisor : Professor Hee-seon Bang

A Thesis submitted for the degree of  
Master of Engineering

October 2015

Graduate School of Chosun University

Department of Welding and Joining Science  
Engineering

Seung-yeop Baek

Seung-yeop Baek's Master  
Thesis is certified.

Commitee Chair Chosun Univ. Prof. Han-sur Bang

Member Chosun Univ. Prof. Hee-seon Bang

Member Chosun Univ. Prof. Sung-min Joo

November 2015

Graduate School of Chosun University

# CONTENTS

List of Figures .....	III
List of Tables .....	IV
Abstract .....	V
1장. 서론 .....	1
1 . 1 연구배경 .....	1
1 . 2 연구목적 .....	3
1 . 3 연구방법 .....	6
2장. 고망간강 FCAW 용접공정 개발 .....	8
2 . 1 실험 세부사항 .....	8
2.1.1 실험 재료 및 장비 .....	8
2.1.2 실험 방법 .....	11
2.1.3 용접 조건 .....	13
3장. 용접부 기계적 및 금속학적 특성 평가 .....	17
3 . 1 용접부 성능평가 및 미세조직 특성 .....	17
3.1.1 비드 특성 평가 .....	17
3.1.2 비파괴 검사 .....	18
3.1.3 인장 강도 .....	19
3.1.4 경도 .....	21

3.1.5 피로 강도 .....	23
3.1.6 굽힘 강도 .....	24
3.1.7 미세조직 .....	26
3 . 2 결과 및 고찰 .....	27
3.2.1 비드 특성 .....	27
3.2.2 내부결함 특성 .....	31
3.2.3 인장 강도 특성 .....	34
3.2.4 경도 분포 특성 .....	38
3.2.5 피로 강도 특성 .....	39
3.2.6 굽힘 강도 특성 .....	41
3.2.7 미세조직 특성 .....	42
4장. 결 론 .....	44
참고문헌 .....	46

## List of Figures

Fig 1.1	Fe-Ni and Mn Phase diagram .....	5
Fig 1.2	Fe-Mn and Fe-Mn-C system Phase diagram .....	5
Fig 1.3	Flow chart of thesis .....	7
Fig 2.1	Schematic diagram of 18% High Mn steel and STS304L (3mm) .....	9
Fig 2.2	Schematic diagram of 18% High Mn steel (3mm) .....	9
Fig 2.3	Welding system of FCAW .....	10
Fig 2.4	Configuration and dimension of test specimen (19mm) .....	12
Fig 3.1	Tensile test equipment .....	19
Fig 3.2	Dimension of tensile test specimen (3mm and 19mm) .....	20
Fig 3.3	Fatigue test equipment .....	21
Fig 3.4	Dimension of fatigue test specimen (3mm) .....	22
Fig 3.5	Dimension of bending test specimen (3mm and 19mm) .....	23
Fig 3.6	Vickers hardness test scheme and equipment .....	24
Fig 3.7	Stress-Strain Curve of High Mn steel FCA Welds (3mm) .....	35
Fig 3.8	Stress-Strain Curve of STS304L FCA Welds (3mm) .....	35
Fig 3.9	Tensile strength of FCA Welds (3mm) .....	36
Fig 3.10	Fractured specimen after High Mn steel tensile test (3mm) .....	37
Fig 3.11	Fractured specimen after STS304L tensile test (3mm) .....	37
Fig 3.12	Fractured specimen after High Mn steel tensile test (19mm) .....	37
Fig 3.13	Hardness distributions of FCA welds .....	38
Fig 3.14	S-N Curve for High Mn steels .....	40
Fig 3.15	S-N Curve for STS304L .....	40

Fig 3.16 High Mn steel and STS304L specimen after bending test (3mm) .....	41
Fig 3.17 High Mn steel specimen after bending test (19mm) .....	41
Fig 3.18 SEM observation in different locations of FCA welds .....	42
Fig 3.19 SEM observation in base metal .....	43
Fig 3.20 SEM observation in weld metal .....	43
Fig 3.21 SEM observation in HAZ .....	43

## List of Table

Table 2.1	Material properties of 18% High Mn steel and STS304L	8
Table 2.2	Heat input for welding parameters	14
Table 2.3	KR rules and regulations	15
Table 2.4	Welding parameters of FCAW (3mm)	15
Table 2.5	Welding parameters of FCAW (19mm)	16
Table 2.6	Welding parameters of specimen for wire and shielding gas (19mm)	16
Table 3.1	ISO 5817 Quality levels for imperfections	17
Table 3.2	Configuration of tensile test specimen	20
Table 3.3	Configuration of fatigue test specimen	22
Table 3.4	Fatigue test condition for dissimilar materials	22
Table 3.5	Hardness testing condition	25
Table 3.6	Bead profiles of welds for groove angle(0°) in different gap size	28
Table 3.7	Bead profiles of welds for groove angle(40°) in different gap size	28
Table 3.8	ISO 5817 Quality levels for imperfections (Groove 0°)	29
Table 3.9	ISO 5817 Quality levels for imperfections (Groove 40°)	30
Table 3.10	Radiographic test for specimen (3mm)	32
Table 3.11	Radiographic test for specimen (19mm, 2G-Case1)	32
Table 3.12	Radiographic test for specimen (19mm, 2G-Case2)	32
Table 3.13	Radiographic test for specimen (19mm, 2G-Case3)	33
Table 3.14	Tensile strength of FCA Welds (19mm)	36
Table 3.15	Fatigue test results (3mm)	39

## ABSTRACT

### 극저온용 박판 고망간강의 용접성 및 역학적 거동

Seung-yeop Baek

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

Department of Welding and Joining  
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, Due to the gas resources and shale gas resources development such as shipbuilding and shipping industry demand for LNG market is steadily increasing.

In addition, Green-ship demand has increased because IMO strongly regulated ship exhaust gas regulations. Hence high-efficiency, electric propulsion, Green ship-related research has expanded. Because LNG propulsion ship is rated as the most realistic alternative, demand has been gradually increased. In the future, demand of the LNG cargo and LNG Tank is expected to increase significantly.

The material used in LNG cargo and fuel tank must keep excellent ductile characteristics under the cryogenic environment, down to  $-163^{\circ}\text{C}$ , in order to avoid the sudden catastrophic brittle fracture during the operation condition. STS, Ni steel and Al alloy used in LNG tank has a excellent cryogenic properties. Currently, High Manganese steel is considered to be alternative material. The conventional alloy steel are expensive because of high Ni content. On the other hand, austenitic High Manganese steel have the advantage of low cost and high yield strength because of high Mn content.

In this study, the world's first 3t 18% High Manganese for adoption of LNG tank were carried out by FCAW. High Manganese with 3mm

thickness is used for this study as base metal. The optimum welding parameters were voltage, ampere, shielding gas, flow rate, C.T.W.D and welding speed. The detailed parameters are as follows. Voltage : 25V, Ampere : 170~180A, Shielding gas : Ar and CO<sub>2</sub> mixture gas, Flow rate : 20ℓ/min, C.T.W.D : 17~18mm, Welding speed : 34.3cm/min.

The weldability was evaluated in terms of mechanical and metallurgical characteristic. The average yield and tensile strength of the FCA welded joints was 385.6 MPa and 598 MPa, which is approximately 91% and 63.2% of base metal. The fracture occurred in welded joints after tensile test. The Vickers hardness were found about 269HV for base metal, and 153HV for welded joints. The fracture occurred in welded joints.

Welded joints quality was evaluated according to ISO 5817(Undercut, Excess weld metal, Excess penetration, Incorrect weld toe, Overlap, Linear misalignment). The result for estimate welded joints could be obtained quality level for stringent(B).

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

최근 조선·해운 업계는 가스자원 개발 및 셰일가스 개발에 따라 LNG 시장의 수요가 크게 증가하고 있다. 또한 전 세계적으로 강화되는 환경규제로 가스 연료의 경제성이 부각되면서 가스 연료 엔진의 상용화 속도가 빨라지는 추세이다.

IMO는 발틱해, 북해, 미국의 일부 해역에 2012년부터 배출가스 통제구역을 설정하여 HFO보다 황 함유량이 적은 청정연료를 사용하도록 규제하고 있으며, 청정해역에 대한 요청 증가로 대상을 확대하고 있다. 또한 선박에서 배출되는 질소산화물(NOx)도 Tier III 규제 적용으로 현재 Tier II 수준보다 총량 대비 75% 감축을 해야한다. IMO는 향후 온실가스 배출량을 2005년 기준으로 2020년까지 20%, 2050년까지 50% 감축을 목표로 설정하고, 2013년 1월부터 건조되는 신조선에는 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 규정을 준수한 선박만을 건조 운영되도록 규제를 강화하고 있는 추세이다. 우리나라는 환경규제 강화 및 고유가 대비 추세에 발맞추어 최근 한국가스공사를 포함한 조선사, 해운사 등 15개 회원사로 'LNG 병커링 협의체'를 발족하고, LNG 추진선박과 LNG 병커링 기술 개발 및 표준화, 제도 개선등의 업무를 추진 중이다.[1]

LNG 연료 엔진을 선박에 적용할 경우 황산화물(SOx) 저감 문제를 해결할 수 있고, CO<sub>2</sub> 관련 EEDI 지수를 20%정도 줄일 수 있다. 특히, 셰일가스의 상용화로 인한 천연가스의 안정된 공급은 이러한 움직임에 힘을 불어넣고 있다.

최근 LNG 시장의 수요가 크게 증가함에 따라 연료 Tank 기술 및 개발 등이 진행되면서, 극저온 특성이 우수한 강에 대한 요구가 증대되고 있다.

국내 연구 동향으로는 극저온용 고망간강 강재의 국가표준(KS) 제정으로 시장의 신뢰성을 확보해 기존의 극저온용 소재인 Si합금, STS 304강, 9% Ni강, Invar강 등을 대체할 수 있게 되었다. 극저온용 소재는 2020년에 약 1.4조원의 국내 시장을 형성할 것으로 예측되고 고망간 강재를 사용할 경우 재료 가격 및 시공비 등을 포함하여 기존의 극저온용 소재 대비 약 50%~75%의 원가절감을 할 수 있어 국내 조선 및 플랜트 등 관련 업계의 경쟁력 강화에 기여할 것으로 예상된다.

문헌에 따르면, 고망간 강재 예상 소요 비용으로 Si합금을 100%로 기준했을 때, STS 304강은 128%, 9% Ni강은 205%인 반면에 고망간강은 56% 수준에 불과했다. LNG-FPSO, LNG-Fueled Ship, LNG-Carrier와 같은 LNG 관련 선박 및 저장장치 소재의 시장 규모는 해마다 증가하고 있는 추세이다. 현재 톤당 350만원 수준으로 2020년 약 1.4조원 국내 시장을 고망간강이 대체할 수 있을 것으로 예상된다. 고망간강은 기존 소재 대비 높은 가격 경쟁력으로 국내외 시장 확대에 기여할 것으로 예상된다.[2]

극저온 특성이 우수한 강에 대한 요구와 에너지 관련 산업이 크게 증대됨에 따라 Green-ship 수요가 증가하였고, 고연비선박, 전기추진선 및 Natural 추진선 등의 Green ship 관련 연구가 확대되고 있다. 이들 중 LNG Carrier, LNG FPSO, LNG 육상탱크 등 중단기적으로 가장 현실적인 대안으로 평가되어 실선 적용이 증가되고 있다. 이러한 이유로 LNG Tank를 포함한 LNG 화물창의 수요가 크게 증가할 것으로 예측된다.[3]

## 1.2 연구목적

LNG 화물창 및 연료 Tank에 사용되는 강재는 LNG의 특수성에 의해 극저온 ( $-163^{\circ}\text{C}$ )에서 성능이 우수해야한다. 육상 탱크에 비해 충격 하중이 발생할 가능성이 높고, 이로 인한 취성파괴를 피하기 위해 우수한 연성성질을 유지해야 한다.[4]

현재 LNG Tank에 사용되고 있는 STS강, Ni강, Al합금 등은 극저온에서 우수한 성능을 가지고 있는 강재들이다. 현재는 이러한 강재들을 대체하여 고망간강이 새롭게 주목받고 있다. 기존에 주로 사용되던 페라이트를 주조적으로 하는 탄소강은 저온 영역에서 특히 연성이 크게 저하되는데, 이는 저온 영역으로 내려가면 항복강도가 급격히 상승하여 취성 파괴를 야기하는 문제점을 나타내었다. 이러한 특성의 한계를 나타냄에 따라 이들의 단점을 극복하는 대체재로 그 적용이 증가하고 있는 추세이다.

기존 대표적인 오스테나이트계 강재로는 오스테나이트계 스테인레스 강인 AISI(18Cr-8Ni계)가 있다. 그러나 기존 강재는 항복강도가 낮아 구조 재료로 적용하기에는 문제점이 있으며 고가의 원소인 Ni을 다량 함유하여 비경제적이기 때문에 그 용도 및 적용에 한계가 존재하였다. 오스테나이트 안정화 원소인 Mn은 공식 온도를 낮추고 오스테나이트 영역을 확대시킨다. Fig 1.1을 보면 Mn은 Ni 합금함량 대비 약 1.4% 효과를 얻을 수 있으므로, 고망간강은 니켈합금강 및 오스테나이트 스테인리스강과 비교하여 상당히 경제적인 강재에 해당함을 알 수 있다.

오스테나이트계 고망간강은 Mn의 함량을 높여 경제적이고 용접 열영향부에서 발생하는 인성 저하의 문제가 해결되고, 내식성 또한 뛰어나다. 상온에서 안정한 오스테나이트 단상을 가지고, 소성변형 중 오스테나이트 결정립 내에 기계적 쌍정을 발생시켜 전위의 이동을 방해함으로써 가공 경화를 추가로 얻어 우수한 연신율을 갖을 뿐만 아니라 높은 인장강도와 기존의 합금강들보다 항복강도가 높다는 장점을 가지고 있다.

Fig. 1.2는 Fe-Mn 이원계 상태도와[5], Fe-Mn-C 삼원계 상태도를 나타낸 것이다.[6] Fe-Mn 이원계 상태도에 의하면 Mn의 첨가는 오스테나이트 상 영역을 확장시켜 준다. 상온에서 5wt% Mn 이하에서는 페라이트가 존재하고, 5wt% Mn을 초과하게 되면 페라이트와 오스테나이트가 공존하게 된다. Mn이 30~50 wt% 첨가 되면 상온에서도 존재할 수 있을 정도로 오스테나이트 상이 안정화되는 경향을 보인다. Fe-Mn-C 삼원계 상태도에 의하면 동일한 Mn에서는 C의 첨가량이 증대될 수록 오스테나이트 상이 안정화되는 것을 알 수 있다. 이처럼 Fe-Mn-C 합금계에서 오스테나이트 상을 안정화시키기 위해서는 Mn과 C의 양을 증가시키는 것이 필요하다.

LNG Tank에 사용되는 우수한 성능의 강재들은 많은 연구가 수행되었다. 하지만 3t 및 19t 고망간강에 대해서는 아직 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다. 고망간강의 대형선박 적용시 설계, 인증, 수주, 건조 및 대규모 인프라 확보에 장시간이 소요되지만, 소형 선박 어선의 경우 국내법령 및 선박안전관리공단 규정을 따르므로 신속한 고망간강의 적용이 가능한 이점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 고망간강 LNG 연료탱크를 탑재한 어선의 실선적용을 고려하여, 최근 각광받고 있는 LNG Tank 적용 강재인 3t 18% 고망간강에 대해서 최초로 FCA 용접을 실시하여 갭, 개선각에 따른 용접부의 기계적 특성 및 미세조직을 고찰하여 용접조건을 도출하고자 하였다. 아울러서 19t 18% 고망간강에 대해서도 FCA 용접을 실시하여 용접조건을 도출하고자 하였다.

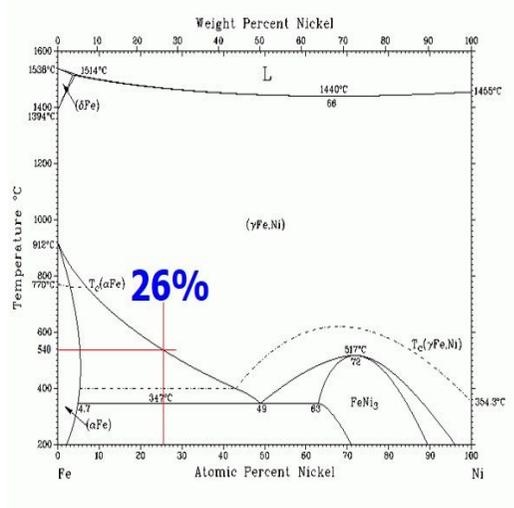
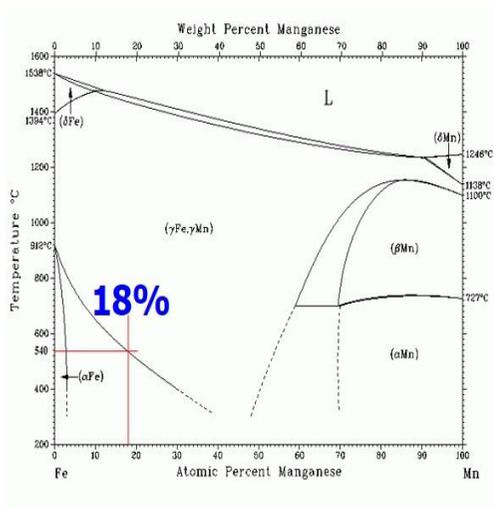


Fig. 1.1 Fe-Ni and Mn Phase diagram

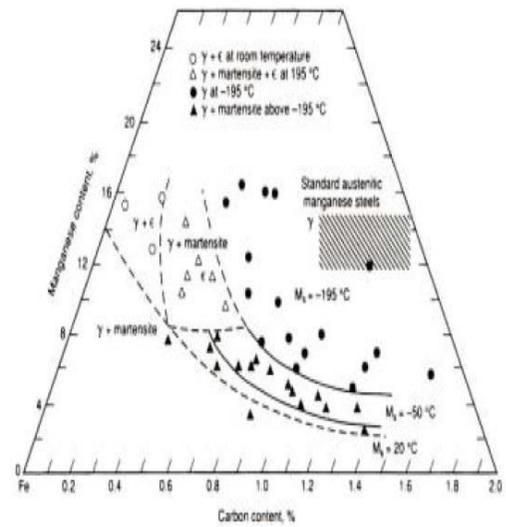
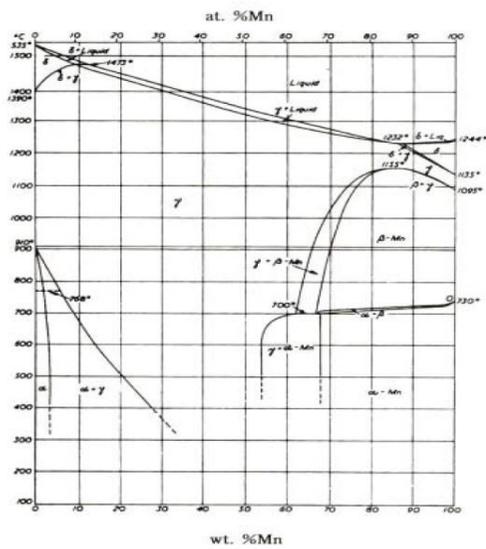


Fig. 1.2 Fe-Mn and Fe-Mn-C system Phase diagram

### 1.3 연구방법

1장에서는 연구 배경, 국내외 동향 및 목적 그리고 본 논문의 구성 대해서 나타내었다.

2장에서는 고망간강 FCAW 용접공정 개발에 대하여 연구하였다. 용접변수가 용접부 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 3t 18% 고망간강 및 스테인레스강에 대해서 1G 자세, 19t 고망간강에 대해서 2G 자세로 맞대기 용접을 수행하였다. 용접 변수로는 3t 시험편에 대하여 개선각과 갭의 변화를 두었다. 개선각과 갭의 변화에 따른 비드의 형상 및 횡단면을 고찰하였으며, 연구에 수행된 개선각 및 갭의 크기, 백킹재, 전류, 전압, 보호가스 등의 최적조건은 문헌조사 및 KR Rules, ISO 규정에 의거하였다. 19t 고망간강은 와이어 및 보호가스 종류에 따른 용접성을 평가하였다.

3장에서는 용접부의 기계적 및 금속학적 특성을 평가하였다. 3t, 19t 고망간강 및 3t 스테인레스강에 대하여 실험을 수행하였다. 용접부의 결함 평가를 위해 ISO 5817 규정에 의거하여 조건별로 등급을 나타내었다. 내부의 결함을 확인하기 위한 비파괴 검사를 수행하였으며, 고망간강의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장, 피로, 굽힘 및 경도를 측정하였다. 또한 광학현미경 및 주사전자현미경을 이용하여 고망간강의 미세조직 특성을 평가하였다.

4장에서는 고망간강 FCAW 용접공정 개발, 용접부의 기계적 및 금속학적 특성을 고찰하여 요약 및 결론을 도출하였다.

Fig. 1.3 에 4개의 장으로 구성된 본 논문구성의 flowchart를 나타내었다.

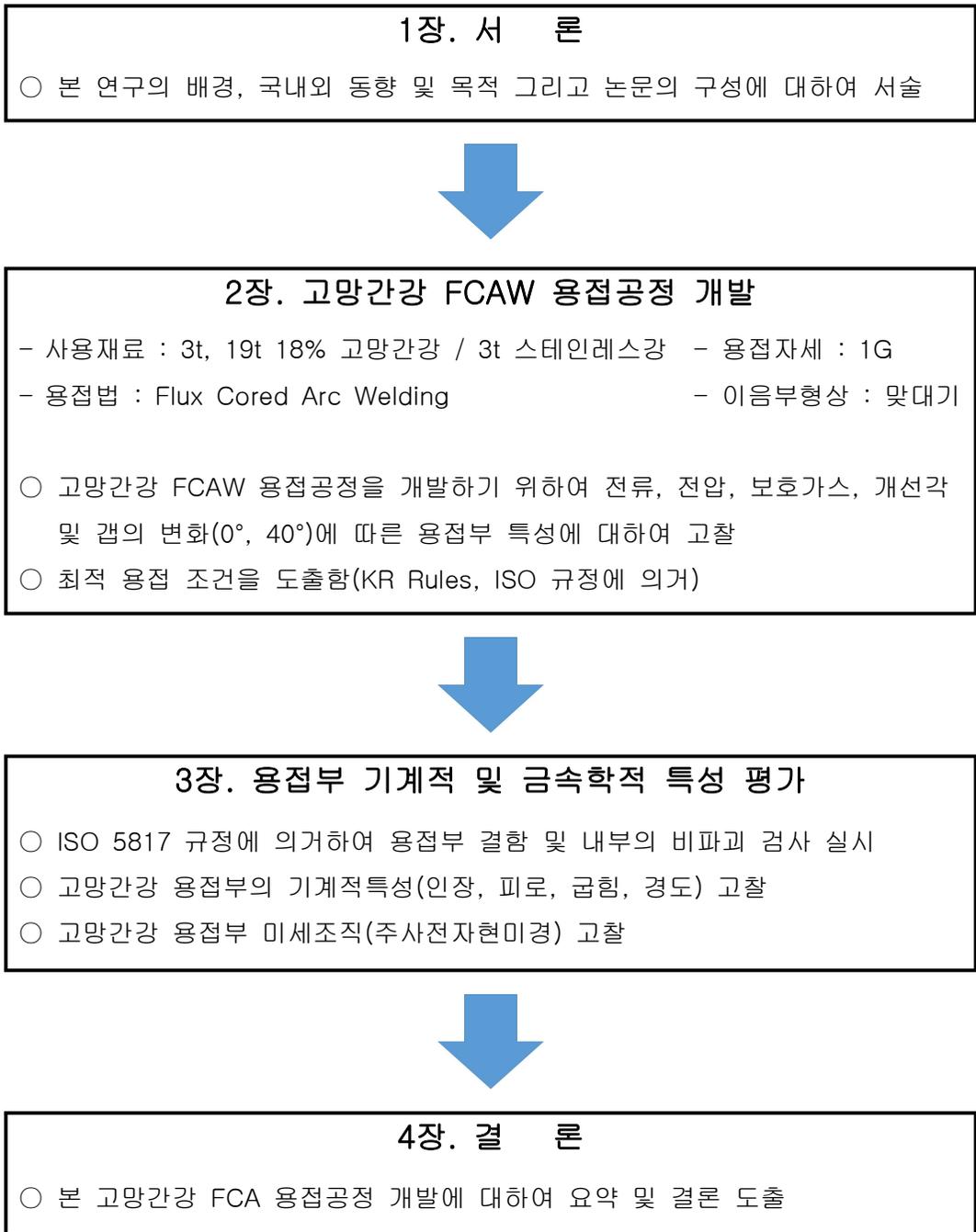


Fig. 1.3 Flow chart of thesis

## 제 2 장 고망간강 FCAW 용접공정 개발

### 2.1 실험 세부사항

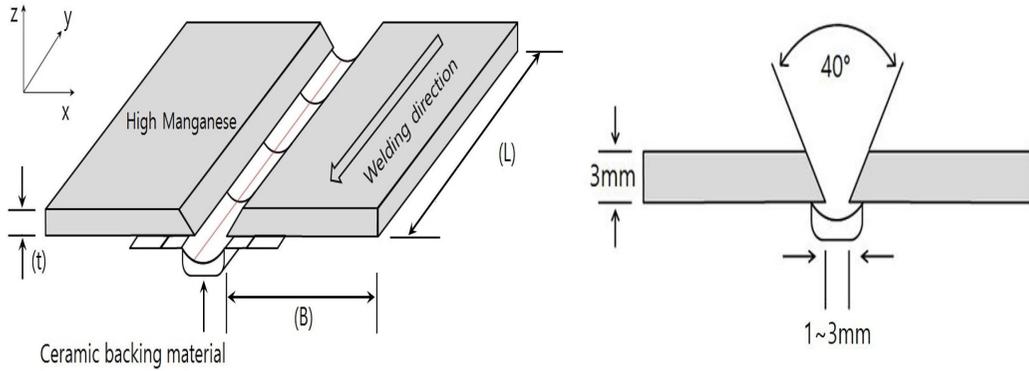
#### 2.1.1 실험 재료 및 장비

본 연구에서 사용한 재료는 3t 및 19t 극저온용 오스테나이트계 고망간강을 사용하였다. FCAW 용접공정을 개발하기 위하여 1.2 $\phi$  슬래그계 플럭스 코어드 와이어를 사용하였다.

개선각은 각 20°씩 총 40°를 두었으며, 3t 시험편의 치수는 240(L) x 100(B) x 3(t)mm이고, 19t 시험편의 치수는 200(L)x 100(B) x 19(t)mm이다. 맞대기 용접을 실시하였으며, 와이어 및 보호가스 종류에 의하여 실험을 수행하였다. Table. 2.1에 시험편의 물성치를 나타내었고, Fig. 2.1과 Fig. 2.2에 모식도를 나타내었다.

Table. 2.1 Material properties of 18% High Mn steel and STS304L

Material	Y.S (MPa)	U.T.S (MPa)	EL.(%)
18% High Manganese	470	901	54
STS 304L	277	656	51



(a) Configuration of FCAW specimen

(b) Gap and groove angle

Fig. 2.1 Schematic diagram of 18% High Mn steel and STS304L (3mm)

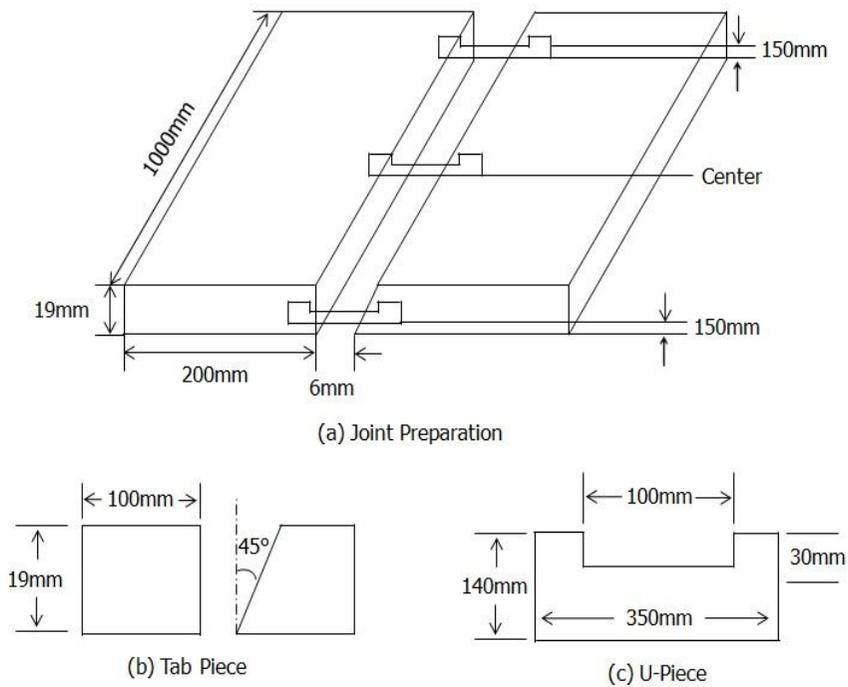


Fig. 2.2 Schematic diagram of 18% High Mn steel (3mm)

본 연구의 고망간강 FCA 용접을 수행하기 위해 HYOSUNG사의 CO<sub>2</sub> 용접기와 SAMSHIN사의 오토캐리지를 이용하였다. 오토캐리지의 속도는 44.5cm/min까지 가능하며 후진법으로 수행하였다.

이면비드를 내기위해 세라믹 백킹제를 이용하였다. 와이어는 1.2 $\phi$  슬래그계 플럭스 코어드 와이어를 사용하였다. 보호가스는 8:2 비율의 Ar과 CO<sub>2</sub> 혼합가스를 이용하였다. 전류와 전압은 정확성을 위하여 Digital clamp meter기와 Data logger를 이용하여 측정하였으며, 각도기를 이용하여 토치각도를 설정하였다.

주안점으로는 맞대기 용접부의 개선 형상 및 갭의 변화에 따른 용접성을 평가하였다. 실험장비는 Fig. 2.3에 나타내었다.

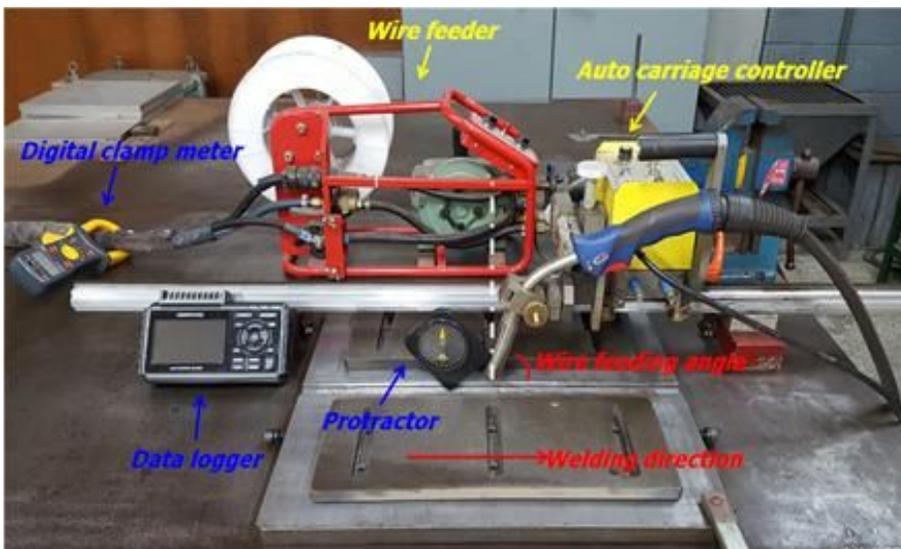


Fig. 2.3 Welding system of FCAW

## 2.1.2 실험 방법

- 1) 고망간강의 FCA 용접을 수행하기 위해서, 첫 번째로 가접을 실시하였다. 고망간강은 열에 의한 변형이 심하였기 때문에 가접은 총 4군데 실시하였으며, 백킹제는 세라믹 백킹제를 사용하였다. 토치의 각도는 75°로 고정을 하였고 1G 자세로 용접을 하였다. 19t 고망간강에 대해서는 2G 자세로 수행하였다.
- 2) 두 번째로, 이송속도, 전압, 전류, 개선각 및 갭의 변화에 따른 실험을 실시하였다. 조건을 설정하기 위한 변수로 전압은 23~25V, 전류는 150~220A로 정하였다. 정확도를 위하여 Digital clamp meter기와 Data logger를 이용하여 전압과 전류를 측정하였다. 속도는 32~36cm/min, 갭은 1~3mm, 개선각은 0°와 40°, CTWD는 15~20mm로 정하였다. 후진법으로 수행하였고 보호가스는 8:2 비율의 Ar과 CO<sub>2</sub> 혼합가스를 사용하였다. 와이어는 플렉스 코어드 1.2∅를 사용하였다.  
 19t 고망간강에 대해서는 전압은 28V, 전류는 190A, 속도는 33~40cm/min, 일면 45°로 가공하여 3mm의 갭을 두고 수행하였다.
- 3) 세 번째로, 얻어진 FCA 용접부의 비드 특성을 정의하기 위하여, Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys-Quality levels for imperfections(ISO 5817)에 의거하여 비드의 특성을 6가지로 구분하였고, 수준은 3단계(양호, 불량, 매우 불량)로 용접부 품질을 평가하였다.
- 4) 네 번째로, FCA 용접을 마친 후에, 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장, 피로, 굽힘강도를 측정하였다. 인장 시험의 cross-head 속도는 KS규정 (KS B 0801)에 의거하여 0.25mm/sec로 설정하였다. 피로수명은 시편의 용접부가 완전히 파단 및 분리 될 때 1x10<sup>7</sup> 사이클 이상에서의 수명을 무한 수명으로 고려하였다. 굽힘시험은 앞면(face) 및 뒷면(root) 굽힘시험을 수행하였다. 비커스 경도 시험기를 통해 경도를 측정하였다.

19t 고망간강에 대해서는 수평 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위하여 용접절차 인정시험의 시험재(한국선급 2015 선급 및 강선규칙 제 2편 재료 및 용접)를 제작하여 기계적 특성을 평가하였다. Fig. 2.4에 시험편 치수 및 형상을 나타내었다.

- 다섯 번째로, FCA 용접을 마친 후에, 결함을 확인하기 위해 용접부의 외관 검사를 실시하였고, 내부 결함의 유무를 알기 위해 비파괴시험을 하였다. 그리고 금속학적 시험을 위해 용접부 미세연마 및 에칭을 실시하여 미세조직을 고찰하였다.

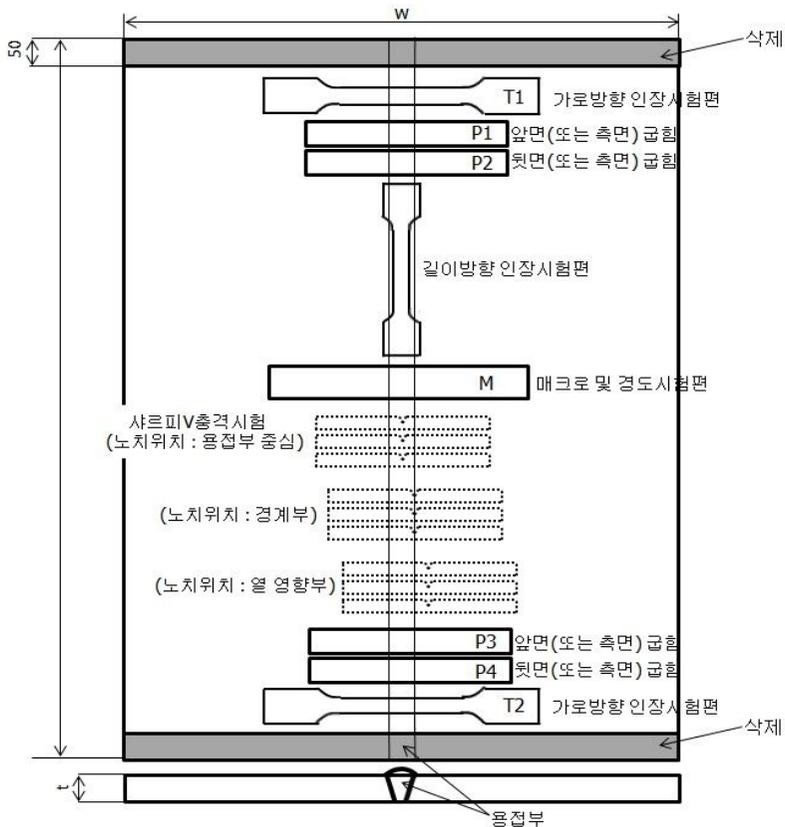


Fig. 2.4 Configuration and dimension of test specimen (19mm)

### 2.1.3 용접 조건

백킹재는 용융 금속을 보호하며 받쳐주고 용락을 방지해준다. 그리고 적절한 Groove의 넓이와 높이를 형성시켜주는 역할을 한다. 특히 세라믹은 고온에서의 내열성이 우수하며 급열, 급냉에 대한 열충격 저항성 역시 뛰어나므로 용접시 발생하는 고열에 대해서 매우 안정한 상태를 유지한다.

전류, 전압 및 속도의 조건은 여러 가지 조건으로 실험을 수행하여 비드의 외관 및 용입성을 평가하여 선정하였다. 입열량이 증가할수록 높은 여성고를 나타내었고 너무 낮으면 언더컷 등 문제가 발생하였다. 최적조건에서의 입열량은 7.94kJ/cm를 나타내었다. Table. 2.2에 전류에 따른 입열량을 나타내었다.

갭 변화의 선정 조건은 Table. 2.3에 나타낸 KR rules and regulations에 의거하였다. 시편의 두께가 6t 이하에서 갭의 크기는 3mm까지 허용되기 때문에 갭의 변화는 1~3mm로 선정하였다.

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.[7] 또한 충격치는 개선각이 클수록 입열량의 차이로 인해 저하할 수 있음을 알 수 있었다.[8] 따라서 개선각은 40°로 선정을 하였다.

후진법은 전진법에 비해 아크가 안정적이며 스파터의 발생이 적을뿐만 아니라 깊은 용입을 얻을 수 있다. 용접 중 발생한 스파터가 용접이 안된 백킹재 위에 부

착되어 용접시 완전한 재용해가 되지 않는 경우 백킹재에 갇혀 이면비드 스패터로 나타나게 된다. 따라서 이면비드의 스패터 발생을 방지하기 위해서 전진법보다 후진법을 적용하여 백킹재 위에 붙는 스패터 발생량을 줄이고자 하였다.

CO<sub>2</sub> 100%의 보호가스를 사용하는 용접은 보호가스의 특성으로 인해 반발이행과 단락이행의 금속이행모드를 가지며, 이때 나타나는 불안정한 아크로 인해 스패터량이 많고, 용착 및 용락 등의 문제가 발생한다. 문헌에 따르면, Ar 2%에서 가장 많은 기공이 발생하였으며, Ar의 비율이 증가함에 따라 기공 발생 정도는 저하하여 Ar+20%CO<sub>2</sub> 에서는 기공이 전혀 발생하지 않았음을 알 수 있다.[9] 따라서 보호가스는 Ar : CO<sub>2</sub> = 8 : 2로 선정을 하였다.

Table 2.4와 Table 2.5에 3t 및 19t 고망간강의 용접조건을 나타내었다. Table 2.6은 19t 고망간강의 용접 변수인 와이어 및 보호가스 종류를 나타내었다.

**Table. 2.2 Heat input for welding parameters**

Current(A)	Voltage(V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
160	25	34	7.05kJ/cm
170	25	34	7.50kJ/cm
180	25	34	7.94kJ/cm
190	25	34	8.38kJ/cm
200	25	34	8.82kJ/cm
210	25	34	9.26kJ/cm
220	25	34	9.70kJ/cm

Table. 2.3 KR rules and regulations

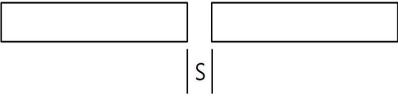
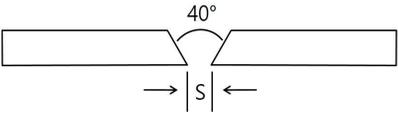
Thickness (mm)	Shape of joint	Dimension (mm)
$t \leq 6.0$		$S \leq 3$
$t = 3$		$S = 1 \sim 3$

Table. 2.4 Welding parameters of FCAW (3mm)

Welding parameter		Values
FCAW	Position	1G
	No. of Weld Runs	1
	Voltage(V)	23~25
	Current(A)	150~220
	Shielding Gas( $\ell$ /min)	Ar : CO <sub>2</sub> = 8 : 2
	Torch Angle(deg)	75
	Welding Speed(cm/min)	32~36
	Gap size(mm)	1~3
	Groove Angle(deg)	0, 40
	C.T.W.D(mm)	15~20
	Backing material	ceramic material

Table. 2.5 Welding parameters of FCAW (19mm)

Welding parameter		Values
FCAW	Position	2G
	No. of Weld Runs	23
	Voltage(V)	28
	Current(A)	190~200
	Shielding Gas( $\ell$ /min)	Ar : CO <sub>2</sub> = 8 : 2
	Torch Angle(deg)	75
	Welding Speed(cm/min)	33~40
	Gap size(mm)	3
	Bevel Angle(deg)	45
	Backing material	ceramic material

Table. 2.6 Welding parameters of specimen for wire and shielding gas (19mm)

Case	Wire	Shielding Gas( $\ell$ /min)
2G - Case1	1.2 $\emptyset$ slag flux cored wire	100%CO <sub>2</sub> (20 $\ell$ /min)
2G - Case2	1.2 $\emptyset$ metal flux cored wire	100%CO <sub>2</sub> (20 $\ell$ /min)
2G - Case3	1.2 $\emptyset$ slag flux cored wire	Ar+20%CO <sub>2</sub> (20 $\ell$ /min)

## 제 3 장 용접부 기계적 및 금속학적 특성 평가

### 3.1 용접부 성능평가 및 미세조직 특성

#### 3.1.1 비드 특성 평가

3t 고망간강의 개선각과 갭의 크기에 따른 FCA 용접부의 비드 형상과 횡단면을 고찰하고 조건별 비드의 특성을 Table. 3.1에 나타낸 6가지관점으로, 수준은 3단계 (양호, 불량, 매우 불량)로 평가하였다. 가접은 시점부터 1/3지점, 2/3지점, 종점까지 총 4번을 실시하였다. 접합조건은 전압 25V, 전류 170~180A, 보호가스는 Ar:CO<sub>2</sub> = 8:2로 사용하였고 유량은 20ℓ/min, C.T.W.D는 17~18mm, 후진법으로 용접속도는 34.3cm/min이다.

Table. 3.1 ISO 5817 Quality levels for imperfections

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
Excess weld metal	$h \leq 1\text{mm} + 0.25b$ , but max. 10mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.15b$ , but max. 7mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.1b$ , but max. 5mm
Excess penetration	$h \leq 1\text{mm} + 0.6b$ but max. 5mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.3b$ but max. 4mm	$h \leq 1\text{mm} + 0.1b$ but max. 3mm
Incorrect weld toe	$\alpha \geq 90^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$	$\alpha \geq 150^\circ$
Overlap	$h \leq 0.2b$	Not permitted	Not permitted
Linear misalignment	$h \leq 0.25t$ , but max. 5mm	$h \leq 0.15t$ , but max. 4mm	$h \leq 0.1t$ , but max. 3mm

### 3.1.2 비파괴 검사

비파괴 시험은 구조물의 품질관리나 품질보증의 수단에 주로 이용되는 계측기법으로써 재료, 제품, 구조물 등의 종류에 상관없이 대상물을 손상, 분리, 파괴시키지 않고 시험체의 표면이나 내부의 결함유무 또는 그 상태 등을 검사하기 위한 시험이다. 육안으로 확인되지 않는 용접부 내부의 결함을 확인하기 위해 비파괴검사 방법중 하나인 방사선 투과검사를 실시하였다.

3t 고망간강에 대하여 도출된 최적의 조건으로 용접을 실시한 후 방사선투과검사를 실시하였다. 19t 고망간강에 대해서도 양 끝단에 엔드탭을 부착하고 전압 28~29V, 전류 180~190A의 조건으로 용접을 실시한 후 방사선투과검사를 실시하였다.

### 3.1.3 인장 강도

개선각과 갭의 변화에 따른 용접부의 인장강도를 평가하기 위해 Fig. 3.1에 나타난 INSTRON사 UTM-100톤 시험기를 사용하였다.

인장 시험편은 ASTM E8M-04 규격에 의거하여 Transverse 방향, 와이어 커팅 방식으로 채취하였다. 시험 속도는 cross-head 속도로 KS규정(KS B 0801 13-B)에 의거하여 0.25mm/sec로 설정하였다. Fig. 3.2는 19t 고망간강의 수평용접을 위한 시험편 형상을 나타내었으며, Table. 3.2에 시험편의 규격을 나타내었다.



- INSTRON IMT 8803
- Load capacity :  $\pm 500\text{kN}$
- Frequency range : 0.001 ~ 50Hz
- INSTRON 2620-601
- Gauge length : 12.5 / 25 / 50mm
- Full scale range :  $\pm 5\text{mm}$
- Frequency range : 0 ~ 50Hz

Fig. 3.1 Tensile test equipment

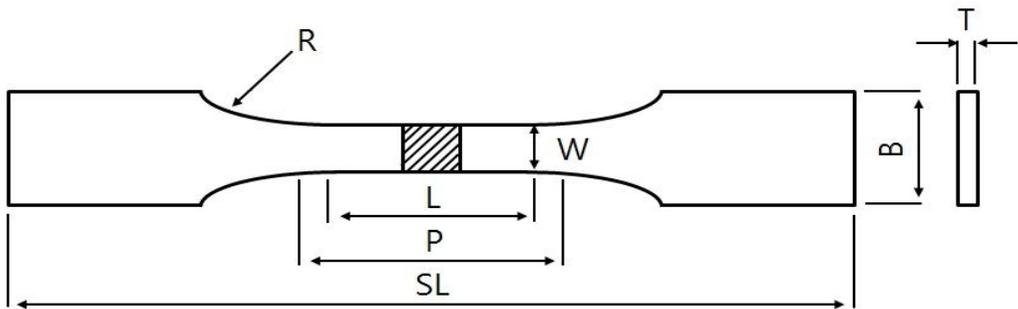


Fig. 3.2 Dimension of tensile test specimen (3mm and 19mm)

Table. 3.2 Configuration of tensile test specimen

Item	W	L	P	R	T	B	SL
3t	12.5mm	50mm	57mm	12.5mm	3mm	20mm	200mm
19t	25mm	80mm	95mm	26mm	19mm	35mm	350mm
Values	○ W : Width		○ L : Gauge length		○ P : Length of reduced section		○ R : Radius of fillet
	○ T : Thickness		○ B : Width of grip section		○ SL : Over-all length		

### 3.1.4 피로 강도

3t 고망간강 및 스테인레스강 동종 용접부의 피로강도를 평가하기 위해 Fig. 3.3에 나타낸 500KN 용량의 INSTRON사 IMT 8803 유압식 인장시험 장치를 사용하였고 응력비  $R=0.1$ 로 하중제어 하였다. 응력 범위는 200~500MPa, 하중 반복 속도는 55Hz 그리고 피로한도는  $1 \times 10^7$  cycle로 정의하였다.

피로 시험편은 ASTM E466 규격에 의거하여 Transverse 방향, 와이어 커팅 방식으로 채취하였다. Fig. 3.4와 Table. 3.3에 시험편의 규격 및 치수를 나타내었다. Table. 3.4는 실험조건을 나타내었다.

IW 규정에 의거하여 표면 및 이면비드를 제거한 V-groove 용접부에 대한 피로 강도 설계기준선은 FAT 112를 적용하였다.

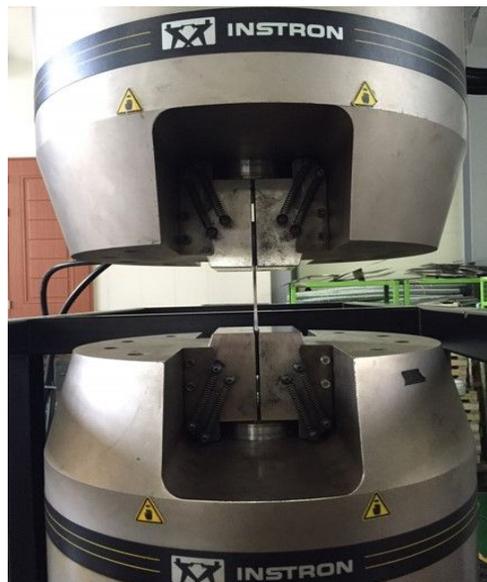


Fig. 3.3 Fatigue test equipment

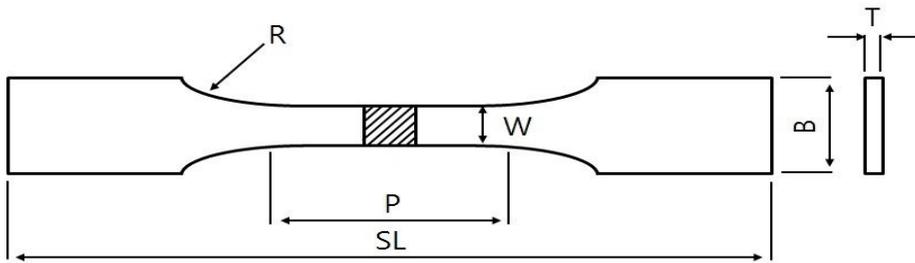


Fig. 3.4 Dimension of fatigue test specimen (3mm)

Table. 3.3 Configuration of fatigue test specimen

Item	W	P	R	T	B	SL
	8mm	16mm	64mm	3mm	20mm	160.11mm
Values	○ W : Width		○ T : Thickness			
	○ P : Length of reduced section		○ R : Radius of fillet			
	○ SL : Over-all length		○ B : Width of grip section			

Table. 3.4 Fatigue test condition for dissimilar materials

Materials	Control mode	Temperature	Load pattern	Stress ratio	Frequency (Hz)
High Mn steel + High Mn steel	Load control	Ambient	Sinusoidal wave	0.1	55
STS304L + STS304L					

### 3.1.5 굽힘 강도

3t와 19t 고망간강 및 3t STS304L 용접부의 연성 및 크랙 발생정도를 확인하기 위해 롤러 3점 굽힘시험을 수행하였다. 500KN 용량의 INSTRON사 IMT 8803 유압식 인장시험 장치를 사용하였다.

굽힘 시험편은 KR rules 제 2편 재료 및 용접에 제시된 용접절차 인정시험용 RB 1호에 의거하여 Transverse 방향, 와이어 커팅 방식으로 채취하였다. 앞면(face) 및 뒷면(root) 굽힘시험을 2회씩 실시하였다. Fig. 3.5는 시험편의 규격을 나타내었다.

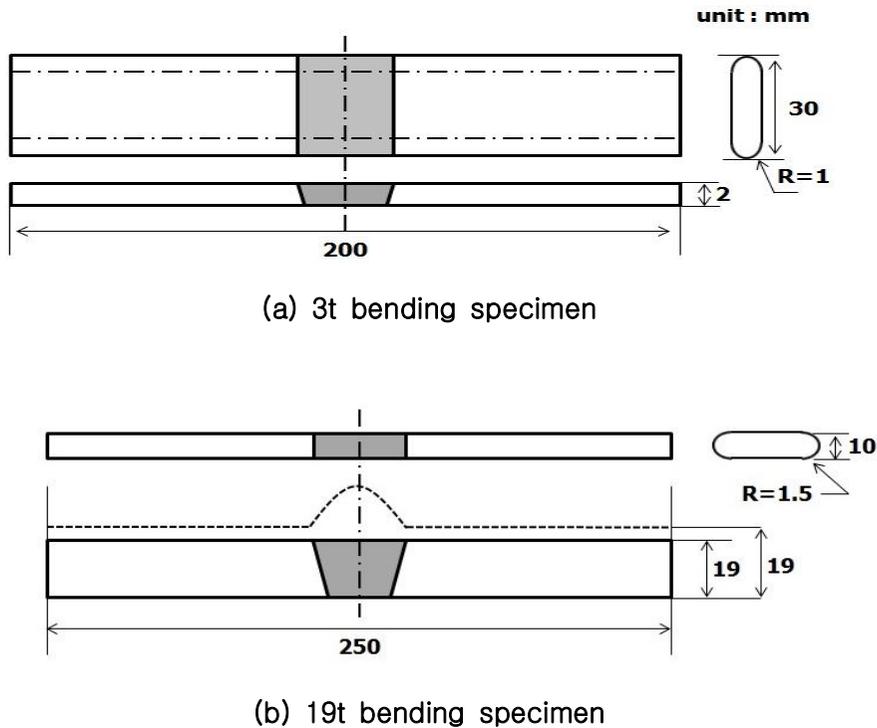


Fig. 3.5 Dimension of bending test specimen (3mm and 19mm)

### 3.1.6 경 도

3t 고망간강 및 스테인레스 동종 용접부에 대하여, 경도 측정은 Fig. 3.6에 나타낸 Akashi사의 HM-112 비커스 경도 시험기를 사용하였다. 현미경 배율은  $50\mu\text{m}$ 이며,  $136^\circ$  다이아몬드 피라미드 입자를 사용하였다. 경도 측정을 위하여 용접부 횡단면을 절단하여 미세연마 하였다. Nital 4% 부식액으로 40~50sec 에칭을 실시한 후에, 증류수100ml+메타중아황산나트륨10g 부식액으로 3~5sec 에칭을 실시하였다.

경도 측정 조건은 Table 3.5에 나타내었다. 용접부 상부표면으로부터 0.2mm지점, 1.6mm지점, 2.8mm지점에서 횡방향으로 1.3mm 간격으로 하중 0.2kgf, 하중 유지시간 10sec로 경도를 측정하였다.

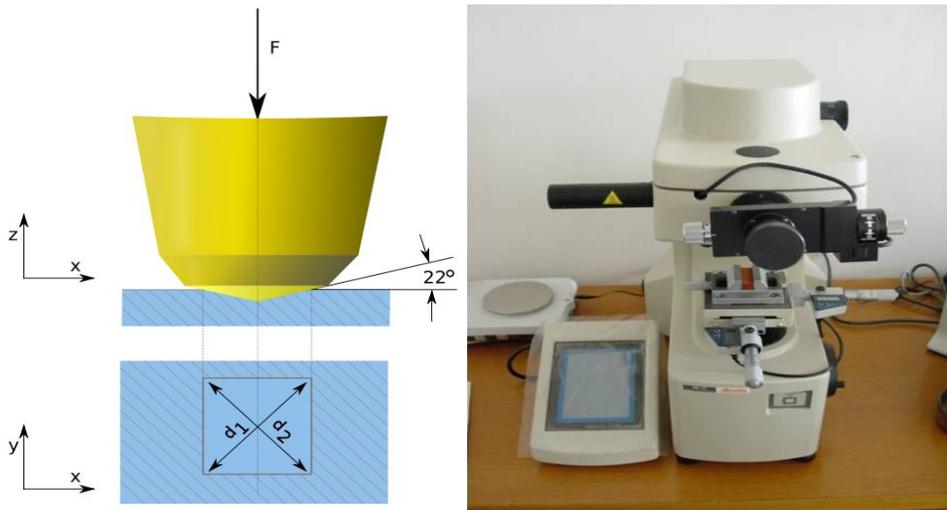


Fig. 3.6 Vickers hardness test scheme and equipment

Table. 3.5 Hardness testing condition

Parameters	Values
Type	Micro vickers hardness tester
Load	0.2kgf
Loading time	10sec
Test position	Below 0.2, 1.6, 2.8mm from surface

### 3.1.7 미세조직

미세조직 특성 고찰은 용접부 횡단면의 미세연마 및 에칭 후에 이루어졌다. FCAW 고망간강 용접부는 용접방향의 수직으로 절단하였다. 사포 #400, #800, #1200, #1500, #2000, #4000 순으로 연마한 후에, Diamond paste 9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m를 이용하여 미세연마 하였다.

Nital 4% 부식액으로 40~50sec 에칭을 실시한 후, 증류수100ml + 메타중아황산 나트륨10g 부식액으로 3~5sec 에칭을 실시하였다. 주사전자현미경을 이용하여 미세 조직을 고찰하였다.

## 3.2 결과 및 고찰

### 3.2.1 비드 특성

3t 고망간강의 최적조건을 선정된 후 맞대기 용접을 실시하여, 용접부의 비드형상과 횡단면부 용입 특성을 고찰하였다. Table. 3.8에서 보듯이 개선각 0°, 갭이 1mm일 때 탑비드는 안정적인 형상을 나타냈지만 바텀비드는 횡단면도 마크로 사진에서와 같이 완전용입이 이루어지지 않았고, 전체적으로 비드의 폭이 좁고 높았다. 갭이 1mm, 2mm일 때 Excess weld metal [D] 등급과 Incorrect weld toe [C] 등급을 나타내 [B] 등급에 미치지 못함을 확인할 수 있었다.

Table. 3.9에서 보듯이 개선각 40°, 갭 1mm, 2mm일 때 Excess weld metal [D], [C] 등급, Incorrect weld toe는 [C] 등급임을 확인할 수 있었다. 3mm일 때 적절한 용입(Undercut, Excess weld metal, Excess penetration, Incorrect weld toe, Overlap, Linear misalignment) 및 가장 안정된 비드를 나타내며, 용접부에 대한 비드특성을 6가지 관점에서 평가한 결과, 1단계에 해당되는 “양호” 수준의 건전한 용접 부를 확보할 수 있었다.

Table. 3.6 Bead profiles of welds for groove angle(0°) in different gap size

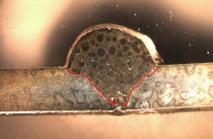
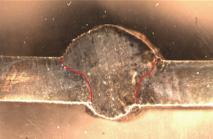
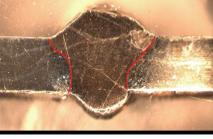
Welding conditions		Bead appearance		Cross section
Groove angle	Gap			
0°	1mm	Top		
		Bottom		
0°	2mm	Top		
		Bottom		
0°	3mm	Top		
		Bottom		

Table. 3.7 Bead profiles of welds for groove angle(40°) in different gap size

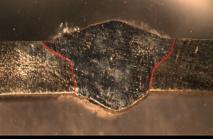
Welding conditions		Bead appearance		Cross section
Groove angle	Gap			
40°	1mm	Top		
		Bottom		
40°	2mm	Top		
		Bottom		
40°	3mm	Top		
		Bottom		

Table. 3.8 ISO 5817 Quality levels for imperfections (Groove 0°)

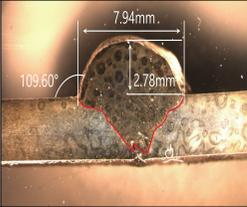
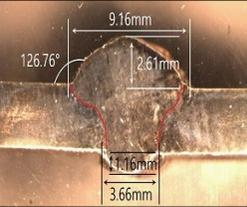
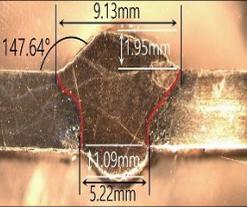
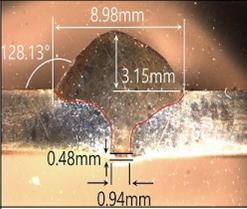
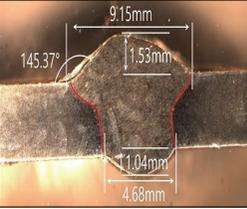
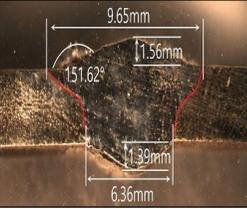
Groove 0°		Case 1	Case 2	Case 3
Welding condition		Groove 0° Gap 1mm	Groove 0° Gap 2mm	Groove 0° Gap 3mm
Cross section				
Continuous undercut	h(mm)	None	None	None
	Level	[B]	[B]	[B]
Excess weld metal	h(mm) b(mm)	h=2.770 b=7.936	h=2.614 b=9.162	h=1.953 b=9.131
	Level	[D]	[D]	[C]
Excessive penetration	h(mm) b(mm)	None	h=1.161 b=3.664	h=1.086 b=5.217
	Level	[B]	[B]	[B]
Incorrect weld toe	degree	109.605°	126.758°	147.642°
	Level	[D]	[C]	[C]
Overlap	h(mm) b(mm)	None	None	h=0.112 b=0.139
	Level	[B]	[B]	[Not permitted]
Linear misalignment	h(mm)	h=0.152	h=0.120	h=0.125
	Level	[B]	[B]	[B]

Table. 3.9 ISO 5817 Quality levels for imperfections(Groove 40°)

Groove 40°		Case 4	Case 5	Case 6
Welding condition		Groove 40° Gap 1mm	Groove 40° Gap 2mm	Groove 40° Gap 3mm
Cross section				
Continuous undercut	h(mm)	None	None	None
	Level	[B]	[B]	[B]
Excess weld metal	h(mm) b(mm)	h=3.152 b=8.981	h=1.536 b=9.152	h=1.562 b=9.654
	Level	[D]	[B]	[B]
Excessive penetration	h(mm) b(mm)	h=0.482 b=0.943	h=1.038 b=4.683	h=1.385 b=6.361
	Level	[B]	[B]	[B]
Incorrect weld toe	degree	128.130°	145.368°	151.624°
	Level	[C]	[C]	[B]
Overlap	h(mm) b(mm)	None	None	None
	Level	[B]	[B]	[B]
Linear misalignment	h(mm)	h=0.201	h=0.105	h=0.085
	Level	[B]	[B]	[B]

### 3.2.2 내부결함 특성

Table. 3.10은 도출된 최적조건에서 3t 고망간강 맞대기 용접을 수행한 결과이다. 방사선 투과시험을 한 결과 표면상의 결함이 발견되었지만 기공이나 슬래그 혼입 등 내부결함은 발생하지 않았다.

19t 고망간강에 대한 용접은 양 끝단에 엔드탭을 부착하였으며 23pass 비드 형상을 나타내었다. Table. 3.11과 Table. 3.12에 100% CO<sub>2</sub>를 보호가스로 사용하였을 때 플렉스코어드와이어 종류에 따른 용접부에 주로 발생하는 결함은 기공 (porosity, P)과 슬래그혼입(slag inclusion, S)임을 나타내었다. 특히 기공의 경우, 메탈계 와이어보다 슬래그계 와이어를 사용하였을 때 용접부내 존재하는 기공의 수가 더 밀집되고 많음을 알 수 있었다.

Table 3.13은 보호가스로 Ar+20%CO<sub>2</sub>를 사용하여 용접한 시험편으로, 개선된 슬래그계 와이어로 용접을 수행한 결과이다. 각 pass 용접시 그라인딩을 실시하여 슬래그를 완전히 제거하였다. 기존 슬래그계 와이어 대비 아크 안정성 및 작업성이 개선되었으며, RT검사에서 슬래그 혼입은 발견되지 않았으나 간헐적인 기공이 발생함을 알 수 있었다.

Table. 3.10 Radiographic test for specimen (3mm)

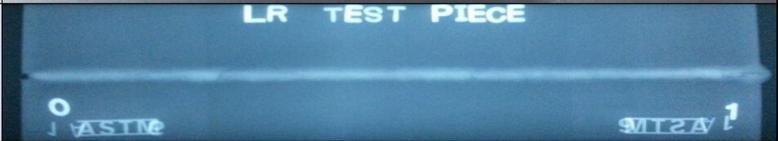
Bead appearance	
RT	

Table. 3.11 Radiographic test for specimen (19mm, 2G-Case1)

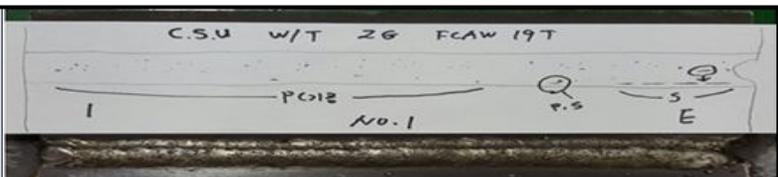
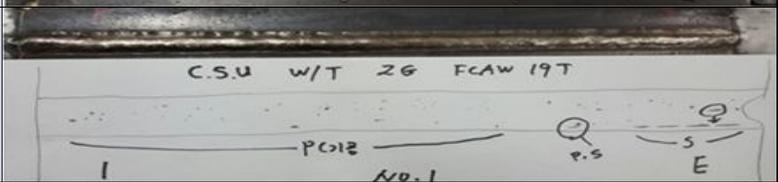
Top bead	
Back bead	

Table. 3.12 Radiographic test for specimen (19mm, 2G-Case2)

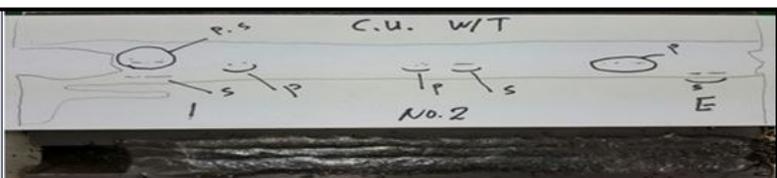
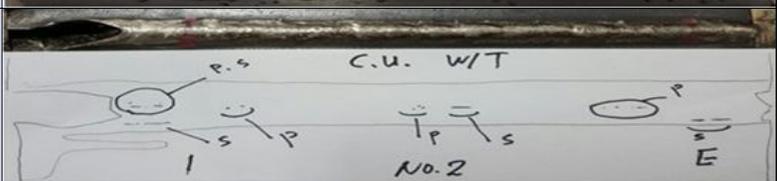
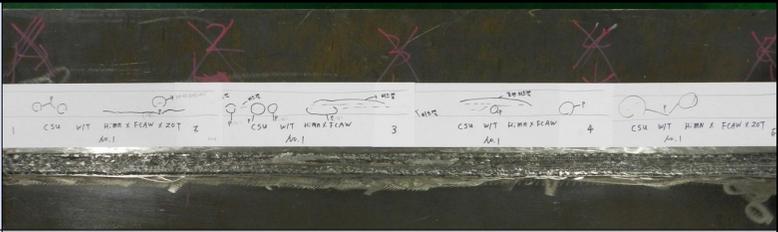
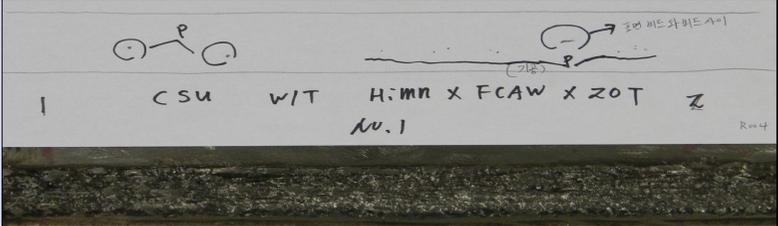
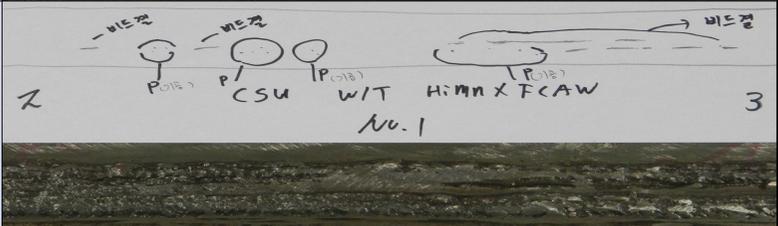
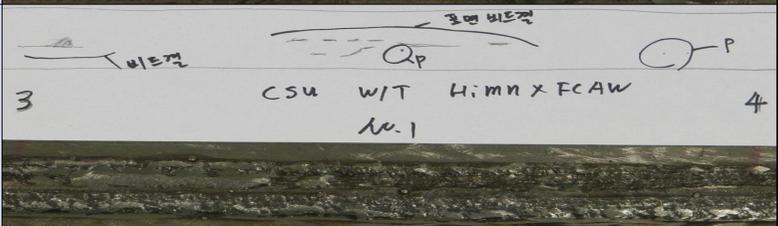
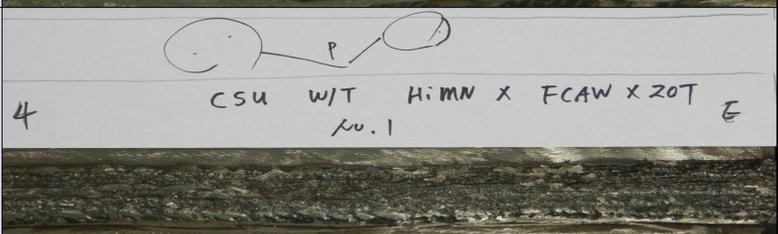
Top bead	
Back bead	

Table. 3.13 Radiographic test for specimen (19mm, 2G-Case3)

Bead appearance	
1~2	
2~3	
3~4	
4~E	

### 3.2.3 인장 강도 특성

용접부의 건전성을 확인하기 위하여 ASTM E8M-04 인장시험 규격에 의거하여 인장강도 특성을 나타내었다. Fig. 3.7과 Fig. 3.8은 도출된 최적 조건으로 실험을 수행한 3t 고망간강 및 스테인레스강 FCA 용접부의 Stress-Strain Curve를 나타내었다.

갭3mm, 개섩각 40°의 조건에서 모재는 총 2회 실험 결과, 인장강도는 평균값 942.134MPa, 항복강도는 423.667MPa를 나타내었다. 3t 고망간강 및 스테인레스강 FCA 용접부는 총 6회 실험 결과, 고망간강 평균 인장강도 617MPa, 항복강도 396MPa, 스테인레스강 평균 인장강도 499MPa, 항복강도 279MPa를 나타내었다. FCA 고망간강 용접부는 모재와 비교하였을 때 63.2%의 인장강도를 나타내었다. 19t 고망간강 FCA 용접부는 총 2회 실험 결과, 평균 인장강도 700MPa과 항복강도 480MPa를 나타내었다.

Fig. 3.9는 모재와 FCA 용접부의 인장 및 항복강도, 연신율을 비교한 그래프를 나타내었다. 6회의 FCA 용접부의 인장 시험 결과, 모두 용접부에서 파단이 발생하였다. 고망간강 및 스테인레스강 모재의 연신율은 47%와 51%를 나타내었고, FCA 용접부의 연신율은 13%와 23%를 나타내었다. 모재와 FCA 용접부의 인장 및 항복강도, 연신율을 연강과 비교하여 보았을 때, 인장강도는 각 2.07배, 1.31배, 항복강도는 각 1.43배, 1.3배 높은 값을 나타내었으며 연신율은 각 1.2배, 0.37배의 값을 나타내었다. 고망간강의 인장 및 항복강도는 연강보다 우수한 값을 나타내었으나, 연신율은 크게 떨어짐을 알 수 있었다. Fig. 3.10에서 Fig. 3.12는 실험 후 파단된 시편을 나타내었다.

하중이 증가함에 따라 곡선이 계속 상승하는 양상을 보이다가, 파단 직전 톱니모양의 강도 감소와 함께 특유의 소리(tin cry)가 발생하였다. 문헌에 따르면, 소성 변형 중에 발생하는 기계적 쌍정이, 소재 결정방위의 변화를 일으켜 더 많은 슬립이 일어나도록 유도하여 국부적인 네킹 없이 변형을 진행하다가, 더 이상 쌍정 및 슬립계가 작동할 수 없는 영역까지 변형되는 경우 쌍정의 적층 및 슬립계 내의 간섭이 일어나는 고망간강의 특징임을 알 수 있었다.[10]

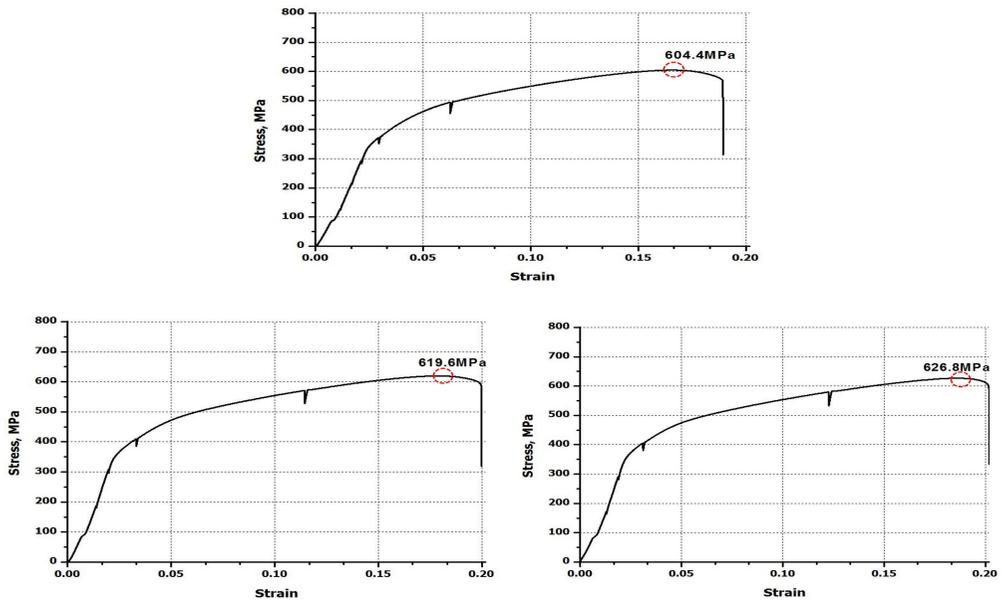


Fig. 3.7 Stress-Strain Curve of High Mn steel FCA Welds (3mm)

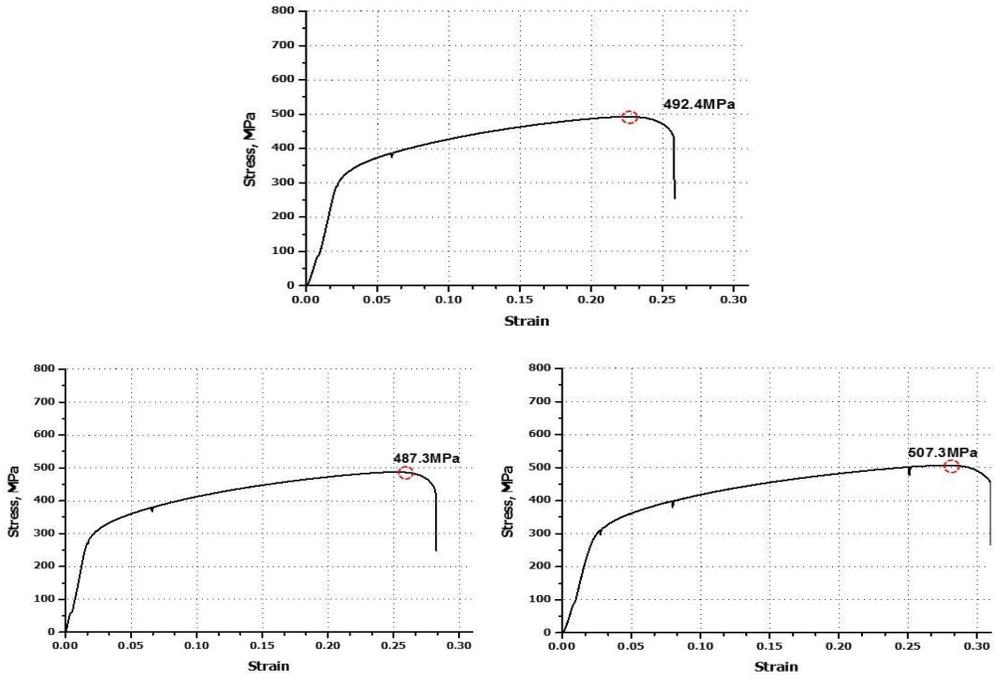


Fig. 3.8 Stress-Strain Curve of STS304L FCA Welds (3mm)

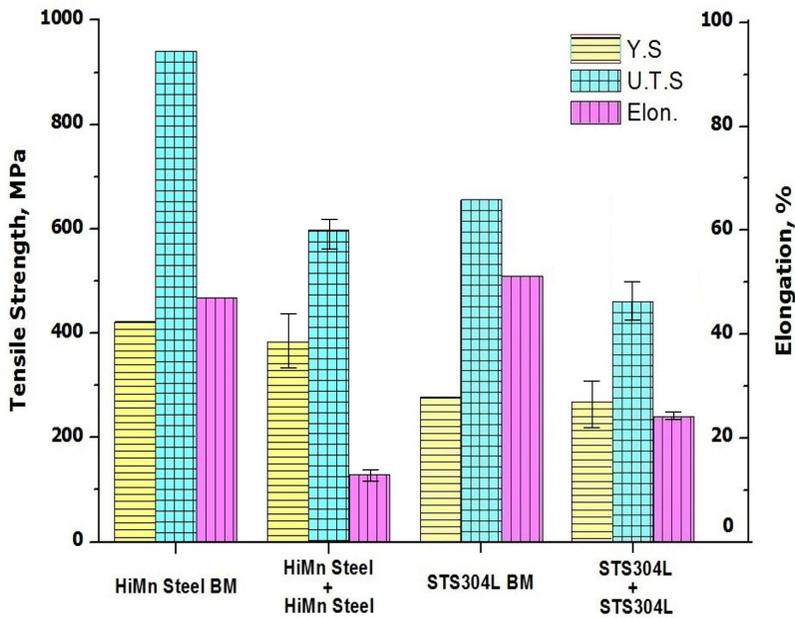


Fig. 3.9 Tensile strength of FCA Welds (3mm)

Table. 3.14 Tensile strength of FCA Welds (19mm)

Direction	Y.S(MPa)	U.T.S(MPa)	Fracture location
Transverse	469	711	Weld metal
	491	689	Weld metal

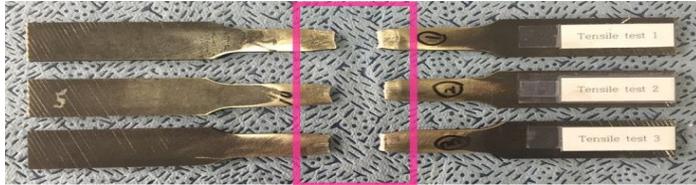


Fig. 3.10 Fractured specimen after High Mn steel tensile test (3mm)

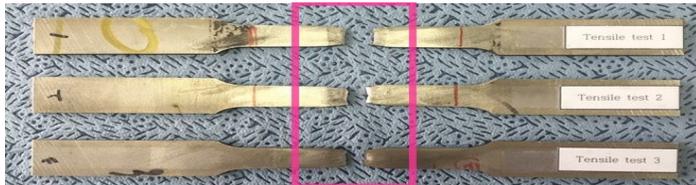


Fig. 3.11 Fractured specimen after STS304L tensile test (3mm)

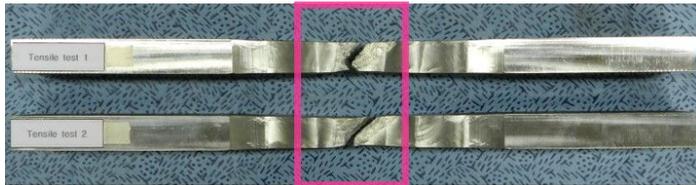


Fig. 3.12 Fractured specimen after High Mn steel tensile test (19mm)

### 3.2.4 경도 분포 특성

Fig. 3.13은 개선각 40°, 갭 3mm 일 때, FCA 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 용접부의 경도분포는 시편의 상부표면으로부터 0.2mm, 1.6mm, 2.8mm 위치에서 용접부 단면의 횡방향으로 1.3mm 간격으로 측정하였다.

용접부의 경도분포를 살펴보면 용접부에서 최저 경도값을 나타내었고 모재 대비 약 116HV 낮은 값을 나타내었다. 열영향부에서는 약 220HV 값을 나타내었고 모재 대비 약 48HV 낮은 값을 나타내었다. 열영향부에서 모재로 갈수록 경도 값이 증가하였다. 경도 분포는 용접부 단면의 횡방향의 변화에 상관없이 Top, Center, Bottom 모두 비슷한 양상을 나타내었다. 연강(약 168HV)보다 우수한 경도값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

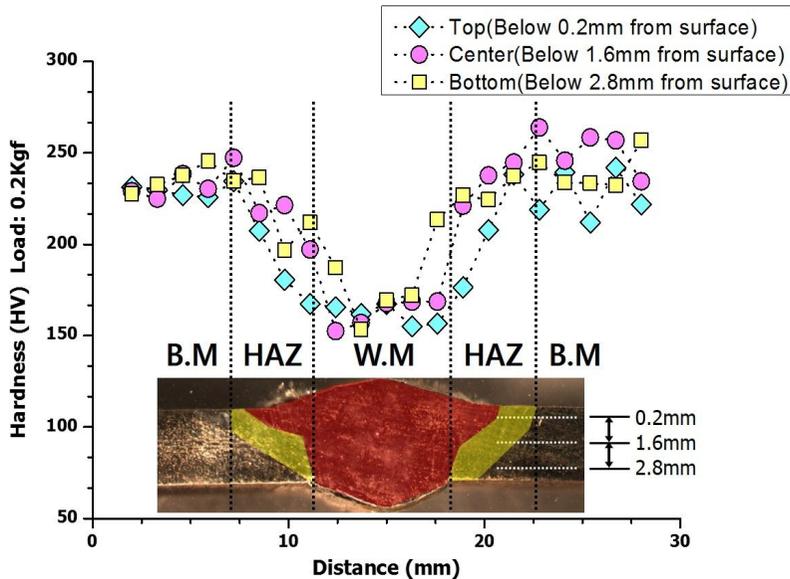


Fig. 3.13 Hardness distributions of FCA welds

### 3.2.5 피로 강도 특성

Table. 3.15는 고망간강과 스테인레스강 동종 용접부의 피로시험 결과를 나타내었다. 총 10회 실험을 수행하였고 Fig. 3.14와 Fig. 3.15는 각각의 S-N Curve를 나타내었다.

Fig. 3.14와 Fig 3.15에 나타난 바와 같이 고망간강+고망간강은  $\Delta\sigma 220\text{MPa}$ 에서  $1 \times 10^7$  Cycle까지 파단이 발생하지 않았으며, STS304L+STS304L은  $\Delta\sigma 260\text{MPa}$ 에서  $1 \times 10^7$  Cycle까지 파단이 발생하지 않았다. 또한 IIW FAT 112의 피로 강도 설계 기준선보다 높은 피로 강도를 나타냄을 알 수 있었다.

Table. 3.15 Fatigue test results (3mm)

High Mn steels + High Mn steels		STS304L + STS304L	
$\Delta\sigma$ [MPa]	Cycles to failure (Nf)	$\Delta\sigma$ [MPa]	Cycles to failure (Nf)
400	168,767	450	11,811
400	220,326	450	10,221
360	433,291	400	65,685
360	498,878	400	110,297
290	1,190,604	360	294,503
290	4,358,532	360	187,097
260	2,247,705	290	841,715
260	2,753,780	290	882,779
220	5,845,624	260	10,000,000
220	10,000,000	260	10,000,000

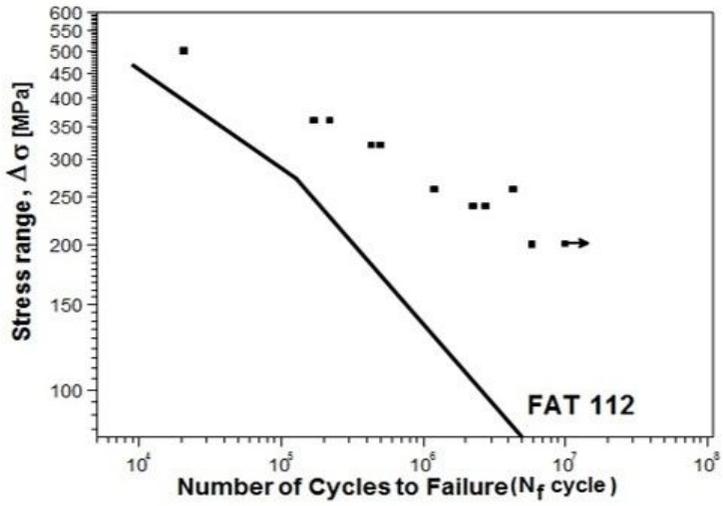


Fig. 3.14 S-N Curve for High Mn steels

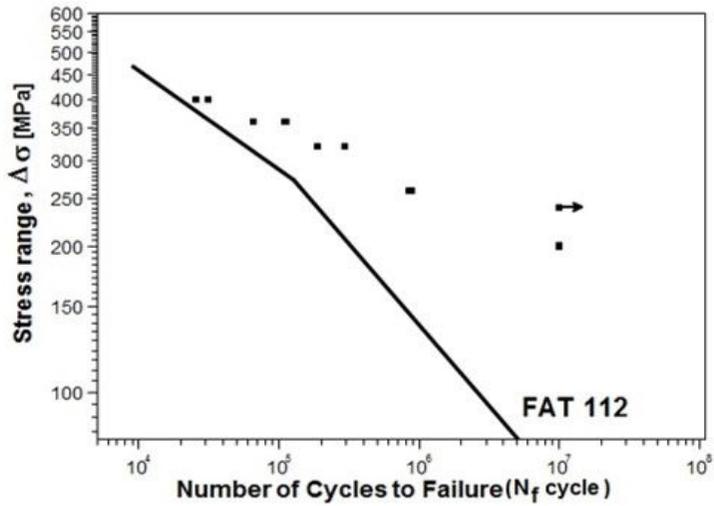


Fig. 3.15 S-N Curve for STS304L

### 3.2.6 굽힘 강도 특성

Fig. 3.16과 Fig. 3.17은 3t 고망간강과 스테인레스강 및 19t 고망간강의 굽힘시험 후의 시험편을 나타내었다. 앞면(face) 및 뒷면(root) 굽힘시험을 각 2회 수행하였다. 용접부 표면굽힘 KS B0832에 의거하여 3mm 이상 굽힘부의 갈라짐이 없어야 하며 3mm 이하라도 총합이 7mm 이하가 되어야 한다. 각 시험편별로 큰 균열 없이 허용범위를 만족하는 건전한 용접부 특성을 나타내었다.



Fig. 3.16 High Mn steel and STS304L specimen after bending test (3mm)



Fig. 3.17 High Mn steel specimen after bending test (19mm)

### 3.2.7 미세조직 특성

Fig. 3.18은 고망간강 FCAW 용접부를 주사전자현미경을 이용하여 각 영역별 용접금속(WM), 열영향부(HAZ) 그리고 모재부(BM)의 미세조직을 관찰한 결과이다. 고망간강의 조직은 전형적인 오스테나이트 조직을 나타내었다.

망간의 함량이 10% 미만이면, 오스테나이트 상의 적층결함에너지가 너무 높아져서 쌍정을 형성하기 어려운 단점이 있고, 20%를 초과하면 적층결함에너지가 너무 커져서 쌍정이 형성되지 않고 오스테나이트 상의 소성변형이 일어나므로 기계적 성질이 나빠지게 된다.

안정한 오스테나이트 단상을 가짐을 확인할 수 있었고, 마르텐사이트 변태는 일어나지 않았다. Fig. 3.19의 모재에서는 등축 결정립과 어닐링 쌍정이 관찰되었고, Fig. 3.20의 용접부에서는 부분적으로 수지상정이 관찰되었다. Fig. 3.21의 열영향부에서는 결정립 조대화가 일어났으며, 열영향부의 범위가 넓음을 확인할 수 있었다.

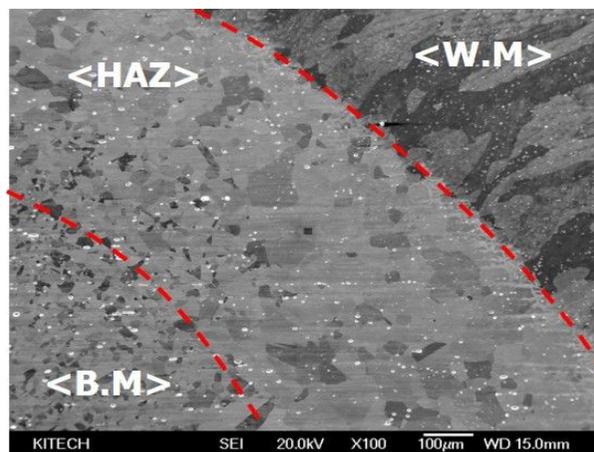


Fig. 3.18 SEM observation in different locations of FCA welds

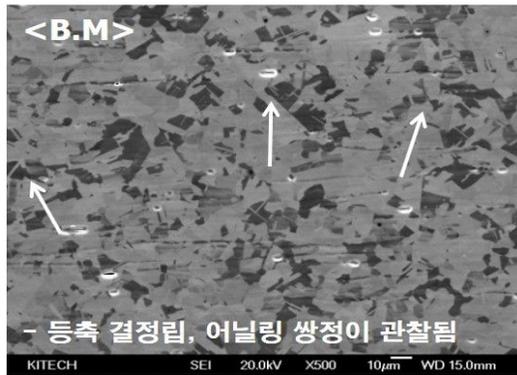


Fig. 3.19 SEM observation in base metal



Fig. 3.20 SEM observation in weld metal

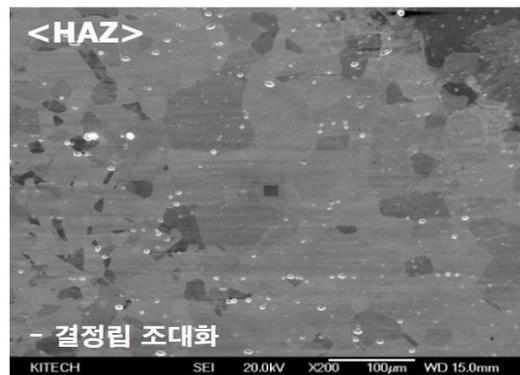


Fig. 3.21 SEM observation in HAZ

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 LNG 연료 탱크에 적용되는 극저온용 고망간강 및 스테인레스강 (3mm)에 대하여 맞대기 용접을 실시하여 용입 깊이 및 넓이, 기계적 특성 평가와 금속학적 특성을 평가하였다. 고망간강 FCAW 용접공정 개발을 위해 개선각과 갭의 변화에 따른 용접성 평가를 실시하였다. 비파괴시험, 결함평가, 인장, 경도, 굽힘, 피로강도, 미세조직을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각 조건별 맞대기 용접을 실시하여 용접부의 Cross section을 고찰해 본 결과 개선각이 없는 갭 1mm의 조건에서는 완전한 용입이 이루어지지 않았다. 개선각이 없는 조건의 용접부가 전체적으로 비드의 폭이 좁고 높음을 확인할 수 있었다. ISO 5817 Quality levels for imperfections의 6가지 관점에서 고찰한 결과 개선각은 40°, 갭의 크기는 3mm에서 1단계에 해당되는 “양호”의 수준으로 평가되는 건전한 용접부를 확보할 수 있었다. 갭 1mm, 2mm의 조건은 용가재의 유동성 부족으로 인한 적절한 용입이 이루어지지 않는 것을 알 수 있었다.
- 2) 방사선 투과검사 결과 기공이나 슬래그 혼입 등 내부결함이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다. 아크길이와 전류, 전압이 불안정했다면 모재와 용가재의 충분한 융합이 이루어지지 않음으로써 용접부 내부에 결함이 발생하게 된다. 내부결함이 발생하지 않았음을 확인함으로써 충분한 융합이 이루어졌다고 판단된다.
- 3) 용접재의 인장강도가 모재강도에 대비하여 낮았기 때문에 용접부 중심부에서 파단이 발생한 것으로 판단된다. 모재와 비교하여 보았을 때 인장강도 값이 현저히 떨어지는 것으로 미루어 보아 기존 실험에 사용되었던 용접재의 성능이 부족했던 것으로 판단된다. 하지만 연강과 용접부를 비교하여 보았을 때, 인장강도는 약 1.31배, 항복강도는 약 1.3배를 나타냄으로써 충분한 강도값을

가짐을 알 수 있었다. 더 높은 강도값을 가지기 위해서는 용접재의 개발이나 재선택으로 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 개선각 40°, 갭 3mm의 조건에서 경도를 측정한 결과 용접부(WM)에서 경도 값이 가장 낮게 나왔으며, 모재(BM)에서 경도 값이 가장 높게 나왔다. 열영향부(HAZ)에서 용접부로 가면서 경도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다.

인장강도와 피로강도는 연강과 같은 기존 강재에 비해 충분한 강도값을 나타내었다. 하지만 모재에 비해 충분한 강도값을 나타내지 않았고 용접부에서의 파단이 발생하였다. 이러한 이유로는 입열량, 냉각속도 등의 일반적인 요인 외에 용접재에 함유된 각종 합금원소가 용접중 충분히 정련작용이 이루어지지 않았기 때문에 용접부 조직이 미세화되지 않은 점, 장시간 가열에 의해 입자 성장이 발생할 수 있고 조직내에 가공 경화에 의해 형성된 적층결함이 해소되는 효과가 발생했기 때문으로 판단된다.

## Reference

- [1] J.H Kim : LNG 연료 추진선과 병커링 기술 동향, Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, 2014.10, Vol 14-10
- [2] Korea Evaluation Institute of Industrial Technology : 에너지산업 전망에 따른 금속소재 개발 전략, 2012
- [3] K.M Lee : Cryogenic Experiments and Structural Analysis of High manganese Steel for the Application of Onshore LNG Storage Tank, 인하대학교, 석사 2014
- [4] J.S Lee : The study on effect of Si on the solidification cracking behavior in austenitic high Mn steel welds, Journal of KWJS, 2013.11, 36-36
- [5] Massalski : Binary Alloy Phase Diagrams, Mary Anne Fleming 2nd, 2(1993) 1725.
- [6] R. A. Lula : High Manganese High Nitrogen Austenitic Steels, ASM International, (1993) 1.
- [7] 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
- [8] H.S Bang : The Optimization of Welding Design on Butt Welded Joint, Journal of KWJS, 1994, Vol.2, pp82-84
- [9] 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
- [10] Y.I Jung : A Study on the Application of High Manganese Austenitic Steel Sheet to Automobile Parts, Journal of KSTP, 2009, pp393-396